

Bulletin

105

Avril 2026

Bulletin APM

Sommaire

Editorial P. 2

Purification de l'air P. 3

La Gateway est abandonnée P. 15

Trajectoire de retour libre P.18

Vie de l'association. P. 21





Bulletin n°105, avril 2026.

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

1. SOMMAIRE

Editorial :.....	2
Purification de l'air.....	3
La Gateway est abandonnée	15
Trajectoire de retour libre	18
Vie de l'association	21



Editorial :

Par Jean-Marc Salotti, Vice-Président APM

La conquête spatiale semble trouver un second souffle !

La mission Artemis a permis à trois astronautes de faire le tour de la Lune et de revenir sains et saufs. Ce type de mission ayant déjà été réalisé à de nombreuses reprises lors du programme Apollo, on pouvait s'attendre à une couverture médiatique limitée. Pourtant, surprise : tous les médias en ont parlé et l'enthousiasme était réel. On imagine ce qu'il en serait d'une mission habitée vers Mars. C'est à méditer.

Comme pour Apollo, une mission vers Mars serait très coûteuse. Mais les Américains se sont-ils appauvris à cause du programme Apollo ? Ou, au contraire, sont-ils devenus la première puissance économique, avec le plus grand nombre de brevets déposés chaque année ?

Comme pour Apollo, une mission martienne habitée offrirait du rêve et des perspectives à des millions de jeunes. Cela se traduirait par une incitation à travailler plus dur et plus longtemps, notamment dans les domaines scientifiques et techniques, mais aussi à innover et à entreprendre. Ce serait une invitation à aller plus loin : imaginer des futurs, les chanter, les écrire, les représenter, en débattre, et finalement les inventer. C'est profondément humain. A travers la couverture médiatique d'Artemis, nous reprenons conscience de l'importance de repousser les frontières, d'imaginer d'autres mondes, de rêver à ces mondes, et que les rêves peuvent nous transcender. Réjouissons-nous de ce nouvel enthousiasme pour les missions habitées et restons confiants. Le tour de Mars viendra un jour ; et ce jour-là, des millions de jeunes regarderont le ciel avec des idées, des projets, de nouvelles ambitions, pour eux, mais aussi pour l'humanité.

Jean-Marc Salotti



Purification de l'air

Par Jean-Marc Salotti, APM

Nota Bene : le gaz carbonique, la vapeur d'eau et l'oxygène ne sont pas traités dans cette partie.

1. Particules présentes dans l'air

Taille et persistance : Plus la particule est petite, plus elle reste longtemps en suspension. Les particules $<5\text{ }\mu\text{m}$ (PM5=Particule de Matière de taille inférieure à $5\text{ }\mu\text{m}$) restent pratiquement tout le temps en suspension en microgravité. Les particules $>10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ tendent à être entraînées par les flux d'air mais peuvent se déposer sur les surfaces.

Origine humaine : L'équipage est la principale source de particules : peau, cheveux, vêtements, respiration (exemples figure 1). Même sans poussière externe, les particules organiques (COV) sont omniprésentes.

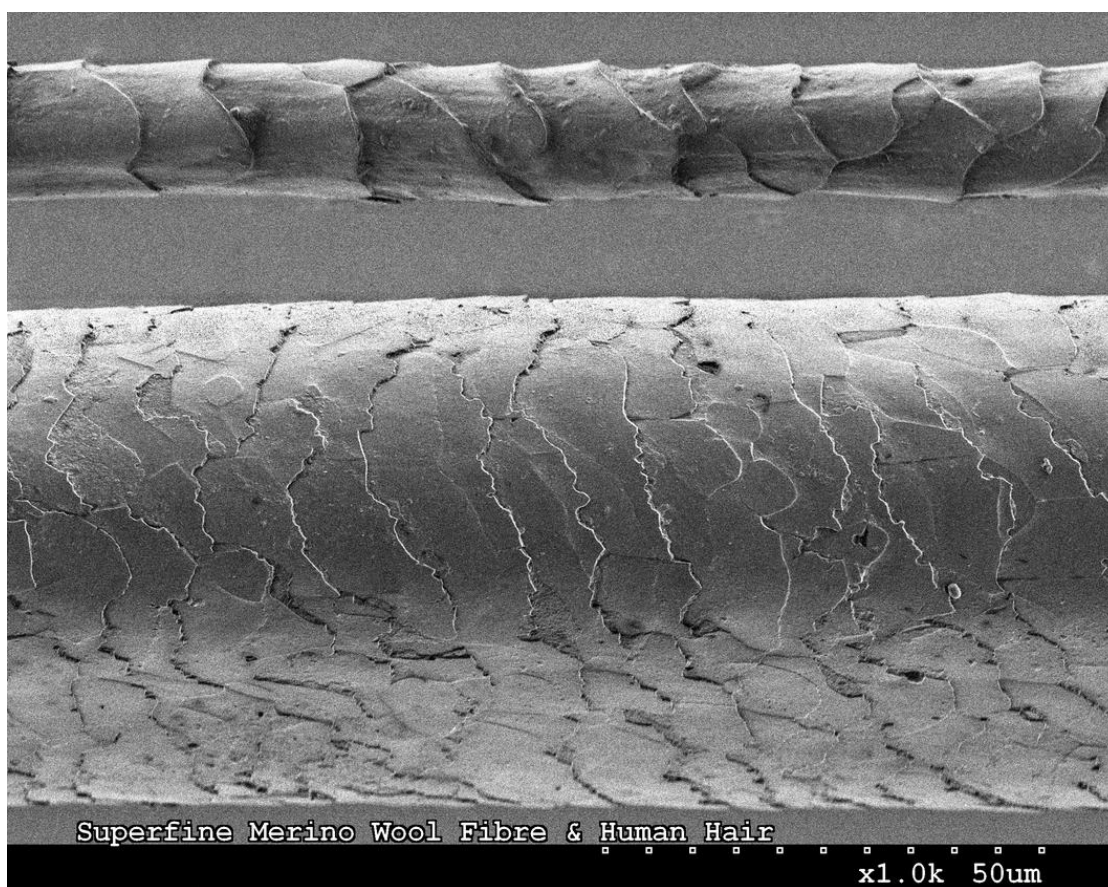


Figure 1 : Image au microscope d'un cheveu (en haut) et d'une fibre de laine (en bas). Copyright : © CSIRO, CC BY 3.0.



Profondeur de pénétration dans les poumons :

- PM10 : peut rester dans le nez et les voies respiratoires supérieures.
- PM5 : atteint bronches et alvéoles, donc plus dangereuse pour la santé respiratoire.
- PM2,5 : très fine, peut passer dans le sang via les poumons.

Type de particule	Taille typique	Origine	Effets / Risques
Fibres textiles	10–500 µm longueur, <10 µm diamètre	Vêtements, draps, sièges, rideaux	Irritation nasale, obstruction des filtres HEPA
Peau morte et squames	1–50 µm	Corps humain	Allergies, source de bactéries et spores
Poussière organique	0,1–10 µm	Aliments, déchets organiques, micro- organismes	Irritation respiratoire, croissance microbienne
Particules métalliques	1–20 µm	Usure des instruments, vis, engrenages, alliages	Abrasion équipements, risque électrique si conductrices
Particules composites / plastiques	1–50 µm	Panneaux composites, résines, peintures	Abrasion, émissions COV, toxicité potentielle
Cendres ou résidus de combustion	0,1–5 µm	Fuites moteur, systèmes chimiques	Irritation respiratoire, toxicité
Micro-gouttes / aérosols d'eau	1–10 µm	Vapeur condensée, éclaboussures	Favorise croissance microbienne, corrosion
Micro-organismes	0,5–5 µm (bactéries), spores jusqu'à 10 µm	Peau, aliments, surfaces contaminées	Infection, biofilm sur filtres et surfaces

Quelques ordres de grandeur pour les particules les plus petites du monde vivant :

- diamètre d'une bactérie : entre 0,3 et 0,5 µm (sauf exception)
- taille d'un virus : 0,02–0,3 µm
- diamètre d'une protéine aérienne : 0,002–0,03 µm
- diamètre d'une molécule de CO₂ : 0,00023 µm

2. COV – Composés Organiques Volatils

2.1 Définition

Les COV sont des composés chimiques contenant du carbone, capables de s'évaporer facilement à température ambiante (pression de vapeur significative), ce qui les rend volatils dans l'air.



2.2 Caractéristiques des COV

- Liquides ou solides à température ambiante, mais libèrent des molécules dans l'air.
- Généralement inodores ou faiblement odorants, certains très irritants.
- Ils incluent un très large ensemble de molécules : solvants, hydrocarbures, alcools, aldéhydes, cétones, esters, etc.
- **TVOC - Total Volatile Organic Compounds** : concentration totale de tous les composés organiques volatils (COV) présents dans l'air, exprimée généralement en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou mg/m^3 .

2.3 Air intérieur typique d'un habitat terrestre :

Les COV sont notamment émis par les peintures, solvants, meubles, plastiques et produits ménagers.

Observations typiques :

- TVOC, air intérieur résidentiel : $0,2\text{-}2 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($200\text{-}2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- TVOC, bureau / école : $0,3\text{-}1,5 \text{ mg}/\text{m}^3$
- Formaldéhyde : $10\text{-}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Toluène : $20\text{-}200 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Acétone : $50\text{-}200 \mu\text{g}/\text{m}^3$

2.4 Exemples de COV dans un habitat spatial

Atmosphère fermée, microgravité → accumulation plus facile, ventilation limitée.

COV	Source principale	Effets principaux
Formaldéhyde (HCHO)	Peintures, résines, plastiques	Irritation yeux, nez, gorge ; toxique
Acétaldéhyde (CH₃CHO)	Plastiques, matériaux composites, combustion partielle	Irritation voies respiratoires, yeux
Acétone ((CH₃)₂CO)	Nettoyants, solvants, colles	Irritation, effets neurologiques si forte exposition
Benzène (C₆H₆)	Solvants industriels, peintures	Très toxique, cancérigène
Toluène (C₆H₅CH₃)	Peintures, adhésifs, carburants	Céphalées, irritations, effets neurologiques
Xylène (C₆H₄(CH₃)₂)	Encres, peintures, solvants	Irritation respiratoire, maux de tête
Éthanol (C₂H₅OH)	Désinfectants, solvants	Irritation, effets neurologiques en forte concentration
Méthanol (CH₃OH)	Nettoyants, solvants	Irritation, toxicité systémique
Hexane (C₆H₁₄)	Colles, solvants	Neurotoxique, irritant
Octane / hydrocarbures légers	Carburants résiduels, matériaux plastiques	Irritation, effets neurologiques



TVOC sur l'ISS : ~ **0,3–1 mg/m³** (300–1000 µg/m³), dont (figure 2) :

- Formaldéhyde (CH₂O) : 10-100 µg/m³
- Toluène (C₇H₈) : 20-100 µg/m³
- Acétone (C₃H₆O) : 50-150 µg/m³

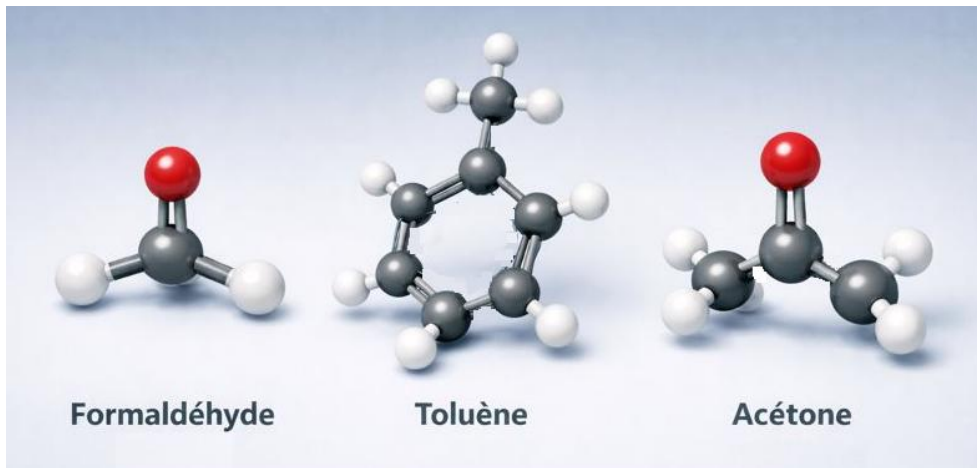


Figure 2 : Formules 3D de 3 COV couramment détectés.

2.5 Risques pour l'équipage

- Irritation des yeux, du nez et de la gorge.
- Effets respiratoires ou neurologiques à long terme.
- Certains COV sont cancérogènes ou toxiques (ex. formaldéhyde, benzène).

3. Autres contaminants

Les contaminants suivants sont surveillés en priorité :

3.1 CO (monoxyde de carbone)

→ Le plus critique et le plus surveillé

Sources possibles : surchauffe électrique, moteurs, incendie incomplet, équipements défectueux.

Il est très dangereux à faible concentration : le CO se lie à l'hémoglobine dans les globules rouges. Il se fixe 200 à 250 fois plus fortement que l'oxygène (O₂). Le résultat est la formation de carboxyhémoglobine (HbCO) → le sang ne peut plus transporter l'oxygène efficacement.

Des capteurs permanents sont obligatoires dans tous les habitats spatiaux. Plusieurs technologies de capteurs existent, mais une seule est réellement adaptée à un habitat spatial habité : le capteur électrochimique.

Principe de fonctionnement : le CO est oxydé sur une électrode en platine (ou alliage de platine et de palladium), très sélective à cette molécule.



La réaction génère un courant proportionnel à la concentration. Le capteur est précis et répond



rapidement même à faible concentration. De plus, il n'est pas sensible à l'humidité et au taux d'oxygène. Il est utilisé dans les habitats spatiaux, les sous-marins, les mines et près des fourneaux (combustion incomplète).

3.2 Ammoniac (NH_3)

Il est typiquement utilisé comme fluide caloporteur (ex. ISS). Il peut aussi provenir du traitement des urines. Il est toxique, mais son odeur est facilement détectable et le risque est bien identifié, surtout en cas de fuite technique.

3.3 Hydrogène (H_2)

Il est typiquement produit lors de l'électrolyse de l'eau pour la production d'oxygène. Il est normalement évacué ou recombéné. Le risque principal est son inflammabilité, pas sa toxicité.

3.4 H_2S (sulfure d'hydrogène)

Le H_2S (sulfure d'hydrogène) est un gaz très toxique, même à faibles concentrations, et il agit principalement sur le système nerveux central et la respiration. Cette molécule est liée à la décomposition organique anaérobie, ce qui est peu probable, car les déchets sont généralement traités ou isolés.

4. Filtre simple : treillis / tamis métallique

Un système de ventilation aspire l'air en continu et le fait passer par un tamis métallique dont les trous font moins de 0,5 millimètre. Caractéristiques :

- Maillage métallique rigide (acier inox / aluminium)
- Ouverture typique : ~100 à 500 μm
- Fonctions :
 - o arrêter fibres, cheveux, miettes, débris
 - o protéger les ventilateurs et échangeurs
- Nettoyable (aspiration, brossage, lavage)
- Très faible perte de charge

Ce type de filtre est utilisé par les Russes dans l'ISS. Il est complété par un aspirateur manuel, typiquement composé d'un tissu dense, qui capte les particules de taille jusqu'à 1 à 5 μm . Les Russes utilisent également des adhésifs (jetables) proches des systèmes de ventilation et autres appareils. La poussière et les particules se collent dessus. Lorsqu'ils sont saturés, ils sont jetés.

5. HEPA (High Efficiency Particulate Air)

Filtre HEPA (High Efficiency Particulate Air) : il retient $\geq 99,97\%$ des particules $>0,3\ \mu\text{m}$. Il fonctionne par 4 mécanismes combinés :

1) Interception

- La particule suit le flux d'air
- Elle touche une fibre et reste collée

2) Impact inertiel

- Particules lourdes ($>1 \mu\text{m}$)
- Trop d'inertie pour suivre le flux ? collision avec la fibre

3) Diffusion (mouvement brownien)

- Très petites particules ($<0,3 \mu\text{m}$)
- Mouvement aléatoire ? collision avec les fibres

4) Attraction électrostatique (secondaire)

Charges résiduelles sur fibres ou particules

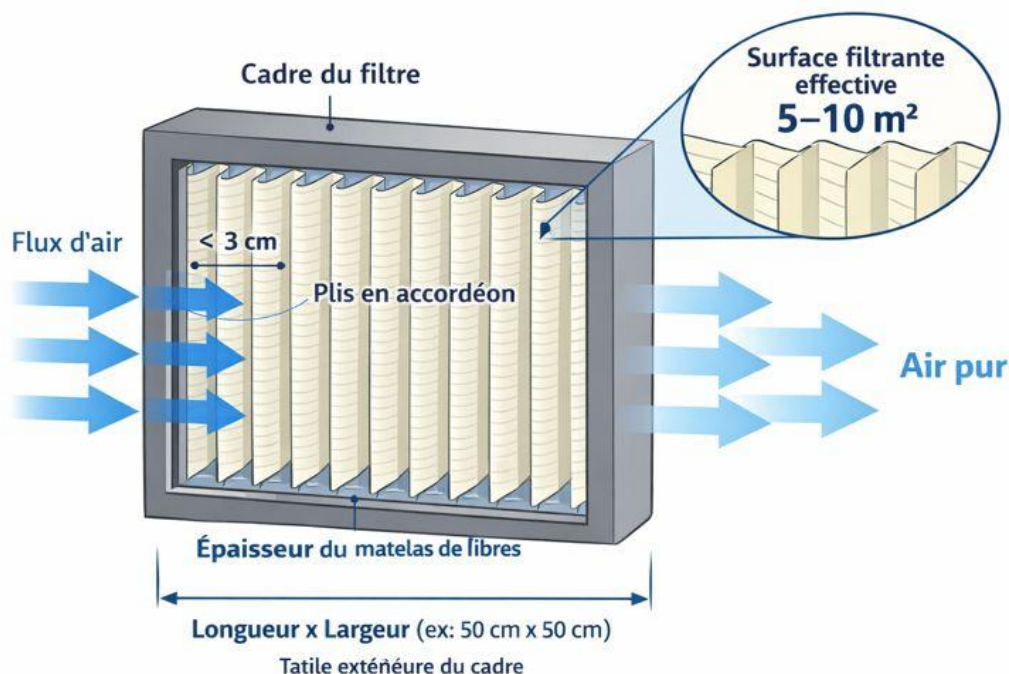


Figure 3 : Schéma du filtre HEPA générée par I.A.

Dans l'ISS, les filtres HEPA sont constitués d'un matelas de fibres de verre très fines (diamètre $0,5\text{--}2 \mu\text{m}$, longueur de plusieurs centimètres) enchevêtrées de manière aléatoire, capables de capturer presque toutes les particules solides et biologiques en suspension dans l'air, tout en laissant passer les gaz et molécules individuelles telles que CO_2 , NH_3 ou COV. Il y a 21 filtres HEPA distribués dans différents modules de l'ISS, notamment dans le segment américain (US Lab, Node 1/2/3, airlock...). Les filtres HEPA sont intégrés aux systèmes de ventilation. Les particules s'agglutinent progressivement sur les fibres, qui finissent par saturer et laisser passer moins d'air. L'augmentation de la puissance des ventilateurs permet de prolonger l'usage, jusqu'à saturation complète. A cause de la saturation, ils nécessitent un nettoyage / remplacement périodique. Il existe aussi sous la forme



d'un aspirateur.

Particules capturées

- Poussières (PM10, PM5, PM2,5)
- Fibres textiles
- Peau morte (squames)
- Spores fongiques
- Bactéries ($\approx 0,5\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$)
- Aérosols liquides
- Particules métalliques ou plastiques

Particules non filtrées

- Gaz (CO_2 , CO, NH_3)
- COV (formaldéhyde, toluène, etc.)
- Vapeur d'eau (en tant que gaz)

Risques :

- Accumulation de biofilms si humidité mal contrôlée
- Source secondaire de contamination si mal entretenu

Performances normalisées, norme classique (HEPA "vrai") : efficacité $\geq 99,97\%$ pour les particules de $0,3\text{ }\mu\text{m}$. Ce n'est donc pas du 100% sûr, mais presque !

- | | |
|---|-----------------|
| ⇒ bactérie : entre $0,3$ et $0,5\text{ }\mu\text{m}$ (sauf exception) | => ne passe pas |
| ⇒ molécule de CO_2 : $0,00023\text{ }\mu\text{m}$ | => passe |
| ⇒ protéine aérienne : $0,002\text{--}0,03\text{ }\mu\text{m}$ | => passe |
| ⇒ virus : $0,02\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m}$ | => passe |

6. Charbon actif et oxydation catalytique

6.1 Principe fonctionnel du charbon actif

Le charbon actif est une forme de carbone poreux avec une surface interne énorme ($500\text{--}1500\text{ m}^2/\text{g}$) qui permet de piéger des molécules diverses. Elles se collent aux parois internes des pores grâce aux forces de Van der Waals (forces d'attraction ou de répulsion faibles entre molécules ou parties de molécules, qui ne résultent pas de liaisons chimiques classiques). Le charbon actif adsorbe les COV (ex. acétone, formaldéhyde), les molécules odorantes et certains gaz inorganiques à faible concentration (NH_3 , traces de H_2S).

Exemple typique de filtre de charbon actif pour un module de $50\text{--}75\text{ m}^3$:

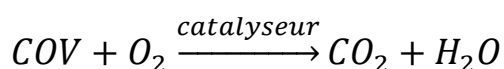


Paramètre	Valeur approximative
Volume de charbon	3 à 5 L (ou dm ³)
Masse	1,5 à 2,5 kg (densité ~0,5 kg/L)
Granules	1–2 mm de diamètre
Flux d'air traversant le filtre	300–600 m ³ /h (~5–10 m ³ /min)
Durée avant saturation	6–12 mois selon charge de COV

En pratique, on en a 3 pour un même module : 1 en service, 1 en réserve pour remplacement instantané en cas de besoin, et 1 en stockage pour redondance.

6.2 Oxydation catalytique

Un système d'oxydation catalytique vient souvent en complément du charbon actif. Il consiste à faire passer l'air contaminé sur un catalyseur (souvent à base de platine, palladium ou oxydes métalliques). Sous l'effet du catalyseur, d'une température élevée (>200°C), et en présence d'oxygène, le composé organique réagit et se transforme en gaz carbonique et vapeur d'eau :



Dans certains filtres combinés, le HEPA retient les particules et le charbon retient les gaz, en un seul passage d'air. Dans l'ISS, le système Trace Contaminant Control System (TCCS) comprend des filtres à charbon actif et une oxydation catalytique, ce qui permet une sécurité chimique, le confort (suppression des odeurs persistantes) et la simplicité : un seul module de filtration pour particules et gaz, réduction du volume et du poids.

6.3 Fabrication du charbon actif

La fabrication du charbon actif commence par le choix d'une matière organique riche en carbone, comme le bois. Cette matière est placée dans un four ou un récipient étanche à l'air et chauffée à 400–700 °C. Un processus appelé pyrolyse libère des gaz tels que H₂O, CO₂, CO et des vapeurs organiques, tout en laissant un résidu comportant une plus grande concentration d'atomes de carbone. Ce charbon brut est encore peu poreux et nécessite une étape d'activation pour développer sa surface interne. L'activation peut être physique, par chauffage à haute température en présence de vapeur d'eau ou de CO₂, ou chimique, par imprégnation avec des agents comme l'acide phosphorique ou l'hydroxyde de potassium suivie d'un chauffage. Ces traitements créent un réseau de micropores qui confèrent au charbon actif sa capacité exceptionnelle d'adsorption. Après lavage pour éliminer résidus chimiques et poussières, et séchage à plus de 100°C pour supprimer de nouveau H₂O, le produit final est stable, transportable dans des sacs étanches, et peut être conditionné en poudre,



granulés ou blocs, prêt à être utilisé pour filtrer l'air, purifier l'eau ou dans divers procédés industriels.

6.4 Usages du charbon actif



Image générée par IA

- Filtration et purification de l'air :
 - Module spatial habité.
 - Masques et systèmes de ventilation militaires et civils : protection contre les gaz chimiques et toxiques (ex. bunkers, sous-marins).
 - Purificateurs domestiques : élimination des odeurs et des vapeurs chimiques dans la maison.
 - Laboratoires et industries chimiques : filtres pour capturer solvants ou gaz dangereux.
- Traitement de l'eau :
 - Eau potable : élimination du chlore, pesticides, solvants et odeurs.
 - Aquariums : maintien de l'eau claire et non toxique pour poissons et plantes.
 - Stations d'épuration : piégeage de polluants organiques dans les eaux usées.

Usage médical : charbon actif administré par voie orale pour adsorber les poisons ou médicaments ingérés.

7. Ventilation

7.1 Objectifs

Dans un module spatial, plusieurs mesures sont mises en place pour assurer la qualité et le confort de l'air. Tout d'abord, l'air est renouvelé et mélangé en permanence afin d'éviter la formation de poches de CO₂ ou d'humidité autour des astronautes. Ensuite, les particules et micro-organismes sont captés grâce aux filtres HEPA, garantissant un environnement propre et sûr. Le système contribue également à maintenir la température et l'humidité uniformes dans tout le module. Enfin, l'air conditionné est distribué depuis les échangeurs thermiques et les unités de contrôle environnemental, permettant une circulation homogène et un confort optimal pour l'équipage.

7.2 Systèmes principaux de l'ISS

a) CCAA – Common Cabin Air Assembly (segment US)

Le système de recirculation et de filtration de l'air dans les modules US a pour rôle principal de maintenir une atmosphère propre et confortable pour l'équipage.



Ses composants clés incluent les ventilateurs, le filtre HEPA et l'échangeur thermique. Les ventilateurs déplacent l'air à travers le filtre HEPA et les échangeurs thermiques, assurant ainsi une circulation efficace. Le filtre HEPA capture les poussières, squames, bactéries et virus, tandis que l'échangeur thermique permet de contrôler simultanément la température et l'humidité de l'air.

Le fonctionnement du système commence par l'aspiration de l'air vicié par les ventilateurs. Celui-ci passe ensuite à travers le filtre HEPA et, lorsque nécessaire, un filtre au charbon actif pour éliminer les composés organiques volatils (COV). L'air traverse ensuite l'échangeur thermique avant d'être redistribué dans le module via des conduits et diffuseurs. Chaque ventilateur déplace un débit indicatif d'environ 5 à 10 m³/min (soit 300 à 600 m³/h), ce qui permet à l'air de chaque module d'être recirculé plusieurs fois par heure. Grâce à cette répartition et au nombre de filtres disponibles, les filtres HEPA ne se saturent jamais rapidement, garantissant un environnement propre et sûr pour les astronautes.

b) IMV – Internal Module Ventilation

Le système a pour rôle d'assurer la circulation de l'air à l'intérieur d'un module spécifique. Sa particularité réside dans le fait qu'en microgravité, l'air ne "tombe" pas naturellement. Il est donc nécessaire de forcer le mélange à l'aide de ventilateurs afin d'éviter la formation de poches de CO₂ ou d'humidité autour des astronautes.

Bruit des ventilateurs : Les ventilateurs font du bruit, ce qui peut être gênant. Pour limiter le bruit dans les modules spatiaux, plusieurs mesures sont mises en place. Les ventilateurs sont montés sur des supports antivibrations, assurant une isolation mécanique et réduisant les vibrations transmises à la structure. Les conduits sont optimisés afin de minimiser les turbulences et les tourbillons, ce qui contribue à un flux d'air plus silencieux. Une redondance des ventilateurs est également utilisée : plusieurs ventilateurs tournent à une vitesse plus faible plutôt qu'un seul à pleine puissance, réduisant ainsi le niveau sonore global. Enfin, la planification acoustique est appliquée : les équipements bruyants sont placés loin des zones de sommeil et de travail pour améliorer le confort des astronautes.

8. Pour une mission martienne habitée de 3 ans

8.1 Principes

Il faut prévoir un système de ventilation et des systèmes de suppression de toutes les particules, de la poussière aux molécules de COV. On peut se baser sur la masse du TCCS de l'ISS (adapté à un module dont le volume est d'environ 100 m³, soit pour environ 3 personnes) et recalculer les besoins en consommables et en pièces de rechange :



Composant	Masse approx.	Commentaire
Lit de charbon actif	1,5 – 2,5 kg	Contient 3–5 L de granules pour adsorber COV et odeurs. Volume principal mais faible poids.
Catalyseur d'oxydation	10 – 15 kg	Platine ou oxydes métalliques dans support céramique ou métallique. Assure destruction chimique des COV résiduel
Tamis moléculaire / zéolithes	20 – 25 kg	<i>Utilisé pour CO₂ et H₂O, parfois intégré au même rack. Intégré au TCSS, <u>mais pas pour purifier, donc pas comptabilisable, donné pour information.</u></i>
Ventilateurs + moteurs	15 – 20 kg	Déplacement de l'air à travers les lits de filtration. Poids significatif.
Structure et conduits internes	15 – 20 kg	Rack, conduits, supports antivibrations et fixation dans le module.
Capteurs, instrumentation, valves	5 – 8 kg	Température, pression, débit d'air, alarmes et contrôle électronique.
Masse totale TCSS	environ 53 kg	Remarque : 25 kg pour la zéolithe non pris en compte, car l'élimination du CO ₂ n'est pas abordée ici.

8.2 Principe de la double redondance

Chaque fonction critique est réalisée par trois éléments au total, 1 élément en service actif, 2 éléments de réserve (inactifs ou en attente). L'objectif est que le système continue de fonctionner même si un composant tombe en panne, et que le second de réserve permette de maintenir l'opération jusqu'au remplacement ou la fin de mission.

8.3 Calculs

On recalcule les besoins avec le principe de double redondance :

- Charbon actif (COV et odeurs)
 - Durée de vie par filtre : 12 mois
 - Cycles pour 3 ans : 3
 - Filtres par cycle : 1 en service + 2 de réserve → 3 filtres
 - Filtres totaux : $3 \times 3 = 9$ filtres
 - Masse totale : $9 \times 2 \text{ kg} \approx 18 \text{ kg}$
- Catalyseur d'oxydation (COV résiduels)
 - Durée de vie : ≥ 3 ans
 - Cycles : 1 suffisant pour 3 ans
 - Double redondance : 1 en service + 2 de réserve → 3 unités
 - Masse totale : $3 \times 12 \text{ kg} \approx 36 \text{ kg}$
- Filtres HEPA



- Durée de vie : 1 an
- Cycles pour 3 ans : 3
- Double redondance : 3 filtres par cycle
- Filtres totaux : $3 \times 3 = 9$ filtres
- Masse par filtre : 1,5 kg → Masse totale $\approx 13,5$ kg
- Ventilateurs
 - Durée de vie : 3 ans (ils durent toute la mission)
 - Redondance : double ou triple selon le flux
 - Nombre de ventilateurs pour double redondance : 3 par flux
 - Masse par ventilateur : 17 kg → Masse totale ≈ 51 kg

Masse totale (hors système de traitement du CO₂ et de la vapeur d'eau) : ~ 150 kg

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.



La Gateway est abandonnée

Nous reproduisons ci-dessous la traduction en Français d'un article de Robert Zubrin paru le 26 mars 2026 saluant l'initiative "Ignition" de la NASA, qui vise notamment à abandonner le passage par l'orbite lunaire appelée "Gateway" avant de se rendre sur la surface de la Lune. Planète Mars se réjouit également de cette adaptation du programme Artemis.

Jean-Marc Salotti, éditeur du bulletin.

Une étape audacieuse vers la Lune et au-delà

La Mars Society se félicite de l'ensemble ambitieux d'annonces politiques faites par l'administrateur de la NASA, Jared Isaacman, lors de l'événement Ignition de mardi. La décision de donner la priorité à des opérations de surface durables sur la Lune, d'augmenter fortement la cadence des missions, d'accélérer le développement de l'énergie spatiale, de lancer une mission d'hélicoptère martien et de mettre en place une chaîne logistique à vocation commerciale représente une réorientation fondamentale et attendue de longue date du programme spatial habité américain. Pour la première fois depuis des décennies, l'architecture présentée par la NASA reflète ce que la Mars Society défend depuis plus de trente ans : construire les infrastructures, établir les lignes d'approvisionnement et ouvrir la frontière.

Priorité à la surface : le bon choix

La décision d'abandonner le projet Lunar Gateway et de rediriger ses ressources vers une présence permanente à la surface est exactement le type de clarté stratégique dont le programme avait besoin. Le Gateway constituait un détour coûteux qui ajoutait de la complexité aux missions lunaires sans bénéfice ni pour la Lune ni pour Mars. L'approche par phases proposée par Isaacman — débutant par des livraisons robotiques fréquentes, évoluant vers des infrastructures semi-habitées, et aboutissant à une présence humaine continue — reflète l'architecture progressive et orientée mission que la Mars Society défend depuis longtemps.

De manière cruciale, Isaacman a affirmé que la surface lunaire servirait de terrain d'essai pour les capacités nécessaires aux futures missions vers Mars. Cette perspective est essentielle.

L'établissement d'une base lunaire n'est pas une fin en soi. Un tel avant-poste permet d'apprendre à vivre et travailler sur un autre monde, en validant les systèmes de survie en boucle fermée, l'utilisation des ressources in situ, les systèmes énergétiques de surface et le rythme opérationnel des missions habitées dans l'espace lointain. Chaque leçon tirée au pôle sud lunaire nous rapproche d'un premier pas humain sur le sol martien.



Poser les fondations

Nous avons été frappés par le choix des mots de Jared Isaacman lors de l'événement d'hier :

« Nous ne faisons pas que retourner sur la Lune, nous posons les fondations qui permettront au secteur privé de suivre. »

Ces mots portent une résonance historique forte que la Mars Society met en avant depuis des années. De la même manière que le chemin de fer transcontinental a transformé l'Ouest américain en un territoire accessible et porteur d'opportunités, la mise en place d'une infrastructure de transport spatial fiable et régulière permettrait d'ouvrir le système solaire à la science, au commerce et à l'installation humaine.

Le plan Ignition de la NASA s'inscrit clairement dans cette logique. L'extension du programme CLPS, le développement de véhicules d'exploration de surface lunaire, le recours accru à des systèmes commerciaux réutilisables pour les missions habitées, ainsi que l'objectif d'une cadence d'alunissage tous les six mois, convergent vers la création d'un véritable réseau logistique durable — condition essentielle à toute présence humaine permanente.

Cependant, si l'accélération des missions est nécessaire, les moyens pour y parvenir restent flous. L'architecture du programme Artemis demeure incohérente. Le succès de Starship comme lanceur lourd réutilisable à faible coût est plausible, mais sa masse importante le rend peu adapté comme véhicule d'atterrissage et de remontée. Il faudrait plutôt un atterrisseur réutilisable plus petit, utilisant les mêmes ergols méthane-oxygène, fonctionnant comme une navette entre orbite et surface. Aucune exigence claire d'interopérabilité n'a encore été formulée — elle devrait l'être.

Énergie nucléaire, propulsion et Mars

Nous saluons l'annonce de Space Reactor-1 Freedom, une mission de démonstration de propulsion électrique nucléaire vers Mars prévue avant fin 2028. Ce calendrier paraît toutefois optimiste, d'autant que ce système est censé soutenir une mission d'hélicoptère martien prévue la même année.

Une telle mission est une excellente idée, prolongeant le succès de Ingenuity en multipliant la mobilité des robots martiens. Mais elle pourrait être réalisée avec des technologies de propulsion existantes. La rendre dépendante d'un développement rapide de la propulsion nucléaire introduit un risque inutile.

Le réacteur nucléaire de 40 kWe envisagé jouerait un rôle essentiel pour alimenter des missions humaines sur Mars. En revanche, la propulsion électrique nucléaire n'offre pas d'avantages décisifs pour l'exploration martienne. Elle est en revanche très adaptée aux missions robotiques vers le système solaire externe, notamment pour explorer les lunes de Jupiter ou de Saturne, grâce à ses capacités de manœuvre et de transmission de données élevées.

L'énergie et la propulsion nucléaires doivent être développées, mais pour les bonnes applications,



afin d'être un atout majeur pour la science spatiale plutôt qu'un facteur de risque.

Notre rôle à l'avenir

Depuis plus de 25 ans, la Mars Society se prépare à ce moment. À travers la Mars Desert Research Station (Utah) et la Flashline Mars Arctic Research Station (Arctique canadien), elle a mené des centaines de missions analogues pour tester les opérations humaines, les facteurs psychologiques et les protocoles scientifiques nécessaires à une présence durable sur la Lune et Mars.

Nous appelons la NASA à s'appuyer sur ces données et cette expertise. Nous l'encourageons également à maintenir une orientation claire vers Mars. La Lune est une étape, pas une destination. Mars concentre les enjeux scientifiques, techniques et humains. Chaque système développé sur la Lune doit être conçu en vue de cette étape suivante.

Une nouvelle ère commence

Pendant trop longtemps, le programme spatial habité américain a été marqué par des architectures trop complexes, des retards chroniques et un manque de vision stratégique. L'initiative Ignition marque une rupture réelle. En investissant dans les infrastructures de surface, en augmentant la cadence des missions, en s'appuyant sur le secteur privé et en développant l'énergie nucléaire spatiale, la NASA pose les fondations qui permettront à l'humanité d'aller sur la Lune et, à terme, sur Mars.

La Mars Society se tient prête à soutenir pleinement cette vision.

Robert Zubrin, Président de la Mars Society, Etats-Unis d'Amérique



Trajectoire de retour libre

Par Jean-Marc Salotti, Vice-Président APM

1. Introduction

Lors de la mission Artemis 2, les astronautes ont tourné autour de la Lune avant de revenir vers la Terre, sans qu'il ait été besoin d'appliquer une nouvelle poussée, c'est ce qu'on appelle une trajectoire de retour libre. Ce n'est pas nouveau. Lors de la mission Apollo 13, un incident est survenu durant le voyage aller vers la Lune, rendant inopérant le système de propulsion du module de service qui devait permettre l'insertion en orbite lunaire et le retour vers la Terre. Il fallait donc arrêter la mission et revenir vers la Terre, sans exploiter ce système de propulsion. La solution fut de tourner autour de la Lune sans s'arrêter afin de replacer le vaisseau sur une trajectoire de retour vers la Terre, à l'aide d'une toute petite correction de trajectoire fournie par le système de propulsion du module lunaire. C'était également une trajectoire de retour "libre". Dans le contexte d'une mission martienne, si l'atterrissage était compromis et qu'il fallait revenir vers la Terre, serait-il possible de suivre également une trajectoire de retour libre (free return en Anglais) ? C'est l'option que nous allons présenter ici, bien connue des spécialistes d'astronautique, avec en référence les travaux de Sims, Longuski et Landau [1,2].

2. Problème de ponctualité planétaire

Lorsque le vaisseau spatial quitte l'attraction terrestre et se dirige vers Mars, il faut de 8 à 9 mois pour qu'il parvienne à destination si on considère une trajectoire de Hohmann, qui minimise les besoins en ergols. Pendant le voyage, la Terre se déplace et 8 mois plus tard, elle est bien loin de la position qu'elle avait le jour du lancement du vaisseau vers Mars. Voir Figure 1.

Pour cette raison, si un vaisseau tourne autour de Mars et tente de revenir vers l'orbite terrestre, à 150 millions de km du soleil, typiquement en 8 mois également, la Terre ne sera pas au rendez-vous. En effet, la Terre tourne autour du soleil plus rapidement que le vaisseau et elle est donc déjà passée, $8 \text{ mois} + 8 \text{ mois} = 16 \text{ mois}$, soit une orbite complète (12 mois) et encore 4 mois, soit $1/3$ d'orbite en plus. Non seulement il faut que le vaisseau revienne au niveau de l'orbite terrestre, mais il faut aussi qu'il soit ponctuel, c'est-à-dire qu'il doit avoir le bon timing avec la Terre, pour que les deux atteignent le même point au même moment. Etant donné que la Terre se déplace plus vite que le vaisseau autour du soleil, cela paraît impossible.

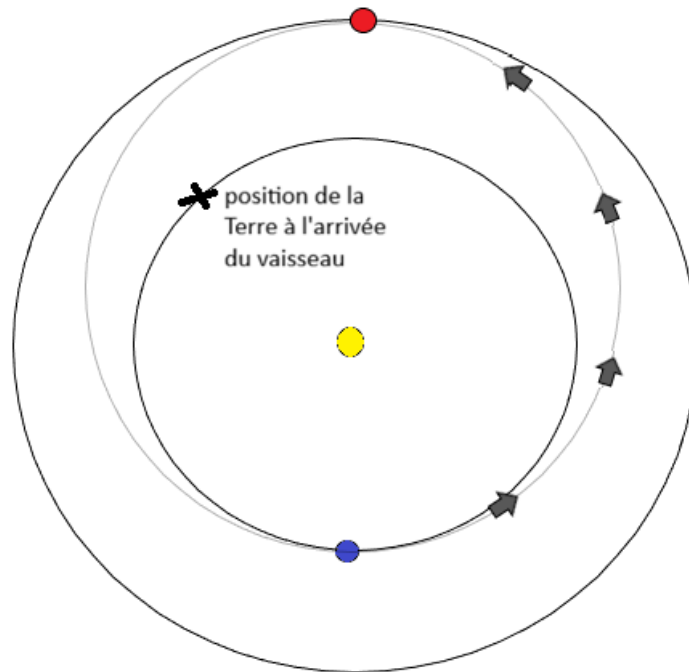


Figure 1 : En suivant une trajectoire de Hohmann (en gris), le vaisseau rejoint Mars en 8 à 9 mois. Il est possible de passer à côté de Mars et de tenter de revenir en "retour libre", mais il faudrait 8 mois de plus pour revenir au point initial ... où la Terre est déjà passée, puisqu'elle ne met que 1 an pour faire le tour complet. Remarque : le dessin des orbites a été simplifié.

3. Trajectoire de retour libre

La solution la plus simple pour un retour libre, qui n'est pas trop pénalisante au niveau énergétique, c'est de choisir une orbite plus allongée, avec une période plus longue, de sorte que lorsque le vaisseau revient au point initial, la Terre a effectué exactement 2 tours complets. Autrement dit, on synchronise le vaisseau avec la Terre pour qu'ils se retrouvent au même endroit 2 ans plus tard. Ce principe est illustré figure 2. Les éléments techniques sont indiqués dans le tableau 1. Pour se placer sur une trajectoire de retour libre, il faut tout de même une accélération de 5,1 km/s depuis l'orbite basse.

Tableau 1 : Comparaison entre trajectoire de Hohmann et trajectoire avec retour libre

Élément de la mission	Valeur
Delta V requis pour Hohmann	3,6 km/s
Delta V requis pour free return	5,1 km/s
Durée trajet aller Hohmann	8 mois
Durée trajet aller free return	6 mois

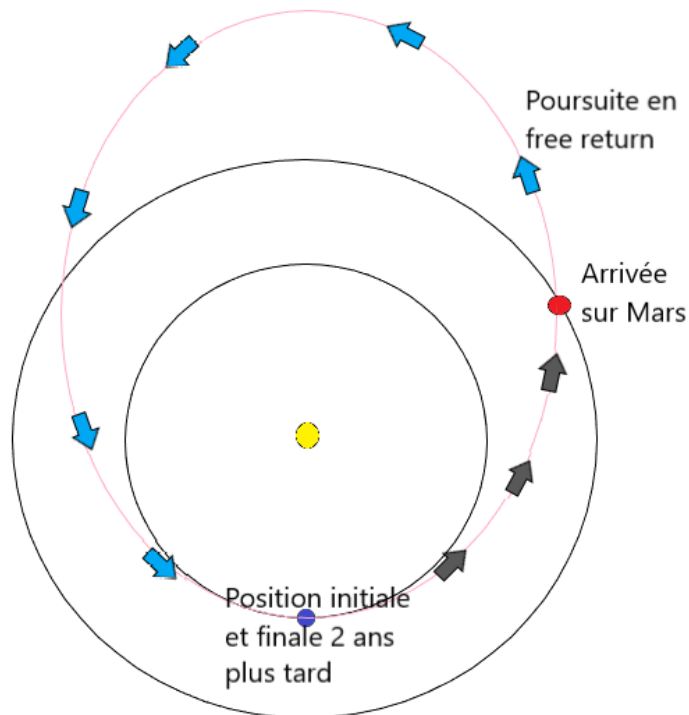


Figure 2 : Avec une vitesse initiale du vaisseau plus importante permettant d'allonger l'ellipse de l'orbite solaire, si l'insertion en orbite martienne est abandonnée et si la période est exactement de 2 ans, le vaisseau retrouvera la Terre 2 ans plus tard et il suffira d'effectuer une rentrée atmosphérique pour terminer la mission.

4. Conclusion

La trajectoire de retour libre permet de réduire un peu les risques en permettant un retour des astronautes même si le vaisseau de retour est soudainement défaillant, ou s'il est nécessaire de revenir au plus vite vers la Terre (2 ans au lieu de 3), ce qui est tout de même très long, mais peut-être préférable dans certaines circonstances. Théoriquement, il existe des variantes du retour libre, certaines exploitant la gravité de Mars et même parfois son atmosphère pour adapter la trajectoire. Ces variantes (voir [3]) sont toutefois complexes et ne sont pas présentées ici.

Références :

- [1] Jon A. Sims & James M. Longuski, Mars Free Return Trajectories, NASA Technical Reports Server, 1997.
- [2] Damon F. Landau & James M. Longuski, Trajectories for Human Missions to Mars, Part I: Impulsive Transfers, Journal of Spacecraft and Rockets, 43(5), 2006.
- [3] Mark Jesick (JPL, Caltech), Mars double-aeroflyby free returns, Acta Astronautica, Volume 138, Pages 262–275, 2017.



Vie de l'association

Par Jean-Marc Salotti, APM

Chers membres,

Voici les nouvelles de l'association :

- Réunion Mars Society européennes :

Une réunion des associations Mars Society européennes a été organisée en visioconférence par Planète Mars le vendredi 10 avril 2026. Des représentants de Belgique, Autriche, Allemagne, Suisse, Pologne, Italie, France et Royaume Uni étaient présents. Il a été décidé en particulier de mettre en place des webinaires communs, dont l'organisation est déléguée aux Italiens, qui ont une expérience dans le domaine. Une réunion est également prévue entre APM et les représentants belges pour aider à mettre en place la prochaine European Mars Conference qui aura lieu en Belgique, probablement en mars 2027 à l'Eurospace Center.

- Site web piraté :

Vous l'avez sans doute constaté, notre site web n'est plus fonctionnel. Il a en effet été piraté et nous avons été obligé de le fermer provisoirement, le temps de procéder à des vérifications et de le remettre en état. Il semble que rien n'ait été perdu, mais il est encore trop tôt pour dresser un bilan. Notez que vous pouvez toujours renouveler votre adhésion sur le site de Hello Asso :

<https://www.helloasso.com/associations/association-planete-mars/adhesions/adhesion-apm>

- 23/03/2026 : Conférence Air France : sous la tutelle de Yves Tichené, Philippe Clermont a fait une conférence sur les missions martiennes habitées dans les salons d'Air France à l'aéroport Charles de Gaulle.
- 28/03/26 : Conférence de Philippe Clermont à Chatillon St Jean (Drôme) à l'occasion du Salon du Livre Jeunesse.

DEVENIR MEMBRE :

Vous pouvez soutenir notre Association en devenant membre:

<https://www.helloasso.com/associations/association-planete-mars/adhesions/adhesion-apm>

Prenez soin de vous et en avant Mars !

Jean-Marc Salotti

Responsable du bulletin APM