

Bulletin
106
Juillet 2026

Bulletin Planète Mars

Sommaire

Editorial **P. 2**

Musk sous le charme de la sirène lunaire **P. 3**

MarsCarto: une carte planétaire interactive **P. 13**

Elimination du CO₂ **P. 18**

Vie de l'association. **P. 28**

ANNEXE : Procès verbal de l'AGO **P. 30**





Bulletin n°106, juillet 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.

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

Editeur du bulletin : Jean-Marc Salotti

SOMMAIRE

Editorial :	2
Musk sous le charme de la sirène lunaire	3
MarsCarto: une carte planétaire interactive de nouvelle génération	13
Elimination du CO ₂	18
Vie de l'association	28
ANNEXE : Procès verbal de l'assemblée générale ordinaire.....	30



Editorial :

Par Jean-Marc Salotti, Président Planète Mars

Think tank Planète Mars

Peut-être l'avez-vous remarqué, le titre de ce bulletin a changé, ce n'est plus Bulletin APM, mais bulletin Planète Mars.

Planète Mars, ou association Planète Mars, comment se présenter à l'extérieur ? La différence pourrait sembler futile, mais elle est cependant importante. Certes, nous sommes une association loi 1901, donc le qualificatif d'association est parfaitement approprié. Cependant, si notre rôle ne se limite pas à faire des conférences et participer à des expositions, si en particulier nous souhaitons nous présenter comme une société savante capable de conseiller les décideurs et les industriels, il peut être judicieux de se présenter comme le "Think Tank Planète Mars". La fonction est ainsi mise en avant et la nature organisationnelle est reléguée au second plan, ce qui peut avoir un impact sur la façon dont nous sommes perçus. Au niveau européen, les autres Mars Societies ont également adopté une stratégie de communication qui va dans ce sens. Par exemple, pour renforcer les liens avec la société civile et les partenaires industriels, la Mars Society italienne a créé des entreprises visant à exploiter les usages duaux des technologies en lien avec l'exploration martienne. Il y a également un cas similaire avec un laboratoire de Bremen en Allemagne. Selon le cas, donc, de manière opportuniste, nous accentuerons le côté Think tank ou le côté associatif. Pour ce qui est du bulletin, en tant qu'éditeur, je vous propose de renommer le bulletin "Bulletin Planète Mars" (à la place de Bulletin APM).

Jean-Marc Salotti



Musk sous le charme de la sirène lunaire

Par Robert Zubrin, Président de la Mars society, traduction d'Etienne Martinache, Planète Mars

Publié le 5 mars 2026 sur quillette.com



Le 8 février, le PDG de SpaceX, Elon Musk, a tweeté :

"Pour ceux qui l'ignoreraient, SpaceX vient de se fixer comme objectif la construction d'une cité autonome sur la Lune, car nous pourrions y parvenir en moins de dix ans, alors que sur Mars il nous faudrait plus de vingt ans. La mission de SpaceX reste la même : étendre aux étoiles la conscience et la vie telles que nous les connaissons... Cela dit, SpaceX s'efforcera également de bâtir une cité martienne et commencera à le faire dans environ cinq à sept ans, mais la priorité absolue est de sécuriser l'avenir de la civilisation, et sur la Lune ce sera plus rapide."

Si Musk tient effectivement parole, il fera la plus grosse erreur de sa vie. Il est impossible de construire une cité autonome sur la Lune car beaucoup des matériaux nécessaires pour soutenir la vie - sans parler d'une civilisation technologique - ne sont pas disponibles sur place. Et ceux qui existent le sont sous des formes qui rendent leur transformation en ressources utiles bien plus difficile que sur Terre ou sur Mars.



Pourquoi la Lune n'est pas adaptée à la colonisation

Nous sommes tous constitués de composés carbonés, comme tout ce que nous consommons, ou les vêtements que nous portons, et la plupart des objets que nous utilisons. Or il n'y a pas de carbone sur la Lune. Les autres constituants principaux de la vie sont l'eau et l'azote. Mais à l'exception des dépôts de glace des cratères ultrafroids (-230°C) et plongés dans l'ombre en permanence, proches du pôle Sud, l'eau n'est présente dans le sol (régolithe) lunaire qu'à teneur de quelques parties par million. S'il y avait du béton sur la Lune, les colons lunaires l'exploiteraient pour en extraire son contenu en eau ! Et l'azote est totalement absent.

En revanche, outre ses calottes polaires, Mars possède des régions de boue gelée de la taille d'un continent, composées à soixante pour cent d'eau en masse, ainsi que d'immenses formations glaciaires de glace d'eau pure dans son hémisphère nord qui s'étendent jusqu'à 38° de latitude Nord - la latitude d'Athènes sur Terre. Le carbone et l'azote sont facilement accessibles partout, puisque l'atmosphère martienne est composée à 95% de dioxyde de carbone (CO_2) et de 3% d'azote.

La Lune possède un peu d'oxygène, mais intégré dans des roches, et les processus complexes nécessaires pour l'en extraire exigent à la fois beaucoup d'énergie et des températures très élevées qui limitent la durée de vie de l'équipement d'extraction. Il est difficile, mais possible, d'extraire l'oxygène lunaire du régolithe. Développer la technologie et les installations nécessaires serait effectivement réaliste pour un programme de base lunaire. Mais sur Mars, eau et CO_2 peuvent facilement servir à produire de l'oxygène à température ambiante via la photosynthèse, l'électrolyse de l'eau ou d'autres techniques simples de génie chimique que l'on pourrait mettre en œuvre lors de la toute première mission habitée.

Contrairement à la Terre ou à Mars, la Lune n'a pas connu d'activité hydrologique au cours de son histoire. Elle ne possède donc pas de minerais concentrés, nécessaires à l'extraction et à la production pratiques de métaux utiles et d'autres produits chimiques. La concentration moyenne de cuivre sur Terre n'est que de soixante parties par million. Pourtant, les humains en ont fait un usage intensif depuis l'âge du bronze, car les processus naturels l'ont concentré en minerais. Nous possédons également d'énormes quantités de sable constitué de silice presque pure, d'oxydes de fer et d'aluminium hautement enrichis, ainsi que des dépôts de sel. Mars était autrefois une planète chaude et humide, elle possède donc aussi de riches minéraux. Mais aucune de ces substances n'existe sur la Lune, qui n'est qu'un immense agrégat de débris rocheux. C'est un point très important, sur lequel nous reviendrons plus tard.

Pour aggraver les choses, puisque la Lune ne possède pas d'atmosphère pour la protéger des éruptions solaires, les plantes devraient y être cultivées dans des serres souterraines éclairées par des projecteurs électriques alimentés par de coûteux réacteurs nucléaires ou des panneaux solaires. En revanche, bien que l'atmosphère martienne soit ténue, elle est suffisamment dense pour protéger les plantes des éruptions solaires. Cela permettrait de les cultiver sur la surface martienne dans des serres à parois minces, et d'utiliser la lumière solaire naturelle pour la photosynthèse. C'est très



important, car les plantes ont besoin de beaucoup de lumière. Par exemple, pour produire assez de lumière pour éclairer l'ensemble de l'État du Maryland (32 000 km²), il faudrait 32 000 GW, une puissance environ trois fois supérieure à celle actuellement générée par l'ensemble de l'humanité.

Par ailleurs, bien que la Lune soit plus proche de la Terre et plus facilement accessible, la quantité de propergol nécessaire pour atteindre la surface lunaire depuis l'orbite terrestre basse (Low Earth Orbit ou LEO) est de cinquante pour cent supérieure à celle qu'il nous faut pour aller sur Mars. En effet, les quantités de propergol ne dépendent pas de la distance parcourue, mais du différentiel de vitesse - le « deltaV » - qu'exige la mission. Il faut un deltaV de 6 km/s pour atteindre la surface lunaire depuis l'orbite terrestre basse (LEO). Mais comme Mars possède une atmosphère qui peut être mise à profit pour ralentir un vaisseau spatial sans consommer de propergol, il ne faut que 4 km/s de deltaV pour atteindre la surface martienne depuis la LEO. Or la quantité de propergol nécessaire pour accomplir une mission augmente de façon exponentielle avec le rapport « deltaV » sur « vitesse d'éjection des gaz », qui pour le vaisseau de SpaceX est de 3,7 km/s. Cette différence de deltaV a donc un gros impact sur la mission.

Mais la réalité est encore plus défavorable, car il serait bien plus difficile de produire sur la Lune que sur Mars le carburant pour le voyage de retour. Les quantités de propergol nécessaires à un aller-retour lunaire seraient trois fois supérieures à celles d'une mission martienne. Si l'on se base sur les chiffres de SpaceX, le Starship pèse cent tonnes et pourra transporter cent tonnes supplémentaires sur orbite. Un Starship voyageant vers la Lune avec cent tonnes de cargaison et revenant à vide devra être ravitaillé dans l'espace par quatorze vols de Starships. Même si le Starship n'effectuait qu'un voyage aller, ou si l'oxygène lunaire était disponible pour le vol de retour, il lui faudrait tout de même huit Starships ravitailleurs. Le même aller-retour vers Mars ne nécessiterait que quatre ravitailleurs.

Pour l'ère à venir de la colonisation spatiale, la Lune sera à Mars ce que le Groenland était à l'Amérique du Nord durant l'ère de l'expansion maritime européenne. Le Groenland était plus proche, et les Européens l'ont visité en premier. Mais il était trop pauvre pour soutenir un nouveau rameau de la civilisation humaine. Si Musk veut réellement bâtir une « cité autonome » pour « assurer l'avenir de la civilisation », il a choisi le mauvais endroit. Mais pourquoi ?

Je connais personnellement Musk et je suis sûr qu'il connaît la plupart des faits cités ci-dessus. Le domaine dans lequel il est moins informé est la différence de difficulté associée aux technologies nécessaires pour transformer les matériaux lunaires et martiens en ressources utiles. Il n'est pas le seul : tous les processus d'« utilisation de ressources in situ » dans l'espace (In Situ Resource Utilization ou ISRU) paraissent très simples sur le papier. Mais en réalité, l'ISRU lunaire est de plusieurs ordres de grandeur plus difficile à réaliser que l'ISRU martien. Je le sais parce que j'ai dirigé une entreprise qui a travaillé sur les deux projets pendant vingt-sept ans.

Mais Musk connaît certainement les besoins en propulsion de sa mission et l'absence totale de matériaux essentiels à la colonisation sur la Lune. Donc son tweet est absurde. Il a peut-être détourné



le regard vers la Lune, mais ce n'est certainement pas dans le but d'y construire une cité autonome.

Peut-être Musk annonce-t-il avoir porté son attention vers la Lune parce que c'est ce que la NASA est prête à financer. S'il s'agissait d'une autre entreprise aérospatiale, ce serait plausible. En effet, Musk pourrait utiliser le Starship pour construire une base lunaire nettement plus grande que tout ce que la NASA a jamais envisagé. Avec un rythme de lancement d'environ un Starship par mois, SpaceX pourrait envoyer deux Starships sur la Lune tous les deux ans, l'un pour un aller simple et l'autre pour un aller-retour, et y déposer deux cents tonnes de cargaison au passage. Cela suffirait à ravitailler une base lunaire de cinquante personnes, soit environ dix fois la taille de la base prévue par la NASA. Mais entretenir une base scientifique de cinquante personnes avec des Starships depuis la Terre est une chose, entretenir une cité de cinq cent mille habitants en est une autre. La première entreprise est faisable, l'autre non.

La NASA pourrait contribuer à un tel programme de base lunaire. Mais même si Musk est sans doute prêt à récupérer tous les financements publics possibles, cela ne suffirait pas à le faire changer de cap - et cela ne devrait pas suffire. Mais si Musk ne construit pas une cité autonome ou ne rallie pas les objectifs de la NASA, quelle idée a-t-il en tête ?

La nouvelle course à la Lune : Artemis II et les ambitions lunaires chinoises

La course est lancée pour construire une base d'habitation humaine permanente sur la Lune.



Image NASA.

A la poursuite du mirage d'O'Neill

Je crois que Musk est convaincu de pouvoir lancer une gigantesque entreprise sur la Lune. Dans un discours du 11 février, il a affirmé que la cité lunaire pourrait gagner des milliards en utilisant des



catapultes électromagnétiques pour exporter chaque année un Téra watt de panneaux solaires et d'autres matériaux, afin de construire d'immenses constellations de satellites d'intelligence artificielle (IA) en orbite terrestre basse.

Cela correspondrait au *modus operandi* habituel de Musk, qui s'est avéré assez efficace jusqu'à présent. Il avance étape par étape, chaque étape constitue la base financière qui permet la suivante. Il a cofondé PayPal, ce qui lui a permis de fonder SpaceX. Le Falcon 9 de SpaceX est devenu une source de revenus qui lui a permis de fonder Starlink. Starlink ne l'a pas seulement rendu encore plus riche, mais elle l'a rendu bien plus puissant que tout autre entrepreneur sur Terre. Une immense constellation de satellites IA rendue possible par un complexe industriel photovoltaïque construit sur la Lune pourrait être la prochaine grande étape de Musk.

Où alors ce sera peut-être le coup d'arrêt à sa série de victoires. Musk voit certainement très grand, et la plupart de ses projets sont des réussites. Mais ce dernier projet a-t-il un sens ? Ses partisans vous diront que des centres informatiques situés dans l'espace auront accès à une énergie solaire illimitée. Mais l'énergie solaire spatiale est bien plus chère que sur Terre - qui elle-même n'est pas vraiment compétitive avec les combustibles fossiles, l'hydroélectricité ou le nucléaire. Les défenseurs du projet affirment qu'ils pourront fabriquer une quantité illimitée de panneaux solaires sur la Lune, car on y trouve beaucoup de roches silicatées. Mais les processus nécessaires à la production du silicium ultrapur que requiert la fabrication de panneaux photovoltaïques sont incroyablement complexes et exigent des quantités massives d'éléments comme le fluor et le chlore que l'on ne trouve pas sur la Lune.

En réalité, le plan de Musk n'est pas seulement impraticable mais aussi pas très original. L'idée de financer le développement spatial par la fabrication de panneaux photovoltaïques lunaires est au cœur de la thèse de « The High Frontier », un livre culte publié en 1976 par le professeur de Princeton Gerard O'Neill. Selon O'Neill, on peut facilement fabriquer des panneaux photovoltaïques à partir de roches lunaires et les expédier dans l'espace à l'aide de canons électromagnétiques, qu'il appelle « lanceurs de masse ». Une fois dans l'espace, les panneaux solaires seraient assemblés en immenses centrales par les habitants de gigantesques colonies spatiales dérivantes. D'énormes émetteurs micro-ondes transmettraient alors la puissance abondante de ces réseaux vers la Terre pour la vendre avec un énorme profit. Finalement, toutes les industries terrestres polluantes pourraient être déplacées dans l'espace, permettant aux humains de jouir d'un environnement vert et immaculé.

Cette thèse a captivé l'imagination de Jeff Bezos et joué un rôle majeur dans sa décision de fonder Blue Origin. Mais Musk reconnut très vite que c'était un projet délirant, et ne manqua pas de le faire savoir. Pourtant, il vient d'adopter une variante de ce projet, la seule différence significative étant qu'au lieu de transmettre de l'électricité, les satellites de Musk transmettront de l'information. Bezos est un dilettante en matière spatiale, il n'est donc pas étonnant qu'il ait conservé sa foi originelle dans les thèses d'O'Neill. Mais Musk est très informé, son enthousiasme pour le projet lunaire est donc surprenant.



Quelques difficultés techniques auxquelles le plan de Musk est confronté

Musk possède déjà une entreprise d'énergie solaire, initialement appelée SolarCity, financée par ses cousins Peter et Lyndon Rive, et fait désormais partie de Tesla Energy. En vingt ans d'existence, en tant qu'entité autonome puis partie intégrante de Tesla, elle a installé un total de 4 GW de puissance solaire sur Terre. Cela représente 0,2 GW par an en moyenne, les panneaux eux-mêmes étant fournis par d'autres fabricants. Aujourd'hui, Musk voudrait fabriquer 1000 GW de panneaux solaires par an sur la Lune, et les installer sur des satellites IA, qu'il prévoit de construire lui-même.

L'augmentation d'échelle proposée par Musk est fantastique, mais ce n'est que le premier des problèmes. Sur Terre, on fabrique les panneaux solaires en chauffant du sable de silice pur - qui n'existe pas sur la Lune - à 2000°C et en le faisant réagir avec du carbone - qui n'existe pas non plus sur la Lune - pour produire du silicium métallique et du CO₂ purs à 99%. Mais pour fabriquer des panneaux photovoltaïques, il faut du silicium pur à 99,9999 %. Pour y parvenir, il faut faire réagir le silicium avec de l'hydrogène et du chlore - peu abondant sur la Lune - afin de produire du trichlorosilane. Ce gaz peut ensuite être distillé et décomposé pour libérer du silicium ultrapur. Le silicium en fusion est ensuite versé dans des moules pour produire du silicium polycristallin, découpé en plaquettes de 0,15mm d'épaisseur, dopées au bore et au phosphore puis recouvertes d'une couche anti réfléchissante de nitrure de silicium (Si₃N₄), après quoi des grilles métalliques sont fixées à l'avant et à l'arrière de chaque panneau.

Non seulement rien de tel n'a jamais été fait sur la Lune, mais rien de tel n'a jamais été fait sur Terre dans une chambre à vide utilisant des matières premières de simulateurs de sol lunaires. Nous connaissons, depuis les missions Apollo, la composition précise du régolithe lunaire, nous savons donc produire des simulateurs de sol lunaire, et cela fait un demi-siècle qu'O'Neill a publié son livre, dans lequel il décrit cette technologie de fabrication comme étant la clé du développement spatial. Pourtant, jamais encore aucun kilowatt de panneaux solaires dérivés de roche lunaire n'a été produit par quiconque dans un laboratoire sur Terre dans des conditions même vaguement proches de celles de la surface lunaire. Le problème est que, bien qu'il y ait beaucoup de silicium sur la Lune, il n'est pas présent sous forme de sable de silice pur, mais dans des roches contenant des concentrations de dioxyde de silicium de l'ordre de 40%, mélangé à tout un ensemble d'autres matériaux, dont le fer, l'aluminium, le magnésium et les oxydes de calcium. Il serait même difficile de fabriquer du verre de qualité optique à partir d'un matériau de si mauvaise qualité. Si l'on réduisait ces substances, soit en utilisant la réduction carbothermique, soit un procédé novateur à haute température appelé électrolyse magmatique, on n'obtiendrait pas un silicium métallurgique pur à 99%. On obtiendrait un mélange inutile de toutes sortes de métaux, qui devrait passer par toute une série de processus supplémentaires avant de pouvoir être raffiné. Produire de l'oxygène de la qualité nécessaire à un propergol à partir du régolithe lunaire est possible, bien que difficile, car on peut extraire de l'oxygène pur à partir d'un mélange de roches oxydées. Mais fabriquer des métaux purs de haute qualité à partir d'une roche de mauvaise qualité est une toute autre affaire. Et même si l'on parvenait à résoudre le



problème des opérations de fabrication complexes et gourmandes en énergie nécessaires à la transformation de ce matériau en silicium pur et le silicium en panneaux solaires, il faudrait ensuite transporter les panneaux vers un endroit en orbite terrestre où ils pourraient être installés sur des satellites IA, précédemment lancés depuis la Terre.

Musk voudrait envoyer chaque année un Téra watt (TW) de panneaux solaires depuis la Lune vers l'orbite terrestre basse. Les panneaux photovoltaïques fonctionnant à une distance de la Terre au Soleil pèsent environ 20kg par kilowatt généré. Donc l'exportation d'un TW par an nécessiterait un rythme de lancement annuel de 20 millions de tonnes - soit environ 2280 tonnes par heure, soit l'équivalent du chargement de 23 vaisseaux spatiaux. Pour contourner cette exigence plutôt contraignante, Musk, comme O'Neill, propose d'utiliser des lanceurs de masse pour expédier les panneaux dans l'espace.

Pour lancer les panneaux depuis la Lune sur une trajectoire qui les renvoie sur Terre il faut les accélérer jusqu'à une vitesse de 3km/s. Un lanceur de masse capable de les accélérer à 20g/s ferait 22,5km de long. Même en supposant qu'on les regroupe en conteneurs d'une tonne, avec un rendement de 100%, chaque lancement nécessiterait 4,5GJ d'énergie et quinze secondes d'accélération dans le lanceur de masse. Pour atteindre l'objectif de Musk, il faudrait lancer dix conteneurs toutes les quinze secondes. Même en supposant qu'ils fonctionnent à pleine capacité et sans interruption, cela implique l'opération simultanée d'au moins dix de ces lanceurs de masse.

Et tout cela juste pour envoyer les panneaux vers la Terre. Pour les capturer en orbite terrestre de manière contrôlée et les amener à un endroit où on pourrait les installer sur les satellites IA, les conteneurs devraient disposer d'un système combiné de capture aérodynamique, de propulsion et de contrôle, qui pèserait probablement au moins autant que les charges utiles des panneaux photovoltaïques. Ces systèmes de contrôle devraient également être fabriqués sur la Lune et leur lancement doublerait le besoin de livraison des lanceurs de masse. Bref, ce plan est absurde. Il était déjà absurde quand O'Neill l'a évoqué pour la première fois, et il est toujours aussi insensé aujourd'hui.

Un plan bien plus réaliste consisterait simplement à lancer les satellites IA, équipés de leurs panneaux solaires, depuis la Terre. Cela nécessiterait de mobiliser la capacité totale de production photovoltaïque de la planète, soit environ 1TW par an. Si nous nous contentons d'un dixième du plan initial de Musk, la Chine pourrait répondre à la demande. Le lancement des seuls panneaux pour ce plan réduit nécessiterait deux vaisseaux par heure. Mais il serait préférable de lancer directement les satellites déjà équipés de leurs panneaux, ce qui nécessiterait quatre vaisseaux par heure, soit 168 par semaine. C'est un rythme cinquante fois plus élevé que les trois tirs hebdomadaires que SpaceX a déjà effectué avec son lanceur actuel de haute qualité, le Falcon 9. Mais c'est encore dans le domaine du faisable. En effet, plusieurs autres entreprises spatiales affirment désormais avoir des projets de cette envergure. Mais bien sûr, en procédant ainsi, Musk n'aurait plus aucune raison de construire une cité lunaire.



Considérations commerciales malheureuses

Toute entreprise réalisable doit être non seulement faisable, mais aussi pratique, c'est-à-dire moins coûteuse que toute alternative facilement disponible. Or une constellation de satellites IA lancée depuis la Terre ne répond pas non plus à ce critère.

Le système de communication Starlink de Musk est, de loin, la plus grande constellation de satellites de l'histoire. Au moment où j'écris ces lignes, environ 9600 satellites Starlink sont en orbite terrestre. L'ancien modèle v1 pèse entre 260 et 310kg, tandis que la version v2 Mini, désormais la plus couramment lancée, pèse environ 800kg. Chacun génère environ 20 kilowatts d'électricité et a coûté à SpaceX environ 2 millions de dollars pour sa construction et son lancement. Au cours de son programme de lancement de Starlinks sur près de sept ans, SpaceX a lancé un total de 0,2GW de panneaux solaires spatiaux, soit un rythme moyen de 0,03GW par an. Elle l'a fait pour un coût de 100 000 dollars par kilowatt en orbite installé et les auxiliaires nécessaires à son utilisation.

C'est un exploit très impressionnant, bien que l'ensemble de cette entreprise ne représente qu'un trente millièmes de l'envergure du plan de lancement de satellites depuis la Lune proposé par Musk. Pourtant, il a changé le monde. Réaliser le même type d'exploit avec des satellites IA reste encore un rêve lointain pour les concurrents de SpaceX, mais si Musk le décidait, il y parviendrait probablement. Mais ce ne serait pas économique. Alors que Starlink doit être effectivement positionné en orbite pour remplir sa fonction de communication globale, un processeur de données IA peut être installé n'importe où. Un kilowatt, c'est à peu près la puissance d'un micro-ondes. Le coût actuel d'installation de l'énergie solaire domestique aux États-Unis est d'environ 3000 dollars par kilowatt. Un générateur portable de 100kWe au gaz naturel coûte environ 100 000 dollars, soit 1 000 dollars par kilowatt, et il peut fonctionner au gaz de torchère, qui est presque gratuit. Le coût moyen du kilowatt fourni par une grande centrale nucléaire est de 5000 à 10 000 dollars, tandis que celui des nouvelles petites centrales nucléaires modulaires devrait être d'environ 3000 dollars. Il serait donc bien plus simple et moins coûteux d'installer une unité de traitement de données IA sur un toit ou dans un bureau, un terrain vague, un navire, un radeau, un sous-marin ou n'importe où sur cette planète que sur un satellite en orbite terrestre. Que la constellation soit lancée depuis la Terre ou la Lune, le business plan des centres de données IA en orbite ne tient tout simplement pas la route !

L'idée est cependant plutôt à la mode. L'IA est la nouveauté émergente, la nouvelle ruée vers l'or. Comme l'internet des années 90, pendant toute la prochaine décennie, l'IA promet d'être le terrain de chasse béni où se bâtiront sans doute d'immenses fortunes. Si une entreprise spatiale peut offrir l'accès à ce paradis des investisseurs, sa valorisation pourrait augmenter de façon spectaculaire. Vu sous cet angle, le lancement simultané du plan « De la Poussière lunaire à l'IA » (« Moondust to AI ») de Musk, de la fusion et de la prochaine introduction en bourse de SpaceX-XAI est parfaitement logique. Si le marché suit, cela pourrait rapporter à Musk une vraie fortune. Mais cela ne fera pas de l'humanité une espèce multi-planétaire.



Comment rendre l'humanité multi-planétaire

Si la colonisation spatiale est rentable, la « Main Invisible du Marché » s'occupera du reste. C'est pourquoi beaucoup de ceux qui croient que l'expansion humaine dans le cosmos est importante pour notre avenir ont prétendu que cela rapporterait de l'argent. Malheureusement, tous les business plans basés sur l'importation de matériaux communs d'autres mondes vers la Terre ou vers l'orbite terrestre sont irréalistes, car il y aura toujours une source beaucoup moins coûteuse de ces produits à portée de la main. Les activités commerciales qui tirent parti des avantages uniques des positions orbitales - telles que les relais de communication ou la télédétection - ont été très rentables et d'autres entreprises pourraient profiter à l'avenir des environnements uniques en termes d'apesanteur et de vide qu'offre l'orbite terrestre basse. Mais rien de tout cela ne favorisera la colonisation spatiale.

Si les humains doivent migrer vers d'autres mondes, ce sera pour l'espoir, pas par cupidité. Il n'existe aucun business plan crédible de colonisation de la Lune ou de Mars qui offre un retour sur investissement rentable en un temps raisonnable, moins encore un bénéfice plus élevé ou plus rapide que de nombreuses autres opportunités d'investissement à risque beaucoup plus faible ailleurs. Mais il est des raisons bien plus importantes de le faire.

Dans l'espace, la méritocratie règnera en maître

Ceux qui voyageront vers Mars ne débattront pas de la liberté d'entreprendre, de la bureaucratie ou du contrôle étatique des moyens de production. Ils ne se soucieront pas de l'ethnie ou de l'identité de genre de leurs pairs. Ils seront trop occupés à essayer de survivre.

Il n'est pas nécessaire d'aller dans l'espace pour gagner de l'argent. Il y a de nombreuses façons plus simples de gagner de l'argent sur Terre. Nous ne devons pas non plus aller dans l'espace pour offrir un refuge à quelques élus et leur permettre d'échapper à la destruction future, supposée inévitable, de la civilisation humaine sur Terre. Une telle motivation serait non seulement moralement répugnante, mais totalement irréaliste. Il faudra des siècles avant que des sociétés extraterrestres puissent vivre en autarcie et constituer des sociétés indépendantes de la planète-mère.

Non, nous ne partons pas dans l'espace pour désertier la Terre. Nous allons dans l'espace pour créer de nouvelles sociétés qui ajouteront leurs pouvoirs créatifs à ceux de l'ensemble de la civilisation humaine. Cela sera en final extrêmement profitable - non pas pour les investisseurs, mais pour l'humanité. Les sociétés par actions qui ont financé les colonies de Jamestown et de Nouvelle-Angleterre ont fait faillite. Mais leurs actions ont conduit à la création d'une nouvelle nation qui a démontré la puissance et la valeur d'une société fondée sur la liberté individuelle et inondé le monde des bienfaits de ses inventions, depuis les bateaux à vapeur, le télégraphe, la lumière électrique, l'enregistrement du son, le cinéma, les avions, les automobiles produites en masse jusqu'à la télévision, l'énergie nucléaire, les satellites de communication, les ordinateurs domestiques, Internet, les iPhones et l'intelligence artificielle.

Voilà ce que nous promet la colonisation de l'espace. La question est de savoir si l'ambition de



Musk est à la hauteur de l'enjeu.

Je connais Musk. Sa motivation profonde est d'atteindre ce que les anciens Grecs appelaient le kleos, la gloire éternelle, pour avoir accompli de grandes actions. Tous les humains partagent cette passion, à des degrés divers. C'est sans doute également mon cas. Mais avec Musk, c'est une passion dévorante. C'est cette passion qui a motivé ses grandes réalisations, notamment la création de SpaceX et de Tesla. Elle a aussi un côté pathologique, comme en témoigne sa réaction de violente colère quand une équipe de plongeurs dirigée par les Britanniques lui a volé la vedette en sauvant avant lui les garçons qui étaient coincés dans une grotte en Thaïlande. Mais avant de le critiquer, demandez-vous qui d'autre avait essayé de sauver ces garçons.

Musk est aussi très doué pour gagner de l'argent et il y prend plaisir. Cette seconde passion est honorable, car elle lui a donné les moyens de poursuivre la première. Mais compte tenu de sa fortune inégalée, combien d'argent supplémentaire lui faut-il pour établir l'humanité sur Mars ?

Bien que sa « Moon City » soit un fantasme, Musk aurait les moyens à court terme d'établir et de soutenir une base lunaire de cinquante personnes, car un rythme moyen de lancement d'un vaisseau spatial par mois suffirait à expédier cent tonnes par an sur la Lune. Mais le même rythme de lancement permettrait d'envoyer une charge utile deux fois plus grande sur Mars, et d'y faire vivre beaucoup plus de monde, car les matériaux nécessaires à la création de ressources y sont beaucoup plus abondants et accessibles que sur la Lune. Un tel village martien pourrait constituer une base agricole et industrielle pour soutenir une présence humaine en constante expansion sur la Planète Rouge.

La diversion de Musk vers la Lune est une impasse technique dont le seul objectif est sans doute de maintenir la confiance des investisseurs dans sa quête d'un eldorado lunaire. Pour le même effort, il pourrait semer les graines d'un nouveau rameau de la civilisation humaine sur Mars.

Le pouvoir corrompt, et il rend aussi dépendant. L'anneau magique de Tolkien accordait à ses propriétaires un immense pouvoir, mais il les réduisait en esclavage par la même occasion. Musk a acquis une fortune fantastique, qui pourrait lui permettre de réaliser quelque chose de vraiment grandiose. Ou le corrompre au point de consacrer les dernières années de sa carrière à une quête vaine et sans fin pour gagner toujours plus.

Si Musk veut vraiment mériter le kleos dont jouira celui qui mènera l'humanité hors de son berceau, il devra trouver la force de repousser la tentation du profit et rester motivé par l'espoir d'une grandeur authentique. S'il en est incapable, nous devons chercher ailleurs.

Robert Zubrin

Dr Robert Zubrin est un ingénieur aérospatial américain, auteur de nombreux ouvrages, dont le plus récent est « Mars, Le Nouveau Monde: Ce que nous pouvons créer sur la planète rouge »



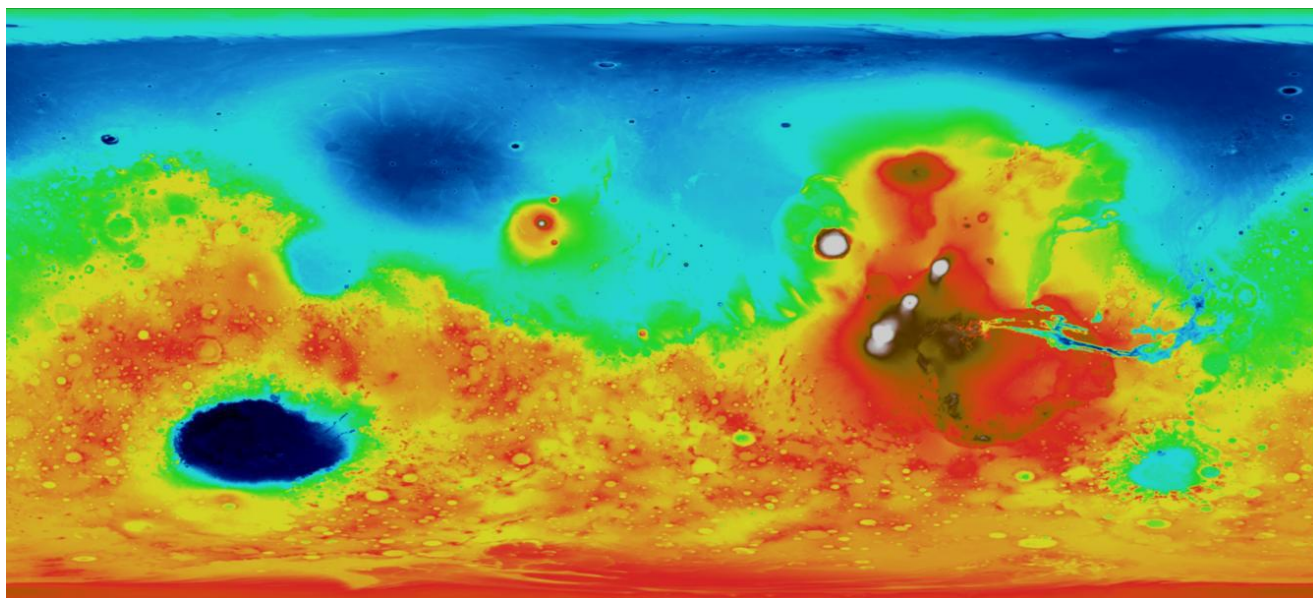
MarsCarto: une carte planétaire interactive de nouvelle génération

Mikita Belikau (mikita87@gmail.com)

Constantin Greffe - Conseiller Technique - (marscarto@constantingreffe.fr)

1. Introduction

Les décennies d'exploration martienne nous ont légué des quantités astronomiques de donnée géospatiale. L'exploration en ligne de cette donnée a longtemps été un défi. Les Systèmes d'Information Géographique historiques requièrent souvent de lourdes applications de bureaux, dépendant en général de pondéreux serveurs en backend rapidement en difficulté pour assurer un rendu fluide des millions de points de ces données. Cet article présente **MarsCarto** (<https://marscarto.com>), une application cartographique web moderne démocratisant l'accès aux données géospatiales martiennes et à leur analyse dynamique. Construite sur des formats cloud-natifs et sur des calculs dans le navigateur, Marscarto est une expérience interactive opérant intégralement dans le navigateur de l'utilisateur finale, sans dépendance à un backend traditionnel.



2. Objectifs

Le projet a l'ambition de devenir le pont entre le monde académique et l'industrie aérospatiale, via la fusion de ces données complexes et hétérogènes dans une plateforme performante, Marscarto, un outil commun aux chercheurs (planétologues, physiciens, astrobiologistes) et ingénieurs de planification et programmation de mission pour explorer, mener des recherches, planifier et analyser efficacement. À ces fins, le projet repose sur 4 piliers :



1) Une portée globale avec une précision locale : la planète entière, pas quelques sites isolés. Les parcelles dont les données sont en haute définition (comme le cratère Jezero) sont intégrés sans couture dans un contexte globale continu. La génération de cette vue planétaire s'inspire et s'appuie d'initiatives communautaires exceptionnelles telles que OpenPlanetaryMap (OPM) et les travaux de cartographie globale de Casey Handmer.

2) Performance : le rendu simultané de jeux de données massif - les centaines de milliers de cratères d'impact, les contours topographiques complexes, la mosaïque haute définition de Murray Lab, tout cela avec des performance au niveau de Google Maps.

3) Ergonomie : retrait des barrières à l'entrée. Quiconque a un navigateur moderne peut explorer la géologie et topographie martienne sans être contraint d'installer des mastodontes téléchargeant des giga-octets de données brutes pour ensuite se battre avec les formats de données et les interfaces.

4) Analyse interactive sans doctorat : bien plus qu'une visionneuse statique. L'objectif est de fournir un outil d'analyse dynamique dans lequel les utilisateurs cliquent, filtrent et exécutent des requêtes géospatiales sans formation scientifique formelle avancée.

3. Le comment : architecture technique

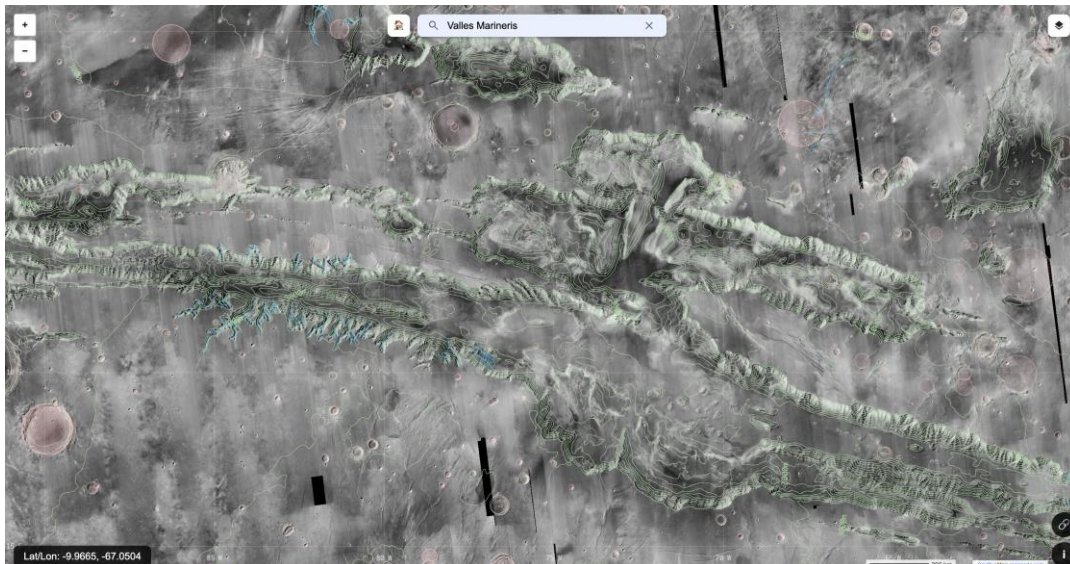
Pour atteindre ces objectifs, MarsCarto est construit avec la pile technologique de pointe pour le geospatial « serverless »:

- **Deck.gl:** framework de visualisation Deck.GL basé sur WebGL, bientôt WebGPU - accélération matérielle du rendu via la carte graphique. La carte peut afficher des millions de polygones (cratères et lacs) et des couches matricielles (raster) massive. Nous avons étudiés différentes technologies, telles qu'OpenLayers, Leaflet, etc., mais aucune d'entre elles ne tenait la charge.
- **PMTiles:** au lieu d'héberger un serveur de tiles traditionnel, la carte utilise les formats PMTiles et GeoParquet. Les PMTiles sont des archives optimisées pour le cloud, en un seul fichier, hébergées sur un simple espace de stockage (comme Amazon S3 ou Cloudflare R2). Les zoom et panoramiques de l'utilisateur sont traduits par le navigateur en requêtes HTTP Range pour récupérer le strict nécessaire pour la vue actuelle.
- **GeoParquet:** le format GeoParquet offre d'excellentes performances et une très bonne compression des données. Ce format est utilisé à la fois pour la représentation statique et l'analytique des données.
- **DuckDB-WASM:** Marscarto intègre la base de donnée DuckDB, compilée en WebAssembly (WASM). Lorsqu'un utilisateur interroge les ensembles de données régionaux, par exemple pour analyser le relief du cratère Jezero, les calculs sont effectués instantanément sur l'ordinateur de l'utilisateur à l'aide des fichiers Parquet, sans attendre un serveur distant, via le moteur SQL de DuckDB.

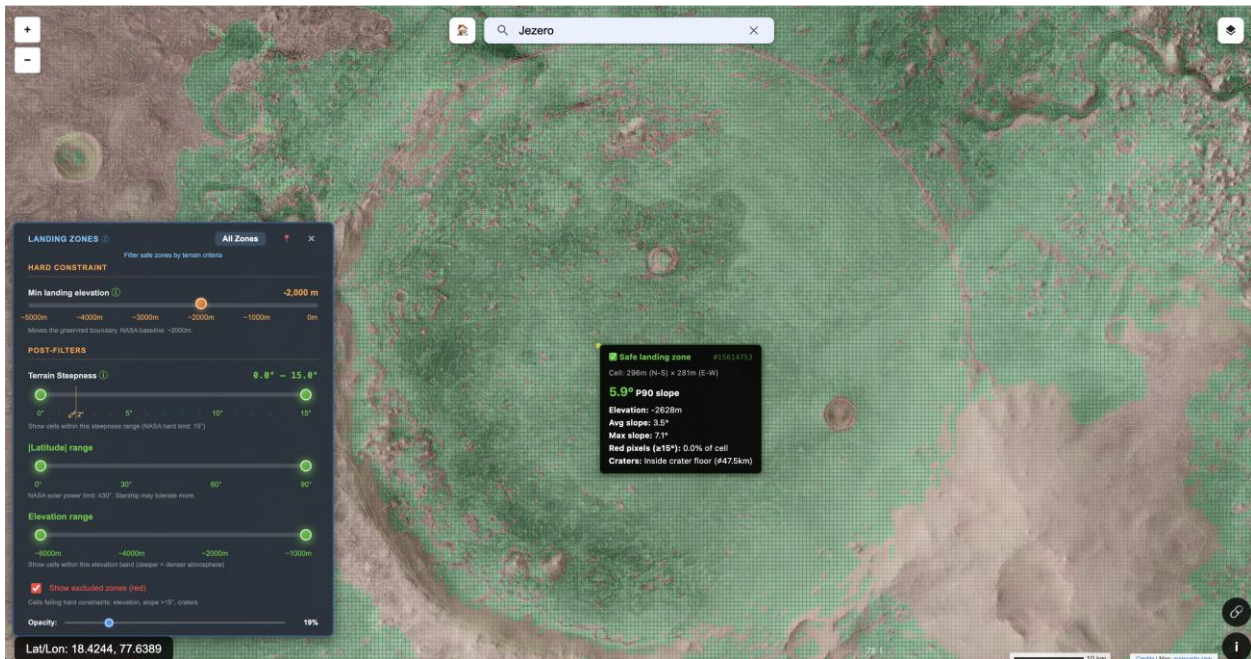


4. Couches et fonctionnalités principales

La carte intègre plusieurs jeux de données fondamentaux et spécialisés, superposés pour offrir une vue complète de la surface martienne :



- **Mosaïque Murray Lab CTX & superposition multi-couche:** la carte intègre la superbe mosaïque CTX mondiale en haute résolution créée par le Laboratoire Bruce Murray pour la visualisation planétaire. Les utilisateurs peuvent facilement superposer cette carte visuelle détaillée à d'autres jeux de données scientifiques, offrant ainsi une vue riche et multicouche de la surface.
- **Recherche par nom :** un moteur de recherche permet aux utilisateurs de se rendre instantanément vers les formations martiennes qu'ils ont nommés.
- **Parcelles à hautes définitions & Zones d'atterrissage :** Marscarto inclut des parcelles à haute définition – telles que Jezero. En combinant plusieurs jeux de données, l'outil met en évidence les zones d'atterrissage sûres en se basant sur des critères réels (mais simplifiés) de la NASA, tels qu'un terrain plat et de faibles pentes. Ces zones sont disponibles à différents niveaux de détail, et d'autres régions seront bientôt ajoutées.
- **Topographie globale MOLA & calcul de pentes :** à l'aide des données du Mars Orbiter Laser Altimeter, la carte visualise l'altitude globale fournie par OpenPlanetaryMap. Une couche dynamique de calcul des pentes met en évidence leur raideur, élément essentiel pour la sélection des sites d'atterrissage et la planification des itinéraires des rovers.
- **Cartographie de la glace d'eau souterraine (SWIM) :** intégration des données du projet SWIM, affichant la densité de la glace d'eau souterraine. Ces informations sont essentielles pour planifier la future implantation humaine.



- **Simulation hydrologique et océanographique** : Simulation du niveau de l'océan martien, permettant aux utilisateurs d'inonder dynamiquement le terrain pour visualiser d'anciens littoraux hypothétiques basés sur des données topographiques. Elle inclut également des réseaux cartographiés d'anciennes vallées fluviales et de paléolacs.
- **Cratères et géologie** : une couche complète de cratères martiens incluant la base de données Robbins, ainsi que les grottes martiennes connues.
- **Analyse des zones d'atterrissage** : une zone d'analyse à haute résolution, avec un côté rectangulaire de 59 m, est mise en place autour du cratère Jezero, site d'atterrissage du rover Perseverance, combinant des images visuelles à haute résolution avec une analyse interactive approfondie des données. Des cellules d'analyse de plus grande taille sont disponibles pour toutes les autres zones où la couverture des données est moins dense.

5. Conclusion et avenir

Associant des formats modernes, natifs au cloud, à une puissance de rendu côté client exceptionnelle, MarsCarto démontre qu'il est possible de rendre les Systèmes d'Information Géographique planétaires complexes à la fois rapides, ergonomiques et hautement interactifs.

À l'avenir, le projet ira encore plus loin dans l'accessibilité des données martiennes en intégrant l'intelligence artificielle. Les utilisateurs pourront s'exprimer en langage naturel en plus de cliquer sur l'interface utilisateur. Par exemple, un utilisateur pourrait demander : « Montre-moi la meilleure zone d'atterrissage sur Mars qui présente la plus forte concentration potentielle de glace d'eau et qui est la plus proche des tubes de lave. » L'IA traduira cette question en langage naturel en une requête complexe dans la base de données et affichera instantanément les résultats sur la carte. Nous prévoyons également de développer des capacités de rendu de terrain en 3D (modèles numériques



d'élévation) et d'introduire des outils collaboratifs pour les chercheurs.

Les outils et les ensembles de données pour l'exploration de Mars se multiplient rapidement, et la création d'interfaces cartographiques capables de suivre le rythme de ces données est essentielle tant pour l'engagement du public que pour les découvertes scientifiques. Nous sommes ouverts aux commentaires et à la collaboration de la communauté des sciences planétaires afin d'affiner et d'étendre davantage ce projet.

Mikita Belikau est le créateur de *marscarto.com*. Fort de plus de 17 ans d'expérience dans les systèmes d'information géographique (SIG) et le développement logiciel, il conçoit des outils pratiques dédiés à l'exploration de Mars. Il s'intéresse plus particulièrement à l'évaluation automatisée des sites d'atterrissage et à l'analyse du potentiel de l'utilisation des ressources *in situ* (ISRU), afin de soutenir les futures missions habitées.



Élimination du CO₂

Par Jean-Marc Salotti, Président Planète Mars

1. Introduction

Nous abordons ici une problématique importante du système de support de vie d'un habitat spatial : l'élimination du gaz carbonique (CO₂) qui est émis par les astronautes lors de la respiration. Dans la partie 2, les principes de la respiration sont rappelés et la quantité de CO₂ émise par jour par chaque astronaute est calculée. Avant d'éliminer le CO₂, il faut savoir combien il y en a et à quel point c'est un problème pour la santé. La partie 3 est donc dédiée à la présentation du danger de l'excès de CO₂ dans l'air et à son contrôle à l'aide de capteurs.

Il existe 3 grandes méthodes pour éliminer le surplus de CO₂.

- L'utilisation de cartouches d'hydroxyde de lithium est décrite dans la partie 4.
- L'utilisation de tamis moléculaires est expliquée dans la partie 5.
- La mise en œuvre de la réaction de Sabatier est présentée dans la partie 6.
- L'utilisation des plantes vertes, dans le cadre d'un système de support de vie biologique, est traitée à part, voir la section correspondante du Wiki mission martiennes habitées.

Remarque : Il existe d'autres méthodes (réaction de Bosch par exemple), non présentée ici.

2. CO₂ produit par respiration

Le CO₂ provient essentiellement de l'oxydation du glucose par toutes les cellules du corps humain. Réaction chimique simplifiée de la respiration :



Calculons la quantité approximative de CO₂ produite par personne adulte :

- Consommation d'oxygène moyenne journalière : 0,84 kg O₂/jour
- Chaque mole de O₂ consommée produit environ 1 mole de CO₂
- Masse molaire CO₂ = 44 g/mol, alors que Masse molaire O₂ = 32 g/mol

⇒ CO₂ produit = 0,84/32x44 ≈ 1,16 kg/jour

Remarques :

- Consommation O₂ si activité sportive : 1,1 kg O₂/jour
- 5^{ème} percentile femme (activité nominale) : ≈ 0,52 kg O₂/jour.
- 95^{ème} percentile homme (activité nominale) : ≈ 1,11 kg O₂/jour
- A masse égale, consommation O₂ hommes > consommation O₂ femmes (masse maigre)

Bilan : de 1 à 1,2 kg de CO₂/jour par adulte au repos.

Pour un astronaute actif : jusqu'à 1,5 kg/jour, voire plus si l'activité sportive est longue et intense.



3. Contrôle du CO₂

3.1 Danger du CO₂

Même si le CO₂ est souvent décrié comme gaz à effet de serre, il y en a moins de 1% dans l'air extérieur, de l'ordre de 0,042%, soit 442 parties par million (ppm). Si une salle est mal ventilée, le taux peut atteindre 0,2% ou 2000 ppm, et c'est le début de l'inconfort. Le danger critique est à 4%.

L'inconfort et le danger sont définis dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Dangers du CO₂

Seuil	Valeur typique	Effets / rôle
Pré-alerte / surveillance	2000–2500 ppm	Concentration qui déclenche l'attention du contrôle sol et du système de ventilation. Inconfort léger possible (maux de tête, concentration).
Limite courte durée (24 h)	5000 ppm	Concentration maximale tolérée pour 24 h selon NASA. Symptômes possibles : maux de tête, fatigue, somnolence.
Limite longue durée (mission)	2500–3000 ppm	Concentration recommandée pour le confort et la santé sur plusieurs jours ou semaines.
Limite critique / danger immédiat	> 40 000 ppm	Hypoxie et intoxication sévère ; situation d'urgence absolue.

$$\text{ppm} = \frac{\text{volume ou nombre de molécules du gaz}}{\text{volume ou nombre total de molécules d'air}} \times 10^6$$

3.2 Détection du CO₂

Sur l'ISS, les capteurs de CO₂ sont principalement des capteurs infrarouges non dispersifs (NDIR = Non Dispersive InfraRed). Voir figure 1.

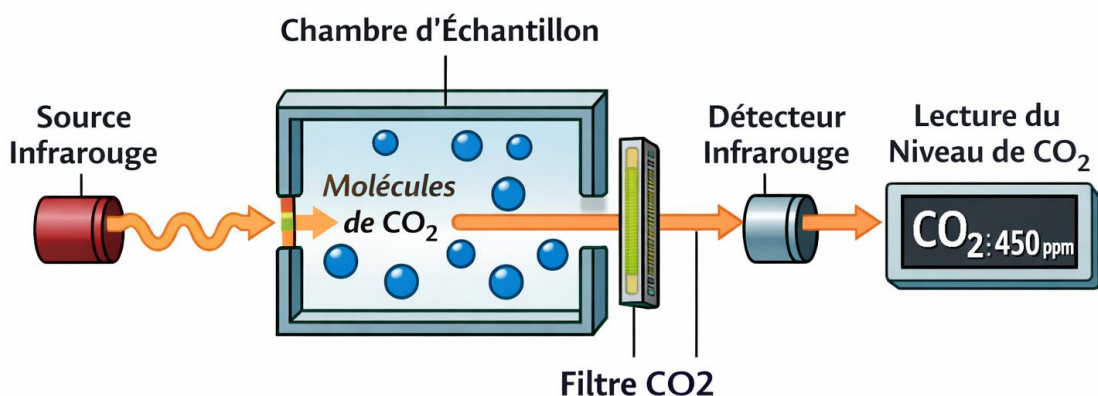


Image générée par IA

Figure 1 : Principe de fonctionnement du capteur de CO₂ NDIR. Une petite lampe infrarouge émet un faisceau lumineux. Le CO₂ absorbe la lumière à une longueur d'onde spécifique (~4,26 µm), ce qui n'est pas le cas des autres composants de l'air. Un détecteur mesure l'intensité de la lumière après passage par un filtre optique qui ne laisse passer que certaines longueurs d'onde.

Calcul de concentration :

$$C_{\text{CO}_2} = \alpha \ln \frac{I_0}{I}$$

- I = intensité lumineuse mesurée (convertit la lumière IR en petite variation de température, puis en tension).
- I_0 = intensité de référence (sans CO_2)
- α , coefficient de calibration du système

Plus le CO_2 est présent dans l'échantillon, plus l'absorption est élevée et plus l'intensité IR est faible au niveau du détecteur. Le capteur convertit ensuite l'intensité mesurée en ppm selon la formule.

Remarque : de nombreuses difficultés sont rencontrées lors de l'exploitation de ces capteurs. On observe en particulier : a) une dérive de la valeur mesurée (vieillesse du capteur, contamination, effets thermiques) qui nécessite une recalibration périodique ou un changement de capteur; b) du bruit, c'est-à-dire des phénomènes physiques qui font fluctuer la mesure (électronique interne, turbulence de l'air, vibrations); c) un temps de réponse un peu long (un pic de CO_2 peut être manqué de plusieurs minutes). Pour des questions de sécurité, la redondance est obligatoire. Dans l'ISS, on dispose ainsi de 2 à 3 capteurs par module et il y a déclenchement automatique de la ventilation et d'une alarme si un seuil est atteint.

4. Elimination avec hydroxyde de lithium (LiOH)

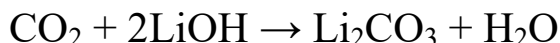
Le premier système d'élimination du CO_2 exploité dans le spatial habité est la cartouche à hydroxyde de lithium (LiOH). Utilisée dès le programme Mercury au début des années 1960, puis aujourd'hui dans la capsule Dragon ou dans les scaphandres spatiaux, entre autres, cette cartouche absorbe chimiquement le dioxyde de carbone par une réaction irréversible, assurant ainsi l'épuration de l'air dans les capsules habitées [1].



Figure 2 : Système de filtrage du CO_2 à base de LiOH



Elle est ensuite devenue célèbre lors de la mission Apollo 13, à la suite du problème d'adaptation des cartouches de LiOH du module lunaire au système d'épuration du module de commande, dont le format était différent. L'équation chimique est la suivante :



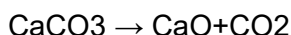
Les avantages de cette méthode sont sa simplicité, sa fiabilité et sa faible maintenance. Le besoin en énergie se limite à l'alimentation électrique du ventilateur. L'inconvénient majeur est que le filtre finit par saturer, ce qui implique un changement périodique de cartouche et finit par constituer une masse importante si la mission est de longue durée. Le besoin est de 22,2 kg par personne pour 10 kg de CO₂ à filtrer, ce qui correspond à un changement tous les 3 jours pour un équipage de 3 astronautes. De plus, l'oxygène n'étant pas récupéré (les atomes d'oxygène restent fixés à la molécule Li₂CO₃), il faut en produire pour la respiration des astronautes.

Remarque : Sur une surface planétaire (Mars), il est possible de traiter le Li₂CO₃ et de régénérer le filtre à base de LiOH selon le principe suivant :

1. Production de chaux vive (CaO) à l'aide de ressources locales (ISRU)

Deux voies crédibles sur Mars :

- 4a. Calcination de carbonates de calcium martiens (à trouver)

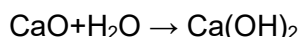


Conditions : 900–1000 °C ; CO₂ rejeté dehors

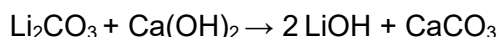
- 4b. Extraction directe du Ca depuis le régolithe, anorthite (CaAl₂Si₂O₈) par exemple

Electrolyse de régolithe fondu, ou réduction carbothermique

2. Production de chaux éteinte, Ca(OH)₂, à partir de la chaux vive :



3. Régénération du LiOH à partir du Li₂CO₃ avec de la chaux éteinte (caustification) :



5. Elimination avec tamis moléculaire

5.1 Zéolithe

Principe : Le CO₂ est éliminé par adsorption physique grâce à un tamis moléculaire. Une zéolithe synthétique est un matériau microporeux fabriqué en laboratoire, qui possède une structure cristalline très régulière avec des cavités (cages) et canaux de taille nanométrique. Ces cages peuvent piéger sélectivement certaines molécules, comme le CO₂, l'ammoniac ou l'eau. Par exemple, la zéolithe 13X est un réseau de silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃) formant des cages et canaux. La formule théorique répétitive approximative comporte de l'ordre de 1000 atomes : Na₈₆(AlO₂)₈₆(SiO₂)₁₀₆, xH₂O. La forme géométrique comporte 106 tétraèdres SiO₄ et 86 tétraèdres AlO₄. Des molécules d'eau sont déjà

présentes dans certaines cages, leur nombre varie. Chaque tétraèdre est formé de la manière suivante : à un sommet se trouve un atome d'oxygène, au centre un atome de silicium ou aluminium. Les tétraèdres s'assemblent pour former des supercages sphériques (~13 Å de diamètre) et des tunnels hexagonaux (~7 Å de diamètre) qui relient les supercages. Ce réseau répété donne une structure cubique pour cette cellule unitaire. Chaque supercage et tunnel contient des cations Na^+ et des molécules d'eau, qui déterminent les sites actifs pour le CO_2 . La connectivité continue permet aux molécules de circuler à travers toute la cellule.

Pour une plus grande efficacité, notamment pour éviter l'encrassement, il est préférable de combiner le tamis moléculaire à base de zéolithe avec des systèmes de purification de l'air placés en amont, comme cela est illustré figure 3.

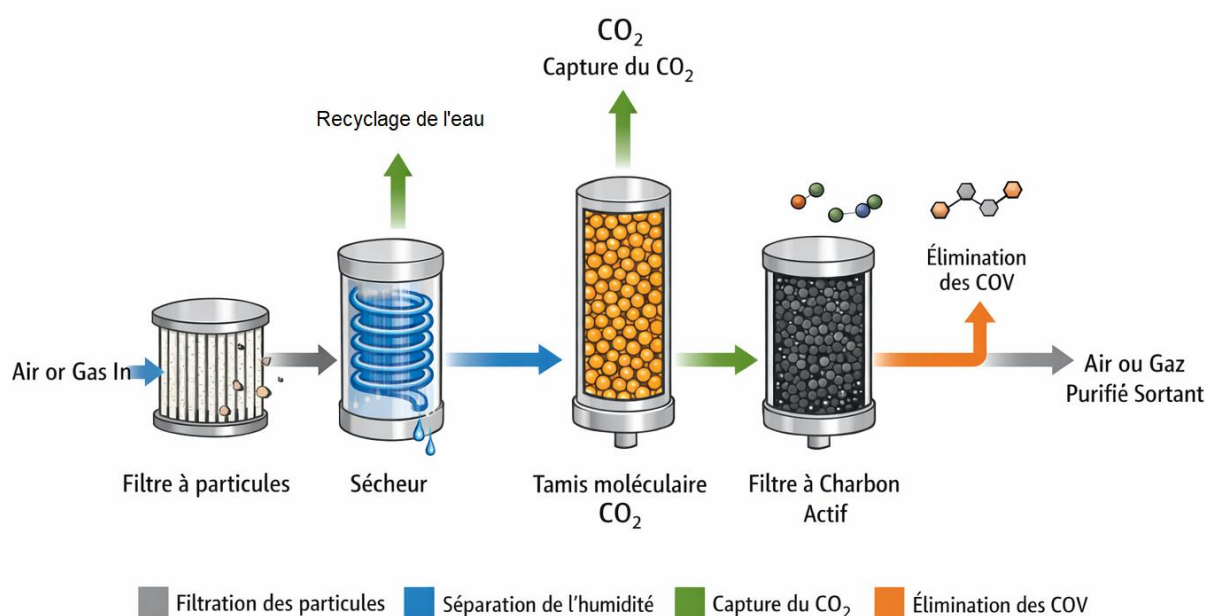


Figure 3 : Combinaison avec les systèmes de purification de l'air.

Les étapes combinées sont typiquement les suivantes :

- **Préfiltration** : avant d'atteindre la colonne de zéolithe, il faut éliminer les poussières et les particules / micro-organismes / grosses molécules, par exemple à l'aide de filtres mécaniques (type HEPA ou filtres à particules). Objectif : éviter que la zéolithe ne s'encrasse ou que les pores soient bouchés.
- Les molécules de CO_2 passent dans les "tunnels" et sont piégées dans les "supercages" par :
 - Interaction électrostatique : le CO_2 ayant un moment dipolaire (atomes d'oxygène légèrement négatifs), il est attiré par les cations (Na^+ , Ca^{2+}) dans les cages.
 - Effet de confinement : les cages ont une taille comparable à celle des molécules de CO_2 , les molécules s'intègrent dans les cages comme dans un moule.
 - Forces de Van der Waals : les parois polaires du réseau attirent le CO_2 par forces dispersives.

- L'adsorption est physique et réversible, donc le matériau peut être régénéré en chauffant ou en abaissant la pression.

5.2 Régénération

La régénération se fait avant saturation complète du sorbant, pour maintenir l'efficacité (illustration figure 4). Sur la plupart des systèmes, il existe une capacité définie : par exemple, une cartouche de sorbant solide peut adsorber X kg de CO₂ avant d'atteindre 90–95 % de saturation. Pour supprimer définitivement le CO₂, il existe plusieurs options. Il suffit de les placer dans un réservoir, puis de chauffer à 100-200°C, ou et de réduire fortement la pression de l'air, on observe un dégagement du CO₂. On peut ensuite le libérer dans l'espace par une ouverture dédiée. Il est également possible de le compresser et de le stocker en vue d'une exploitation ultérieure (exemple : réaction de Sabatier).



Figure 4 : Sorbants solides régénérables.

L'élimination du CO₂ avec des zéolithes a plusieurs avantages :

- Régénération → pas de déchets chimiques et masse indépendante de la durée de la mission.
- Sélection → capte le CO₂ sans trop retenir l'O₂.
- Stabilité → résiste aux cycles de chauffage/refroidissement.

6. Utilisation d'amines solides

6.1 Principes

Les « amines solides » sont des matériaux poreux avec des groupes amines (-NH₂) capables de capturer le CO₂ de façon réversible. L'air cabine passe à travers un lit de sorbant, les molécules de CO₂ entrent en contact avec les groupes amines et le CO₂ est fixé chimiquement sur le matériau, selon l'équation ci-dessous :





R représente un groupe organique générique.

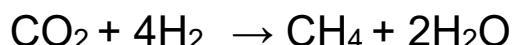
6.2 Régénération

Les sites amines se remplissent progressivement et la capacité de capture du CO₂ se réduit progressivement. Lorsqu'on approche la saturation, il est impératif de régénérer. Le processus s'appelle désorption : on inverse la réaction en changeant les conditions, soit par chauffage, soit par baisse de pression (vide de l'espace par exemple), ou les deux à la fois. Les liaisons chimiques faibles comme celles associées au groupe COO sont cassées et le CO₂ est relâché, ou récupéré sous forme concentrée.

7. Réaction de Sabatier combinée à l'électrolyse de l'eau

7.1 Principe de base

Le réacteur de Sabatier est un dispositif chimique qui réalise la réaction de Sabatier, inventée par le chimiste Paul Sabatier :



avec :

- CO₂ : dioxyde de carbone.
- H₂ : hydrogène (produit par électrolyse de l'eau ou autre source).
- CH₄ : méthane (gaz combustible, souvent stocké ou utilisé comme carburant).
- H₂O : eau (qui peut être récupérée et réutilisée).

C'est une réaction catalytique exothermique, ce qui signifie qu'elle libère de la chaleur.

7.2 Conditions de fonctionnement

La réaction étant réversible, il faut impérativement exploiter un catalyseur pour qu'elle se fasse en priorité dans le sens désiré. Le catalyseur est métallique, souvent nickel ou parfois ruthénium, fixé sur un support solide. Le catalyseur permet à la réaction de se produire à température modérée (~300–400 °C) au lieu de nécessiter des températures très élevées, et des pressions variables entre 1 et 10 bars. Le ratio H₂/CO₂ est idéalement 4:1 pour compléter la réaction.

Le taux de conversion dépend de la température, de la pression et du catalyseur. Même dans des conditions optimales, le CO₂ n'est jamais totalement transformé : on obtient typiquement 80 à 95 % de conversion par passage dans le réacteur.

7.3 Éléments principaux

Un réacteur de Sabatier se présente généralement sous la forme d'un cylindre métallique (acier inox ou alliage haute température) vertical. Il comporte :



- Une cuve ou corps du réacteur, qui contient le catalyseur solide (p. ex. billes ou granulés de nickel sur un support), construite pour résister à des températures de 300–400 °C et pressions de quelques bars.
- Des tubes d'entrée pour les gaz CO_2 et H_2 , parfois avec des débitmètres et valves de contrôle.
- Des tubes de sortie pour CH_4 (gaz méthane) et pour H_2O , liquéfiée dans un condenseur.
- Un système de chauffage pour atteindre et maintenir la température de réaction.
- Des instruments de mesure, capteurs de pression, température et composition des gaz pour contrôler la réaction.

7.4 Avantages et inconvénients

L'avantage principal de la réaction de Sabatier est la récupération des atomes d'oxygène pour reconstituer des molécules d'eau, et la production de méthane, utilisable comme carburant. Un autre point positif est la masse relativement modeste d'un réacteur (6–8 kg/pers pour 100 jours).

L'inconvénient majeur est de nécessiter de l'hydrogène, obtenu généralement par électrolyse de l'eau, processus qui requiert énormément d'énergie.

Le réacteur est finalement un système complexe, dont le taux de conversion est sensible au contrôle de l'énergie et de la température.

8. Applications

8.1 Systèmes de l'ISS

CDRA (Carbon Dioxide Removal Assembly) :

C'est un rack standard installé dans le module américain Destiny / Node 3. Son poids est de 90 kg et sa dimension est de 1,5m x 0,8m x 0,7m. Il comporte 2 lits de zéolithe en parallèle qui se présentent sous la forme de colonnes cylindriques avec une tuyauterie complexe et des vannes automatisées. Le système est dimensionné pour éliminer 6 kg de CO_2 par jour en mode nominal (6 personnes), avec un débit d'air de 50 à 60 m^3 par heure, acheminé par le système de ventilation. La régénération peut se faire en continu en alternant avec les deux colonnes.

Différentes zéolithes sont utilisées dans l'ISS. Le type 5A possède des pores d'environ 5 Å, sélective pour les molécules de CO_2 . Le type 13X possède des pores d'environ 10 Å, plus polyvalentes pour divers gaz. Il adsorbe typiquement entre 0,1 et 0,25 kg de CO_2 par kg de zéolithe selon la pression, la température et la concentration de CO_2 . Donc pour stocker temporairement 1 kg de CO_2 entre deux régénérations, il faut environ 4 à 10 kg de zéolithe.

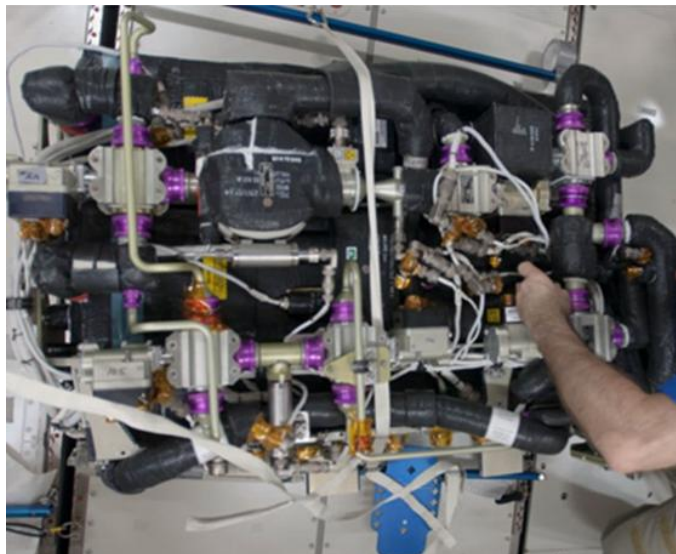


Figure 5 : Maintenance du CDRA dans l'ISS.

Vozdukh :

Installé dans le module russe Zvezda, ce système est plus compact que le CDRA américain. Le système comporte 3 lits d'amines solides :

- 1 lit en adsorption (capture CO_2)
- 1 lit en régénération (chauffage + vide)
- 1 lit en phase transitoire (préparation / équilibrage)

Ces lits permettent un fonctionnement quasi continu. Son design est plus simple que CDRA, avec moins de vannes. Il est calibré pour traiter 3 à 4 kg de CO_2 par jour avec un débit d'air de 35 à 40 m^3 par heure, acheminé par ventilation.

8.2 Mission de longue durée

Pour les missions de longue durée, la fiabilité est impérative et la redondance est nécessaire. Les adsorbants solides (zéolithes ou amines solides) sont les choix les plus sûrs. On peut prévoir plusieurs lits en parallèle, chacun régénérable, pour créer une redondance complète. A noter que l'élimination du CO_2 à bord du vaisseau Orion, conçu pour des durées de trois semaines, est réalisée par des amines solides.

Les systèmes Électrolyse + Sabatier restent utiles pour la production d'oxygène et de carburant, mais ils ne sont pas la solution primaire pour la sécurité de l'habitat, car ce sont des systèmes complexes, donc plus difficile à contrôler et à maintenir, et une panne peut être critique.

Enfin, pour parer à toute éventualité, il est recommandé de prendre des cartouches de LiOH en backup, pour 30 jours par exemple.

9. Conclusion

Pour l'élimination du CO_2 , le système le plus simple est la cartouche d'hydroxyde de lithium, qui



convient parfaitement pour les missions de courte durée, comme Apollo. Pour les missions plus longues, il est préférable d'exploiter des tamis moléculaires constitués de zéolithes, qui sont régénérables et permettent donc de limiter la masse totale des systèmes embarqués.

Plusieurs autres méthodes n'ont pas été présentées ici. En particulier, l'élimination du CO₂ peut être faite à l'aide d'absorbants liquides, comme les solutions alcalines fortes telles que NaOH (hydroxyde de sodium ou soude), KOH (hydroxyde de potassium ou potasse), LiOH (hydroxyde de lithium) ou les solutions d'amines telle que la MEA (monoéthanolamine). Ces méthodes ont un intérêt en milieu industriel, mais la plupart de ces produits chimiques sont dangereux et doivent être manipulés avec précaution, ce qui constitue un inconvénient majeur pour un usage dans le domaine spatial.

Encore au stade d'études, les metal-organic frameworks (MOF) constituent une classe de matériaux poreux cristallins générant des réseaux tridimensionnels. Leur intérêt pour la capture du CO₂ repose sur la possibilité de concevoir finement la taille des pores et la chimie de surface, afin de favoriser une adsorption sélective du CO₂. Bien que prometteurs pour les systèmes de support-vie avancés et les architectures de type exploration planétaire, les MOF restent encore à un niveau de maturité technologique inférieur aux solutions actuellement opérationnelles, notamment en raison de questions de stabilité à long terme et de sensibilité à l'humidité.

Références

- [1] NASA OCHMO Technical Brief OCHMO-TB-004 — Carbon Dioxide (CO₂) Removal, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Office of the Chief Health and Medical Officer, 2022
- [2] El Sherif, D. & Knox, J. (NASA / SAE), International Space Station Carbon Dioxide Removal Assembly Concepts and Advancements, SAE Technical Paper 2005-01-2892
<https://doi.org/10.4271/2005-01-2892>
- [3] Sweterlitsch, J. et al., Amine Swingbed Payload Technology Demonstration on the International Space Station, NASA Technical Reports Server (NTRS), 2014
- [4] Abney, M. B. et al. (NASA Marshall Space Flight Center), "Carbon Dioxide Reduction Assembly (CDRA–Sabatier integration)", NASA Technical Reports Server (NTRS), 2015
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20150016512>

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.



Vie de l'association

Par Jean-Marc Salotti, Président PM

Chers membres,

Voici les nouvelles de l'association et de os partenaires européens :

Assemblée générale :

L'assemblée générale de Planète Mars a eu lieu par visioconférence le 26 juin 2026. Voir la copie du procès verbal en annexe.

Jean-Marc Salotti est le nouveau président de l'association :

Un conseil d'administration a eu lieu le 9 juillet 2026. Suite au souhait de Philippe Clermont de ne pas renouveler son mandat de Président, Jean-Marc Salotti s'est porté candidat et a été élu Président. Philippe Clermont a été élu Vice-Président. Les fonctions des autres administrateurs ont été renouvelées. Enfin, Louis Sylvestre a accepté la fonction de coordinateur européen, en lien avec les autres Mars Societies européennes.

Webinaires :

Le premier webinaire des Sociétés martiennes européennes s'est tenu le 16 juin. Il a rencontré un grand succès, avec plus de 400 inscrits. Organisé par le chapitre italien et animé par Antonio Del Mastro, il comprenait six présentations de 20 minutes :

- Gernot Grömer (Autriche) : Les simulations analogues martiennes comme vecteur de réussite des missions.
- Sarah Baatout (Belgique) : Médecine spatiale et rayonnement cosmique : comprendre les risques et rendre possible l'exploration humaine de l'espace.
- Jean-Marc Salotti (France) : Comparaison des systèmes de propulsion pour les missions vers Mars.
- Antonio Del Mastro (Italie) : Mars et l'industrie européenne.
- Krzysztof Zarsaka (Pologne) : Production d'oxygène et d'hydrocarbures sur Mars par conversion plasmatique du CO₂.
- Pierre Brisson (Suisse) : Méthodologie pour l'établissement d'une présence humaine permanente sur Mars.

Voir : <https://europe2mars.space/>

Formation des astronautes :

En juin 2026, le Forum spatial autrichien (OeWF) a présenté ses six nouveaux astronautes analogues.



Voir : <https://oewf.org/en/2026/06/austrian-space-forum-trains-six-new-analog-astronauts/>

Prochaine "European Mars Conference" en Belgique :

La prochaine conférence européenne (EMC 2027) se tiendra à l'Euro Space Center, en Belgique, probablement fin mars 2027.

Convention internationale de la Mars Society 2026 :

La Convention internationale 2026 de la Mars Society, qui se déroulera à Los Angeles du 22 au 24 octobre 2026, accepte désormais les propositions de communications portant sur tous les aspects de l'exploration et de la colonisation de Mars.

Sortie du livre Genèse martienne, tome 2 : Fondation

Jean-Marc Salotti vient de publier le 2^{ème} volet de son roman de hard science-fiction. Il est publié en auto-édition, uniquement accessible sur Amazon, ou lors de conférences / dédicaces. <https://planete-mars.com/genese-martienne-nouveau-roman-de-jean-marc-salotti/>



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



ANNEXE : Procès verbal de l'assemblée générale ordinaire

DU VENDREDI 26 JUIN 2026 – 18h-19h30.

L'Assemblée générale 2026 devait se tenir en format mixte distanciel (Zoom) et présentiel (Maison des Associations du 14eme arrondissement de Paris – 76 rue Daguerre 75014). Compte tenu de la situation de canicule, la Maison des Associations a décidé de fermer. La réunion se tient ainsi uniquement en distanciel par force majeure. La feuille de présence dénombre 9 membres à jour de cotisation, présents (sur zoom) ou représentés :

- Zoom : 9 membres, Philippe Clermont, Jean-Marc Salotti, Yves Tichene, Pascal Verseux, Yves Monier, David duval, Etienne Martinache, Maxime Bary, Jean-Marc Fouassier ;
- Pouvoirs : 0

L'Assemblée peut valablement se tenir, en conformité avec les statuts de l'Association.

Monsieur Philippe Clermont conduit la réunion en sa qualité de président de l'association. Il rappelle que l'assemblée générale a été organisée en vue de délibérer sur l'ordre du jour suivant :

- Approbation du rapport moral ;
- Approbation du rapport financier ;
- Renouvellement ou nominations au Conseil d'Administration ;
- Questions diverses. Rappelons que d'autres sujets peuvent être traités, qui doivent être soumis par écrit, avant la date de l'assemblée par les membres qui le souhaitent.

Les administrateurs Philippe Clermont, Stephan Gérard, Etienne Martinache et Yves Tichené sont statutairement sortants à l'issue de la période de trois ans. Louis Sylvestre s'est porté candidat pour rejoindre le Conseil d'administration. Comme indiqué dans la convocation, les candidatures pouvaient être communiquées par courriel au président jusqu'au 24 juin à minuit, accompagnées d'une lettre de motivation. Aucune autre candidature n'a été reçue.

Le rapport moral et le rapport financier sont présentés respectivement par le président et le trésorier.

A l'issue des débats et questions, il est procédé aux votes :

1. Approbation du rapport moral. Le rapport moral est approuvé à l'unanimité.
2. Approbation du rapport financier. Le rapport financier est approuvé à l'unanimité.
3. Renouvellement du mandat d'administrateur de Philippe Clermont. A l'unanimité, Philippe Clermont est réélu administrateur.
4. Renouvellement du mandat d'administrateur de Stéphane Gérard. A l'unanimité, Stéphane Gérard est réélu administrateur.
5. Renouvellement du mandat d'administrateur de Etienne Martinache. A l'unanimité, Etienne Martinache est réélu administrateur.



6. Renouvellement du mandat d'administrateur de Yves Tichené. A l'unanimité, Yves Tichené est réélu administrateur.

7. Nomination comme administrateur de Louis Sylvestre. A l'unanimité, Louis Sylvestre est nommé administrateur.

Conformément à nos statuts, le président rappelle que le bureau sera réélu par le Conseil d'Administration lors de sa prochaine réunion.

L'Assemblée générale est close à 19:30h.

Philippe Clermont

Président

pclermont@planete-mars.com