

Bulletin

101

Avril 2025

Bulletin APM

Sommaire

Editorial P. 2

Propulsion nucléaire thermique pour le voyage vers Mars P. 3

Systèmes de support de vie : des premières capsules aux enjeux actuels P. 8

Vie de l'association. P. 23





Bulletin n°101, avril 2025.

Images de la page de couverture :

- Planète Mars, image NASA.
- Curiosity Landing with the Crane, image NASA.
- Mars Desert Research Station en Utah, image Alain Souchier, APM.

Association Planète Mars : <https://planete-mars.com/>

Editeur du bulletin : Jean-Marc Salotti

SOMMAIRE

Editorial.....	2
Propulsion nucléaire thermique pour le voyage vers Mars	3
Systèmes de support de vie : des premières capsules aux enjeux actuels.....	8
Vie de l'association	23



Editorial

Par Jean-Marc Salotti,

Le rêve martien est de retour – voici comment le réaliser

Tel est le titre de l'article de Robert Zubrin paru d'abord dans The New Atlantis, puis paru sur notre site web, traduit en Français par les soins d'Etienne Martinache, membre du Conseil d'Administration de l'association.

Zubrin, faut-il le rappeler, est le fondateur de la Mars Society américaine, il a notamment écrit en 1994 le très convainquant et inspirant "The Case for Mars", donnant les clés du voyage habité vers Mars et de l'établissement de bases permanentes.

Le rêve était-il parti ? Non, bien entendu, mais depuis les années 90, cela fait plus de 30 ans qu'on nous annonce le premier voyage habité vers Mars dans la décennie suivante ... Force est de constater que le temps passe et que nous n'y sommes pas encore. Certes, il y a le StarShip, mais SpaceX peine à le fiabiliser et il reste de nombreux obstacles à surmonter avant d'oser le voyage interplanétaire. C'est le moment choisi par Robert Zubrin pour exposer son point de vue sur les programmes de la NASA et aussi pour nous convaincre que le rêve est toujours là, que les obstacles ne sont pas insurmontables, qu'il y a des problèmes mais aussi des solutions, et que, finalement, nous avançons toujours sur le chemin, vers notre destinée.

L'article étant volumineux, il n'a pas été intégré dans le bulletin, il est donc en libre accès sur le site. Dans ce bulletin, deux problématiques importantes sont abordées : la propulsion nucléaire thermique et les systèmes de support de vie. Ces articles vont nourrir le wiki sur les missions martiennes habitées.

Et il y a aussi de nombreuses nouvelles de l'association, preuve de notre dynamisme, je vous laisse les découvrir !

Jean-Marc Salotti, responsable éditorial



Propulsion nucléaire thermique pour le voyage vers Mars

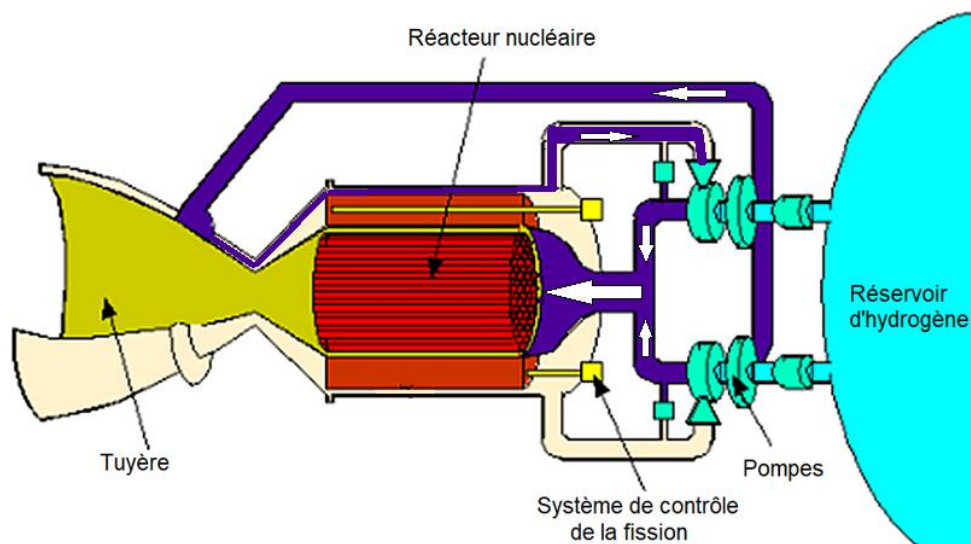
Par Jean-Marc Salotti, APM

Introduction

Proposée dans plusieurs scénarios de mission martienne habitée de la NASA, notamment celui de la Design Reference Mission 3.0 de 1997 et celui de la Design Reference Architecture de 2009, la propulsion nucléaire thermique a un peu été oubliée dans les années 2010 avant de revenir à la mode très récemment, avec le développement concret de ces systèmes par l'United States Space Force et la DARPA, l'agence de recherche et développement américaine spécialisée dans les projets de défense. A priori, l'idée semble prometteuse, l'énergie nucléaire permettant théoriquement d'améliorer le rendement du système de propulsion, c'est-à-dire le gain de vitesse par tonne de carburant. Mais qu'en est-il vraiment, comment est-ce que cela fonctionne, quels sont les risques et les contraintes d'usage associés au nucléaire, pourquoi cet abandon dans les années 2010 et, bien entendu, est-ce intéressant pour les voyages vers Mars ? Telles sont les questions abordées dans ce dossier.

1. Principes généraux de la propulsion nucléaire thermique

Un moteur à propulsion nucléaire thermique fonctionne avec deux éléments essentiels. Le premier est un réacteur nucléaire embarqué qui produit à volonté une grande chaleur, et le deuxième est un ergol, typiquement de l'hydrogène, qui est chauffé à haute température et expulsé sous pression et donc à grande vitesse dans la direction de la tuyère. Voici ci-dessous un schéma de fonctionnement proposé par la NASA et issu des travaux de Borowski (Borowski 1998).



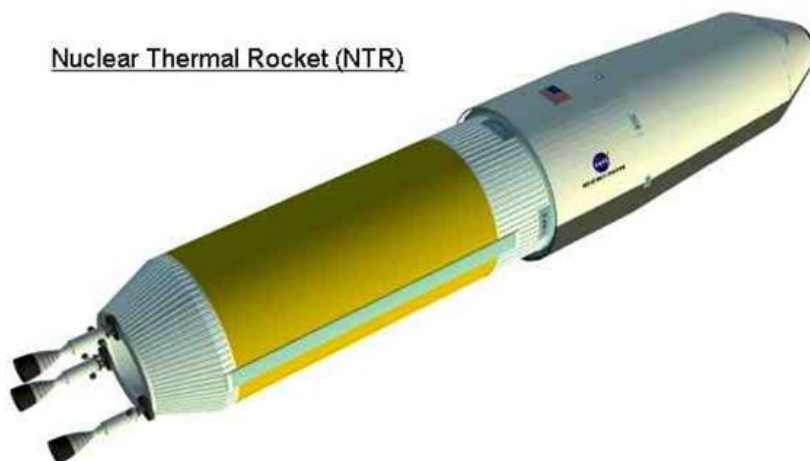


L'hydrogène liquide sert à la fois à la propulsion et au refroidissement de la tuyère et du réacteur. Comme dans une centrale nucléaire classique, le système de contrôle permet de rapprocher ou éloigner les barres d'uranium. En cas d'éloignement, il n'y a pas de réaction en chaîne, les radiations sont donc relativement limitées et il n'y a pas de risque d'explosion.

Les deux paramètres les plus importants d'un système de propulsion sont d'une part la poussée, exprimée en Newtons, et la vitesse d'éjection des gaz, elle-même linéairement corrélée à ce qu'on appelle l'impulsion spécifique. Pour décoller, il faut impérativement une énorme poussée, autrement dit un très grand volume de gaz éjecté par seconde. Théoriquement, c'est faisable avec un tel moteur, mais du point de vue de la sécurité, il est hors de question de décoller avec un réacteur nucléaire en fonctionnement, ce serait trop dangereux, en raison des retombées radioactives potentielles s'il y avait un quelconque problème lors des premières minutes de vol. Par conséquent, si on souhaite exploiter un système de propulsion nucléaire thermique, il faut le démarrer en orbite, pas avant. Il convient de préciser que même l'orbite basse est interdite, car si l'atmosphère y est quasi-absente, les quelques particules qu'on peut rencontrer à ces altitudes (de l'ordre de 400 km) produisent un micro-freinage des vaisseaux ou satellites et donc une lente descente orbitale jusqu'à la désintégration atmosphérique quelques mois ou années plus tard. Pour cette raison, les responsables de développement de ces technologies considèrent qu'on ne peut démarrer un réacteur nucléaire qu'à partir d'une orbite de 800 kilomètres de périégée, c'est ce qui est préconisé par la NASA. De cette orbite, donc, on allumerait le réacteur nucléaire et on exploiterait un système de propulsion nucléaire thermique pour le reste du voyage aller vers Mars. Le bénéfice attendu (on y reviendra) est une économie de consommation d'ergols. On peut noter que ce système de propulsion pourrait également servir pour la mise en orbite autour de Mars. Les astronautes seraient alors transférés dans un vaisseau atterrisseur, puis, une fois la mission terminée sur la surface, remonteraient en orbite martienne pour de nouveau embarquer dans le vaisseau à propulsion nucléaire thermique afin d'effectuer le retour vers la Terre.

2. Efficacité du moteur à propulsion nucléaire thermique

Nuclear Thermal Rocket (NTR)

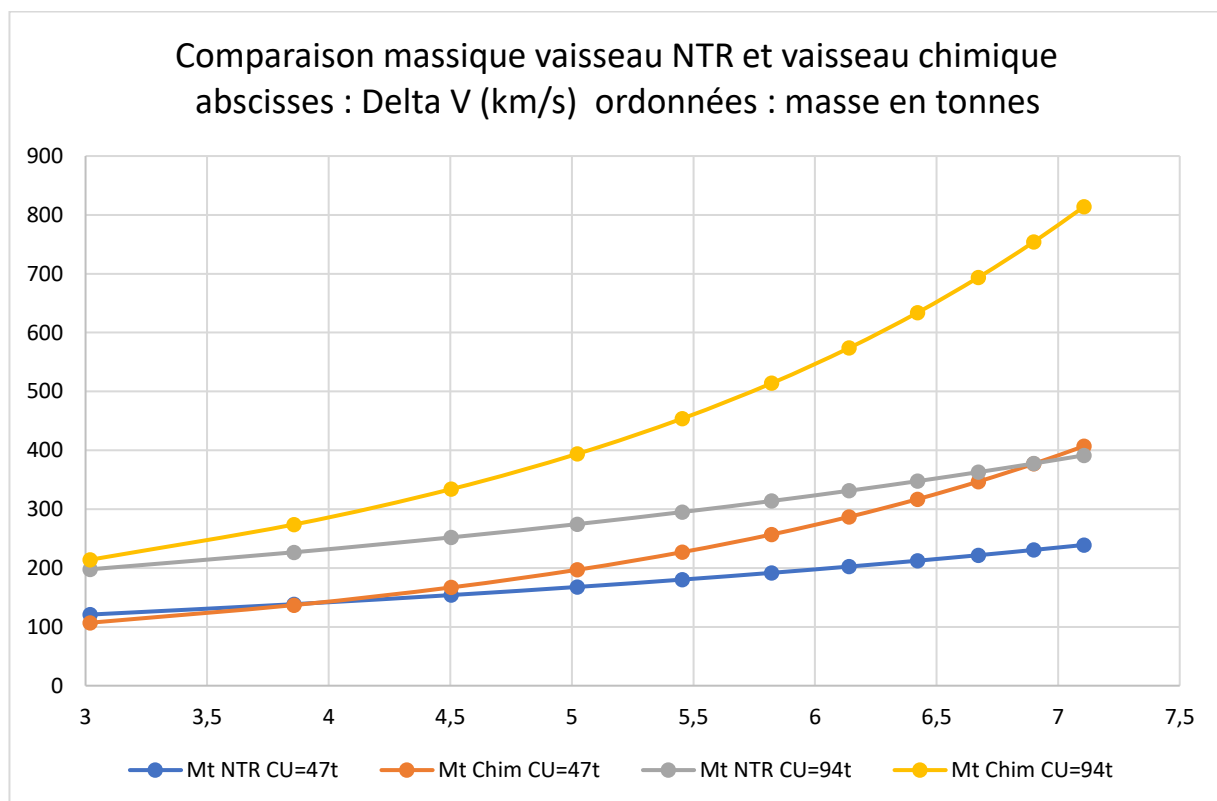


Crédits : NASA, DRM3.1 1997



Selon différentes études sur le sujet (Borowski 1998, Borowski 2012, Gabrielli 2015), par rapport à un moteur à propulsion chimique classique, la vitesse d'éjection des gaz est potentiellement bien supérieure avec ce type de moteur. Les auteurs annoncent typiquement une impulsion spécifique de 830 secondes validée expérimentalement, avec un potentiel de 940 secondes, soit environ deux fois mieux qu'un moteur H₂/O₂, ce qui signifie que pour une augmentation de vitesse donnée, ce moteur consommerait beaucoup moins d'ergols, permettant une économie de masse substantielle. Toutefois, il faut effectuer un bilan précis, car s'il y a une réduction de la masse des ergols à emporter, il ne faut pas oublier qu'il faut ajouter la masse du réacteur nucléaire ainsi que la masse de tous les autres systèmes nécessaires. En particulier, lors du fonctionnement du moteur, les radiations émanant du cœur du réacteur sont dangereuses pour les humains. Il faut donc ajouter un blindage complémentaire anti-radiations.

Prenons deux exemples concrets avec l'objectif d'effectuer la manœuvre de transfert vers Mars depuis l'orbite terrestre, pour le premier cas avec une charge utile de 47 tonnes, et pour le deuxième cas avec une charge utile de 94 tonnes. Voici ci-dessous un graphique comparant la masse totale (Mt) d'un vaisseau à propulsion nucléaire thermique (NTR) avec la masse totale d'un vaisseau à propulsion chimique pour effectuer cette manœuvre. Pour le vaisseau NTR, nous reprenons l'estimation massique de Borowski (Borowski 1998, Table 15 page 38), en extrapolant l'augmentation de masse en fonction du ΔV . Pour le vaisseau à propulsion chimique, nous avons pris un seul étage propulsif avec un coefficient structurel entre 0,08 et 0,09.





Le graphique illustre parfaitement le gain de la propulsion nucléaire thermique. Le gain de la NTR croît avec le Delta V requis et la masse de la charge utile. C'est un résultat attendu, car même si la masse du réacteur nucléaire augmente la masse structurelle, le gain en carburant, obtenu grâce à une plus grande impulsion spécifique, devient prépondérant pour les grandes valeurs de Delta V, ou lorsque la masse à envoyer vers Mars est très importante.

3. Inconvénients de la NTR

Si le voyage vers Mars implique de se situer sur la droite de la courbe, le gain de la NTR est évident. Cependant, pour l'insertion en orbite martienne, il est possible d'exploiter le freinage atmosphérique. Or, l'ajout d'une protection thermique et d'éléments de propulsion pour une modeste manœuvre d'ajustement orbital conduit à une petite augmentation massique et élimine le besoin d'un freinage propulsif. En conséquence, le système de propulsion nucléaire thermique ne présente aucun intérêt pour se placer en orbite martienne. Le gain serait donc limité à la manœuvre de transfert vers Mars (TMI=Trans-Mars Injection) depuis l'orbite terrestre.

Le ΔV pour cette manœuvre est de l'ordre de 3,7 km/s. Sur le graphique, si la charge utile est de 94 tonnes, le gain de la NTR reste significatif, mais si on prend le cas d'une charge utile de 47 tonnes, on se situe précisément au niveau du point d'intersection des courbes, là où le gain n'est pas certain. De plus, si on considère une altitude de 800 km pour le démarrage du réacteur nucléaire, il faut soustraire environ 0,4 km/s aux besoins de ΔV pour la manœuvre TMI et les ajouter aux besoins de la mise en orbite.

Malgré tout, on peut aussi envisager d'exploiter une NTR pour le retour. Pour la fusée du retour, le besoin en ΔV nous ramènerait sur la droite de la courbe et le gain de la NTR serait donc plus évident. Toutefois, il est connu que l'hydrogène liquide est difficile à conserver. Il faudrait donc envisager un autre carburant, ou tenir compte des pertes, ce qui rajoute des incertitudes sur les gains.

Enfin, il convient de rappeler qu'un réacteur nucléaire en fonctionnement émet des radiations. Pour protéger les astronautes, il faudrait éloigner le module habité et placer un bouclier relativement lourd entre celui-ci et l'étage de propulsion. La masse d'un tel bouclier est difficile à estimer. Elle est de 2 tonnes dans l'étude de Borowski et de 10 tonnes dans le rapport de la NASA de 1997. Cela augmente donc les incertitudes sur les gains massiques.

Conclusion

Au final, bien que l'impulsion spécifique soit meilleure, le gain de la propulsion nucléaire thermique pour les missions martiennes habitées dépend du cas considéré. Selon les scénarios, la charge utile des vaisseaux à destination de Mars varie entre 35 et 100 tonnes. Si on est proche des 35 tonnes, la NTR n'a probablement aucun intérêt, car les gains de masse, s'ils existent, sont marginaux. Si en revanche on est proche des 100 tonnes, les gains sont plus évidents. L'étude menée ici comportant de nombreuses approximations, il faut se garder d'émettre des conclusions définitives.



Par exemple, il est possible qu'on parvienne à réduire fortement la masse structurelle d'une NTR, ou qu'on parvienne à atteindre des impulsions spécifiques bien supérieures.

Un autre argument à considérer est la réutilisabilité. L'usure des tuyères des NTR est un problème important, mais si on parvenait à la réduire et à envisager la réutilisabilité de ces vaisseaux sur plusieurs missions, les gains seraient nettement plus importants. En effet, la quantité d'ergols nécessaire au voyage vers Mars étant nettement moindre, il serait beaucoup plus facile et rapide de faire le plein d'une NTR que d'une fusée à propulsion chimique. Sur le long terme, par exemple dans le cadre d'une colonisation de la planète rouge, une NTR pourrait devenir un moyen de transport très intéressant.

Références

(Borowski 1998) S.K. Borowski, L.A. Dudzinski, M/L. McGuire, Vehicle and mission design options for the human exploration of Mars/Phobos using "Bimodal" NTR and LANTR propulsion, proceedings of the 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland (OH, USA), 13-15 July 1998.

(Borowski 2012) S.K. Borowski, D.R. McCurdy, T.W. Packard, Nuclear Thermal Propulsion (NTP): a proven growth technology for human NEO/mars exploration missions, proceedings of the IEEE Aerospace Conference, NASA Glenn Research Center, BigSky, MT, March 3–10, 2012.

(Gabielli 2015) R. A. Gabielli, G. Herdrich, Review of Nuclear Thermal Propulsion Systems, Progress in Aerospace Sciences, vol. 79, p. 92–113, 2015.

Jean-Marc Salotti

Jean-Marc Salotti est professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Cognitique, Bordeaux INP. Ses activités de recherche sont centrées sur la robotique collaborative et le spatial habité. Docteur en informatique spécialité Intelligence Artificielle, diplômé en 2002 du Master of Space Studies de l'International Space University, il a publié de nombreux articles sur les missions martiennes habitées et est devenu membre de l'International Academy of Astronautics. Il est membre de l'Association Planète Mars depuis 2000.



Systèmes de support de vie : des premières capsules aux enjeux actuels

Par Lucie Poulet, APM

Introduction

Les systèmes de support de vie remplissent quatre fonctions essentielles : la gestion de l'air, de l'eau, des déchets et de la nourriture, garantissant ainsi la survie des équipages lors des missions spatiales. Par ailleurs, ils doivent maintenir des conditions environnementales compatibles avec la vie humaine.

Depuis les premières missions habitées, ces systèmes ont évolué en fonction de la durée et de la complexité des missions : de quelques heures avec Yuri Gagarine à plus d'un an à bord de la station Mir, en passant par les missions standards de six mois sur la Station Spatiale Internationale (ISS). Pour les futures missions scientifiques et d'exploration sur la Lune et Mars, ces technologies devront encore progresser.

Lors des premiers programmes (Vostok, Mercury, Voskhod, Gemini), les systèmes de support de vie étaient entièrement ouverts, sans recyclage des ressources. Avec les missions Apollo, plus longues, une avancée majeure a été réalisée : la production d'eau à bord du vaisseau, réduisant ainsi la masse embarquée. L'augmentation de la durée des séjours à bord des premières stations spatiales, comme Saliout et Skylab, de quelques semaines à plusieurs mois, a permis d'expérimenter des technologies adaptées aux vols de longue durée. Ces stations ont aussi offert l'opportunité de mener les premières expériences scientifiques en orbite tout en amorçant une transition vers des systèmes de support de vie partiellement ouverts.

La station Mir, premier laboratoire multi-modulaire en micropesanteur, a permis d'étendre les missions à plus d'un an. Son système de support de vie, entièrement intégré et basé sur des procédés physico-chimiques, assurait le recyclage de l'eau et la production d'oxygène in situ. Quant à l'ISS, elle représente le laboratoire spatial de plus longue durée à ce jour. Son infrastructure a permis de tester diverses technologies de support de vie, notamment des systèmes de régénération et de production locale de l'eau et de l'air.

1. Gestion de l'air

Les premiers systèmes de gestion de l'air ont été développés pour les premiers programmes de vol habité, Vostok et Mercury.

Dans les capsules Vostok, l'oxygène était généré par des cartouches de dioxyde de potassium, produisant de l'oxygène au contact de l'eau. Du côté américain, l'oxygène n'était pas produit à bord



mais stocké dans des réservoirs embarqués, avec une différence majeure : les États-Unis avaient opté pour une atmosphère composée d'oxygène pur. À partir des missions Gemini, pour réduire le volume et la masse des réservoirs, l'oxygène liquide cryogénique a été adopté. Une redondance dans l'approvisionnement en oxygène a également été mise en place, un principe toujours utilisé sur l'ISS. L'avancée majeure est survenue avec les stations soviétiques Saliout, lorsque l'oxygène a commencé à être produit par électrolyse de l'eau plutôt que par des réactions chimiques. Dans la station Skylab, une atmosphère composée d'oxygène et d'azote a été introduite. Sur la station Mir, un système secondaire de génération d'oxygène reposait sur des générateurs à combustible solide. L'atmosphère contenait entre 21 et 40 % d'oxygène et jusqu'à 78 % d'azote (stocké sous haute pression), avec une pression proche de la pression atmosphérique terrestre. Sur l'ISS, la pression atmosphérique est maintenue à 101 kPa, avec un mélange d'oxygène et d'azote.

Dans les capsules Vostok, un co-produit de la génération d'oxygène, l'hydroxyde de potassium, permettait également de capter le dioxyde de carbone (CO_2). Du côté américain, des missions Mercury aux missions courtes de la navette spatiale, le CO_2 était capté à l'aide de filtres combinant charbon actif et hydroxyde de lithium. Pour les missions de plus longue durée sur la navette, des systèmes régénérables à base d'amines ont été introduits, permettant également d'éliminer l'humidité. Dans le Soyouz, des lits fixes d'hydroxyde de lithium plus volumineux et plus efficaces ont amélioré la capture du CO_2 par rapport aux missions Vostok et Voskhod. Sur la station Skylab, le CO_2 était éliminé grâce à des tamis moléculaires. Sur Mir, il était capté par des lits de sorbants. Sur l'ISS, le segment américain utilise des lits de tamis moléculaires à régénération, tandis que le segment russe repose sur le même système que Mir. Le recyclage de l'air sur l'ISS a également été testé avec un réacteur de Sabatier, permettant de faire réagir le CO_2 avec le dihydrogène issu de l'électrolyse de l'eau pour produire de l'eau et du méthane.



Générateurs d'oxygène russes Elektron dans le module de service Zvezda de la Station spatiale internationale. Source: NASA.



Concernant les contaminants atmosphériques, dès les premières missions, Soviétiques et Américains ont utilisé du charbon actif pour les éliminer, et les capsules étaient équipées de capteurs pour mesurer les concentrations d'oxygène et de CO₂. Dans Skylab, une dépressurisation temporaire permettait d'éliminer ces contaminants. Sur Mir, un système combinant filtres, lits de charbon actif régénérables et réacteurs catalytiques d'oxydation a été mis en place pour purifier l'air, une approche toujours utilisée sur l'ISS.

La repressurisation des cabines a été introduite avec les missions Voskhod, qui ont également inauguré le premier sas de dépressurisation pour les sorties extravéhiculaires. La navette spatiale a ensuite été le premier véhicule à reproduire une atmosphère standard équivalente à celle du niveau de la mer.

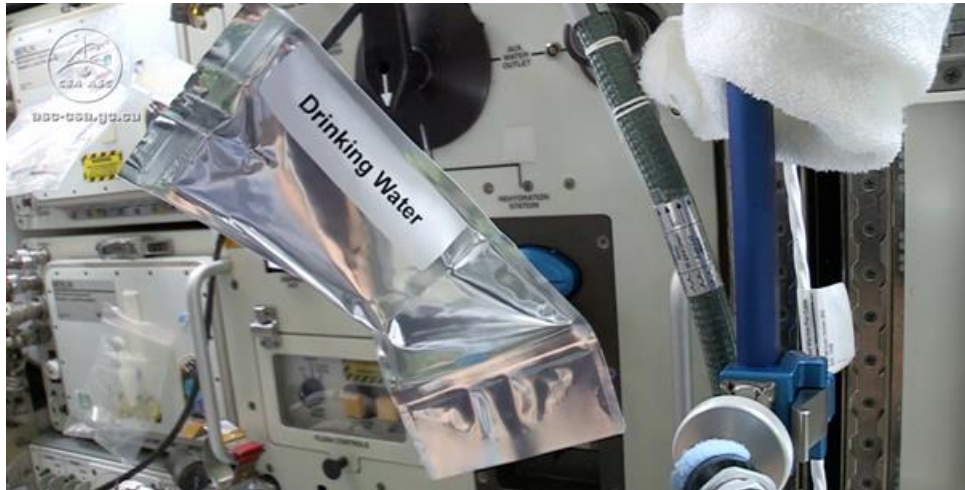
2. Gestion de l'eau

Dans les premières capsules (Vostok et Mercury), l'eau était stérilisée avant la mission et stockée dans des réservoirs, mais aucun contrôle de qualité n'était effectué en vol avant les missions de la navette spatiale. Lors des missions Gemini, du chlore était ajouté aux réservoirs. Dans les missions Mercury, le condensat était récupéré et stocké, mais ce n'est qu'avec les missions Apollo que l'eau a commencé à être produite à bord. Dans le Command Module (CM), elle était générée comme co-produit des piles à combustible, et le condensat était réutilisé. Une solution d'hypochlorite de sodium était ajoutée dans les réservoirs du CM toutes les 24 heures, tandis que les réservoirs du Lunar Module (LM) étaient traités avec une solution d'iode avant le lancement.

Sur la navette spatiale, l'ajout d'iode était automatisé pour garantir la potabilité de l'eau, et son niveau a commencé à être surveillé à partir de Skylab. Dans les stations Saliout, l'eau était recyclée grâce à la récupération du condensat et de l'urine.

Sur Mir, le recyclage de l'eau était organisé en trois circuits distincts : l'eau potable, l'eau d'hygiène et l'eau de service. L'eau potable provenait du condensat, qui était pasteurisé avant l'ajout de biocides et de minéraux, avec un contrôle de qualité via un capteur de conductivité. L'eau d'hygiène était issue des eaux grises, filtrées à travers un système combinant dolomie fragmentée, silicates artificiels, sels, charbon actif et résines à échange d'ions. Quant à l'eau d'urine, elle était distillée avant d'être utilisée pour la production d'oxygène par électrolyse.

Sur l'ISS, le segment russe utilise un système similaire à celui de Mir. En revanche, côté américain, toute l'eau est recyclée, qu'il s'agisse d'eau potable, d'eau d'hygiène ou de celle destinée à l'électrolyse. Le traitement repose sur une combinaison de multifiltration, de lits absorbants à échange d'ions, d'oxydation catalytique et de distillation. L'eau est ensuite stérilisée par iode et chaleur, tandis que son pH, sa salinité et sa conductivité sont surveillés en continu. Des tests microbiologiques sont également effectués ponctuellement.



Water dispenser sur la station spatiale internationale. Source: CSA.

3. Gestion des déchets

Dans les missions Vostok, Mercury et Gemini, l'urine et les fèces étaient simplement collectées, sans traitement particulier. À partir des missions Apollo, des bactéricides ont été utilisés pour stabiliser la matière fécale, et un réceptacle spécifique pour l'urine a été introduit.

Dans Skylab, l'urine était stockée avant d'être évacuée dans l'espace avec les autres déchets liquides, tandis que les déchets solides étaient lyophilisés puis entreposés.



Sac de collection fécale des missions Apollo. Source : Smithsonian National Air and Space Museum.

Avec la navette spatiale, un progrès important a été réalisé : la matière fécale était désormais stockée dans des toilettes, remplaçant le système de récupération dans des sacs utilisé auparavant.

Sur Mir, l'urine et les fèces étaient collectés dans des toilettes, l'urine étant dirigée vers une unité



de recyclage, tandis que les déchets solides, y compris les restes alimentaires, étaient stockés séparément.

Sur l'ISS, le fonctionnement est similaire : l'urine et les fèces sont récupérés dans des toilettes, l'urine est envoyée vers le système de recyclage, et les déchets solides sont collectés dans des sacs puis stockés.



Toilettes russes à bord de la station Mir, Wikimedia Commons

4. Contrôle environnemental

Les capsules Vostok et Mercury étaient équipées de capteurs environnementaux permettant de mesurer la température et l'humidité relative. Leur régulation s'effectuait à l'aide d'échangeurs de chaleur et de gel de silice imprégné d'un agent de séchage à base de chlorure de lithium et de charbon actif.

Avec les missions Gemini, des radiateurs et des échangeurs de chaleur régénératifs ont été introduits. Dans le programme Apollo, des systèmes avancés de sublimation ont été mis en place pour améliorer la gestion thermique.

Sur la navette spatiale, le contrôle de la température reposait sur un échangeur de chaleur liquide/air centralisé utilisant de l'eau comme fluide de refroidissement.

Dans le Soyuz, la régulation de l'humidité a été optimisée grâce à l'implémentation d'un mélange eau/glycol et à un système avancé de capture de la condensation.

Dans les stations Saliout et Skylab, la gestion thermique s'appuyait sur un système de



refroidissement liquide, tandis que la régulation de l'humidité était assurée par des échangeurs de chaleur à condensation.

Sur l'ISS, la régulation de la température et de l'humidité repose sur des échangeurs de chaleur air/eau, permettant également la récupération du condensat.

5. Provision de nourriture

Les débuts de l'alimentation spatiale

Lors des premières missions à bord des capsules Vostok et Mercury, la nourriture était conditionnée dans des tubes. Yuri Gagarine fut le premier humain à manger dans l'espace, consommant une pâte de bœuf et de foie, suivie d'une crème au chocolat en dessert. De son côté, John Glenn, premier Américain à effectuer un vol orbital et à se nourrir en microgravité, eut droit à de la compote de pommes.

Les aliments lyophilisés firent leur apparition avec le programme Gemini, qui comportait des missions pouvant durer jusqu'à deux semaines. Durant Apollo, la nourriture était également lyophilisée et préemballée, nécessitant une réhydratation avant consommation. Des améliorations furent progressivement apportées, comme l'ajout d'eau chaude pour réhydrater certains aliments et la possibilité de manger directement depuis un sachet à l'aide d'une cuillère.



La cosmonaute Valentina Terechkova mangeant la nourriture d'un tube lors de sa mission Vostok 6. Source: NASM.

Évolutions technologiques et diversification des menus

L'ajout d'un congélateur à bord de Skylab a permis une meilleure conservation des aliments et la possibilité d'embarquer des aliments congelés, tels que de la glace ou des plats préparés. D'autres aliments étaient stockés en conserve.

À l'époque de la navette spatiale, une cuisine fut aménagée, offrant la possibilité de réhydrater et



de réchauffer les repas, élargissant ainsi la variété des menus. Cependant, l'absence de réfrigération imposait l'usage exclusif d'aliments déshydratés ou thermostabilisés. Les astronautes disposaient néanmoins d'un petit compartiment pour stocker des aliments frais destinés à une consommation immédiate.



Nourriture des missions Gemini. Source : NASA



Plateau de nourriture avec huit ouvertures pour les conserves, dont trois chauffées électriquement dans Skylab. Source: Smithsonian National Air and Space Museum.



Sur la station Mir, une table et un dispositif pour réchauffer et réhydrater les aliments ont été mis en place. Les repas étaient relativement variés, et cette diversité augmentait avec l'arrivée d'astronautes étrangers. Par exemple, lors de sa visite en 1988, Jean-Loup Chrétien, premier Français à séjourner sur Mir, a apporté du pâté, du sauté de veau, du fromage et du chocolat.

Menu actuel sur l'ISS

À partir de la mission de la navette spatiale STS-61B en novembre 1985, les tortillas firent leur entrée dans le menu standard des astronautes, à la demande de l'astronaute mexicain Rodolfo Neri Vela. Contrairement au pain, elles ne produisent pas de miettes, ce qui les rend idéales pour réaliser des sandwiches ou envelopper d'autres aliments.

Aujourd'hui, les membres d'équipage peuvent choisir parmi environ 200 articles lyophilisés ou thermostabilisés pour leur menu standard, qu'ils peuvent compléter par des choix personnels. Le Space Food Systems Laboratory du Johnson Space Center (JSC), à Houston, est chargé des tests, de la préparation et de l'emballage des aliments américains destinés à l'ISS. De temps en temps, il est possible d'envoyer des aliments congelés, comme de la crème glacée, dans les congélateurs destinés à retourner des échantillons scientifiques lancés à vide.

Les recherches en alimentation spatiale continuent de progresser. En mai 2015, l'astronaute italienne Samantha Cristoforetti (ESA) fut la première à déguster un espresso en microgravité, préparé avec une machine développée par l'Agence Spatiale Italienne en collaboration avec Lavazza. En décembre 2019, les astronautes de l'Expédition 61, Luca Parmitano et Christina Koch, réalisèrent la première cuisson de cookies aux pépites de chocolat à bord de l'ISS, dans le cadre d'une expérience visant à évaluer la faisabilité de la cuisine spatiale à l'aide d'un four ZeroG.

Les défis des aliments frais et les expériences de culture en orbite

Les fruits et légumes frais restent les denrées les plus difficiles à fournir. Actuellement, ils sont livrés par vaisseau cargo et consommés rapidement en raison de l'absence de solutions de conservation adaptées sur l'ISS. Ainsi, de nombreuses expériences avec des plantes ont été réalisées, en orbite terrestre et sur Terre, dans le but de peut-être un jour produire de la nourriture fraîche dans l'espace.

En 1975, les premières plantes furent consommées à bord de Saliout 4. Depuis, plusieurs systèmes de croissance se sont succédé, tels que Svet, Astroculture et Lada, jusqu'à l'installation de Veggie en 2014, entièrement dédié à la recherche sur la production alimentaire en orbite terrestre. Bien que Veggie ne soit pas encore utilisé pour compléter le régime des astronautes, ceux-ci peuvent néanmoins goûter certaines des plantes cultivées. Un autre système, l'Advanced Plant Habitat (APH), destiné aux expériences de biologie fondamentale en microgravité, permet également ces dégustations ponctuelles.



Samantha Cristoforetti buvant son espresso sur l'ISS. Source: NASA.

De la fin des années 1980 au début des années 2000, la Biomass Production Chamber (BPC) du Kennedy Space Center fut utilisée pour démontrer le potentiel de la culture alimentaire, du recyclage de l'eau et du contrôle de l'atmosphère dans des environnements clos, en vue des futures missions de longue durée.



Sunita Williams devant un repas dans l'ISS. Source: NASA.

Plus récemment, la NASA a développé un prototype de serre lunaire à l'Université d'Arizona, la



Lunar Greenhouse (LGH). Ce projet vise à tester la croissance des plantes en environnement contrôlé, ainsi que le recyclage de l'eau et des déchets et la régénération de l'air. Les tests ont montré qu'il était possible de satisfaire les besoins quotidiens en eau d'une personne (27-30 L) et de produire 60 g/m²/jour de biomasse végétale.

6. Les systèmes biorégénératifs

Les sections précédentes ont présenté des systèmes physico-chimiques assurant les quatre fonctions principales du support-vie. Certains de ces systèmes intègrent des mécanismes de régénération, permettant de réduire l'apport en ressources. Cependant, ces systèmes nécessitent une infrastructure initiale plus lourde. Pour les missions de courte durée (comme l'étaient les missions Mercury, Vostok, Voskhod, Apollo), il est donc plus efficace d'emporter directement toutes les ressources nécessaires depuis la Terre. En revanche, pour des missions de longue durée, il devient impératif de minimiser la consommation de ressources tout en garantissant fiabilité et robustesse, conditions essentielles à la survie des astronautes, que ce soit sur d'autres planètes ou lors de voyages interplanétaires.

Les systèmes de support de vie régénératifs et biorégénératifs deviennent pertinents à partir d'une certaine durée de mission, lorsque la masse de ressources à embarquer initialement équivaut à celle qui devrait être envoyée régulièrement en l'absence de régénération. La production de nourriture in situ repose exclusivement sur des organismes biologiques, ce qui induit une interdépendance entre les différentes fonctions du support de vie. La photosynthèse permet le recyclage de l'air et de l'eau, tandis que les organismes photosynthétiques utilisent les produits de dégradation des déchets comme source nutritive.

Ce type de système forme une boucle fermée et constitue un véritable écosystème artificiel, dont la structure rappelle celle des écosystèmes terrestres. On y retrouve des producteurs, comme les plantes, des consommateurs, tels que les humains et les animaux, ainsi que des décomposeurs sous forme de micro-organismes.

Cette section examine les principaux projets développés dans le but d'étudier ces systèmes de support de vie en boucle fermée.

Union soviétique

Les recherches sur les systèmes biorégénératifs ont débuté en Union soviétique dans les années 1960 à l'Institut des Problèmes Biomédicaux de Moscou. Trois bioréacteurs contenant des microalgues ont été testés pour régénérer jusqu'à 90 % de l'oxygène nécessaire à un humain. Ces expériences ont mené à la conception du système BIOS, premier prototype à grande échelle de support-vie biorégénératif. Son installation initiale comprenait une chambre étanche de 12 m³, un bioréacteur de 18 L peuplé de microalgues et une chambre de culture de plantes mesurant 2,5 x 2,0 x 1,7 m. Après une décennie de tests, le premier essai avec des humains a eu lieu en 1972 dans BIOS-



3. Entre 1972 et 1983, plusieurs expériences de quatre à six mois ont été menées dans un module de 315 m³ comprenant un habitat humain, une chambre de culture et un bioréacteur à microalgues. Le système n'intégrait pas de recyclage des déchets solides, mais permettait d'atteindre un taux de régénération de 90 % pour l'air et l'eau, tout en produisant 40 à 45 % de la nourriture nécessaire à un équipage de trois personnes, et jusqu'à 70 % pour deux personnes. Il était possible d'ajuster la photosynthèse des plantes en modifiant l'intensité lumineuse afin de s'adapter aux variations environnementales, mais une accumulation de gaz traces potentiellement toxiques a été observée.

Etats-Unis

Aux États-Unis, l'armée de l'air américaine a commencé à explorer, dans les années 1950, l'utilisation de la microalgue chlorelle pour régénérer l'atmosphère. Parallèlement, la NASA a mené des recherches sur des organismes chimioautotrophes, tels que *Hydrogenomonas*, combinés à des procédés physico-chimiques, afin de produire de la biomasse et de recycler l'air. Dans les années 1970, la NASA a développé le programme CELSS (Controlled Ecological Life Support System), qui visait à utiliser des plantes en environnement contrôlé pour produire de l'oxygène, éliminer le CO₂, purifier l'eau et générer de la nourriture. Ce programme a fusionné au milieu des années 1990 avec le programme ALS (Advanced Life Support) afin d'améliorer l'efficacité des systèmes de support-vie pour les missions de longue durée.



Biosphere, Arizona, Wikimedia Commons

En parallèle, le projet privé Biosphere 2, situé dans le désert de l'Arizona, a construit le plus grand écosystème clos au monde. Ce projet comprenait cinq biomes : une forêt tropicale, un océan, une zone humide de mangrove, une savane et un désert, ainsi qu'un système agricole et un habitat humain. L'expérience visait à démontrer la viabilité d'un système totalement autonome capable de



subvenir aux besoins d'un équipage grâce au recyclage de l'air, de l'eau et des déchets. La première mission, d'une durée de 24 mois, a réuni huit participants mais a rencontré des problèmes de niveaux d'oxygène très bas, dus à une absorption par le béton. Une injection d'oxygène a été nécessaire pour stabiliser l'environnement. Malgré ces difficultés, l'équipage a pu produire suffisamment de nourriture pour survivre. Une seconde mission, plus courte (6,5 mois), a permis d'améliorer la sélection des plantes et d'obtenir une stabilité accrue des niveaux d'oxygène.

Japon

Entre 2005 et 2007, des expériences ont été menées au sein du CEEF (Closed Ecology Experiment Facilities) au Japon, un écosystème artificiel intégrant 23 espèces de plantes, ainsi que deux chèvres et deux humains. Ces expériences, d'une durée de 1 à 4 semaines, ont permis de démontrer que les plantes pouvaient fournir entre 92 et 95 % de la nourriture nécessaire aux humains et 79 % de celle des chèvres. Elles ont également confirmé que l'air pouvait être recyclé efficacement entre le module de culture et le module d'habitation, tout en maintenant les niveaux de gaz traces en dessous des seuils toxiques. En 2007, une unité de recyclage des déchets a été mise en place, permettant de convertir le carbone organique des déchets en CO₂, réutilisé ensuite dans le module de culture des plantes.

Chine

Le Centre Chinois de Recherche et d'Entraînement des Astronautes a entamé ses recherches sur les systèmes de support-vie biorégénératifs dans les années 1990, avec un accent particulier sur la culture des plantes, les microalgues et le recyclage des déchets.

En 2013, la Chine a lancé son premier test d'écosystème artificiel à grande échelle, Lunar Palace 1. Pendant 105 jours, une équipe de trois personnes a vécu dans cet environnement où étaient cultivées 21 espèces de plantes, et où des vers de farine jaunes étaient utilisés pour le traitement des déchets. L'expérience a atteint un taux de recyclage de 100 % pour l'air et l'eau, une production alimentaire couvrant 55 % des besoins et 97 % de recyclage de la matière.

En 2016, Lunar Palace 365, qui s'est en réalité étendu sur 370 jours, a poursuivi ces avancées. Le système a permis un recyclage total de l'air et de l'eau, une production alimentaire couvrant 83 % des besoins et un recyclage de la matière de 98,2 %. L'expérience, menée avec une équipe de trois personnes, comprenait le remplacement de certains membres d'équipage en cours de mission et a rencontré quelques problèmes techniques. Malgré cela, elle a démontré une grande stabilité sur une longue durée.

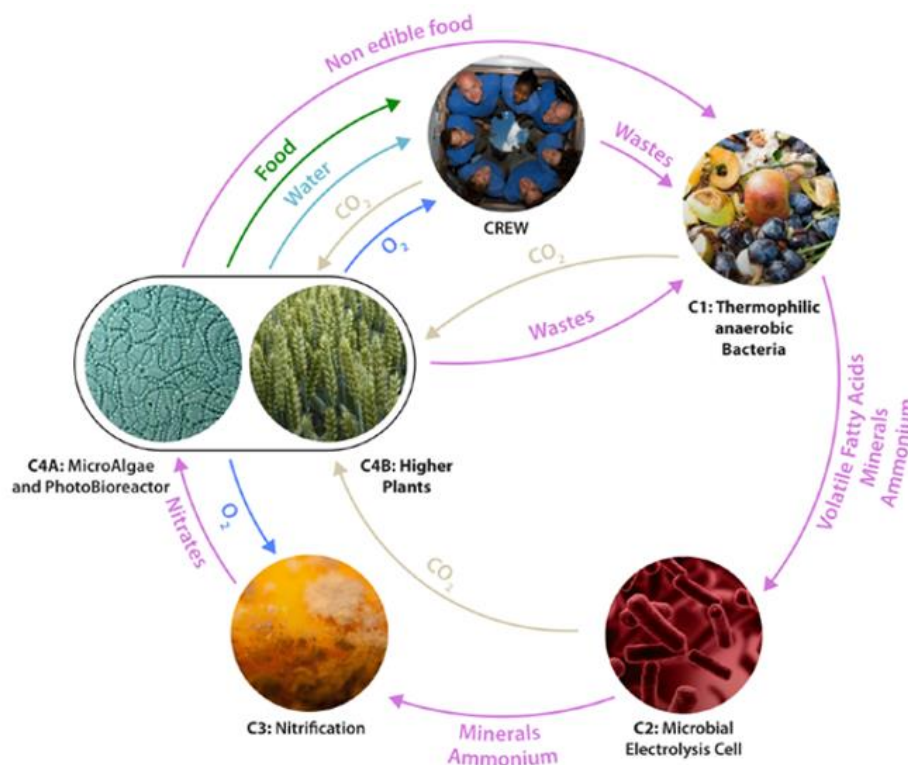
D'autres groupes de recherche chinois ont également mené des tests d'écosystèmes artificiels impliquant des humains. Parmi eux, le Astronaut Center of China a réalisé en 2016 une expérience, qui consistait à observer pendant 180 jours un système habité par quatre membres d'équipage. Cette expérience a démontré un taux de régénération de 100 % pour l'air, 99 % pour l'eau et 70 % pour la



nourriture.

Europe

Le principal projet européen en matière de systèmes de support de vie biorégénératifs est le programme MELiSSA (Micro-Ecological Life-Support System Alternative), initié en 1987 par l'Agence Spatiale Européenne. Inspiré des écosystèmes lacustres, MELiSSA est une boucle fermée simulant toutes les étapes de dégradation des déchets, de production de ressources et de consommation, structurée en cinq compartiments distincts (voir figure ci-après).



Représentation schématique de la boucle MELiSSA. Source : ESA/MELiSSA

Les trois premiers compartiments reposent sur des micro-organismes assurant la transformation des déchets. Le premier compartiment liquéfie les déchets grâce à un consortium de bactéries thermophiles anaérobies, produisant notamment des acides gras volatils. Le second compartiment vise à éliminer le carbone organique en transformant ces acides gras via une cellule d'électrolyse microbienne, générant notamment de l'ammonium. Le troisième compartiment convertit cet ammonium en nitrates, une forme d'azote assimilable par les organismes photoautotrophes, grâce à l'action de bactéries nitrifiantes.

Le quatrième compartiment est un compartiment de production, divisé en deux sous-systèmes : un photobioréacteur contenant des micro-algues (spiruline), et une chambre de culture de plantes. Le photobioréacteur assure la production d'oxygène, l'élimination du CO₂ et génère une source alimentaire riche en protéines. Les plantes, quant à elles, produisent également de l'oxygène et de l'eau, tout en éliminant le CO₂ et en fournissant une alimentation variée.



Enfin, le cinquième compartiment est celui de l'équipage, les consommateurs, qui produisent des déchets solides, liquides et gazeux, tout en consommant les ressources produites par les autres compartiments.

Ce système est intégré au MELiSSA Pilot Plant, un démonstrateur terrestre où les boucles de régénération (solide, liquide et gazeux) sont progressivement interconnectées.

Actuellement, les boucles liquide et gazeuse du compartiment de nitrification sont reliées au photobioréacteur. Ce dernier et la chambre de culture des plantes sont eux-mêmes connectés, par leur boucle gazeuse, au compartiment des consommateurs, constitué de trois rats, qui respirent l'oxygène produit par les microalgues et les plantes et fournissent en retour le CO₂ nécessaire à la photosynthèse. En outre, le compartiment de nitrification est alimenté par de l'urine humaine synthétique.

L'approche suivie par le projet MELiSSA comporte un volet recherche et développement mené dans les laboratoires partenaires, visant à caractériser les procédés de chaque compartiment ; un volet démonstration en vol permettant de tester ces procédés en conditions spatiales ; et un volet démonstrateur au sol où sont intégrées les différentes solutions technologiques développées pour chaque compartiment.

Conclusion

L'évolution des systèmes de support-vie dans l'exploration spatiale témoigne d'un progrès continu vers une autonomie accrue.

De systèmes entièrement ouverts, nécessitant des apports constants de ressources, les systèmes de support-vie sont progressivement passés à des boucles partiellement fermées, comme celles utilisées sur la station Mir ou l'ISS. À terme, l'objectif est de développer des écosystèmes autosuffisants capables de soutenir des missions scientifiques de longue durée, sur la Lune, Mars ou au-delà.

L'histoire des systèmes de recyclage dans l'espace met en lumière deux approches distinctes : les États-Unis ont privilégié des solutions compactes et efficaces, comme les environnements à oxygène pur et le stockage cryogénique, tandis que l'Union soviétique a misé sur des conceptions plus robustes et modulables. L'un des progrès majeurs a été l'introduction de la production d'eau et d'oxygène à bord des véhicules spatiaux, réduisant ainsi la masse des missions et la dépendance aux ravitaillements. Les Soviétiques ont ouvert la voie en matière de production d'oxygène embarquée, passant des cartouches chimiques à l'électrolyse de l'eau sur Mir, une technologie aujourd'hui essentielle aux systèmes de support-vie régénératifs.

Ces avancées ne bénéficient pas uniquement à l'exploration spatiale : elles trouvent également des applications sur Terre, notamment dans les environnements extrêmes et la gestion durable des ressources. Les technologies de recyclage de l'eau, de l'air et des déchets développées pour l'espace



peuvent contribuer à améliorer la résilience des habitats isolés et à optimiser l'utilisation des ressources dans un contexte de changement climatique et de pression environnementale croissante.

Cependant, la mise au point de systèmes entièrement fermés et autonomes nécessitera des innovations dans la culture des plantes en environnement contrôlé, la gestion des déchets organiques et la stabilisation des boucles écologiques sur le long terme. L'optimisation énergétique, la résistance aux conditions extrêmes et l'intégration de nouvelles technologies, seront autant d'enjeux cruciaux.

L'exploration spatiale a toujours été un moteur d'innovation. Loin d'être une simple contrainte technique, la recherche de l'autosuffisance en milieu spatial ouvre la voie à des solutions durables qui pourraient transformer la gestion des ressources sur Terre.

Pour aller plus loin

- Eckart, P. (1995). Life Support And Biospherics—A Handbook. Life Support & Biosphere Science, 2(2), 103-106. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11538309/>
- Ewert, M. K., Chen, T. T., & Powell, C. D. (2022). Life support baseline values and assumptions document. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210024855>
- MELiSSA website : <https://www.melissafoundation.org/>

Lucie Poulet est une chercheuse en bioastronautique et procédé du support-vie à l'Institut Pascal de l'Université Clermont Auvergne (France). Son travail de recherche se focalise sur la compréhension des échanges de matière et d'énergie entre les plantes et leur environnement en gravité réduite, avec une approche de modélisation mécaniste. Elle utilise ensuite ces modèles dans le but d'optimiser la conception de systèmes, comme les serres spatiales. Pour valider ces modèles, elle a testé des expériences en vols paraboliques et est en train de préparer une nouvelle expérience pour la Station Spatiale Internationale. Depuis 15 ans, ses travaux de recherche ont des applications dans le domaine des systèmes de support de vie biogénératifs pour les missions spatiales, et elle a collaboré étroitement avec différentes agences spatiales (NASA, ESA, CSA, CNES, DLR) et laboratoires, en particulier dans le cadre du projet MELiSSA (Micro-Ecological Life-Support System Alternative) de l'ESA. Elle a travaillé comme chercheuse postdoctorale à la NASA au sein du groupe Space Crop Production au centre spatial Kennedy (Floride, États-Unis) de 2019 à 2022. Ses travaux de recherche l'ont conduite à participer à quatre simulations de missions martiennes, dont une de 4 mois financée par la NASA au sein du programme HI-SEAS (Hawaii Space Exploration Analog and Simulation). Lucie Poulet est titulaire d'un doctorat de l'Université Clermont Auvergne depuis 2018, d'un Master en génie aérospatial de l'Université Purdue (États-Unis) et d'un diplôme d'ingénieur de l'École des Mines de Nancy (France). Engagée comme sapeur-pompier volontaire et détentrice d'un brevet de pilote privée, Lucie consacre son temps libre à des activités de plein air comme la randonnée ou la plongée, mais pratique également le CrossFit.



Vie de l'association

Par Jean-Marc Salotti, APM

Chers membres,

Voici les nouvelles de l'association pour le troisième trimestre 2024 :

- Invité par la Mars Swiss Society, Philippe Coué a présenté le 22 mars dernier, à l'EPFL de Lausanne (Suisse), une conférence sur les futurs vols habités martiens en Chine. Toutes les pistes connues explorées actuellement par l'Empire du Milieu ont été présentées : conception des astronefs, propulsion, profils de mission, simulateurs de base martienne, etc.. Ainsi, alors que la Chine s'apprête à envoyer ses premiers taikonautes fouler le sol de la Lune, un vaste programme de R&D projette les Chinois au-delà sur les terres du ciel avec une ambition équivalente à celle des États-Unis, sinon supérieure. L'événement a eu lieu en présence de l'astronaute suisse Claude Nicollier qui a réalisé quatre vols à bord de la navette spatiale.
- La parole aux membres : David Augustin Alexandre Duval expose son point de vue sur l'exploration humaine de Mars.



<< **Odyssée :**

Christophe Colomb, Amerigo Vespucci , Vasco de Gama...Toujours aller, toujours voir plus loin, tel est le destin de l' être humain. Au début de l'odyssée fut une cellule, perdue au milieu d' un immense océan primitif. Aujourd'hui, nous sommes 8 milliards sur la planète bleue, le regard tourné vers les étoiles. Quelle est la suite de l' histoire? Nous sommes des explorateurs perpétuels : l'autre côté de la montagne, l'autre côté de l'océan, l'autre côté de la nuit; à la quête de cette réponse ultime à la question : pourquoi la vie ? Aujourd'hui, une nouvelle frontière se dresse devant nous, une frontière telle que l' humanité n'en a jamais connue. Incommensurable, froide, totalement inhospitalière pour des êtres formés pour un environnement terrestre. Qu'allons-nous faire ? Fléchir et écrire l'épilogue de notre histoire ou tourner la page et commencer l'un des plus passionnants, enrichissants et merveilleux chapitres de l'histoire humaine? Tout comme pour cette cellule dans l'océan primitif, les distances à travers le temps et l'espace sont astronomiques, les risques innombrables, les pronostics de réussite peu encourageants. Mais nous sommes là, aujourd'hui. Quelle aventure ! Nous sommes les fiers détenteurs d'un improbable billet gagnant à l'immense loterie de la vie. Nous nous devons , à



nous-mêmes comme à tous ceux qui n'ont pas eu cette chance, de transformer cet essai. Seuls dépositaires de la vie intelligente dans notre système solaire, nous avons le devoir de faire progresser celle-ci. En exportant la vie sur d'autres planètes, ce n'est pas seulement l'humanité qui survit et prospère à travers les millénaires, mais également le berceau qui l'a vu naître...

Je suis de ceux qui aspirent à ce que l'humanité poursuive son incroyable odyssée, faite de terribles dangers, d'aventures rocambolesques, d'intenses moments de communion et de joie, d'épreuves insurmontables que l'on a, finalement toujours surmontées, et même si parfois nous les avons chèrement payées, nous avons prouvé la grandeur de l'âme humaine. Notre devoir est de transmettre la vie, notre savoir, non seulement aux générations futures, mais également aux étoiles, pour que, dans quelques milliers d'années, au creux de celles-ci, l'humanité, qui ne ressemblera certainement plus à celle que l'on connaît, rencontre d'autres formes de vie et écrive avec elles d'autres magnifiques chapitres de la vie.

La colonisation de Mars est dans l'évolution logique de la conquête et de l'exploration de notre système solaire, prémices à de futurs bonds encore plus ambitieux en dehors de celui-ci. La nature même de la planète, la plus apte à supporter un environnement de vie artificiel propre à notre biologie; sa distance, à la portée prochaine de nos moyens technologiques en fait la destination parfaite de notre prochaine grande expédition. Après la folle aventure de la Pinta, la Nina et la Santa Maria, qui nous a offert un nouveau monde, devons-nous renier nos gènes? Aujourd'hui fort de ces milliers de générations qui ont arraché à la terre, jour après jour, la force d'aller plus loin, un pas après l'autre, je dis : allons-y. Embarquons ensemble dans cette folle équipée pour voir de quoi demain sera fait. L'avenir est entre nos mains, construisons ensemble l'humanité de demain...

>>

- Nouveau livre qui parlent de Mars :
- **De la Terre à Mars**, de Olivier Zarrouati, Cépaduès éditions. Résumé : Un siècle après la première empreinte d'une botte de scaphandre sur la Lune, des hommes se lancent à la conquête de Mars. Une bien longue attente, alors que vingt-deux années seulement avaient séparé les deux franchissements du mur du son par Chuck Yeager, et de l'espace interplanétaire par Neil Armstrong. Mais il y a quelques différences, entre un vol d'une semaine et une expédition de plusieurs années, entre une plongée en apnée et un séjour en eaux profondes, entre un rapide vol d'essai et le voyage de Magellan. Des grandes aventures, la mission vers Mars aura donc tous les attraits, et tous les drames aussi. À l'exemple des grands vaisseaux de la Renaissance, Endowment est un appareil de son temps, envoyé au-delà de ses limites pour découvrir des horizons inconnus. Ses passagers sont des êtres humains comme tous les autres, faisant flèche des bois les plus communs pour voyager au-delà de leurs propres limites. Car Mars n'est pas une planète de plus, sur la liste de celles qui restent à découvrir. C'est un monde unique, dans tous les sens possibles. Le seul, véritablement accessible à l'homme du 21^{ème} siècle. Celui où l'on ne va



qu'une fois. Aller sur Mars, c'est en grandeur réelle l'expérience de la démesure.

- **Opinion de Zubrin :**
Robert Zubrin, président de la Mars Society, a exprimé son opinion sur la stratégie NASA pour les missions martiennes : <https://unherd.com/2025/04/the-flaws-in-musks-mars-mission/>
Il a également publié un article dans The New Atlantis. Retrouvez-le dans son intégralité sur notre site web, traduit en Français par Etienne Martinache : "Le rêve martien est de retour – voici comment le réaliser".
- **Organisation de EMC2025 (European Mars Conference) :**
La conférence européenne commence à prendre forme. Elle aura lieu très probablement au cœur de Paris. Adresse : Sarrailh Centre de Conférence et de formation, Résidence Jean Sarrailh, 31 Avenue Georges Bernanos, 75 005 PARIS. Dates provisoires : les vendredi 28 et samedi 29 novembre 2025. L'inscription est ouverte aux membres, en fonction des places disponibles et avec des frais d'inscription qui restent à définir. Affaire à suivre. Une page web dédiée est en cours de construction.
- Le 24/04/2025, conférence de Jean-Marc Salotti à Charles de Gaulle dans le cadre des conférences Air France, à l'instigation de Yves Tichené : "Systèmes de propulsion pour le voyage vers Mars"

DEVENIR MEMBRE :

Vous pouvez soutenir notre Association en devenant membre : <https://planete-mars.com/devenir-membre/>

Prenez soin de vous et en avant Mars !

Jean-Marc Salotti

Responsable du bulletin APM