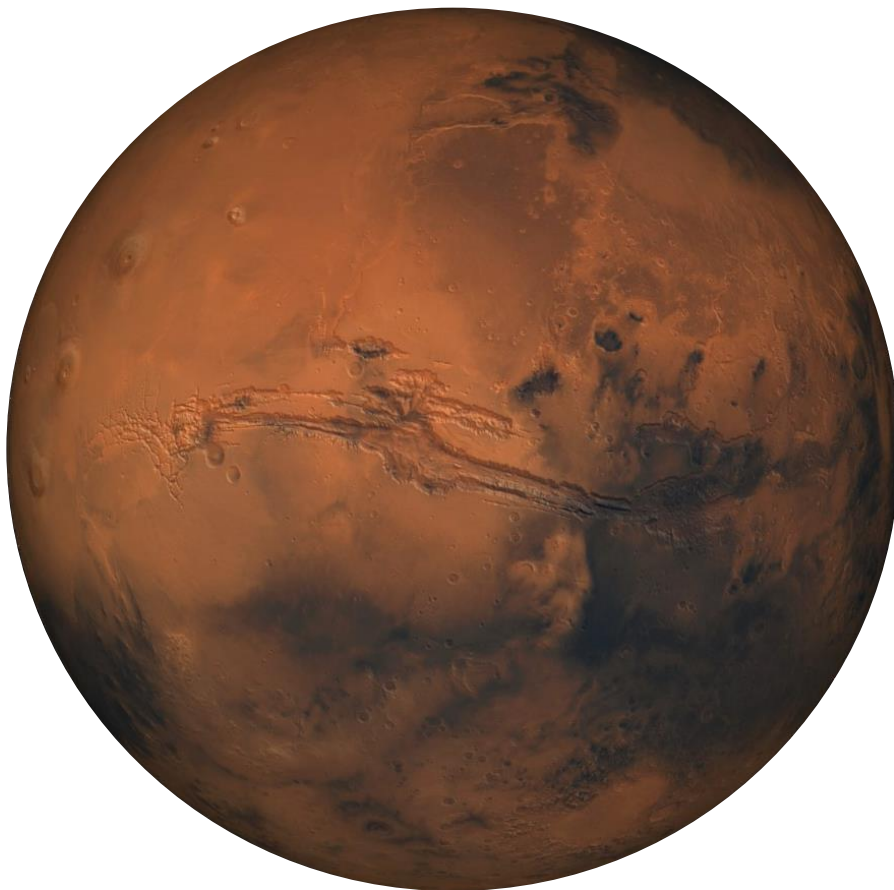


GYMNASE DE BEAULIEU  
TRAVAIL DE MATURITÉ 2023

# OBJECTIF MARS



Répondant : Gérard Valzino

Théo Petignat

Classe : 3M06

Lausanne, le 10 novembre 2023

## 1 REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toutes les personnes qui m'ont aidé au cours de ce travail de maturité.

Premièrement, je tiens à remercier Monsieur Gérard Valzino, mon répondant, pour le suivi, les conseils, les commentaires et l'accompagnement du début à la fin de ce projet. En effet, les conseils et les commentaires qu'il m'a transmis m'ont permis d'améliorer la qualité de mon document.

Je remercie Monsieur Alexandre Looten, doctorant à l'EPFL, Nicolas Bettschart, ingénieur en aéronautique et Claude Nicollier, premier spationaute suisse, pour les informations et le temps qu'ils m'ont accordé pour répondre à mes questions. Leur expérience et leur connaissance du domaine m'ont beaucoup apporté et m'ont permis d'arriver à un document riche et complet. Je leur suis donc particulièrement reconnaissant et les remercie sincèrement.

## 2 RÉSUMÉ DU DOCUMENT

**Titre du travail de maturité :** Objectif Mars

**Répondant :** Gérard Vlazio

**Étudiant :** Théo Petignat

**Classe :** 3M06

### **Résumé :**

L'objectif de mon travail de maturité est d'expliquer pourquoi les agences spatiales s'intéressent particulièrement à la planète Mars, ainsi que de montrer les moyens qui sont employés dans les programmes spatiaux martiens.

Pour répondre à cet objectif, j'ai effectué de nombreuses recherches sur les sites internet des agences spatiales et des organismes compétents, tels que ceux de la NASA, de Nature, de Reuters, du CNES, de Lockheed Martin et de SpaceX, pour en citer seulement une petite partie. De plus, j'ai complété mes informations, grâce aux interviews de Nicolas Bettschart, d'Alexandre Looten et de Claude Nicollier qui m'ont apporté différentes visions et précisions.

En étudiant l'environnement martien et son évolution, il a été possible de déterminer que Mars a très probablement abrité des conditions climatiques propices à l'apparition de la vie, ce qui explique l'intérêt porté par les scientifiques à la planète rouge. De plus, la création et les phases d'évolution de Mars sont similaires à celle de la Terre.

Ensuite, en étudiant les missions MAVEN, Persévérance et le programme spatial Artemis, il a été possible de montrer les moyens colossaux mobilisés dans le domaine de l'exploration spatiale avec pour objectif la planète Mars. En effet, l'innovation technologique, la collaboration entre pays, la collaboration entre les agences spatiales et des entreprises privées, la recherche médicale et les moyens financiers conséquents sont les composantes nécessaires à la mise en place de missions et de programmes spatiaux d'une telle envergure.

Ce travail de maturité permet, par conséquent, à toutes personnes externes à ce domaine de mieux comprendre l'intérêt des missions spatiales martiennes.

**Date :** 10.11.2023

**signature de l'étudiant :**

## TABLE DES MATIERES

1	REMERCIEMENTS .....	1
2	RÉSUMÉ DU DOCUMENT.....	2
3	INTRODUCTION .....	5
3.1	Problématique.....	5
3.2	Méthodologie .....	5
4	LA PLANÈTE MARS .....	6
4.1	Introduction.....	6
4.2	Phobos et Deimos.....	6
4.3	Atmosphère martienne .....	7
4.4	Météorologie martienne .....	7
4.5	Relief de la surface .....	9
4.6	Structure de la planète .....	10
4.7	Volcans martiens .....	11
4.8	Eau et vie sur Mars .....	12
4.9	Champ magnétique .....	13
4.10	Opportunités de recherche .....	14
5	LES MISSIONS ET LES PROGRAMMES SPATIAUX .....	15
5.1	Types de missions.....	15
5.1.1	Avantages de l'approche robotisée.....	15
5.1.2	Avantages de l'approche habitée.....	16
5.2	MISSION PERSÉVÉRANCE.....	17
5.2.1	Introduction .....	17
5.2.2	Cratère Jerezo .....	17
5.2.3	Objectifs de la mission .....	18
5.2.4	Composition technique .....	19
5.2.4.1	Rover Persévérance.....	19
5.2.4.2	RIMFAX .....	20
5.2.4.3	Mastcam-Z.....	20
5.2.4.4	MOXIE.....	21
5.2.4.5	SuperCam .....	21
5.2.4.6	MEDA.....	22
5.2.4.7	SHERLOC.....	23
5.2.4.8	Ingenuity.....	24
5.2.5	Découvertes et avancées .....	25
5.3	MISSION MAVEN .....	26
5.3.1	Introduction .....	26

5.3.2	Objectifs de la mission .....	26
5.3.3	Composition technique .....	27
5.3.3.1	MAVEN .....	27
5.3.3.2	SEP .....	28
5.3.3.3	SWIA .....	28
5.3.3.4	SWEA .....	29
5.3.3.5	STATIC.....	29
5.3.3.6	LPW.....	29
5.3.3.7	MAG.....	30
5.3.3.8	NGIMS.....	30
5.3.3.9	IUVS .....	31
5.3.3.10	Electra HUF .....	31
5.3.4	Découvertes et avancées .....	31
5.4	PROGRAMME ARTEMIS.....	33
5.4.1	Origines du programme .....	33
5.4.2	Programme spatial .....	34
5.4.3	Intérêts des entreprises privées.....	35
5.4.4	Programmes en concurrence .....	35
5.4.5	Plan de missions.....	36
5.4.6	Technologies .....	38
5.4.6.1	Orion Spacecraft.....	38
5.4.6.2	SLS .....	41
5.4.6.3	Station Lunar Gateway .....	44
5.4.6.4	Atterrisseurs lunaires .....	45
5.4.6.5	DRACO .....	47
5.4.6.6	Camps de bases lunaires .....	49
6	CONCLUSION .....	56
7	BIBLIOGRAPHIE.....	57
8	TABLES DES FIGURES .....	62
9	ANNEXES.....	65
A-1	: Interview de Nicolas Bettschart – Ingénieur aéronautique .....	65
A-2	: Interview de Claude Nicollier – Ancien astronaute.....	71
A-3	: Interview d’Alexandre Looten – Doctorant à l’EPFL en Science et génie des matériaux.....	71
A-4	: Accords Artemis .....	72

### 3 INTRODUCTION

Entre la deuxième et la troisième année au gymnase, il nous est demandé de réaliser un travail de maturité sur un sujet de notre choix. Etant passionné d'astronomie depuis toujours et pratiquant l'observation planétaire, ainsi que l'astrophotographie, j'ai souhaité étudier ce domaine dans mon travail de maturité.

Au même moment où je réfléchissais au sujet précis que j'allais traiter, la mission Artemis 1 allait avoir lieu et une météorite de plusieurs centaines de tonnes était entrée en collision avec Mars, ce qui a permis à l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace des USA (NASA) de montrer à nouveau la présence d'eau sous forme de glace à la surface martienne. J'ai donc choisi de m'intéresser à Mars et aux programmes spatiaux associés.

#### 3.1 Problématique

J'ai porté un intérêt particulier sur la manière d'expliquer l'intérêt des missions martiennes à une personne non initiée. Ainsi, je me suis posé les questions suivantes : "Pourquoi nous intéressons-nous particulièrement à la planète Mars ?" et "Quels sont les moyens employés dans les programmes spatiaux martiens ?".

#### 3.2 Méthodologie

J'ai commencé par établir la problématique en me basant sur des recherches sommaires et je l'ai fait valider par mon répondant Monsieur Valzino. J'ai ainsi pu établir un plan de travail avec un échéancier.

Afin de mener à bien mon travail, j'ai établi une liste des missions robotiques martiennes en les séparant en deux catégories : les missions orbitales et les missions de surfaces. Parmi ces missions, j'ai choisi MAVEN, qui est un orbiteur, et le rover Persévérance, afin de les étudier.

J'ai ensuite pu établir la structure de mon document. Je traite donc les caractéristiques physiques et le passé de Mars, la mission Persévérance, la mission MAVEN et finalement le programme Artemis.

Pour récolter les informations nécessaires à la réponse de ma problématique, j'ai employé deux moyens différents. Premièrement, j'ai utilisé la recherche documentaire et comparative en utilisant les sites des agences spatiales, les sites des entreprises privées concernées et les médias scientifiques. Deuxièmement, j'ai organisé trois interviews, afin de compléter les informations et de m'apporter différents points de vue. J'ai eu la chance de pouvoir contacter Monsieur Alexandre Looten et Monsieur Nicolas Bettschart, grâce à des connaissances de ma famille. De plus, Monsieur Claude Nicollier a gentiment accepté de m'accorder une interview.

## 4 LA PLANÈTE MARS

### 4.1 Introduction

Mars est la quatrième planète la plus proche du soleil. Elle est située à une distance moyenne avec le Soleil de 227 939 200 km. C'est une planète tellurique, tout comme Mercure, Vénus et la Terre. Elle est donc constituée principalement de roches et de métaux qui sont structurés en un noyau en fusion, un manteau et une croûte.

Mars a un diamètre moyen de 6791km, soit environ la moitié de celui de la Terre qui est de 12 742km. Sa masse quant à elle est estimée à  $6.417 \times 10^{23}$  kg, ce qui correspond à seulement 10% de la masse de la Terre. Par conséquent, la gravité à sa surface correspond à 38% de la gravité terrestre.

Sa période de révolution autour du soleil est de 687 jours terrestres, soit environ 1.88 année terrestre. La durée d'un jour martien dure en moyenne 24h 39min 35s et n'est donc pas très différente de celle sur Terre.

« Mars est en orbite autour du soleil, il y a donc des moments où elle est relativement proche de la Terre et des moments où elle est très loin. »<sup>1</sup>, comme l'explique Alexandre Looten. En effet, La distance Terre-Mars varie beaucoup. Elle évolue entre 56 millions de kilomètres au plus proche et 401 millions de kilomètres au plus loin. La distance moyenne est de 225 millions de kilomètres.

### 4.2 Phobos et Deimos

Il existe deux lunes en orbite de la planète Mars. Elles se nomment Phobos et Deimos. Leur origine n'est pas sûre, car leurs compositions sont différentes de la planète Mars. Il est possible que les deux lunes soient des astéroïdes provenant de la barrière d'astéroïde ou qu'elles soient le résultat d'un amassement de débris orbitaux, issus de l'impact d'un corps céleste de la taille de Cérès avec Mars il y a plus d'un milliard d'années. Cérès est une planète naine de notre système solaire, étant environ quatre fois plus petite que la Lune avec un rayon équatorial de 487.5km.



Figure 1: Photographie de Phobos, planetary.org

Phobos est la lune martienne ayant l'orbite la plus basse, avec une altitude moyenne de 5989km par rapport à la surface. Elle mesure 13km × 11.39km × 9.07km et a une masse de  $10.6 \times 10^{15}$ kg. Sa période de révolution est de 7h 39min environ, soit 0.31 jour martien. Son destin est tout tracé, car elle se rapproche d'1.8m de la surface martienne chaque année. Phobos rentrera donc en collision avec Mars dans environ cinquante millions d'années ou éclatera et se transformera en anneaux.

<sup>1</sup> PETIGNAT Théo, « Interview d'Alexandre Looten – Doctorant en Science et génie des matériaux », Annexe A-3, 08.09.2023



Figure 2: Photographie de Deimos, [supernova.eso.org](http://supernova.eso.org)

La deuxième Lune, Deimos, orbite quant à elle à une altitude de 20068km de la surface. Sa masse est de  $1.5 \times 10^{15}$  kg et ses dimensions sont  $7.5\text{km} \times 6.1\text{km} \times 5.2\text{ km}$ . Une révolution de Deimos dure 30h 18min, soit 1.23 jour martien. Contrairement à Phobos, Deimos s'éloigne légèrement de Mars chaque année et pourrait bien finir par s'échapper de l'attraction martienne, au moment où sa vitesse de rotation correspondra la vitesse de libération.

### 4.3 Atmosphère martienne

Mars possède une atmosphère très différente de la Terre. Elle se compose à 95.97% de dioxyde de carbone, 1.93% d'argon, 1.89% de diazote et 0.146% de dioxygène. Les 0.064% se compose de monoxyde de carbone, de vapeur d'eau et d'ozone, dont les quantités varient selon les saisons.

Gas	Mars
CO <sub>2</sub>	95.97 %
Ar	1.93 %
N <sub>2</sub>	1.89 %
O <sub>2</sub>	0.146 %
CO	557 ppmv
H <sub>2</sub> O (variable)	~ 0.03 %
O <sub>3</sub> (variable)	0.01 – 5 Dobs

Figure 3: Tableau de la composition de l'atmosphère martienne, [mars.aeronomie.be](http://mars.aeronomie.be)

Etant donné de la très faible concentration en ozone et en vapeur d'eau, l'atmosphère de Mars ne permet pas d'arrêter les rayons UV, comme la couche d'ozone de la Terre le permet. Ces rayons UV pourraient ainsi détruire les potentielles molécules organiques à la surface de Mars. C'est l'une des raisons pour lesquelles la NASA étudie aussi le sous-sol martien qui est protégé des rayons UV par les roches de surface.

### 4.4 Météorologie martienne

La planète rouge n'abrite pas des conditions météo aussi confortable que la Terre. En effet, les températures peuvent aller de -140°C à +25°C. Des études sur les températures de Mars ont mesuré une moyenne de -63°C à la surface du globe. Ces températures s'expliquent, car Mars se trouve un rang plus loin du Soleil que la Terre et on considère que l'ensoleillement de la planète rouge est deux fois moins important que celui de la planète bleue. De plus, le CO<sub>2</sub>, un gaz à effet de serre présent dans l'atmosphère martienne, ne permet pas de compenser suffisamment le faible ensoleillement, malgré la grande quantité présente.



Les faibles températures entraînent une condensation de  $\text{CO}_2$  aux pôles, ce qui recouvre la surface de calottes polaires de neige carbonique. Cette neige contient également de l'eau sous forme solide en combinaison avec le dioxyde de carbone.

L'atmosphère peu dense de Mars permet à des vents d'atteindre régulièrement les 100km/h. Ces courants d'air provoquent sur Mars des tempêtes de sable et sont responsables de la formation de dunes dans les zones de basses altitudes de la planète.

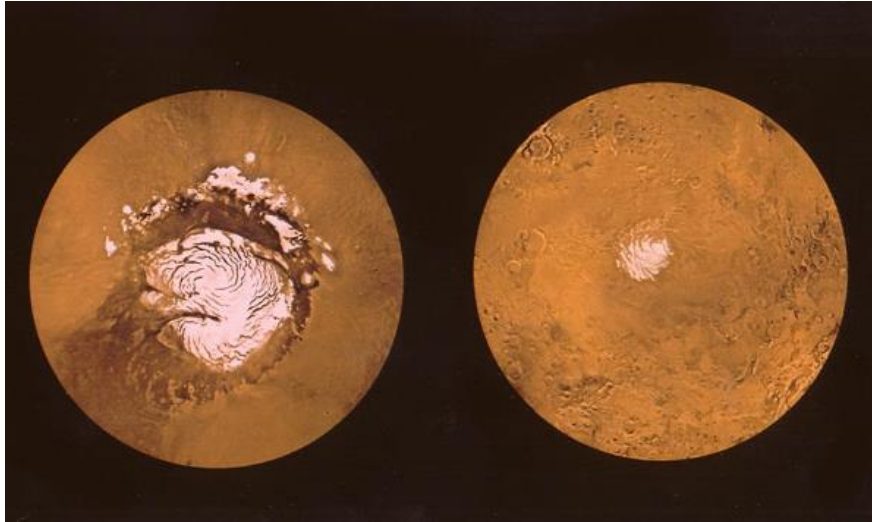


Figure 4: Photographie de la calotte du pôle Nord (à droite) et de la calotte du pôle Sud (à gauche), [planete-terre.ens-lyon.fr](http://planete-terre.ens-lyon.fr)

L'axe de rotation de Mars est incliné à un peu plus de  $25.19^\circ$  par rapport à la perpendiculaire à son plan orbital. Le fait que cet angle soit relativement proche de celui de la Terre,  $23.44^\circ$ , induit qu'il y a également quatre saisons sur Mars. Cependant, celles-ci durent plus longtemps.

L'orbite excentrique de Mars provoque une différence de longueur entre les saisons et par conséquent entre les hémisphères. Dans l'hémisphère Nord, les hivers sont relativement courts et doux, alors que dans l'hémisphère Sud, l'hiver est plus long et plus froid. De ce fait, les calottes glaciaires des deux pôles ont des tailles très différentes, comme on peut le voir sur l'image ci-dessus. La formation de ces calottes glaciaires est expliquée par le climat aux pôles. La température aux pôles varie entre  $-143.15^\circ\text{C}$  en hiver et  $-83.15^\circ\text{C}$  en été, ce qui permet au dioxyde de carbone de l'atmosphère de geler et ainsi former les calottes. Tout comme sur Terre, les calottes glaciaires sont bien plus grandes en hiver qu'en été. Celle du pôle Nord a un diamètre pouvant aller jusqu'à 1000km en hiver, celui-ci se réduit à 300km en été. Une partie du dioxyde de carbone alors solide en hiver effectue une sublimation due à l'augmentation des températures en été et se retrouve à nouveau à l'état gazeux dans l'atmosphère.

## 4.5 Relief de la surface

Une des caractéristiques les plus visibles de la géographie martienne est la différence de relief entre les deux hémisphères. L'hémisphère Nord est constitué de vastes plaines lisses, contrairement à l'hémisphère Sud qui est constitué de hauts plateaux accidentés et de cratères. De plus, la croûte de l'hémisphère Sud est beaucoup plus épaisse. Actuellement, nous ne savons toujours pas quelle est l'origine de cette différence de relief importante, il faudra attendre l'étude de roches de toute la croûte martienne pour en identifier la cause.

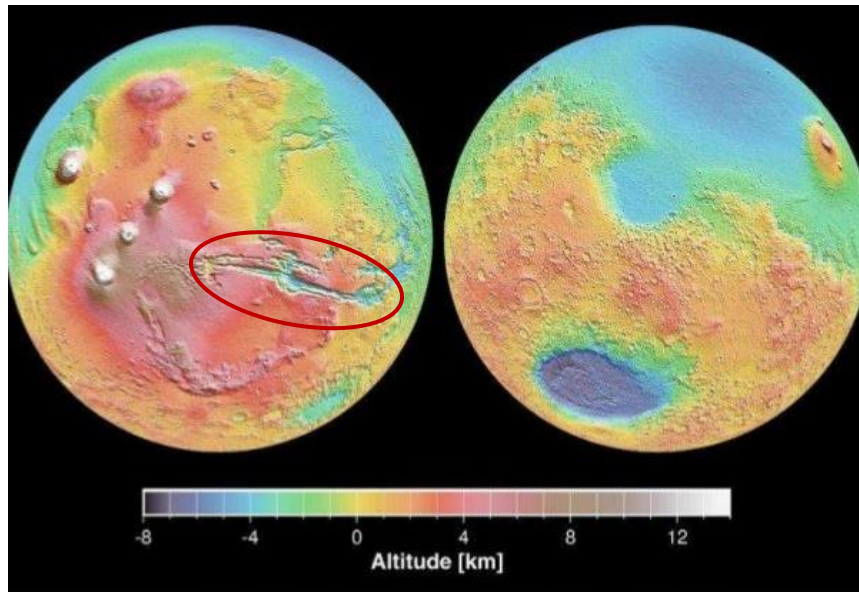


Figure 5: Carte topographique de l'hémisphère Nord (à droite) et de l'hémisphère Sud (à gauche) de Mars, slideshare.net

Mars abrite le plus grand canyon connu du système solaire, qui se nomme « Valles Marineris ». Il mesure plus de 3000km de long et a une profondeur pouvant atteindre jusqu'à 8km. On peut le voir entouré en rouge sur la carte ci-dessus.



Figure 6: Photographie du volcan Olympus Mons, le-système-solaire.net

Le plus grand volcan bouclier du système solaire se trouve également sur Mars et s'appelle « Olympus Mons ». Ce volcan culmine à 22500m d'altitude, ce qui correspond à environ 2.5 fois le mont Everest. Son diamètre est de 624km et il occupe une surface d'environ 305000 km<sup>2</sup>, soit légèrement plus que la surface de l'Italie ou de l'Arizona.

## 4.6 Structure de la planète

Mars possède, en son centre, un noyau liquide surdimensionné qui est composé de nickel, de soufre et de fer. D'après les études effectuées, ce noyau possède un rayon se situant entre 1500 et 2100 km, ce qui est supérieur au rayon du noyau terrestre, d'environ 1216 km. Autour du noyau, se trouve un manteau rocheux et visqueux qui est immobile par rapport aux points chauds et qui s'étend sur une distance de 1240 à 1880 km d'épaisseur. En dessus, il y a la croûte qui est composée de fer, de magnésium, d'aluminium, de calcium et de potassium. La présence de roches ferreuses à la surface de Mars est responsable de sa couleur rougeâtre. L'épaisseur de la croûte martienne évolue entre 10 km pour les régions de l'hémisphère Nord et 50 km pour l'hémisphère Sud.

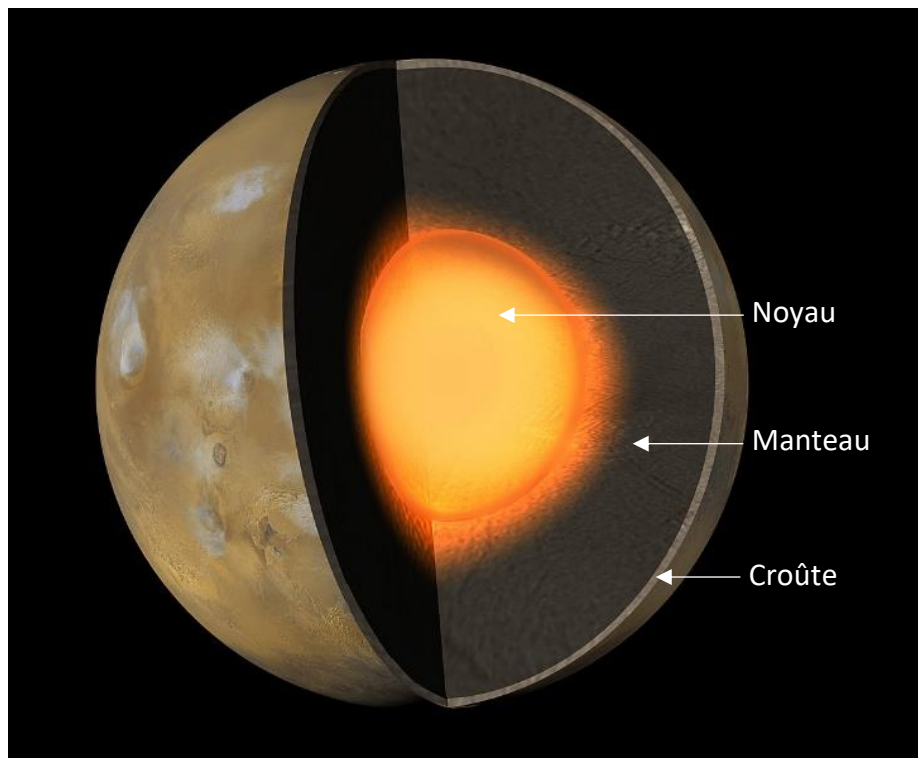


Figure 7: Modélisation de la structure de Mars, wikipedia.org

## 4.7 Volcans martiens

Il y a de nombreux volcans sur Mars, dont certains sont gigantesques. Mars abrite, en effet, les plus grands volcans du système solaire, dont le plus grand, Olympus Mons, présenté précédemment. Ces imposants volcans boucliers effusifs, se sont formés par l'empilement de coulées de lave provoquées par les éruptions volcaniques sur plus de 3.8 milliards d'années. Ce processus de formation explique également leur surface immense en comparaison des volcans terrestres. Cette différence est due à l'absence de plaques tectoniques sur Mars, comme on peut le voir sur l'illustration ci-dessous. En effet, le manteau rocheux martien est immobile par rapport aux points chauds, ce qui provoque des éruptions volcaniques toujours aux mêmes endroits pendant plusieurs milliards d'années permettant à la lave de s'accumuler.

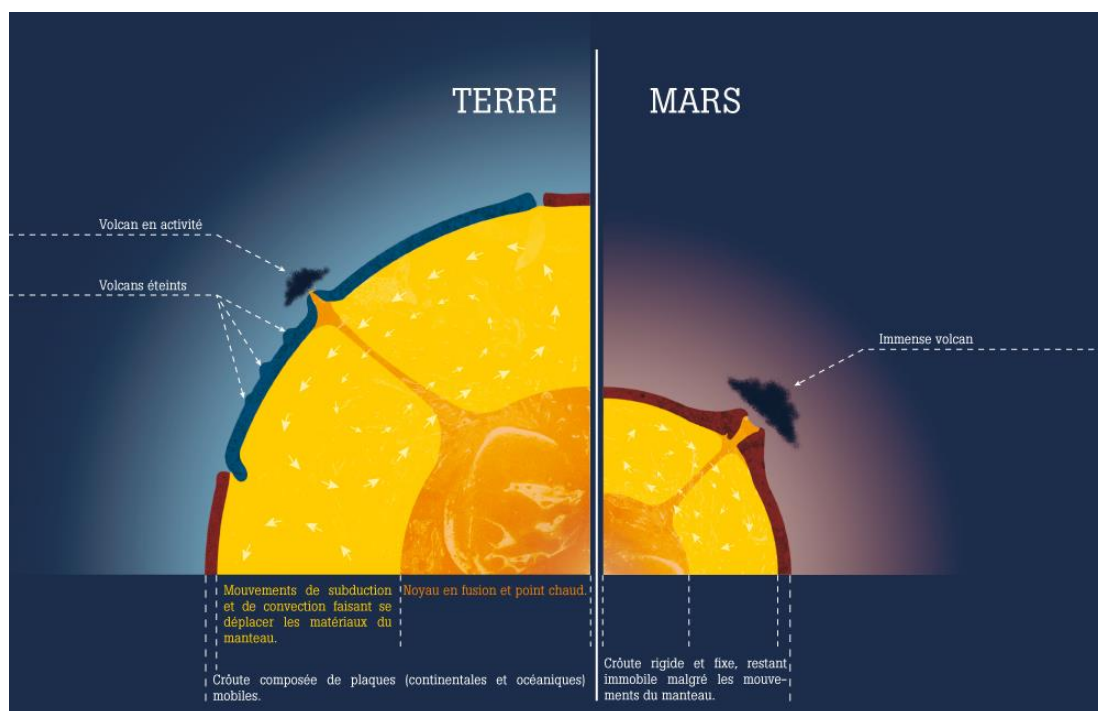


Figure 8: Illustration de comparaison de l'activité volcanique terrestre et martienne, laurinemoreau.com

## 4.8 Eau et vie sur Mars

Actuellement, les scientifiques considèrent que la totalité de l'eau sur Mars se trouve soit sous forme solide, soit sous forme gazeuse. Cette eau sous forme de glace se situe dans les calottes polaires et dans le sous-sol martien. En effet la mission Phoenix, menée par la NASA, a découvert de la glace sous le sable qui recouvre la surface. Des études ont prouvé que de l'eau à l'état liquide a véritablement existé et qu'il y en a eu des quantités importantes, sous forme de pluie, de neige, de glaciers et dans un potentiel océan au Nord. La NASA a également trouvé de grandes quantités de roches argileuses à la surface, créées grâce à cette eau. L'observation du relief de Mars permet d'identifier de grandes vallées fluviales, dont les roches portent des traces d'érosion, ainsi que des deltas, comme celui du cratère Jerezo.

Il est fortement probable qu'un grand océan ait recouvert la moitié de l'hémisphère Nord lors de l'époque humide qui semble avoir existé il y a 4.2 milliards d'années. En effet, les rives de cet océan ont pu être identifiées grâce à des analyses du relief. Les chercheurs ont également pu constater que les vallées formées par le débit d'eau liquide rejoignaient ces rives, ce qui constituait la possible alimentation de cet océan.

Etant donné que la vie terrestre est apparue dans l'eau, il est donc possible que la vie, telle qu'on la conçoit, soit apparue dans cet océan. Toutefois, des études ont montré que si des organismes s'y sont développés, ceux-ci ne sont pas des organismes complexes, car la période propice à l'apparition de la vie a été trop courte.

Pour qu'une étendue d'eau aussi large puisse rester stable, l'atmosphère de Mars pendant la période humide devait être beaucoup plus riche et dense qu'aujourd'hui. En effet, pour que l'eau soit à l'état liquide, il est nécessaire de disposer d'une pression atmosphérique adéquate et d'une température supérieure au point de fusion de l'eau. D'après les informations que nous possédons actuellement, l'atmosphère martienne était cent fois plus dense il y a 4.2 milliards d'années. Les scientifiques estiment que les gaz qui constituaient l'atmosphère martienne, excepté le CO<sub>2</sub>, se sont échappés dans l'espace dans leur quasi-intégralité. Le dioxyde de carbone a bien moins fuité dans l'espace en raison de sa masse atomique supérieure à celle des autres gaz. De plus, des gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone et le méthane, permettaient, avec l'ensoleillement, de maintenir des températures convenables pour permettre l'existence de cet océan.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> PETIGNAT Théo, « Interview de Claude Nicollier – Ancien astronaute », Annexe A-2, 12.10.2023

## 4.9 Champ magnétique

Mars possédait également un champ magnétique qui protégeait la planète des vents solaires et permettait d'éviter les fuites de gaz atmosphériques dans l'espace. Ce champ magnétique était conféré par les interactions entre le fer et le nickel liquide dans le noyau. Actuellement, les scientifiques s'accordent pour dire que c'est probablement la disparition de ce champ magnétique qui a mené aux conditions actuelles sur Mars.

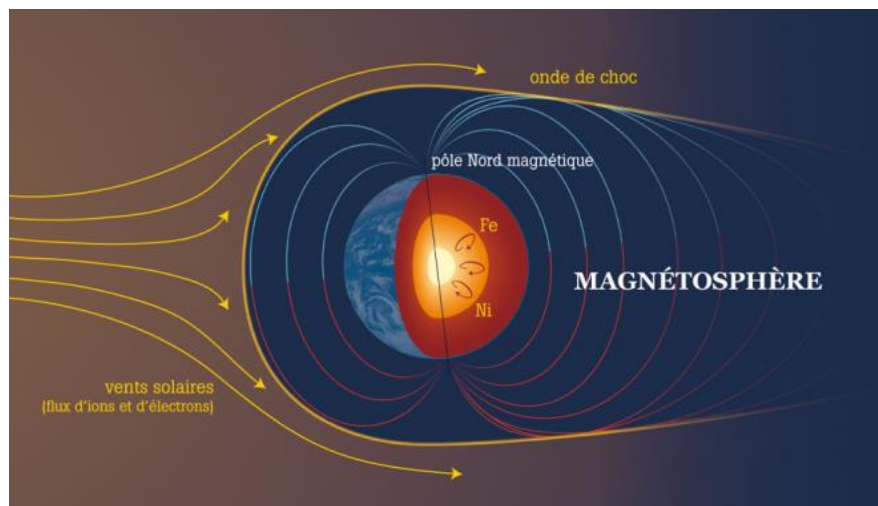


Figure 9: Représentation de Mars avec son champ magnétique, laurinemoreau.com

Une explication possible à cette disparition est le fait que Mars soit plus petite que la Terre et donc que son noyau se refroidit plus vite, jusqu'à se solidifier en partie. Une fois le fer et le nickel solidifiés, les interactions engendrant le champ magnétique n'ont plus lieu. Par conséquent, les gaz atmosphériques ne sont plus maintenus dans l'atmosphère et s'éparpillent dans l'espace. Actuellement, il reste quelques régions de l'hémisphère Sud de Mars où un champ magnétique rémanent subsiste.

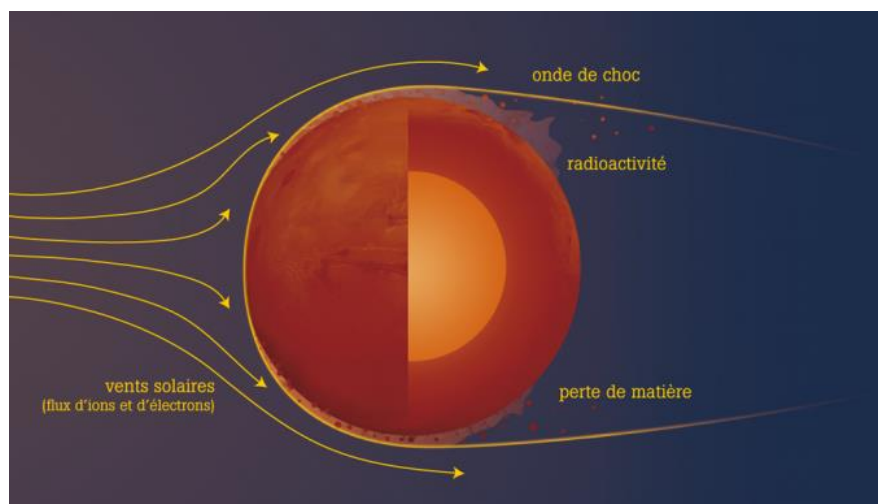


Figure 10: Représentation de Mars sans son champ magnétique, laurinemoreau.com



## 4.10 Opportunités de recherche

La planète Mars offre aux scientifiques des opportunités uniques de recherche qui sont dues à sa composition, sa place dans le système solaire et son évolution.

Comme l'exprime Nicolas Bettschart, « *Un environnement relativement proche de celui de la terre, mais non viables pour l'homme, ouvrent la voie à de multitudes de projets allant de la science du vivant, la géologie, l'étude des radiations, des systèmes autonomes, de l'IA, des transmissions, sans oublier les études sur le confinement et la nutrition des astronautes.* »<sup>3</sup> De plus, les caractéristiques propres à Mars permettent également des études dans les domaines de la climatologie, la météorologie et la planétologie.<sup>4</sup>

L'ensemble de ces études ont pour objectif de comprendre en détail l'évolution des conditions climatiques martiennes, afin de déterminer la future évolution de la Terre, dont la formation et l'évolution sont comparables à Mars. Le deuxième grand objectif de ces études est de déterminer s'il y a eu, sur Mars, de la vie telle qu'on la conçoit. En effet, selon les dires de Claude Nicollier, « *si l'on comprend bien Mars [...] et ses révolutions passées [...], on pourra mieux prédire ce qu'il adviendra de la terre dans le futur.* »<sup>5</sup>

---

<sup>3</sup> PETIGNAT Théo, « Interview de Nicolas Bettschart – Ingénieur aéronautique », Annexe A-1, 6.10.2023

<sup>4</sup> PETIGNAT Théo, « Interview d'Alexandre Looten – Doctorant en Science et génie des matériaux », Annexe A-3, 08.09.2023

<sup>5</sup> PETIGNAT Théo, « Interview de Claude Nicollier – Ancien astronaute », Annexe A-2, 12.10.2023

## 5 LES MISSIONS ET LES PROGRAMMES SPATIAUX

### 5.1 Types de missions

Les missions spatiales martiennes peuvent être catégorisées en deux grands types de missions: les missions robotisées et les missions habitées. Ces deux types de missions sont complémentaires, car la majorité des défauts de l'un est comblée par l'autre.

Il est aussi possible de séparer la catégorie des missions robotisées en deux, entre les missions orbitales, comme MAVEN, Mars Reconnaissance Orbiter, Mars Odyssey ou Trace Gas Orbiter et les missions de surface, telles que Persévérance, Curiosity, ou Insight Lander, qui sont en cours.

Ensuite, les missions habitées vers l'orbite et la surface de Mars sont encore lointaines car ces missions n'en sont actuellement qu'à leur phase de prototypage et de test. De plus, les premiers pas sur la surface martienne, qui seront effectués par une femme, sont prévus pour 2037 au plus tôt. Cependant, le programme Artemis, en cours, sert à préparer ces missions en direction de la planète Mars, en testant les technologies et les manières de procéder sur la Lune qui est beaucoup plus proche.

#### 5.1.1 Avantages de l'approche robotisée

Premièrement, N. Bettschart explique que « *Les missions non habitées sont moins risquées et coûtent nettement moins chers, car elles ne nécessitent pas d'aménagements particuliers pour la survie des astronautes* »<sup>6</sup>. En effet, dans ce cas, les systèmes de survie et les mesures de sécurité supplémentaires pour l'équipage ne sont pas utiles et nécessaires.

Deuxièmement, l'approche robotisée permet des missions de plus longue durée et sans limite géographique. Effectivement, les robots n'ont pas besoin de ravitaillement et les ordinateurs de bord peuvent être reprogrammés, ce qui permet de modifier ou d'ajouter des tâches spécifiques que le robot doit effectuer. Cela permet donc de prolonger la durée des missions. De plus, les robots peuvent être envoyés dans des endroits aux conditions extrêmes, tels que la haute atmosphère de Vénus et les océans sous la surface d'Europa, une lune de Jupiter.

Enfin, ce type de missions permet de réduire l'empreinte environnementale sur les lieux explorés. En effet, les missions robotisées produisent beaucoup moins de déchets et altèrent plus faiblement l'environnement, car peu de ressources, de carburant et d'équipements sont amenés ou produits sur place. Le risque de contamination de l'environnement est donc bien plus faible.

---

<sup>6</sup> PETIGNAT Théo, « Interview de Nicolas Bettschart – Ingénieur aéronautique », page 14



### 5.1.2 Avantages de l'approche habitée

Tout d'abord, la présence humaine permet une prise de décisions et une communication en temps réel. En effet, l'équipage est capable de s'adapter et d'improviser de nouvelles solutions dans des situations complexes, comme des incidents imprévus. De plus, les membres d'équipage peuvent effectuer des expériences complexes, des réparations et assurer la maintenance des systèmes, ce qui n'est pas possible avec uniquement des robots.<sup>7</sup>

Ensuite, comme Claude Nicollier l'affirme, « *Il est intéressant d'avoir des missions habitées sur Mars pour vérifier [...] si l'être humain est capable de vivre à long terme sur un autre corps céleste [...], très loin de la Terre.* »<sup>8</sup>. Ces missions permettent d'étudier plus précisément les effets sur le corps humain de l'exposition prolongée à un environnement extraterrestre. Elles permettent aussi d'analyser les interactions sociales dans des espaces confinés entre un nombre restreint de personnes et les impacts psychologiques qui en résultent. Effectivement, les scientifiques souhaitent étudier l'effet de l'éloignement de la planète Terre sur la psychologie de l'équipage. Ils veulent également étudier les effets de la microgravité sur le corps humain pendant une longue période, afin de pouvoir adapter les découvertes à des applications médicales terrestres.

Enfin, les missions spatiales habitées suscitent un fort intérêt du public. Elles permettent d'inspirer les jeunes générations à effectuer des carrières scientifiques et technologiques. Les programmes spatiaux peuvent également renforcer l'image d'un pays dans les relations internationales, comme ça a été le cas avec le programme Apollo pour les Etats-Unis.

---

<sup>7</sup> PETIGNAT Théo, « Interview d'Alexandre Looten – Doctorant en Science et génie des matériaux », Annexe A-3, 08.09.2023

<sup>8</sup> PETIGNAT Théo, « Interview de Claude Nicollier – Ancien astronaute », Annexe A-2, 12.10.2023

## 5.2 MISSION PERSÉVÉRANCE



Figure 11: Selfie du rover Persévérance et d'Ingenuity, news18.com

### 5.2.1 Introduction

La mission Persévérance se compose d'un rover, qui est le successeur direct du rover Curiosity, et d'un drone nommé « Ingenuity ». La mission Persévérance a décollé le 30 juin 2020, depuis la base de Cap Canaveral à bord d'une fusée Atlas V et a atterri dans le cratère Jerezo sur Mars le 18 février 2021, soit après 233 jours de voyage. La mise en place de cette mission a coûté 2,7 milliards de dollars. La majorité des coûts sont dû à la recherche et l'innovation ayant été nécessaire à la fabrication des différents instruments de mesure présents sur le rover.

### 5.2.2 Cratère Jerezo



Figure 12: Photographie du delta du cratère Jerezo, mars.nasa.gov

Le cratère Jerezo a été choisi comme site d'atterrissage pour la mission Persévérance. Ce choix a été fait à la suite d'un processus de sélection impliquant des scientifiques de la NASA et du monde entier qui ont étudié, aux cours de 5 années consécutives, plus de 60 sites candidats sur la planète rouge. Les scientifiques estiment qu'il y a plus de 3,5 milliards d'années, des canaux se sont déversés dans le cratère et ont créé un lac.

Le cratère Jerezo, mesurant 45 kilomètres de diamètre, se situe dans la région d'Isidis Planitia, un bassin d'impact de météorites dans l'hémisphère Nord de Mars. Cette région a été créée à la suite de l'impact d'une grande météorite qui a formé un cratère de 1200 kilomètres de diamètre environ. Cet événement est connu sous le nom d'impact d'Isidis, ce qui a modifié la roche de base du cratère. Plus tard, une plus petite météorite s'est écrasée au sein de ce cratère et a formé le cratère Jerezo.

Les scientifiques ont remarqué la présence de minéraux argileux, dans le delta asséché, au sein du cratère. Ces derniers se forment uniquement en présence d'eau. Cette découverte effectuée grâce au satellite « Mars Reconnaissance Orbiter » a permis de confirmer la présence passée d'eau dans ce cratère. Il est donc possible que la vie microbienne ait pu se développer à l'intérieur du cratère Jerezo pendant une ou plusieurs périodes humides. Si c'est le cas, des signes de leurs restes pourraient être trouvés dans le lit du cratère.

### 5.2.3 Objectifs de la mission

La mission persévérance visent cinq objectifs :

1. Le premier objectif est de déterminer si la vie a existé sur Mars, en se concentrant sur des études en surface de l'environnement martien. Les scientifiques utilisent donc l'échantillonnage, en cherchant des traces préservées de biosignatures dans des roches formées dans des environnements martiens ayant eu des conditions qui auraient pu être favorables à la vie microbienne. C'est pourquoi le cratère Jerezo a été choisi.
2. Le second objectif est la caractérisation du climat martien actuel afin de comprendre l'évolution des conditions climatiques martiennes.
3. Le troisième objectif est la compréhension de la géologie martienne, avec l'évolution de la composition des sols, car chaque couche de roches contient des informations sur l'environnement dans lequel elle a été formée. L'étude des processus géologiques ayant créé et modifié la croûte et la surface martienne à travers le temps fait également partie du même objectif.
4. Le quatrième objectif est la préparation de l'exploration humaine. Pour répondre à cet objectif, le rover Persévérance teste des technologies clés permettant d'utiliser des ressources naturelles provenant de l'environnement martien pour garantir le maintien des systèmes vitaux et la production de carburant nécessaire aux missions habitées.
5. Le dernier objectif concerne l'hélicoptère Ingenuity, dont le but est de prouver la possibilité de voler avec un système d'hélice dans l'atmosphère martien.

## 5.2.4 Composition technique

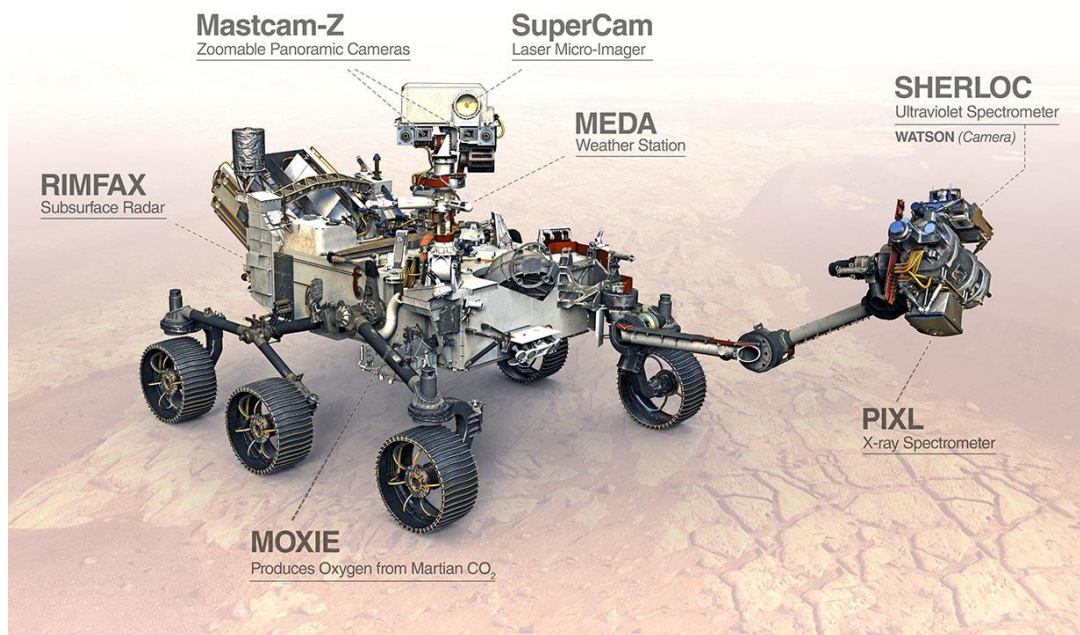


Figure 13: Illustration de la composition du Rover Persévérance, letemps.ch

### 5.2.4.1 Rover Persévérance

Le rover Persévérance reprend la structure de base du rover Curiosity, mais avec des améliorations et des modifications au niveau des roues et des instruments scientifiques innovants à son bord. Tout comme le rover Opportunity, Persévérance fonctionne à l'énergie nucléaire avec des dispositifs thermoélectriques. Ce choix a été fait par la NASA pour éviter de se retrouver dans la même situation que les astromobiles Spirit et Opportunity qui utilisaient des panneaux solaires qui ont été recouverts par la poussière martienne lors de tempêtes. Les missions Spirit et Opportunity ont donc pris fin une fois les batteries vides.

Persévérance transporte six systèmes de mesures différents, tels qu'un radar de sous-sol (RIMFAX), une caméra panoramique (Mastcam-Z), une caméra d'analyses laser (SuperCam), une station météo (MEDA), ainsi que des spectromètres à rayons X (PIXL) et à ultraviolets (SHERLOC). Ce rover est également équipé d'un appareil expérimental, nommé MOXIE, qui a pour objectif de produire de l'oxygène à partir du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère martienne. Le rover Persévérance, avec tous ses instruments scientifiques, a une masse de 1025kg pour des dimensions de 3 m de long, 2.7 m de large et 2.2 m de haut.



#### 5.2.4.2 RIMFAX

RIMFAX est l'abréviation de « Radar imager for Mars' subsurface experiment », comme son nom l'indique, il s'agit d'un radar permettant d'analyser les caractéristiques géologiques des sous-sols martiens.



Figure 14: Photographie du RIMFAX, mars.nasa.gov

Ce radar tire son nom de la mythologie nordique, dans laquelle Hrímfaxi est un des deux chevaux cosmiques à l'origine du cycle du jour et de la nuit. C'est le cheval de la déesse de la nuit, nommée Nøtt.

Il peut détecter la glace, l'eau et les saumures à plus de 10m de profondeur. C'est également le premier radar envoyé par la NASA sur Mars, il opère dans une large plage de fréquences, entre 150 et 1200 megahertz, ce qui permet une polyvalence dans les profondeurs et les types de roches étudiées. Les ondes radios courtes permettent l'étude des matériaux et des structures à la surface ou à quelques centimètres en dessous. Les ondes radios longues, quant à elles, étant moins affectées par l'absorption et la diffusion des ondes au sein de la matière, permettent une vue plus détaillée des structures qui composent les couches souterraines et des surfaces rugueuses.

#### 5.2.4.3 Mastcam-Z



Figure 15 : Photographie de la Mastcam-Z, mars.nasa.gov

Mastcam-Z est une caméra vidéo haute définition, soit 2 mégapixels, aux couleurs panoramiques et au fort zoom, permettant des images 3D de la surface de la planète rouge et des éléments de l'atmosphère. Cette caméra tient son nom simplement de son positionnement sur le mât du rover, « Mast » en anglais et de « Z » pour le zoom.

Cet appareil de haute précision permet une résolution de 150 microns à 7.4 millimètres selon la distance et permet de voir un rocher de la taille d'une mouche à une distance d'un terrain de football, soit à un peu plus de 100 mètres. La Mastcam-Z permet aux scientifiques de sélectionner les roches pouvant contenir des traces de vie passée pour les prélever et étudier la texture de ces roches et des sols. L'étude de la texture permet d'identifier des traces d'anciens lacs, de ruisseaux et d'autres traces d'eau.

#### 5.2.4.4 MOXIE

MOXIE est l'expérience consistant à produire de l'oxygène à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère martienne, qui est composée à 96% de  $\text{CO}_2$ . Son nom est l'abréviation de « Mars Oxygen ISRU<sup>9</sup> Experiment ».

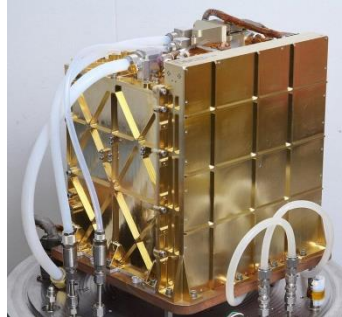


Figure 16: Photographie du module MOXIE, designboom.com

Cette expérience ressemble beaucoup à une pile à combustible, mais fonctionne inversement. Il s'agit d'une « cellule d'électrolyseur à oxyde solide » qui utilise du dioxyde de carbone pour produire du monoxyde de carbone et de l'oxygène. MOXIE parvient à produire jusqu'à 10g d'oxygène par heure, ce qui est une avancée conséquente pour les futures missions habitées, car il est impossible d'apporter l'oxygène nécessaire aux missions habitées depuis la Terre. Il est donc nécessaire de la produire sur place.

La NASA prévoit de construire une version plus grande de MOXIE, nommée « Big MOXIE », qui permettrait de subvenir au besoin en oxygène des missions habitées, c'est-à-dire 25 à 30 tonnes d'oxygène par mission.

#### 5.2.4.5 SuperCam

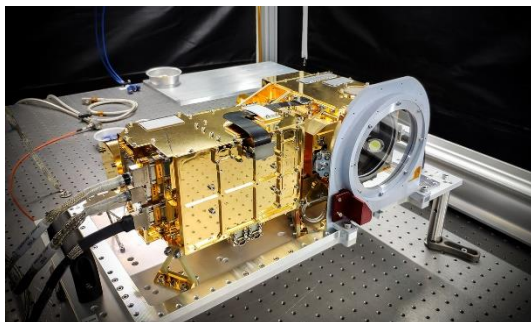


Figure 17: Photographie de la SuperCam, mars.nasa.gov

La SuperCam comporte trois techniques de mesures différentes qui sont : une caméra en couleur, un microphone, un laser ou spectromètre LIBS<sup>10</sup> et un spectromètre infrarouge.

Il s'agit d'une version améliorée de la ChemCam laser du rover Curiosity. Elle permet d'identifier les composants et la texture des roches pour identifier lesquelles se sont formées ou dissoutes dans l'eau et lesquelles peuvent avoir des traces de vie microbienne passée.

<sup>9</sup> ISRU : « In Situ Resource Utilization », « utilisation des ressources locales » en français.

<sup>10</sup> LIBS : « Laser Induced Breakdown Spectroscopy », « Spectroscopie de dégradation induite par laser » en français

C'est grâce au microphone de la SuperCam que les scientifiques ont pu enregistrer les premiers sons de la planète Mars. Le microphone est utilisé pour étudier les vents, les turbulences et la transmission du son dans l'atmosphère de Mars, ainsi que pour déterminer la dureté des pierres sur lesquelles le laser a effectué un tir, en fonction du son qui est émis.

Ce laser pulsé ou spectromètre LIBS effectue des tirs de photons qui rentrent en collision avec la surface des roches étudiées, en la transformant en plasma. Lorsque le laser n'émet pas, le plasma refroidit et les atomes émettent des ondes lumineuses en revenant à l'état solide. Puis, le spectromètre LIBS analyse les longueurs d'ondes émises afin de déterminer les différents éléments de composition de la roche et leur concentration.

La SuperCam étudie également la manière dont les molécules de l'atmosphère, la glace et la poussière absorbent ou reflètent les radiations solaires, ce qui permet d'établir des prédictions météorologiques sur Mars.

#### 5.2.4.6 MEDA

MEDA est la station météorologique de Persévérance. Il s'agit de l'abréviation de « Mars Environmental Dynamics Analyzer » qui signifie « Analyseur de dynamique environnementale martienne » en français.

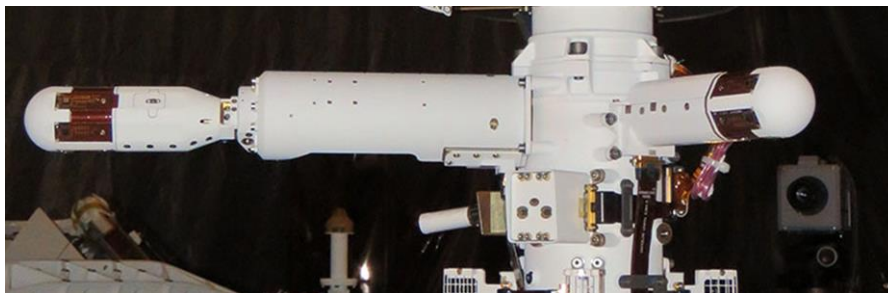


Figure 18: Photographie du module MEDA, [mars.nasa.gov](https://mars.nasa.gov)

MEDA a la capacité de mesurer la vitesse et la direction des vents, la température, l'humidité, la taille et la quantité de particules de poussières dans l'atmosphère, ainsi que les radiations et la pression atmosphérique.

Sa première tâche est l'étude des effets de la poussière martienne sur la température et la météo de la planète rouge, afin de permettre aux scientifiques de prévoir le mieux possible la météo. Ces prévisions sont très importantes pour la sécurité des futures missions habitées. Sa deuxième tâche est de participer à l'identification des roches pouvant contenir des traces de vie, ce qui permet aux chercheurs de comprendre les changements dans les roches dus aux radiations solaires et cosmiques.

#### 5.2.4.7 SHERLOC

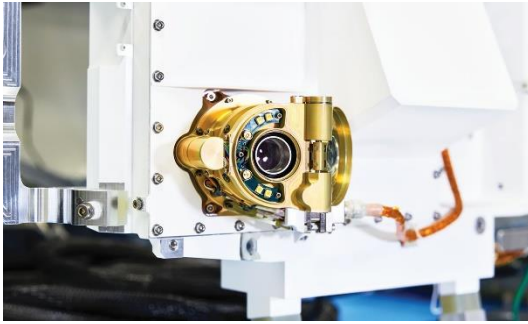


Figure 19:: Photographie de l'instrument de mesure SHERLOC, [mars.nasa.gov](https://mars.nasa.gov)

SHERLOC est l'abréviation de « Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals », soit en français « analyse d'environnements habitables avec la méthode Raman et luminescence pour les produits organiques et chimiques ».

Il s'agit d'un spectromètre ultraviolet qui fonctionne selon la méthode de la spectroscopie Raman. Il est composé d'un laser ultraviolet, d'une caméra d'autofocus et d'image de contexte, ainsi que de la caméra WATSON. WATSON est l'abréviation de « Wide Angle Topographic Sensor for Operations and engineering », soit en français « Capteur topographique grand angle pour les opérations et l'ingénierie électronique ».

Ce système de mesure scientifique tient son nom du célèbre enquêteur de fiction Sherlock Holmes et de son acolyte, le docteur Watson.

Le travail combiné des deux caméras et du laser ultraviolet permet de détecter des biosignatures et des minéraux, grâce à la luminescence de la matière organique sous les rayons ultraviolets, comme sur les scènes de crimes.

#### PIXL

PIXL est un spectromètre à rayons X couplé à un appareil photo macro, dont le nom est l'abréviation de « Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry », soit en français « Instrument planétaire pour la lithochimie des rayons X ». Les scientifiques responsables de la conception de PIXL ont également choisi ce nom en référence au pixel qui est le plus petit point d'une image digitale.

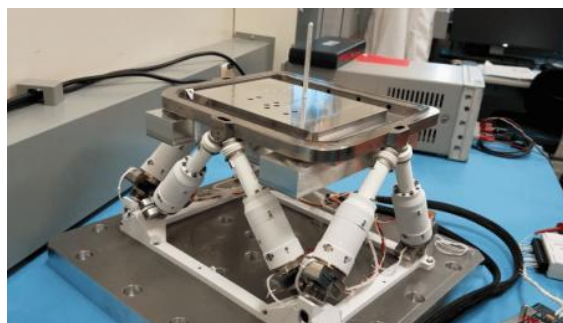


Figure 20: Photographie du module PIXL, [photojournal.jpl.nasa.gov](https://photojournal.jpl.nasa.gov)

Cet instrument d'étude permet de photographier les roches et les sols en très haute résolution et d'identifier les éléments chimiques à une échelle microscopique, grâce à l'emploi des rayons X.



Il permet également aux chercheurs de la NASA d'observer les changements dans les textures et les éléments chimiques des roches martiennes, ainsi que les potentielles traces d'une ancienne vie microbienne.

#### 5.2.4.8 Ingenuity

Ingenuity est un drone fonctionnant à l'énergie solaire, qui a pour objectif de démontrer la possibilité de voler avec des systèmes de type hélicoptère dans les conditions martiennes, où la gravité est un peu plus du tiers de celle de la terre et où la densité de l'atmosphère correspond à seulement 1% de la densité atmosphérique terrestre. En effet, « *Ingenuity est une avancée extrêmement intéressante dans l'exploration de mars, parce qu'avec l'hélicoptère, on peut aller explorer les falaises qui sont pratiquement à la verticale. On peut aussi aller rapidement d'un endroit à l'autre.* »<sup>11</sup>, comme l'énonce Claude Nicollier. Un hélicoptère ou un dirigeable, comme le projet étudié par des étudiants de l'EPFL et Monsieur Nicollier, permet alors de pallier les désavantages du rover.<sup>12</sup>

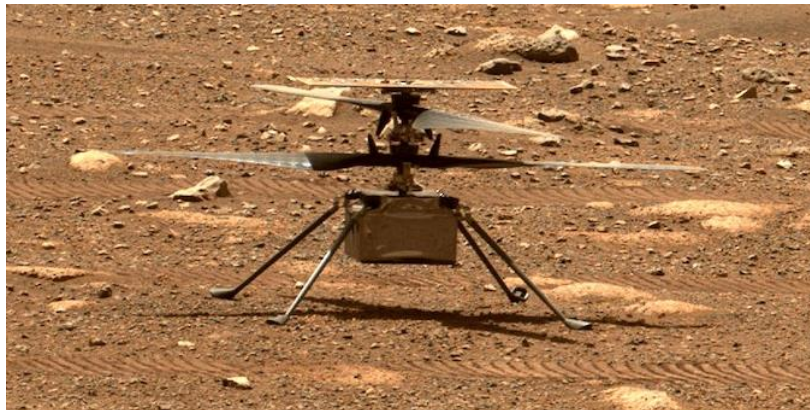


Figure 21: Photographie de l'hélicoptère Ingenuity, uk.pcmag.com

Ce petit hélicoptère de 1.8kg, mesurant 49cm de haut et ayant quatre pales situées sur deux systèmes de rotors, est complètement autonome, grâce à un ordinateur embarqué, des capteurs de navigation et deux caméras, une en noir et blanc et l'autre en couleur.

Depuis son déploiement, Ingenuity a effectué soixante-trois vols, correspondant à une distance cumulée de 14.5km et à une durée de vol totale de 115min 30s.

<sup>11</sup> PETIGNAT Théo, « Interview de Claude Nicollier – Ancien astronaute », Annexe A-2, 12.10.2023

<sup>12</sup> Ibidem

### 5.2.5 Découvertes et avancées

Depuis le début de la mission, le rover Persévérance étudie les roches du delta présent dans le cratère Jerezo. En étudiant le relief et les types de roches présents, les scientifiques sont parvenus à déterminer qu'une rivière à très fort débit traversait cette région. Au cours de sa mission d'échantillonnage, Persévérance effectuera un total de quarante-trois prélèvements, trente-huit échantillons de roches et cinq échantillons d'atmosphère.

Ce rover a déjà récupéré trois échantillons d'atmosphère et vingt-deux fragments de roches à différents endroits du cratère. Six échantillons contiennent des roches ignées, formées à partir de magma. Dix se composent de roches sédimentaires, qui se forment grâce au processus d'érosion et de compaction. Deux autres comportent des roches à la fois ignées et sédimentaires. Il y a également un échantillon n'ayant pas été catégorisé. La présence de ces types de roches permet aux géologues de dire que les roches du cratère Jerezo se sont formées à partir de magma rouge-chaud et qu'elles ont été en contact à plusieurs reprises avec de l'eau à l'état liquide.

Ces échantillons seront envoyés sur Terre afin d'être étudié en profondeur pour mieux comprendre l'évolution du climat martien et de déterminer s'il y a eu une vie microbienne. En effet, l'étude de ces roches permettra de dater les divers événements majeurs les ayant modifiées. Cette mission de rapatriement d'échantillons se nomme « Mars Sample Return » et a été confiée à Lockheed Martin. *« Il y aura un Rover qui va atterrir [...], récupérer les échantillons [...], les mettre dans une capsule de retour, dans une sorte de petite fusée à propulsion solide. Celle-ci sera envoyée en orbite autour de mars [...], puis rentrera sur terre. »*<sup>13</sup>, comme le précise A. Looten.

Grâce à SHERLOC, les scientifiques ont pu confirmer la présence de composés organiques dans les roches du cratère Jerezo. Mais la présence de ces composés ne nous permet malheureusement pas d'affirmer qu'il y a eu de la vie sur Mars. En effet, des processus d'origine non biologiques pourraient être responsables des éléments détectés et par conséquent ne représenteraient pas une preuve de vie microbienne. Les analyses de laboratoire, sur Terre, sont alors nécessaires pour en avoir le cœur net.

---

<sup>13</sup> PETIGNAT Théo, « Interview d'Alexandre Looten – Doctorant en Science et génie des matériaux », Annexe A-3, 08.09.2023

## 5.3 MISSION MAVEN

### 5.3.1 Introduction

MAVEN, l'abréviation de « Mars Atmosphere and Volatile Evolution », est un satellite envoyé par la NASA en orbite martienne pour étudier l'atmosphère et l'ionosphère de la planète rouge, dans des orbites qui varient entre 125km et 6220km au-dessus de la surface de Mars.

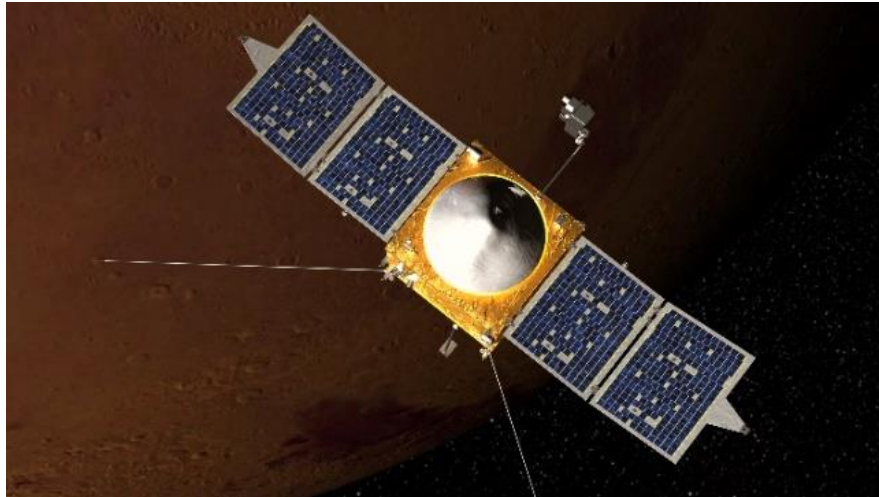


Figure 22: Illustration du satellite MAVEN, [lpl.arizona.edu](http://lpl.arizona.edu)

MAVEN a décollé le 18 novembre 2013, à 13h 28 EST, à bord d'une fusée Atlas V401 depuis le célèbre site de lancement Cap Canaveral. Cette sonde spatiale s'est insérée dans l'orbite martienne le 22 septembre 2014 et a pu commencer sa mission, initialement prévue pour deux ans. Cependant ce satellite avait à son bord du carburant pour plus de dix ans. D'ailleurs, MAVEN est toujours actif et l'ensemble de la mission aura coûté 671 millions de dollars américains pour toutes les années de fonctionnement, la conception et le lancement.

### 5.3.2 Objectifs de la mission

La mission MAVEN a trois objectifs généraux de recherche scientifique :

1. Le premier objectif est la détermination du rôle que la perte des gaz atmosphériques légers, tels que l'hydrogène et l'oxygène, a joué à travers le temps. Ceci permet de mieux comprendre l'histoire de l'atmosphère et du climat de la planète Mars, tout en déterminant la structure et la composition de la haute atmosphère, aussi appelée l'ionosphère martienne.
2. Le second objectif est l'analyse des interactions entre les vents solaires et l'atmosphère de Mars pour comprendre l'évolution des pertes de l'atmosphère, ainsi que l'évolution et les variations climatiques martiennes.
3. Le troisième objectif est l'étude des interactions entre la surface et l'atmosphère, afin de mieux comprendre comment elles ont influé sur les paysages et les évolutions géologiques.

### 5.3.3 Composition technique

#### 5.3.3.1 MAVEN

La sonde spatiale MAVEN produit son énergie de fonctionnement grâce à quatre panneaux solaires composés de 2000 cellules solaires au total, fournissant une puissance variant entre 1150 et 1700 W représentant une surface de 12m<sup>2</sup>. Ces panneaux sont reliés à deux batteries lithium-ion. Ce satellite mesure 2.29 mètres de large, 3.47 mètres de haut et a une envergure de 11.43 mètres avec les panneaux solaire déployés, ce qui correspond à la longueur d'un bus scolaire américain de grande taille. MAVEN a une masse à vide de 809 kilogrammes et une masse de 2454 kilogrammes avec l'hydrazine, qui est le carburant permettant à cette sonde de changer d'orbite efficacement.

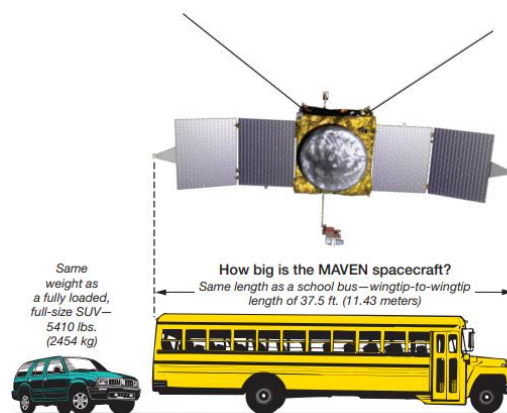


Figure 23: Illustration de comparaison des dimensions de MAVEN, danielmarin.naukas.com

Ce satellite est également équipé de huit instruments de mesures, dont un capteur d'énergie de particules solaires (SEP), un capteur d'ions des vents solaires (SWIA), un capteur d'électrons des vents solaires (SWEA), un capteur de ions à haute-énergie (STATIC), deux capteurs d'ondes avec une sonde Langmuir (LPW), un magnétomètre (MAG), un spectromètre de masse à gaz neutre et à ions (NGIMS) et finalement un spectrographe d'imagerie ultraviolet (IUVS). Ce satellite est également équipé d'un relais de communication, nommé Electra UHF.

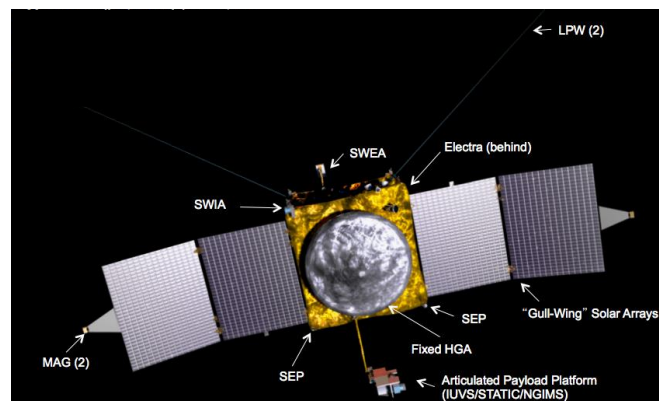


Figure 24: Illustration de la composition de MAVEN, danielmarin.naukas.com

### 5.3.3.2 SEP

SEP est l'abréviation de « Solar Energetic Particles ». Il y a deux capteurs SEP présent sur MAVEN, un de chaque côté, de manière symétrique, qui permettent l'étude de l'interaction des vents solaires avec l'ionosphère, en fournissant des données sur le rôle des particules énergétiques dans le chauffage et l'ionisation de la haute atmosphère.



Figure 25: Photographie des deux capteurs SEP

Ce système mesure les ions énergétiques de l'hydrogène et de l'hélium émis par le soleil pendant les tempêtes et les éruptions solaires, en établissant la quantité d'énergie qui entre dans l'ionosphère et où cette énergie est absorbée.

Un capteur SEP est composé de deux entonnoirs rectangulaires à double extrémités avec une feuille à l'intérieur qui sépare les ions entrant des électrons dans une direction alors qu'un aimant balaye les électrons de faible énergie dans l'autre direction. De plus, des détecteurs à feuilles sont présents entre les deux entonnoirs et enregistrent les ions, ainsi que les électrons séparément.

### 5.3.3.3 SWIA

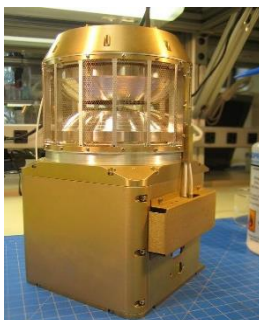


Figure 26: Photographie du module SWIA, [nasa.gov](http://nasa.gov)

SWIA est l'abréviation de « Solar Wind Ion Analyzer ». Il s'agit d'un capteur permettant de mesurer la densité, la température et la vitesse des ions provenant des vents solaires, à la fois dans l'espace proche de Mars et dans l'environnement martien.

#### 5.3.3.4 SWEA



Figure 27:  
Photographie du  
capteur SWEA,  
lasp.colorado.edu

SWEA est l'abréviation de « Solar Wind Electron Analyzer ». Ce capteur sert à mesurer l'énergie, les distributions angulaires des électrons avec des énergies de moyenne portée, ainsi que de faire la distinction entre les électrons des vents solaires et les électrons ionosphériques en raison de leurs différentes distributions d'énergie. Etant donné que MAVEN change d'altitudes et de latitudes d'orbite, les mesures du capteur SWEA permettent de cartographier les régions selon leur exposition aux vents solaires et de caractériser l'ionosphère, tant du côté jour que du côté nuit de la planète rouge.

#### 5.3.3.5 STATIC

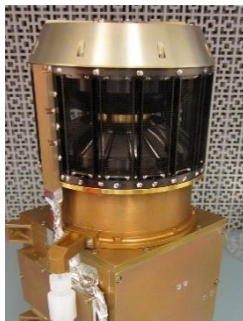


Figure 28:  
Photographie de  
STATIC,  
lasp.colorado.edu

STATIC est l'abréviation de « SupraThermal and Thermal Ion Composition ». Ce système permet de mesurer la composition et la vitesse des gaz, tels que l'hydrogène, de l'hélium, de l'oxygène, et des ions à haute-énergie, comme des ions de dioxyde de carbone, dans l'ionosphère. Les scientifiques s'intéressent aux ions à grande vitesse, car ils peuvent sortir de l'atmosphère jusque dans l'espace et y replonger en causant des pertes par pulvérisation. Les scientifiques cherchent à comprendre et quantifier l'impact de la pulvérisation des ions à haute énergie dans la dégradation et les fuites de l'atmosphère martien.

#### 5.3.3.6 LPW

LPW est l'abréviation de « Langmuir Probe and Waves ». Cet outil de recherche scientifique est composé de deux capteurs et d'une sonde langmuir. Cette sonde électrostatique permet de déterminer la température, la densité électronique et ionique, ainsi que le potentiel électrique du plasma étudié.



Figure 29: Photographie d'une des sondes LPW avec un capteur (en haut à droite), lasp.colorado.edu



Quant à eux, les deux capteurs permettent de mesurer le rayonnement ultraviolet extrême produit par le Soleil. Grâce à l'ensemble des deux capteurs et de la sonde, MAVEN peut mesurer les effets des ondes de plasma et la température des électrons ionosphériques, ce qui permet d'établir des taux de réactions photochimiques, qui contrôlent les fuites atmosphériques.

#### 5.3.3.7 MAG

MAG est un magnétomètre, tenant son nom des trois premières lettres du nom de l'instrument scientifique qu'il est, soit « M », « A » et « G ». Il est composé de deux capteurs qui lui permettent de mesurer des champs magnétiques dans une plage de 60000nT avec une précision de 0.05nT, il est l'héritage de Voyager, Lunar Prospector, Messenger et plusieurs autres encore. Il a pour objectif de mesurer le champ magnétique vectoriel émis par Mars et de caractériser ses interactions avec les vents solaires.



Figure 30: Photographie du magnétomètre MAG, [lasp.colorado.edu](http://lasp.colorado.edu)

#### 5.3.3.8 NGIMS

NGIMS est l'abréviation de « Neutral Gas and Ion Mass Spectrometer ». Comme son nom l'indique, il s'agit d'un spectromètre de masse de gaz neutre et d'ions, permettant d'étudier une plage de masse de 2 à 150 Dalton avec une résolution de 1 Dalton.

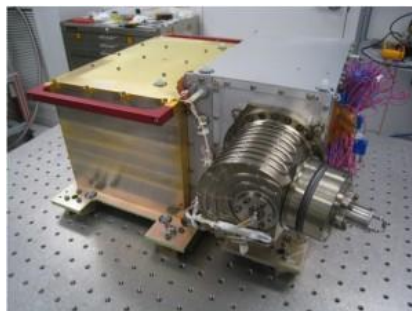


Figure 31: Photographie de l'instrument de mesure NGIMS, [lasp.colorado.edu](http://lasp.colorado.edu)

Il est utilisé pour déterminer la structure et la variation de l'atmosphère neutre et de l'ionosphère dans des altitudes se situant de l'homosphère jusqu'en dessus de l'exobase où les gaz neutres peuvent s'échapper dans l'espace. Il permet aussi de poser les bases qui permettront l'étude de l'énergie thermosphérique, à propos de sa circulation et de la formation de l'ionosphère.

### 5.3.3.9 IUVS

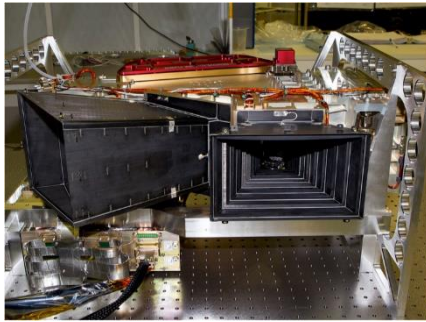


Figure 32: Photographie du système IUVS, mars.nasa.gov

IUVS est l'abréviation de « Imaging Ultraviolet Spectrograph ». Ce spectrographe sert à mesurer des caractéristiques globales de la haute atmosphère et de l'ionosphère de Mars, en utilisant la télédétection, qui consiste à recueillir et à analyser des données obtenues sans contact direct avec l'objet analysé, soit dans ce cas la haute atmosphère et l'ionosphère. Cet instrument scientifique permet une spectroscopie d'image de 110 à 340 nm avec une précision de 0.5 à 1 nm.

### 5.3.3.10 Electra HUF



Figure 33: Photographie du module Electra HUF, mars.nasa.gov

Electra HUF est un relais émetteur et récepteur radio utilisant les ultra-hautes fréquences, d'où son appellation « HUF », qui assure la transmission de signaux entre les robots présent à la surface de Mars. Cet équipement est très important, car il assure la connexion entre les rovers et les ingénieurs de la NASA, peu importe la météo martienne.

## 5.3.4 Découvertes et avancées

Depuis sa mise en orbite autour de Mars, MAVEN a fait beaucoup de découvertes intéressantes, en voici les principales.

Premièrement, ce satellite a montré qu'il y a des processus dynamiques d'échanges gazeux entre la basse et la haute atmosphère martienne, ce qui n'était pas attendu par les scientifiques de la NASA qui ne les comprennent toujours pas entièrement. Cette découverte a été effectuée en analysant la distribution d'ozone et d'oxyde nitrique gazeux dans l'atmosphère martienne.

Ensuite, il a permis de découvrir que certaines particules des vents solaires parviennent à pénétrer à une profondeur inattendue dans la haute atmosphère, plutôt que d'être déviées de Mars par l'ionosphère. Cette pénétration est possible grâce à des réactions chimiques transformant les particules chargées des vents solaires en atomes neutres ayant la capacité de pénétrer profondément dans la haute atmosphère.

Troisièmement, MAVEN a observé pour la première fois une couche de ions métalliques dans l'ionosphère martienne. Cette couche de ions est due à l'arrivée de poussières interplanétaires dans l'atmosphère. Le passage de comètes proche de Mars renforce également cette couche ionique.



Quatrièmement, cette mission a permis d'identifier deux nouveaux types d'aurores qui ne sont pas liées au champ magnétique global ou local. Elles ont été nommées « aurore diffuse » et « aurore à protons ». Ces aurores se forment par des afflux de particules éjectées lors de tempêtes solaires de différents types. Au moment où ces particules frappent l'atmosphère de Mars, elles peuvent aussi augmenter la perte de gaz dans l'espace par des facteurs égaux ou supérieur à dix.

MAVEN a également étudié la variation saisonnière complète de l'hydrogène présente dans la haute atmosphère et a pu confirmer la variation d'un facteur de dix de la quantité d'hydrogène au cours de l'année, en fonction des différentes périodes. L'hydrogène de la haute atmosphère provient de l'eau à l'état gazeux de la basse atmosphère qui est divisée en hydrogène et oxygène par la lumière du soleil, toutefois la variation reste encore aujourd'hui mal comprise.

Sixièmement, grâce à l'étude des isotopes au sein de la haute atmosphère, il est possible de déterminer la quantité de gaz perdu dans l'espace au fil du temps. La mesure de la vitesse à laquelle le soleil et les vents solaires provoquent la fuite des gaz de la haute atmosphère dans l'espace a permis d'extrapoler des taux de pertes dans le passé, lorsque les rayons ultraviolets et les vents solaires étaient plus intenses. Ces taux permettent aux scientifiques d'estimer que deux tiers des gaz ou plus ont été perdus dans l'espace, ce qui a provoqué des changements climatiques. L'environnement qui était plus chaud et humide au début de l'histoire martienne s'est alors transformé en un climat froid et sec, qui est observable aujourd'hui.

## 5.4 PROGRAMME ARTEMIS

### 5.4.1 Origines du programme

En 2004, le programme spatial Constellation a été lancé pour remplacer le programme de missions habitées de la navette spatiale. Son objectif initial était de renvoyer des hommes sur la lune d'ici 2020 et d'en envoyer ensuite sur Mars. Ce programme a été officialisé seulement, en 2005, sous l'administration de George W. Bush. Lors de son officialisation, ses objectifs ont été complétés avec l'ajout de la finalisation de la station spatiale internationale (ISS), en collaborant avec les autres agences spatiales, telles que l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et la JAXA (Agence Spatiale Japonaise).

Au cours du programme Constellation, un vaisseau spatial pouvant transporter quatre membres d'équipage à son bord est développé, par l'ESA et Lockheed Martin en collaboration avec la NASA. Ce vaisseau a été nommé « Orion » et son développement a coûté un peu plus de 18 millions de dollars.

En 2009, l'administration de Barack Obama met fin au programme Constellation en raison de retards et de dépassements budgétaires. En effet, il aurait fallu investir 3 milliards supplémentaires par année pour continuer le programme et atteindre les objectifs fixés. L'administration Obama modifie également les étapes des programmes spatiaux, en visant directement le premier homme sur Mars et en supprimant l'idée d'un retour préalable de l'homme sur la Lune.

De plus, la NASA signe des accords avec ROSCOSMOS (Agence Spatiale Russe), afin de respecter ses engagements dans la finalisation de l'ISS.

En 2010, le congrès américain adopte un projet de loi permettant la conservation de la capsule d'équipage Orion et prévoyant une nouvelle fusée utilisant les contrats existants de la navette spatiale et de Constellation, qui est devenue le SLS (Space Launch System). La NASA s'est aussi tournée vers les entreprises spatiales privées, telles que SpaceX, Blue Origin, Lockheed Martin, Boeing et Ariane Space. Ces dernières se sont beaucoup développées depuis le début des années 2000, afin de fournir des fusées pour la mise en orbite de satellites ou de télescopes orbitaux, et pour le lancement des missions robotiques martiennes.

Puis, en 2017, l'administration de Donald J. Trump réintègre le retour de l'homme sur la Lune et le caractérise de tremplin en direction de Mars. La même année, le programme Artemis est lancé. Son objectif est de retourner sur la lune d'ici 2024, avec la capsule Orion, le SLS et la Gateway, avant d'aller sur Mars.

En parallèle, les accords d'Artemis reprennent les traités de l'espace de 1967 et de 1968 et les complètent avec des objectifs pacifiques, une transparence des plans spatiaux, l'entraide en cas d'urgence, le partage des découvertes scientifiques, l'immatriculation de tous les objets mis en orbite, la protection des sites explorés et des ressources spatiales, ainsi que l'élimination des débris d'engins spatiaux en orbite.<sup>14</sup>

Le coût estimé de la première phase d'Artemis (Artemis I, II, III) et des programmes de développement liés s'élève à environ 93 milliards de dollars sur la période de 2012 à 2025. La NASA consacre à Artemis un peu moins de la moitié de son budget annuel de plus de 20 milliards de dollars. En 2020, la partie du budget allouée à Artemis était de 10.16 milliards de dollars, ce qui représentait 44.9% du budget annuel de la NASA, qui était de 22.63 milliards en 2020.

Le seul changement que l'administration de Joe Biden a effectué sur la planification du programme Artemis a été de repousser la date de retour sur la lune de 2024 à 2025.

#### 5.4.2 Programme spatial



Figure 34: Logo du programme Artémis, nasa.gov

Artemis est un programme spatial mené par la NASA ayant pour but d'établir une présence à long terme en orbite et sur la surface de la Lune, dans un premier temps.

Dans un deuxième temps, Artemis a aussi pour objectif de permettre les premiers pas de l'homme sur Mars et l'établissement de bases d'étude scientifique en orbite et à sa surface. Le retour de l'homme et les premiers pas d'une femme et d'un homme de couleur sur la Lune sont prévus à l'horizon 2025, dans le cas où la mise en orbite de la station Gateway et la finalisation des autres astronefs nécessaire à Artemis ne rencontre pas de retard.

L'échéance visée de l'établissement durables d'habitations et de centre de recherche sur la surface lunaire est fixée à 2028 s'il n'y a aucun problème ou retard avec les missions précédentes. Il est donc plus raisonnable d'estimer que l'établissement durables sur la Lune sera possible uniquement à partir du début des années 2030.

Dans le programme Artemis, la NASA collabore avec d'autres agences spatiales, dont les principales sont l'ESA, la JAXA, l'ASC et l'ISA (Agence Spatiale Israélienne). À l'origine, Roscosmos faisait également partie du projet, mais l'agence russe a dû se retirer, à la suite des tensions en Ukraine et de la guerre qui en a découlé. Les vaisseaux utilisés dans les plans de missions établis sont la capsule Orion, le SLS et la station orbitale lunaire Gateway, ainsi qu'un module d'atterrissage lunaire. Certains parmi ces astronefs sont encore en plein développement, comme Lunar Gateway ou les différents projets de modules d'atterrissage lunaire.

<sup>14</sup> NASA, « Les Accords Artemis », NASA, Annexe A-4, 13.10.202

### 5.4.3 Intérêts des entreprises privées

Pour contribuer au programme Artemis, des entreprises privées se sont lancées dans le développement de solution permettant d'assurer une partie de la mission martienne, comme avec les modules d'atterrissage lunaire qui sont développés par Dynetics et Blue origin, ou le développement de solution pouvant assurer toutes les étapes entre la Terre et la Lune lors de l'aller et du retour, comme SpaceX qui développe le Starship actuellement. SpaceX parviendra à réduire fortement les coûts de lancement des missions lunaires, grâce à la réutilisabilité des propulseurs et du Starship, lorsque son développement sera terminé. En effet, le gros problème du lancement du SLS et de la capsule Orion est le coût pour chaque tir, qui est très élevé. Ces entreprises s'intéressent à la Lune, car selon les prédictions des experts, le marché lunaire pourrait s'élever à 100 milliards de dollars sur les dix prochaines années.

### 5.4.4 Programmes en concurrence



Figure 35: Logo de l'administration spatiale nationale chinoise (CNSA), space.com

L'agence spatiale chinoise (CNSA) a également lancé son programme spatial lunaire et souhaite devancer la NASA sur le retour de l'homme sur la Lune. La CNSA vise le retour de l'homme sur la Lune d'ici 2033. Le déroulement, la planification des missions et les vaisseaux spatiaux en développements restent très secret, il est donc difficile de dire à quel point ils sont proches d'envoyer des hommes en orbite ou sur la Lune.



Figure 36: Logo de l'agence spatiale russe, iafastro.org

Roscosmos a aussi lancé un programme seul, après son exclusion d'Artemis. Leur objectif est un alunissage en 2031 et l'établissement d'une base lunaire à long terme d'ici 15 ans, soit 2038. L'agence russe a imaginé un voyage vers la Lune en deux étapes, l'assemblage des vaisseaux spatiaux en orbite et puis le trajet vers la Lune. En effet, ils prévoient de lancer un vaisseau Soyouz MS et de le connecter à l'ISS. Dans un deuxième temps, ils prévoient d'envoyer un remorqueur spatial à l'aide d'un lanceur de nouvelle génération nommé « Angara » et d'assembler le Soyouz MS et le remorqueur spatial en orbite terrestre, avant de partir en direction de la Lune. Cependant, Roscosmos n'a pas encore développé les technologies nécessaires au bon fonctionnement des missions et fait face à des problèmes de financement qui sont liés à la guerre en Ukraine et à la politique économique russe.

### 5.4.5 Plan de missions

La première phase de Artemis, dans laquelle nous sommes, est constituée des missions Artemis I, Artemis II et Artemis III.

Le vaisseau spatial d'Artemis I, composé du SLS block 1 et de la capsule Orion, a décollé du centre spatial Kennedy, en Californie, le 16 novembre 2022. La date de lancement était initialement fixée au 29 août, mais elle a dû être repoussée à cause de problèmes de météo. L'objectif de cette mission était de démontrer et de vérifier la fiabilité du SLS et de la capsule Orion, en contrôlant le fonctionnement des systèmes lors d'un voyage spatial et lors de la phase d'amerrissage. Ces vérifications sont très importantes, car elles permettent d'assurer la sécurité de l'équipage des futures missions, telles que Artemis II. Après son décollage, l'astronef Orion est allé faire le tour de la Lune avant de revenir vers la Terre et d'entrer dans l'atmosphère avec une vitesse de Mach 32. De ce fait, la température des parois extérieures d'Orion a atteint plus de 2760 °C, ce qui a prouvé la résistance thermique de la capsule. L'amerrissage de la mission Artemis I, dans l'océan Pacifique, s'est passé comme prévu, le 11 décembre 2022 et la capsule a pu être récupérée en bon état. Au cours cette mission, qui a duré 25 jours, 10 heures et 53 minutes, la capsule Orion a parcouru 2.24 millions de kilomètres, soit environ 5.8 fois la distance Terre-Lune.

Ensuite, la mission Artemis II a également pour objectif de faire le tour de la Lune et de revenir sur Terre, cependant la capsule Orion transportera quatre astronautes à son bord. Il s'agit d'une mission de test des divers équipements de survie de la capsule Orion. La mission devrait durer environ 10 jours et son décollage est prévu au cours du mois de novembre 2024. Les quatre astronautes sélectionnés par la NASA pour cette mission ont été révélés le 3 avril 2023, lors d'une conférence de presse à Houston. Cet équipage se compose de trois astronautes Américains et d'un astronaute Canadien.



Figure 37: Portrait de Reid Wiseman, [nasa.gov](https://www.nasa.gov)

Reid Wiseman, le commandant de la mission Artemis II, a participé à l'Expédition 41 à bord de l'ISS, de mai à novembre 2014. Il est originaire de Baltimore, aux Etats-Unis, et a obtenu un Bachelor en sciences au sein de l'institut polytechnique Rensselaer de Troy, dans l'état de New York. Par la suite, il a obtenu un Master en ingénierie des systèmes, à l'Université John Hopkins de Baltimore. Reid Wiseman a également été chef du bureau des astronautes de la NASA.



Figure 38: Portrait de Victor J. Glover Jr., nasa.gov

Victor J. Glover Jr., le pilote de la mission Artemis II, fait partie de la sélection des astronautes de 2013. Il a participé à l'Expédition 64 à bord de l'ISS d'octobre 2020 à avril 2021, ainsi qu'à la mission SpaceX Crew-1. Il est originaire de Californie et a obtenu un Bachelor en ingénierie générale, un Master en génie des essais de vol, un Master en ingénierie des systèmes et un Master en sciences et arts des opérations militaires. Victor Glover fait partie de l'US NAVY, il a été pilote d'essai pour les F/A 18 Hornet et les F/A 18 Super Hornet.



Figure 39: Portrait de Christina Hammock Koch, nasa.gov

Christina Hammock Koch, une des spécialistes de mission, a été sélectionnée comme astronaute en même temps que Victor Glover, en 2013. Christina Hammock Koch est originaire de Jacksonville dans le Michigan et a été ingénieure de vol pendant les Expéditions 59, 60 et 61 dans l'ISS. Elle détient le record du plus long vol spatial effectué par une femme, avec un total de 328 jours dans l'espace. Elle a également participé à la première sortie spatiale entièrement féminine. Elle a obtenu un Bachelor en ingénierie électrique et en physique, puis un Master en ingénierie électrique, au sein de l'université du Ghana. Elle a aussi reçu un doctorat à titre honorifique de la part de l'Université d'Etat de Caroline du Nord.



Figure 40: Portrait de Jeremy Hansen, asc-csa.gc.ca

Jeremy Hansen, le deuxième spécialiste de mission, fait partie de la troisième sélection d'astronautes menée par l'ASC en 2009. Il est originaire de London, en Ontario, au Canada. Il a obtenu un Bachelor en sciences spatiales, au sein du Collège militaire royal, situé à Kingston, en Ontario, et un Master en Physique. Avant d'être astronaute, il a été pilote d'avion de chasse sur F/A 18 de 2004 à 2009. Jeremy Hansen sera le premier Canadien à s'approcher de la Lune et à en faire le tour.

Artemis III a pour objectif de ramener des hommes et des femmes à la surface de la Lune pour la première fois depuis plus de 50 ans. Le lieu choisi pour l'alunissage est situé à proximité du pôle Sud lunaire et le lancement de la mission est prévu pour 2025. La durée de l'exploration à la surface de la Lune sera d'environ six jours et demi, durant lesquels les astronautes effectueront des recherches scientifiques à l'intérieur du Starship, ainsi que des sorties extravéhiculaires. Au cours de celles-ci, ils prendront des photos, des vidéos, étudieront la géologie et prélèveront des échantillons de sol lunaire.

Les missions suivant la première phase d'Artemis, soit à partir d'Artemis IV, auront pour objectif la préparation de l'installation durable de l'homme sur la Lune, en testant les nouvelles technologies et en permettant de vérifier l'attrait des divers lieux d'alunissages et de bases prévus.

#### 5.4.6 Technologies

De nombreuses technologies innovantes sont développées pour répondre aux défis auxquels le programme Artemis fait face. Ces innovations ne se concentrent pas seulement dans la capsule Orion, le SLS et la Gateway ou les atterrisseurs lunaires. En effet, la recherche technologique est également consacrée au développement d'habitats lunaires et martiens durables, de véhicules d'exploration et des systèmes de survie, ainsi que des ressources nécessaires au fonctionnement de la mission. De ce fait, la NASA travaille en collaboration avec les autres agences spatiales et des entreprises privées, afin de permettre un développement plus rapide et d'optimiser les technologies.

##### 5.4.6.1 Orion Spacecraft

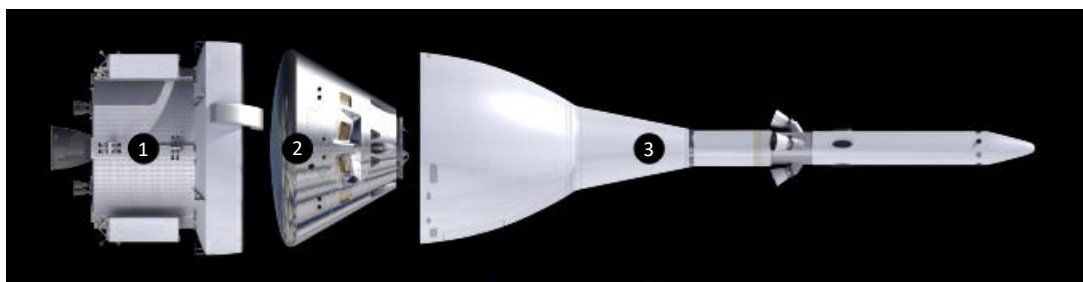


Figure 41: Illustration de la composition d'Orion, pilote-virtuel.com

La capsule spatiale Orion est composée de trois parties, le module de service (1), la capsule pressurisée ou le module de commande (2) et le système d'abandon du lancement (3) qui permet de sauver les astronautes en cas de problèmes lors du lancement. Son développement est le résultat de la collaboration entre Lockheed Martin, qui développe la capsule pressurisée, et l'ESA avec Airbus Space, qui développent le module de service. Le développement d'Orion a coûté plus de 18 milliards de dollars, entre le début de sa conception en 2006 et aujourd'hui.

##### 5.4.6.1.1 Améliorations du module de commande

Le module de commande d'Orion est plus spacieux que celui utilisé lors du programme Apollo, en effet, la capsule d'Apollo avait un espace habitable pressurisé de 6.2 m<sup>3</sup>, contre 9 m<sup>3</sup> pour Orion. La capsule Orion permet de transporter un équipage de 4 personnes. Elle possède un espace interne modulaire. En effet, il est possible de ranger les sièges dès que la capsule est en orbite, ce qui permet de gagner de l'espace pour les astronautes.



La navigation du module Orion est assurée par quatre ordinateurs de vol qui permettent également d'effectuer des opérations critiques, telles que l'amarrage à un autre module dans l'espace, sans intervention humaine nécessaire. Toutefois, le contrôle manuel de l'astronef par les astronautes est possible, grâce à plusieurs consoles composées de trois écrans et de soixante-sept interrupteurs physiques. La navigation de la capsule est donc beaucoup plus facile que de naviguer avec la navette spatiale, dont les commandes se composaient de dix écrans d'affichages et d'environ 1200 commutateurs, cadrans ou jauges.

Une grande avancée par rapport aux anciens modules de commandes est la structure interne de la capsule Orion que l'on peut voir sur la photographie ci-dessus. En effet, la structure est composée d'une structure alvéolaire en alliage aluminium-lithium, ce qui permet de gagner du poids, tout en gardant de la solidité et de la rigidité. Les différentes sections de cette structure sont fusionnées à l'aide d'un procédé avancé appelé le soudage par friction qui permet d'obtenir une soudure sans soudure, ce qui évite les zones de faiblesse dans la structure.



Figure 42: Photographie de la structure interne de la capsule Orion, [nasa.gov](https://nasa.gov)

Ensuite, plusieurs couches de revêtements métalliques résistant aux chaleurs extrêmes recouvrent cette structure. Effectivement, « *lors des rentrées atmosphériques des vaisseaux [...], le frottement chauffe l'air proche du vaisseau à des températures très élevées de plusieurs milliers de degrés.* »<sup>15</sup>, explique Nicolas Bettschart. Le module de commande d'Orion est aussi recouvert du plus grand bouclier thermique jamais conçu pour les missions humaines, qui peut résister à des entrées atmosphériques à près de 40000 km/h.

<sup>15</sup> PETIGNAT Théo, « Interview de Nicolas Bettschart », Annexe A-1, 6.10.2023



#### 5.4.6.1.2 Module de service



Figure 43: Photographie du module de service d'Orion, nasa.gov

Le module de service assure la propulsion principale, l'électricité et les ressources vitales. Le développement de ce module a été confié à l'ESA, à la suite de l'expérience qu'elle a acquise avec les vaisseaux cargo ATV qui ont desservi la station spatiale internationale entre 2008 et 2014. L'ESA fournit une grande partie des systèmes à Airbus Space qui s'occupe de la construction du module de service.

Le système de propulsion d'Orion se compose d'un propulseur principal fournissant environ 2720 kg de poussée, de huit moteurs auxiliaires produisant une poussée de 50kg chacun et de vingt-quatre propulseurs de contrôle, qui permettent l'orientation fine et fournissent chacun une poussée d'un peu plus de 22kg.

La masse totale au décollage de l'astronef Orion varie entre 23.36 tonnes pour Artemis I et 26 tonnes pour Artemis II. Cette masse comprend le carburant qui correspond à environ 9 tonnes d'ergols, la masse du vaisseau, ainsi que les réserves d'oxygène, d'azote, d'eau et l'équipage. Ce module de service fournit l'électricité nécessaire au fonctionnement d'Orion, grâce à quatre panneaux solaires constitués de 15000 cellules solaires, dont la puissance électrique générée est au maximum de 11kW.

Le module de service ne revient pas sur Terre, en effet, la capsule pressurisée Orion se sépare de ce module avant son entrée atmosphérique et le laisse en orbite.

## 5.4.6.2 SLS

### 5.4.6.2.1 Différentes versions du SLS

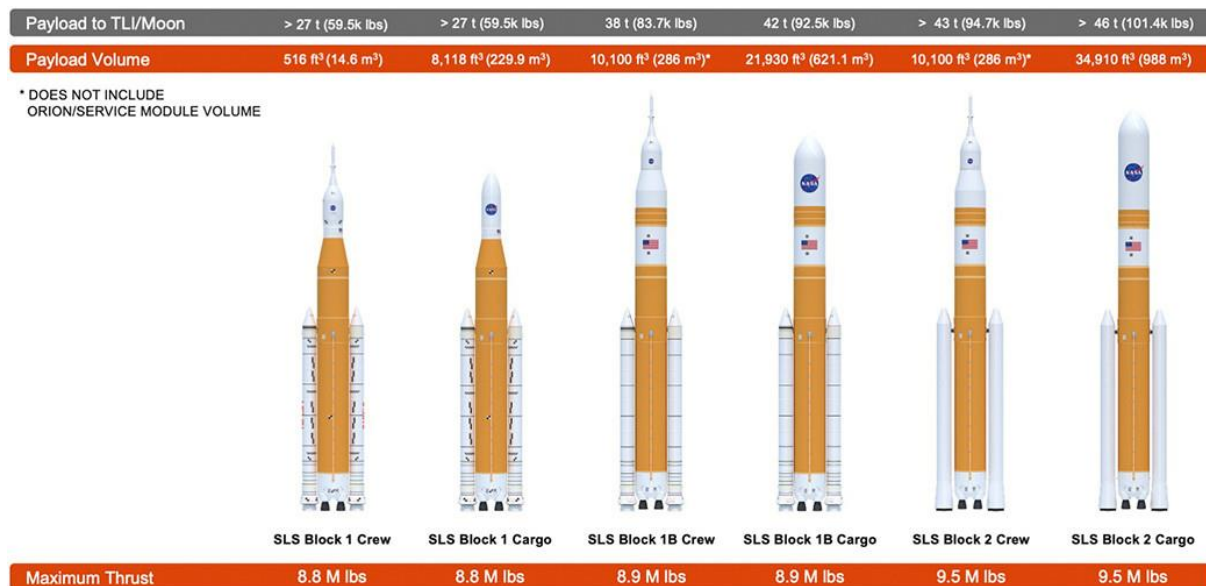


Figure 44: Illustration des différentes versions du SLS, agences-spatiales.fr

Le SLS est le lanceur spatial utilisé dans le programme Artemis. Il a été développé à partir du lanceur de la navette spatiale, afin de réduire les coûts. Le coût de développement du SLS prévu jusqu'au lancement d'Artemis I et à la préparation des missions Artemis II et Artemis III était de 14.8 milliards de dollars. Cependant, le coût jusqu'en 2023 a dépassé de 8 milliards de dollars les estimations, avec un coût réel de 22.8 milliards de dollars. Son rôle est d'assurer le voyage de la capsule Orion entre la surface de la Terre et l'orbite lunaire et par la suite également jusqu'en orbite martienne. La NASA en collaboration avec Boeing, Northrop Grumman et Aerojet Rocketdyne développe six versions du SLS, 3 versions cargos et 3 versions pour un équipage, dont la taille et la puissance varie. Le SLS est constitué de trois parties distinctes, l'étage principal, les boosters et l'étage supérieur d'exploration ou l'étage de propulsion cryogénique intermédiaire, selon les versions.

Le Block 1 est utilisé dans Artemis I et sera employé à nouveau lors d'Artemis II, mais dans sa version Crew. Il a une puissance de poussée d'en peu moins de 4000 tonnes, soit 15% de plus que la SATURN V du programme Apollo. Cette capacité de poussée en fait le lanceur le plus puissant de l'histoire. Il permet de transporter jusqu'à 27 tonnes de matériel et sa taille varie de 95m de haut, pour la version Cargo, à 98m, pour la version. Le SLS Block 1 est donc légèrement plus grand que la statue de la liberté, qui mesure 93 mètres.

Ensuite, le Block 1B fournit une poussée légèrement supérieure au Block 1, en dépassant légèrement les 4000 tonnes de poussée. La version du Block 1B Crew permet de transporter 38 tonnes de matériel et mesure 111 mètres, ce qui en fait le lanceur le plus grand en dépassant la fusée SATURN V qui mesurait 110 mètres de haut. Le SLS 1B Cargo permet quant à lui de transporter 42 tonnes de charges utiles et mesure 99 mètres de haut.

La version la plus puissantes du SLS est le Block 2 qui offre une poussée de 4300 tonnes. Le SLS Block 2 Crew est capable de transporter une charge utile de plus de 43 tonnes et mesure tout comme le Block 1B Crew dans la version Crew 111 mètres. Le SLS Block 2 Cargo permet le transport de plus de 46 tonnes et mesure 108 mètres.

#### 5.4.6.2.2 Structure du SLS

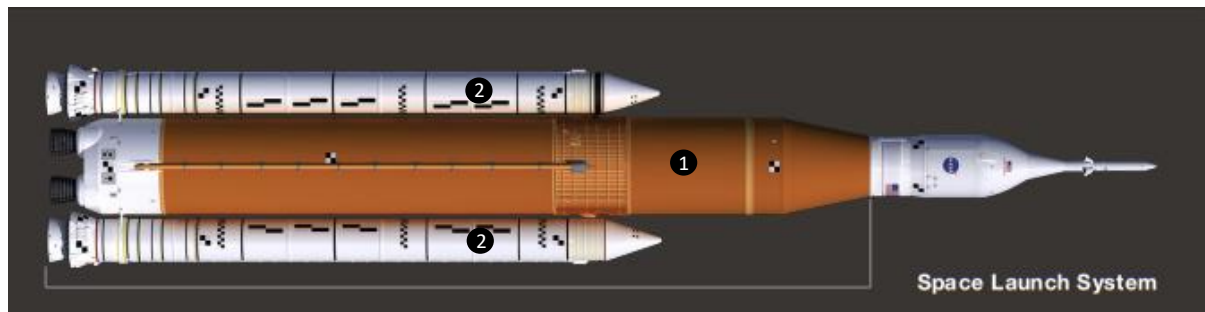


Figure 45: Illustration de la structure externe du SLS, pilote-virtuel.com

#### Etage principal

L'étage principal (1) qui est construit par Boeing mesure 64. 6 mètres de haut et a un diamètre de 8.4 mètres. Il contient un peu plus de 2'763'350 litres d'hydrogène liquide super-refroidi et d'oxygène liquide qui servent à alimenter les quatre moteurs RS-25 propulsant l'étage principal. Ces moteurs, développés par Aerojet Rocketdyne, sont dérivés des moteurs principaux de la navette spatiale, avec un nouveau système de moteur et une nouvelle isolation de buse. La puissance cumulée des quatre moteurs RS-25 s'élève à un peu moins de 930 tonnes de poussée.

#### Boosters

Ensuite, les deux boosters de la fusée (2) fournissent environ 76% de la puissance du SLS, soit environ 3000 tonnes de poussée, pendant les deux premières minutes après le décollage et sont ensuite largués. Ces boosters fonctionnent à l'aide d'un carburant solide qui est du grain de propergol et consomment environ six tonnes de ce carburant à chaque seconde de fonctionnement. Ils sont prévus pour un usage unique et sont les boosters les plus puissants jamais conçus.

Les principales améliorations des boosters apportées par l'entreprise Northrop Grumman sont l'apport d'une nouvelle avionique moderne, une modification de la composition des grains de propergol, une meilleure isolation des parois extérieures, une réduction des coûts de production et une amélioration de la sécurité.

De plus, leur conception est légèrement différente de celle des boosters de la navette spatiale, car les boosters du SLS sont composés de cinq segments de propergol, contre quatre segments pour ceux de la navette, ce qui permet d'avoir plus de puissance et par conséquent de transporter plus de matériel vers la Lune et vers Mars par la suite.

## EUS et ICPS

L'étage supérieur d'exploration (EUS) et l'étage de propulsion cryogénique intermédiaire (ICPS) sont tous deux propulsés par un ou quatre moteurs RL10, produits par Aerojet Rocketdyne, qui offre 11.25 tonnes de poussées chacun et qui fonctionnent à l'hydrogène liquide et à l'oxygène liquide.

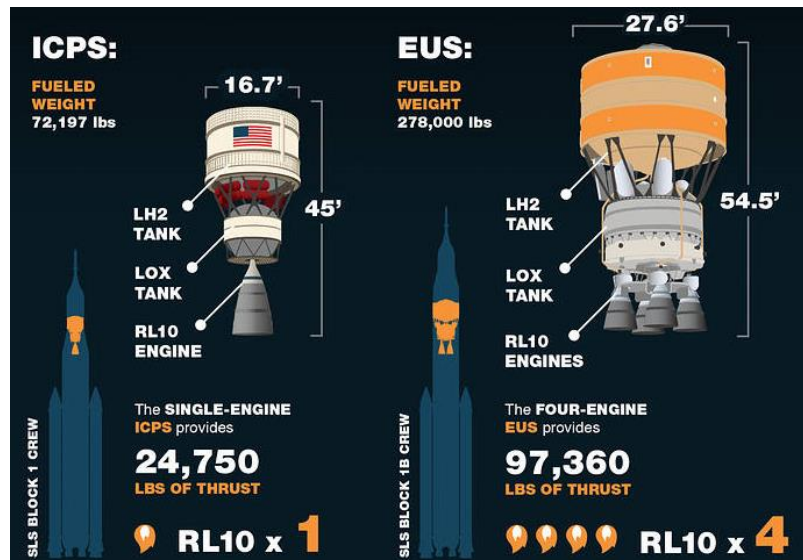


Figure 46: Illustration des modules ICPS (à gauche) et EUS (à droite), nasa.gov

Le module ICPS, mesurant 13.7 mètres de haut et 5 mètres de diamètre, se trouve dans la configuration du SLS Block 1 Crew et possède un seul moteur RL10, grâce auquel la masse du matériel pouvant être transporté est de plus de 27 tonnes.

Dans la configuration SLS Block 1B Crew, le module EUS, mesurant 16.6 mètres de long pour 8.4 mètres de diamètre, est utilisé et fonctionne avec quatre moteurs RL10, soit une puissance de poussée de 45 tonnes et permet de transporter plus de 38 tonnes de matériel, ce qui représente 40% de plus que le Block 1 Crew.

Ces modules permettent d'assurer la poussée entre le moment où l'astronef quitte l'orbite terrestre et la mise en orbite autour de la Lune, ainsi que le retour.

### 5.4.6.3 Station Lunar Gateway

Lunar Gateway ou simplement Gateway est le projet de station spatiale en orbite sélène qui est dirigé par la NASA qui est en collaboration avec les autres agences spatiales et des entreprises privées, telles que Northrop Grumman et Thales Alenia Space. Cette station jouera un rôle de laboratoire scientifique, de banc d'essai de nouvelles technologies et de centre de contrôle pour les missions à la surface de la Lune. Selon les estimations, le coût de sa mise en service ne dépassera pas le tiers du coût de l'ISS, soit au maximum 38.3 milliards de dollars.

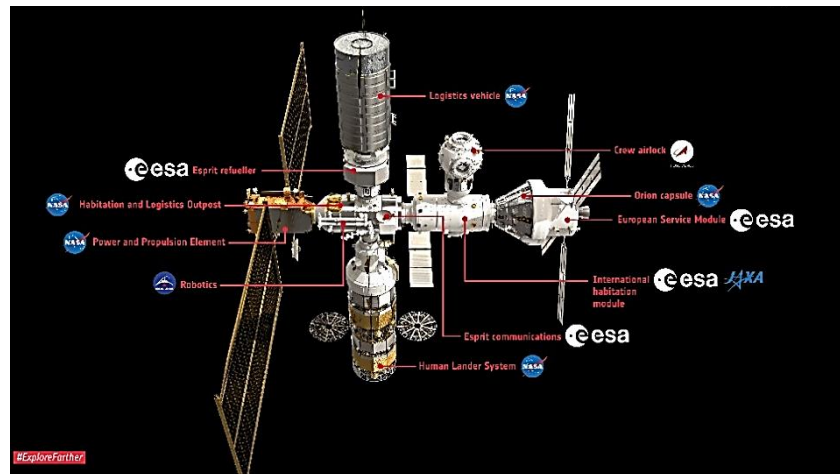


Figure 47: Illustration de la composition de la station orbitale Lunar Gateway, thalesgroup.com

Cette station orbitale permettra de mieux comprendre les effets des rayonnements spatiaux et des éruptions solaires sur la santé des astronautes qui vivent et travaillent sans la protection du champ magnétique de la Terre. En effet, dans cette situation, les astronautes reçoivent trois fois plus de rayonnements que dans l'ISS qui est protégée par le champ magnétique terrestre. Elle servira aussi d'escale pour l'exploration de la surface lunaire et pourrait, par la suite, jouer le rôle de tremplin pour les voyages à destination de Mars.

La station Gateway sera composée de modules de recherches et de modules d'habitation. Elle pourra accueillir quatre astronautes pour des missions allant jusqu'à trois mois et ne sera pas occupée en permanence.

Deux modules de cette station spatiale seront lancés au courant de l'année 2024. Le premier module, nommé « Power and Propulsion Element » et abrégé PPE, fournira l'alimentation électrique et la propulsion de Gateway. Le second module, dont l'abréviation est HALO et dont le nom est « Habitation and Logistics Outpost », assurera, seul dans un premier temps, les besoins primaires des astronautes, jusqu'au déploiement du module « International habitation module ».

La NASA a pour objectif de pouvoir réaliser les premières expériences et démonstrations technologiques à bord de la Lunar Gateway d'ici fin 2026.

#### 5.4.6.4 Atterrisseurs lunaires

##### 5.4.6.4.1 Différents atterrisseurs

Un atterrisseur lunaire est un aéronef permettant la descente de l'équipage et de matériel entre la station Lunar Gateway, quand elle sera opérationnelle, et la surface de la Lune, ainsi que le retour en orbite lunaire.

Ces atterrisseurs seront envoyés en orbite lunaire et s'amarreront à la station Gateway, ou directement à la capsule Orion pour Artemis III. Seuls les atterrisseurs descendront sur la surface, la capsule Orion restera en orbite. La NASA nomme ces astronefs ALPACA, qui est l'abréviation de « Autonomous Logistics Platform for All-Moon Cargo Access ». Les deux projets sélectionnés par la NASA sont le module de SpaceX qui se nomme « Starship » et le module « Blue Moon », développé par Blue Origin.

SpaceX a gagné les contrats des missions Artemis III et IV. L'entreprise Blue Origin, quant à elle, a obtenu un contrat pour Artemis V. À partir de Artemis VI, la NASA disposera donc de deux contrats pour les atterrisseurs lunaires, entre lesquels elle répartira les missions à venir.

Le fait d'avoir deux vaisseaux de prestataires différents permet à la NASA de maintenir une flexibilité opérationnelle, c'est-à-dire que si l'un a un problème technique, l'autre sera toujours disponible.

Un autre avantage d'avoir des systèmes d'atterrissage lunaire d'entreprise différentes est la concurrence tarifaire, pour éviter un monopole de l'accès à la surface de la Lune. La réutilisabilité de ces atterrisseurs pour plusieurs trajets permet à la NASA de faire des économies budgétaires.

##### 5.4.6.4.2 Starship



Figure 48: Photographie d'un prototype du Starship, thepressfree.com

Le Starship, développé par SpaceX est un astronef complètement réutilisable. Il mesure 50 mètres de haut, pour un diamètre de 9 mètres et permet de transporter un équipage et du matériel, pour une charge utile de 100 à 150 tonnes. Cet atterrisseur peut fournir jusqu'à 1500 tonnes de poussée, grâce à ses trois moteurs Raptor.

Le lanceur qui sera utilisé pour son lancement s'appelle « Super Heavy » et est également développé par SpaceX. Il mesure 69 mètres de hauteur et a également un diamètre de 9 mètres et est capable de revenir se poser sur Terre après chaque lancement. Sa puissance de poussée s'élève à 7590 tonnes et est fournie par trente-trois moteurs Raptor qui fonctionnent avec du méthane liquide super-refroidi et de l'oxygène liquide.



L'utilisation d'ergols liquide super-refroidi représente un défi technique pour missions de plusieurs semaines à plusieurs mois, car le stockage du carburant implique de le garder à des températures très basse, par exemple à moins de  $-161^{\circ}\text{C}$  pour le méthane liquide super refroidi. Lorsque le développement du Starship sera terminé, il détrônera le SLS et prendra la place du lanceur le plus puissant et le plus grand jamais conçu. En effet, à terme, le Starship au décollage aura une poussée 1.77 fois plus grande que celle du SLS Block 2 et pourra transporter une charge utile 2 à 3 fois supérieure de celle du SLS. Il dépassera aussi la taille du SLS de 9 mètres, avec une hauteur de 120 mètres au décollage.

SpaceX, avec son atterrisseur, a pour objectif de pouvoir transporter jusqu'à 100 personnes à bord pour des missions de longue durée et également de permettre la mise en orbite de satellite.

Afin que l'atterrisseur lunaire soit réutilisable, SpaceX prévoit une version du Starship permettant de ravitailler cet astronef en carburant, tout en restant en orbite lunaire.

En avril 2023, l'agence de surveillance de l'aviation civile américaine, FAA, a émis 63 mesures correctives que SpaceX a dû appliquer, avant de pouvoir effectuer un nouveau lancement du Starship. Ces mesures concernaient les licences de vol, la sécurité et d'autres exigences légales. La FAA estime que SpaceX ne pourra pas faire décoller le Starship avec le lanceur Super Heavy avant la fin du mois d'octobre 2023, à cause de la licence de lancement qui doit être émise, à la suite des vérifications d'application des mesures. Ce contre-temps provoquera sans doute un retard dans le développement et pourrait repousser la date de lancement de Artemis III et des missions suivantes.

#### 5.4.6.4.3 Blue Moon



Figure 49: Illustration de l'atterrisseur Blue Moon, edition.cnn.com

Le module Blue Moon, développé par Blue Origin est lui aussi complètement réutilisable. Cet atterrisseur considérablement plus petit que le Starship. Il mesure 16 mètres de haut et a une masse totale de 45 tonnes, en comptant le carburant. Il pourra accueillir à son bord entre trois et quatre astronautes.

Ce carburant est composé d'oxygène liquide et d'hydrogène liquide super refroidi. Le Blue Moon fait donc face aux mêmes défis techniques liés au stockage de carburant sur une longue durée que le Starship, cependant la température de stockage de l'hydrogène liquide super refroidi doit être plus basse que  $-252^{\circ}\text{C}$ , ce qui est encore inférieur à celle du méthane liquide super refroidi.

Le lanceur de cet atterrisseurs lunaire, qui est également développé par Blue Origin, se nomme « New Glenn ». Il sera réutilisable et reviendra se poser sur Terre après le lancement, tout comme celui de SpaceX. Il est propulsé par sept moteur BE-4 qui produise ensemble environ 1700 tonnes de poussée et qui fonctionnent au gaz naturel liquéfié et à l'oxygène liquide. Le ravitaillement de cet astronef se fera, tout comme le Starship, en orbite sélène. Le vaisseau de ravitaillement en carburant qui est en train d'être développé par Lockheed Martin.

#### 5.4.6.5 DRACO

La NASA a conclu un accord de coopération avec la DARPA, le 24 janvier 2023, afin de développer un astronef à propulsion nucléaire, nommé DRACO, pour « Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations ». Ce vaisseau est un remorqueur spatial, qui a pour but de faciliter et d'accélérer les voyages vers la Lune pour les tests, puis vers Mars.



Figure 50: Illustration conceptuelle de l'astronef DRACO, universetoday.com

Pour comprendre l'intérêt de la propulsion nucléaire dans le domaine spatial, il faut tout d'abord comprendre comment la propulsion spatiale fonctionne. Les moteurs-fusées ou propulseurs permettent une propulsion en utilisant la troisième loi de Newton, action et réaction. En effet, ces moteurs éjectent par exemple des gaz ou des particules ionisées, ce qui produit la poussée. La force de poussée augmente avec le débit et la vitesse des masses expulsées.

Le premier type de propulsion est la propulsion chimique, qui emploie des réactions de combustion permettant de libérer un gaz à travers une tuyère et ainsi provoquer la poussée. Le moteur a donc besoin d'un mélange de carburant et de comburant, qui est appelé propergol, pour fonctionner. Il existe beaucoup de combinaisons de propergols. Le couple hydrogène liquide et oxygène liquide est le plus utilisé et le plus efficace, de plus sa combustion produit de la vapeur d'eau, qui est non-polluante.

Le premier défi à surmonter avec l'oxygène liquide et l'hydrogène liquide est le stockage à des températures très basses pour éviter que les gaz liquéfiés ne s'évaporent,  $-183^{\circ}\text{C}$  pour l'oxygène liquide et  $-253^{\circ}\text{C}$  pour l'hydrogène liquide. Le second défi, concerne particulièrement l'hydrogène dont la densité est très faible et implique par conséquent des réservoirs volumineux. On atteint donc une limite de propulsion liée à la taille des réservoirs que l'on ne peut pas agrandir infiniment et aux systèmes de refroidissement.

On remarque donc l'intérêt de la propulsion nucléaire qui ne se heurte pas à cette limite. Le fonctionnement d'un moteur nucléaire ne diverge pas complètement de la propulsion chimique.

En effet, un gaz est également porté à une très haute température et éjecté à travers une tuyère. La différence majeure avec la propulsion chimique est le moyen par lequel l'énergie nécessaire au gaz pour atteindre une température très élevée est produite.

Dans le cas de la propulsion nucléaire, cette énergie est produite grâce à un réacteur à fission nucléaire, où le fluide servant à la propulsion traverse le cœur du réacteur dans lequel il emmagasine de l'énergie. Ce type de propulsion n'a donc pas de température limite de combustion, la seule limite de température est celle que les matériaux de la structure peuvent supporter. De plus, il est possible d'expulser directement de l'hydrogène, ce qui permet de profiter de sa faible masse molaire.

Il est donc possible de produire une impulsion deux à quatre fois supérieure à l'impulsion chimique, ce qui permet de réduire très fortement la durée des trajets interplanétaires. Contrairement, à ce que l'on entend souvent, la propulsion nucléaire ne permet pas une poussée continue tout au long du voyage, car la poussée dépend des réserves d'hydrogène liquide.

Grâce à ce moyen de propulsion, la quantité d'énergie libérée pour 1kg de carburant, de l'uranium-235, atteint 23 millions de kWh, contre 40 kWh pour la combustion d'1kg d'hydrogène. La propulsion nucléaire permet donc de libérer pas loin de 600'000 fois plus d'énergie par kilogramme de carburant.

Le désavantage de l'utilisation de la fission nucléaire est la radioactivité émise. Il est donc nécessaire de mettre en place des moyens de protection, tels que des murs en plomb, pour protéger l'équipage et les systèmes sensibles.

Les astronefs à propulsion nucléaire décolleront à bord de lanceur chimique jusqu'en orbite, où le réacteur sera mis en route. Pour éviter des catastrophes nucléaires, ces remorqueurs nucléaires ne redescendront jamais sur Terre, ils resteront en orbite où ils pourront être réapprovisionné en uranium-235, avant de repartir pour une autre mission.

#### 5.4.6.6 Camps de bases lunaires

La NASA prévoit d'établir plusieurs camps de base lunaire, afin de diversifier les ressources pouvant être étudiées et afin d'avoir davantage de flexibilité sur les lieux d'alunissage, en cas de fenêtres de tir ratées. Cette diversification permettra également d'explorer la surface plus rapidement.

La mise en place de bases lunaires fait face à de nombreux défis technologiques, dans la conception des habitats, l'accès à internet et aux données GPS, les besoins en électricité et en oxygène, les moyens de communication, ainsi que dans le domaine de l'exploration avec les véhicules, les combinaisons spatiales et les outils de mesure.

L'établissement de base lunaire durable n'est donc pas encore pour tout de suite, comme James Free, administrateur associé à la NASA, l'exprime lors de la 38<sup>ème</sup> édition du symposium de l'espace, ayant eu lieu entre le 17 et le 20 avril 2023 à Colorado Springs : « Il faudra probablement attendre les missions Artemis VII et suivantes pour des habitations permanentes sur la surface de la Lune »<sup>16</sup>, la mission Artemis VII étant prévue pour 2031 au plus tôt.

##### 5.4.6.6.1 Habitats lunaires

La NASA a choisi deux types d'habitats différents, l'un basé sur l'impression 3D et l'autre étant gonflable. Ces habitats comporteront les deux des chambres, une cuisine, des laboratoires, des lieux de stockage protégés et les systèmes nécessaires à la vie humaine. Actuellement, le développement de ces habitats n'est qu'à ses débuts et demandera encore beaucoup de recherche et de développement pour pallier les conditions extrêmes de la surface.<sup>17</sup>

##### Habitat imprimé en 3D



Figure 51: Illustration conceptuelle d'une imprimante 3D lunaire, 3dnatives.com

Le premier habitat est développé par la NASA en collaboration avec l'entreprise ICON, spécialisée dans l'impression 3D. L'objectif de ce projet est d'employer des imprimantes 3D géantes qui utiliseront uniquement les ressources lunaires, comme le régolithe. Le régolithe est une poussière produite lors de la dégradation des roches, causée par l'impact des météorites et du vent solaire sur la surface lunaire.

<sup>16</sup> NASA Video, « Space Symposium 2023 Panel: NASA Leaders on 'Moon to Mars' Strategy Implementation », Youtube, 19.04.2023, <https://www.youtube.com/watch?v=sqdekNfYZHs&t=534s>, consulté le 23.09.2023

<sup>17</sup> PETIGNAT Théo, « Interview de Nicolas Bettschart », Annexe A-1, 6.10.2023

Cette technologie, en plus de fabriquer les bâtiments du camp de base, permettra également la construction de pistes d'atterrissage et de routes, facilitant le déplacement sur la surface sélène. Cette technologie de fabrication ne pourra pas directement être appliquée aux missions sur la planète Mars, car la surface martienne n'est pas composée des mêmes matériaux que celle de la Lune. Il faudra donc effectuer des modifications sur le fonctionnement de ces imprimantes 3D et sur la composition du matériau d'impression utilisé.

### Habitat gonflable



Figure 52: Photographie du prototype d'habitat gonflable, [lockheedmartin.com](http://lockheedmartin.com)

Le deuxième type d'habitat est développé par Lockheed Martin qui a décidé de se tourner vers la solution du gonflable. En effet, le fait que l'habitat soit gonflable permet d'avoir un volume compact pour le transport et d'avoir un bien plus grand volume gonflé. Ce concept ajoute également de la mobilité par rapport à l'habitat imprimé qui est fixe. Ce type d'habitat, tout comme l'habitat imprimé, demande un développement très avancé.

En effet, l'habitat étant gonflable, il est important d'établir des systèmes de sécurité en cas de décompression due à une brèche dans les parois, afin d'éviter que la structure se referme sur elle-même. Un avantage important, en plus de la mobilité, par rapport à l'habitat imprimé, est la possibilité d'utiliser cette technologie sur Mars ou plus loin, sans avoir à refaire de la recherche.

#### 5.4.6.6.2 Les systèmes de communication, internet et GPS

La NASA a signé des contrats avec l'entreprise Astrobotic Technology pour la mise en place d'un nouveau réseau de communication et un réseau GPS sur la Lune. La raison est que le réseau établi par la NASA au cours de son programme Apollo ne pourra pas fournir une connexion suffisante pour les missions à venir.

Astrobotic prévoit d'envoyer prochainement deux satellites en orbite lunaire, afin d'assurer les communications, grâce à une technologie laser permettant d'obtenir des vidéos et des photos de très haute qualité, ainsi que le réseau GPS.

En parallèle, l'entreprise Nokia a obtenu un contrat pour l'établissement d'un réseau LTE/4G sur la Lune. Ce réseau sera constitué d'une station de base LTE sur l'atterrisseur lunaire, d'équipements utilisateurs LTE qui seront installés sur les véhicules, ainsi que d'antennes établies tout autour du camp de base.

#### 5.4.6.6.3 Production d'électricité

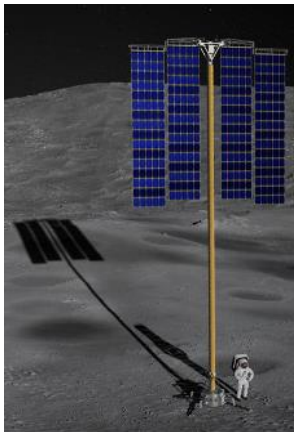


Figure 53: Illustration d'un prototype de panneau solaire lunaire vertical, honeybeerobotics.com

Le projet principal de la NASA concernant l'électricité est appelé projet VSAT, pour « Vertical Array Technology », et consiste à utiliser des panneaux solaires verticaux. La verticalité des panneaux est très importante, car les missions prévues auront lieu à proximité du pôle Sud de la Lune où le soleil ne s'élève pas beaucoup en dessus de l'horizon. Les formations rocheuses peuvent alors créer de l'ombre sur la surface et empêcher les panneaux solaires installés horizontalement de produire de l'électricité.

La NASA a sélectionné Astrobotic Technology, Honeybee Robotics et Lockheed Martin pour leurs concepts et leur a respectivement donné un budget de 6.2 millions de dollars chacun à Astrobotic Technology et Lockheed Martin et un budget de 7 millions à Honeybee Robotics pour développer des prototypes et effectuer des tests environnementaux.

La NASA demande dans son cahier des charges que les systèmes doivent être stables, peu importe le terrain, que les panneaux solaires résistent à la poussière lunaire abrasive, que le volume de transport et la masse soit réduit le plus possible et que le mât des panneaux solaires mesurant 9 mètres se déploie automatiquement.

Bien que La NASA souhaite utiliser l'énergie solaire un maximum, elle n'exclue pas l'utilisation de systèmes à fission nucléaire qui peuvent fournir de l'énergie en continu, sans être impacté par l'emplacement et l'ensoleillement. Ces systèmes seront peut-être utilisés pour les missions à longue durée sur la Lune et sur Mars.



#### 5.4.6.6.4 Production d'oxygène

La start-up israélienne Helios s'occupera de fournir l'oxygène en séparant les métaux et l'oxygène du sol lunaire, grâce à un processus développé par Helios qui s'appelle l'électrolyse du régolithe fondu. Grâce à un réacteur, alimenté par l'électricité, cette machine fait fondre le régolithe, composant la poussière lunaire, à plus de 1600°C, puis utilise la réaction d'électrolyse pour séparer l'oxygène des autres éléments, avant de la stocker.



Figure 54: Illustration conceptuelle du module de production d'oxygène lunaire, timesofisrael.com

Pour le stockage, Helios collabore avec Eta Space, spécialisée dans la production, le stockage et le transfert d'ergols cryogéniques, qui s'occupe du développement d'un module permettant de liquéfier l'oxygène et de la stocker.

Cette technologie ne fonctionnera pas sur Mars, car le sol n'est pas composé des mêmes matériaux. De plus, il y a beaucoup de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et dans les calottes polaires martiennes. C'est donc à partir de celui-ci que l'oxygène sera extrait. Dans les missions martiennes, la machine utilisée sera Big MOXIE, dont la version de test se trouve sur le rover Persévérance, présenté précédemment.

#### 5.4.6.6.5 Combinaisons spatiales



Figure 55: Photographie du prototype de la combinaison AxEMU, gurumed.org

Les combinaisons spatiales du programme Artemis sont développées par Axiom Space, une entreprise spatiale américaine. Le prototype de cette nouvelle combinaison spatiale, appelée AxEMU, pour « Axiom Extravehicular Mobility Unit », a été présenté lors du Space Center Houston Moon 2 Mars Festival. Le prototype, que l'on peut voir sur l'image, est recouvert d'une couche de couverture au couleur de Axiom Space qui cache la conception exclusive de la combinaison et sa couleur blanche. Le blanc est indispensable dans le domaine spatial, car cette couleur permet de refléter la chaleur et de protéger contre les températures négatives extrêmes.

Axiom Space profite des leçons et de l'expérience que la NASA a acquis tout au long des différents programmes par rapport aux combinaisons extravéhiculaires et développe des technologies innovantes pour adapter et améliorer les combinaisons. Les points les plus importants lors du développement de ces combinaisons, sont la résistance à l'usure sur le long terme, la protection des rayonnements, l'imperméabilité aux poussières microscopiques, la mobilité, la sécurité en cas de dépressurisation, les systèmes de survie, les systèmes de communications et le confort.

En effet, que ce soit sur la Lune ou sur Mars, la poussière de surface peut atteindre des vitesses élevées et provoquer un effet abrasif important pouvant user rapidement les matériaux de surface des combinaisons.

De plus, ces poussières lunaires ou martiennes peuvent par leurs grains microscopiques et leur vitesse accrue passer à travers les mailles des tissus composants la combinaison et provoquer de graves dégâts sur le porteur, les systèmes internes et sur les matériaux. Effectivement, Pour maintenir une flexibilité de la combinaison et garantir la mobilité, les combinaisons spatiales sont composées de tissus.<sup>18</sup>

Pour pallier ce problème, Alexandre Looten explique : « *Les technologies actuelles essaient de travailler sur des matériaux fluides rhéoépaississants [...] Le but est d'intégrer ce genre de liquide, qui sera plutôt un fluide, dans la matrice du tissu et qu'à chaque impact cette matrice vienne se solidifier et éviter une perforation ou une pénétration plus profonde dans la combinaison.* »<sup>19</sup>.

Des fibres utilisées dans les protections balistiques, comme le kevlar, sont également utilisées pour se prémunir des perforations causées par les micrométéorites. Un problème qui concerne particulièrement la Lune, du moins selon les informations actuelles, est le fait que la poussière de surface est chargée négativement. C'est pourquoi, « *l'utilisation de boucliers électrodynamiques [...] qui vont empêcher la poussière chargée de se déposer [...] que ce soit sur les objectifs de caméras, [...] tout ce qui est visières et systèmes de contrôle de la combinaison est prévue.* »<sup>20</sup>, déclare Alexandre Looten.

---

<sup>18</sup> PETIGNAT Théo, « Interview d'Alexandre Looten – Doctorant en Science et génie des matériaux », Annexe A-3, 08.09.2023

<sup>19</sup> Idem

<sup>20</sup> Idem

#### 5.4.6.6 Véhicules LTV

Pour le développement de véhicules LTV, signifiant « Lunar Terrain Vehicle », la NASA a choisi de se tourner une nouvelle fois vers l'industrie spatiale privée. En effet, elle a mis un place un appel à candidature pour des prototypes d'astromobiles. La NASA a donc établi un cahier des charges, dans lequel il est demandé que l'astromobile soit capable de parcourir plus de 100km avec une charge, qu'il fonctionne grâce à l'énergie solaire, qu'il ait la capacité de se déplacer dans divers types de reliefs et qu'il soit dirigeable à distance, pour qu'il puisse servir de rover et lorsqu'il n'y a pas de missions habitées à la surface. Les entreprises ayant répondu à la demande de la NASA sont Venturi Astrolab qui collabore avec l'organisation de la Nascar, Lockheed Martin en partenariat avec General Motors, Northrop Grumman qui est associé avec AVL, Intuitive Machines, Lunar Outpost et Michelin, puis finalement Tekedyne Brown Engineering avec Sierra Space et Nissan. Pour l'instant, seulement deux prototypes ont été présentés au public.

#### Leidos LTV

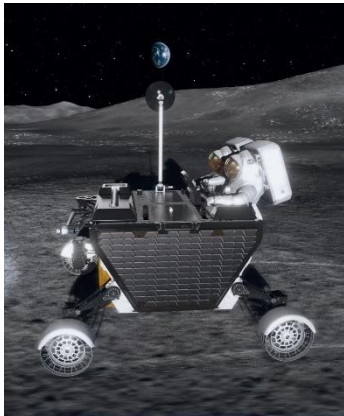


Figure 56: Photographie du prototype Leidos LTV présenté pendant symposium de l'espace 2023, spacenews.com

Leidos, l'entreprise mère du groupe de Dynetics, en collaboration avec la Nascar (organisation américaine de course automobile), a dévoilé, lors du symposium de l'espace 2023, leur premier prototype d'astromobile moderne.

Le Leidos LTV est alimenté grâce à des batteries et à l'énergie solaire, la vitesse maximale du prototype est 15 km/h et il a une autonomie d'un peu plus de 20 km. La vitesse et l'autonomie de la version finale seront bien plus élevées, car le prototype présenté avait pour objectif de montrer les innovations technologiques effectuée par Leidos.

Parmi ces avancées technologiques, on retrouve un système de gestion thermique, permettant de faire face à la variation des températures extrêmes de la surface lunaire et martienne et d'optimiser le fonctionnement des systèmes présents à bord. Leidos prévoit d'avoir un véhicule opérationnel pour la mission Artemis V, soit environ 2028.

**FLEX**

Le deuxième prototype a également été présenté lors de ce symposium de l'espace 2023. Il a été développé par l'entreprise Venturi Astrolab et se nomme FLEX, pour « Flexible Logistics and Exploration ». FLEX est un véhicule très polyvalent permettant le transport d'astronautes, le transport de matériel, de manière autonome et la mise en place d'expériences scientifiques. Venturi Astrolab a signé un accord avec SpaceX pour que leur rover soit envoyé sur la lune à l'horizon 2026 au plus tôt, grâce au Starship, afin d'effectuer les tests en conditions réelles.

Figure 57: Illustration du véhicule FLEX, [astrolab.space](http://astrolab.space), [astrolab.space](http://astrolab.space)

## 6 CONCLUSION

Afin de répondre à la première partie de ma problématique, j'ai étudié la planétologie, la géologie, la climatologie, la météorologie, la biologie martienne, ainsi que le programme spatial Artemis. Ces études montrent que les scientifiques et les agences spatiales s'intéressent fortement à Mars et plus spécifiquement à son passé, malgré les différences de structure et de conditions climatiques actuelles entre Mars et la Terre. Les raisons de cet intérêt sont la proximité relative de Mars avec la Terre, le fait que cette planète ait abrité un environnement propice à l'apparition de la vie, ainsi que la similitude des processus de formation et des phases d'évolution entre les deux astres. De plus, les missions spatiales martiennes et le programme Artemis permettent d'inspirer les nouvelles générations à s'intéresser aux sciences et l'ouverture de nouveaux secteurs de l'industrie. Mars est également attrayante pour la recherche médicale.

Puis, il a été possible de répondre à la deuxième question de ma problématique, en s'intéressant aux missions MAVEN, Persévérance et au programme Artemis. Les moyens employés sont aussi conséquents que variés. Les moyens financiers colossaux alloués aux programmes et la collaboration entre les différentes agences spatiales sont les composantes essentielles, sans lesquelles rien ne serait possible. Ensuite, l'innovation technologique permet le développement des outils de mesure de très haute précision, comme la SuperCam du rover Persévérance. Ces outils de mesure particuliers sont primordiaux pour obtenir des résultats et pouvoir extrapoler le schéma d'évolution précis de Mars. La recherche médicale est aussi très importante et est employée pour assurer la santé des astronautes lors de longues missions sur Mars. Finalement, la NASA et les autres agences spatiales font appel à des entreprises privées, telles que SpaceX, Boeing et Lockheed Martin, pour développer différents astronefs et certains systèmes de survie.

## 7 BIBLIOGRAPHIE

- AFP, « À quoi ressemblera la future base lunaire de la NASA ? », Bilan, 4.5.2023, <https://www.bilan.ch/story/a-quoi-ressemblera-la-future-base-lunaire-de-la-nasa-720725447186>, consulté le 1.11.2023
- AFP, CAP, « Les principaux enjeux du retour sur la Lune avec la mission Artemis », RTS, 13.10.2022, <https://www.rts.ch/info/sciences-tech/13374607-les-principaux-enjeux-du-retour-sur-la-lune-avec-la-mission-Artemis.html>, consulté le 1.11.2023
- AFP, Le Figaro, « Un réseau de téléphonie mobile bientôt installé sur la Lune », Le Figaro, 19.10.2020, <https://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/la-nasa-et-nokia-vont-installer-la-telephonie-mobile-sur-la-lune-20201019>, consulté le 1.11.2023
- AFP, Le Figaro, « Artemis 2 : des astronautes autour de la Lune en novembre 2024, dit la Nasa », Le Figaro, 7.3.2023, <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/Artemis-2-des-astronautes-autour-de-la-lune-en-novembre-2024-dit-la-nasa-20230307>, consulté le 1.11.2023
- ASC, « Biography of Jeremy Hansen », ASC-CSA, 3.4.2023, <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/astronauts/canadian/active/bio-jeremy-hansen.asp>, consulté le 1.11.2023
- ASC, « Mars », ASC-CSA, 15.8.2023, La station spatiale lunaire Gateway, <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/astronomie/exploration-lune/station-spatiale-lunaire.asp>, consulté le 1.8.2023
- ASC, « Mars », ASC-CSA, 24.7.2020, <https://www.asc-csa.gc.ca/fra/astronomie/systeme-solaire/mars.asp>, consulté le 1.8.2023
- Astrobotic Technology, « Continuous, Reliable Power for Lunar Missions », Astrobotic, 2022, <https://www.astrobotic.com/lunar-delivery/lunar-surface-power/>, consulté le 1.11.2023
- Axiom Space, « The Next-Generation Spacesuit », Axiom Space, 2023, <https://www.axiomspace.com/axiom-suit>, consulté le 1.11.2023
- BEHLI Chaima, ERINNEZ Erkin, PROD'HOM Arthur, SYRVET Théo, « La géologie de la planète Mars », Terre ! Origine et évolution d'une planète turbulente Bsc2, Automne 2022
- Blue Origin, « The Workhorse for a New Era », Blue Origin, 2022, <https://www.blueorigin.com/fr-FR/new-glenn>, consulté le 1.11.2023
- BOLLES Dana, « Mars facts », NASA, 27.9.2023, <https://solarsystem.nasa.gov/planets/mars/in-depth/>, consulté le 30.9.2023
- BRISSON Pierre, « A la recherche des traces d'une première étincelle de Vie », Blog Le Temps, 5.6.2018, <https://blogs.letemps.ch/pierre-brisson/2018/06/05/a-la-recherche-de-la-trace-dune-premiere-etincelle-de-vie/>, consulté le 1.11.2023
- BRISSON Pierre, « Pour SpaceX le lancement du Starship du 20 avril est un demi-succès », Blog Le Temps, 20.4.2023, <https://blogs.letemps.ch/pierre-brisson/2023/04/20/pour-spacex-le-lancement-du-starship-du-20-avril-est-un-demi-succes/>, consulté le 1.11.2023



BRISSON Pierre, « DRACO, le « dragon » nucléaire de la NASA qui renouvelle les perspectives d'un accès facilité à la planète rouge », Blog Le Temps, 18.2.2023, <https://blogs.letemps.ch/pierre-brisson/2023/02/18/draco-le-dragon-nucleaire-de-la-nasa-qui-renouvelle-les-perspectives-dun-acces-facilite-a-la-planete-rouge-1/>, consulté le 1.11.2023

Cité de l'espace, « AxEMU, un scaphandre pour marcher sur la Lune », Cité-espace, 15.3.2023, <https://www.cite-espace.com/actualites-spatiales/axemu-un-scaphandre-pour-marcher-sur-la-lune/>, consulté le 1.11.2023

Cité de l'espace, « Blue Moon, un autre atterrisseur lunaire pour Artemis », Cité-espace, 22.5.2023, <https://www.cite-espace.com/actualites-spatiales/blue-moon-un-autre-atterrisseur-lunaire-pour-Artemis/>, consulté le 1.11.2023

DEAN Brandi, « Christina Koch », NASA, 1.8.2023, <https://www.nasa.gov/astronauts/biographies/christina-hammock-koch/biography>, consulté le 1.11.2023

DEAN Brandi, « Victor J. Glover, Jr. », NASA, 1.8.2023, <https://www.nasa.gov/astronauts/biographies/victor-j-glover/biography>, consulté le 1.11.2023

DEIGHAN J., JAIN S.K., CHAFFIN M.S., « Discovery of a proton aurora at Mars », Nature, 23.7.2018, <https://www.nature.com/articles/s41550-018-0538-5>, consulté le 1.11.2023

DUNBAR Brian, « What is Artemis ? », NASA, 25.7.2019, <https://www.nasa.gov/what-is-Artemis>, consulté le 1.11.2023

DUNHAM Will, « NASA rover reveals new evidence about organic molecules on Mars », Reuters, 13.7.2023, <https://www.reuters.com/technology/space/nasa-rover-reveals-new-evidence-about-organic-molecules-mars-2023-07-13/>, consulté le 1.11.2023

FAZEKAS Andrew, « Cinq grands mystères qui entourent toujours Mars », National Geographic, 14.11.2018, <https://www.nationalgeographic.fr/astronomie/phobos-et-deimos-les-mysterieuses-lunes-de-mars>, consulté le 1.10.2023

GRESHKO Michael, « Artemis, le programme de la NASA pour ramener l'Homme sur la Lune », National Geographic, 24.8.2022, <https://www.nationalgeographic.fr/espace/2022/08/Artemis-le-programme-de-la-nasa-pour-ramener-lhomme-sur-la-lune>, consulté le 1.11.2023

GRYNSZPAN Emmanuel, « Les Russes veulent une base sur la Lune, mais en ont-ils les moyens ? », Le Temps, 10.6.2023, <https://www.letemps.ch/sciences/espace/russes-veulent-une-base-lune-ontils-moyens>, consulté le 1.11.2023

HALL Loura, « 6 Technologies NASA is Advancing to Send Humans to Mars », NASA, 17.7.2020, [https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/6\\_Technologies\\_NASA\\_is\\_Advancing\\_to\\_Send\\_Humans\\_to\\_Mars](https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/6_Technologies_NASA_is_Advancing_to_Send_Humans_to_Mars), consulté le 30.10.2023

HARWOOD William, « NASA's Artemis moon program facing rising costs and delays », CBS News, 15.11.2015, <https://www.cbsnews.com/news/Artemis-moon-program-cost-delays-nasa-inspector-general/>, consulté le 1.11.2023

JONES Carlton D., « Orion Spacecraft », NASA, 11.10.2023, <https://www.nasa.gov/humans-in-space/orion-spacecraft/>, consulté le 1.11.2023

La Rédaction, « Perseverance fait une découverte inédite sur Mars », Sciencepost, 3.7.2023, <https://sciencepost.fr/perseverance-decouverte-inedite-sur-mars/>, consulté le 1.11.2023

LEVITT Ross, WATTLES Jackie, « FAA says it may grant a launch license for SpaceX's Starship by the end of October », CNN, 14.9.2023, <https://edition.cnn.com/2023/09/14/world/spacex-starship-faa-license-expected-october-scn/index.html>, consulté le 1.11.2023

Lockheed Martin, « Bursting the Bubble with Inflatable Habitats », Lockheed Martin, 5.7.2023, <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2022/bursting-the-bubble-with-inflatable-habitats.html>, consulté le 1.11.2023

MAHONNEY Erin, « NASA Prompts Companies for Artemis Lunar Terrain Vehicle Solutions », NASA, 31.8.2021, <https://www.nasa.gov/feature/nasa-prompts-companies-for-Artemis-lunar-terrain-vehicle-solutions>, consulté le 1.11.2023

MANGOLD N., GUPTA G., GASNAULT O., ..., « Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars », Science, 7.10.2021, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abl4051>, consulté le 1.11.2023

Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères français, « Projet israélo-américain : extraire l'oxygène de la surface de la Lune », Diplomatie, 29.9.2022, <https://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique-et-universitaire/veille-scientifique-et-technologique/israel/article/projet-israelo-americain-extraire-l-oxygene-de-la-surface-de-la-lune>, consulté le 1.11.2023

MOHON Lee, « Artemis III : NASA's First Human Mission to the Lunar South Pole », NASA, 13.1.2023, <https://www.nasa.gov/feature/Artemis-iii>, consulté le 1.11.2023

MOHON Lee, « Space Launch System », NASA, 23.10.2023, <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/index.html>, consulté le 1.11.2023

NASA Communications, « NASA Makes Progress with New Lunar Terrain Vehicle Moon Rover Services », NASA, 2.11.2022, <https://www.nasa.gov/feature/nasa-makes-progress-with-new-lunar-terrain-vehicle-moon-rover-services>, consulté le 1.11.2023

NASA Communications, « Spacesuit for NASA's Artemis III Moon Surface Mission Débuts », NASA, 15.3.2023, <https://www.nasa.gov/feature/a-next-generation-spacesuit-for-the-Artemis-generation-of-astronauts>, consulté le 1.11.2023

NASA, « As Artemis Moves Forward, NASA Picks SpaceX to Land Next Americans on Moon », NASA, 16.4.2021, <https://www.nasa.gov/press-release/as-Artemis-moves-forward-nasa-picks-spacex-to-land-next-americans-on-moon>, consulté le 1.11.2023

NASA, « Lunar Living : NASA's Artemis Base Camp Concept », NASA, 28.10.2020, <https://blogs.nasa.gov/Artemis/2020/10/28/lunar-living-nasas-Artemis-base-camp-concept/>, consulté le 1.11.2023

NASA, « MAVEN », NASA, 2020, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/maven/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/maven/overview/index.html), consulté le 1.11.2023

NASA, « SLS Block 1 Crew, Block 1B Crew, Block 1B Cargo and Block 2 Cargo Evolution », NASA, 21.8.2020, <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/sls-vehicle-evolution.html>, consulté le 1.11.2023

NASA, « Three Companies to Help NASA Advance Solar Array Technology for Moon », NASA, 23.8.2022, <https://www.nasa.gov/press-release/three-companies-to-help-nasa-advance-solar-array-technology-for-moon>, consulté le 1.11.2023

Nokia, « Nokia aims for the Moon with LTE/4G », Nokia, 2022, <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/nokia-aims-for-the-moon-with-lte4g/>, consulté le 1.11.2023

PIERRICK Jordan, « La mission Perseverance confirme l'intérêt de chercher des traces de vie sur Mars », RTS, 10.10.2021, <https://www.rts.ch/info/sciences-tech/12555373-la-mission-perseverance-confirme-linteret-de-chercher-des-traces-de-vie-sur-mars.html>, consulté le 1.11.2023

PLATT Jane, « NASA's Perseverance Mars Rover Makes Surprising Discoveries », NASA, 15.12.2021, <https://mars.nasa.gov/news/9098/nasas-perseverance-mars-rover-makes-surprising-discoveries/>, consulté le 1.11.2023

PLATT Jane, « Launch Vehicule », NASA, 2020, <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/launch-vehicle/>, consulté le 2.10.2023

PLATT Jane, « Perseverance Rover's Landing Site : Jezero Crater », NASA, 2020, <https://mars.nasa.gov/mars2020/mission/science/landing-site/>, consulté le 1.10.2023

PLATT Jane, « Rover », NASA, 2020, <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/>, consulté le 2.10.2023

RIDGEWAY Beth, « NASA Names Astronauts to Next Moon Mission, First Crew Under Artemis », NASA, 5.4.2023, <https://www.nasa.gov/general/nasa-names-astronauts-to-next-moon-mission-first-crew-under-Artemis/>, consulté le 1.11.2023

RINCON Paul, « Nasa's Orion spacecraft: A guide », BBC, 10.11.2021, <https://www.bbc.com/news/science-environment-58609313>, consulté le 1.11.2023

RODRIGUEZ-MANFREDI J.A., DE LA TORRE JUAREZ M., SANCHEZ-LAVEGA A., « The diverse meteorology of Jezero crater over the first 250 sols of Perseverance on Mars », Nature, 9.1.2023, <https://www.nature.com/articles/s41561-022-01084-0#data-availability>, consulté le 1.11.2023

RUBIO Jeffrey, « Gateway », NASA, 9.8.2023, <https://www.nasa.gov/gateway>, consulté le 1.11.2023

RUHER Hugo, « Ingenuity, l'incroyable hélicoptère de Mars », Le Monde, 6.9.2023, [https://www.lemonde.fr/sciences/article/2023/09/06/ingenuity-l-incroyable-helicoptere-de-mars\\_6188027\\_1650684.html](https://www.lemonde.fr/sciences/article/2023/09/06/ingenuity-l-incroyable-helicoptere-de-mars_6188027_1650684.html), consulté le 1.11.2023

SACLEUX Arnaud, « Phobos et Deimos, les mystérieuses lunes de Mars », National Geographic, 31.10.2018, <https://www.nationalgeographic.fr/astronomie/phobos-et-deimos-les-mysterieuses-lunes-de-mars>, consulté le 1.10.2023

SpaceX, « Starship Overview », SpaceX, 2023, <https://www.spacex.com/vehicles/starship/>, consulté le 1.11.2023

STEIGERWALD William, « 1,000 Days in Orbit: MAVEN's Top 10 Discoveries at Mars », NASA, 16.6.2017, <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2021/could-the-surface-of-phobos-reveal-secrets-of-the-martian-past>, consulté le 1.11.2023

STEIGERWALD William, « Could the Surface of Phobos Reveal Secrets of the Martian Past ? », NASA, 1.2.2021, <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2021/could-the-surface-of-phobos-reveal-secrets-of-the-martian-past>, consulté le 1.10.2023

SURKES Sue, « Des panneaux solaires israéliens sur la Lune pour alimenter la production d'oxygène », The Times of Israël, 1.1.2023, <https://fr.timesofisrael.com/des-panneaux-solaires-israeliens-sur-la-lune-pour-alimenter-la-production-doxygene/>, consulté le 1.11.2023

University of Colorado, « Released Results », Colorado, 2018, <https://lasp.colorado.edu/home/maven/science/released-results/>, consulté le 1.11.2023

WATTLES Jackie, « NASA to test nuclear thermal rocket engine for the first time in 50 years », CNN, 24.1.2023, <https://edition.cnn.com/2023/01/24/world/nasa-nuclear-thermal-rocket-engine-mars-scn/index.html>, consulté le 1.11.2023

WEI-HAAS Maya, « Perseverance : un an après son arrivée sur Mars, le robot de la NASA relève tous les défis », National Geographic, 23.2.2022, <https://www.nationalgeographic.fr/espace/perseverance-un-an-apres-son-arrivee-sur-mars-le-robot-de-la-nasa-releve-tous-les-defis>, consulté le 1.11.2023

## 8 TABLES DES FIGURES

Figure de couverture

Tiré de : <http://pngimg.com/image/61174>

Figure 1: Photographie de Phobos

Tiré de : <https://www.planetary.org/articles/1391>

Figure 2: photographie de Deimos

Tiré de : <https://supernova.eso.org/exhibition/images/0309-deimos-CC/>

Figure 3: Tableau de la composition de l'atmosphère martienne

Tiré de : <https://mars.aeronomie.be/fr/composition.htm>

Figure 4: Photographie de la calotte du pôle Nord (à droite) et de la calotte du pôle Sud (à gauche)

Tiré de : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/calotte-polaire-Mars-2008.xml>

Figure 5: carte topographique de l'hémisphère Nord (à droite) et de l'hémisphère Sud (à gauche) de Mars

Tiré de : <https://www.slideshare.net/pathupawar/geology-of-mars-presentation>

Figure 6: Photographie du volcan Olympus Mons

Tiré de : <https://www.le-systeme-solaire.net/zoom-mars-001.html>

Figure 7: modélisation de la structure de Mars

Tiré de : [https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9ologie\\_de\\_Mars](https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9ologie_de_Mars)

Figure 8: Illustration de comparaison de l'activité volcanique terrestre et martienne

Tiré de : <http://laurinemoreau.com/projets-majeurs/astronomie-mars-terre/>

Figure 9: Représentation de Mars avec son champ magnétique

Tiré de : <http://laurinemoreau.com/projets-majeurs/astronomie-mars-terre/>

Figure 10: Représentation de Mars sans son champ magnétique

Tiré de : <http://laurinemoreau.com/projets-majeurs/astronomie-mars-terre/>

Figure 11: selfie du rover Persévérance et d'Ingenuity

Tiré de : <https://www.news18.com/news/buzz/nasas-perseverance-rover-records-sound-of-ingenuity-helicopter-flying-on-mars-3717875.html>

Figure 12: Photographie du delta du cratère Jerezo

Tiré de : <https://mars.nasa.gov/mars2020/mission/science/landing-site/?ref=warpnews.org>

Figure 13: Illustration de la composition du Rover Persévérance

Tiré de : <https://www.letemps.ch/sciences/espace/premier-allerretour-vers-mars-point-dachever-premiere-moitie-periple>

Figure 14: Photographie du RIMFAX

Tiré de : <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/rimfax/>

Figure 15: Photographie de la Mastcam-Z

Tiré de : <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/mastcam-z/>

Figure 16: Photographie du module MOXIE

Tiré de : <https://www.designboom.com/technology/nasa-moxie-device-generates-oxygen-atmosphere-mars-04-20-2021/>

Figure 17: Photographie de la SuperCam

Tiré de : <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/supercam/>

Figure 18: Photographie du module MEDA

Tiré de : <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/meda/>

Figure 19:: Photographie de l'instrument de mesure SHERLOC

Tiré de : <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/sherloc/>

Figure 20: Photographie du module PIXL

Tiré de : <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA24094>

Figure 21: Photographie de l'hélicoptère Ingenuity

Tiré de : <https://uk.pcmag.com/news/132740/technical-issue-delays-nasa-ingenuity-helicopters-first-martian-flight>

Figure 22: Illustration du satellite MAVEN

Tiré de : <https://www.lpl.arizona.edu/missions/maven>

Figure 23: Illustration de comparaison des dimensions de MAVEN

Tiré de : <https://danielmarin.naukas.com/2013/11/18/maven-2/>

Figure 24: Illustration de la composition de MAVEN

Tiré de : <https://danielmarin.naukas.com/2013/11/18/maven-2/>

Figure 25: Photographie des deux capteurs SEP

Tiré de : <https://lasp.colorado.edu/maven/science/instrument-package/sep/>

Figure 26: Photographie du module SWIA

Tiré de : <https://www.nasa.gov/image-article/solar-wind-ion-analyzer/>

Figure 27: Photographie du capteur SWEA

Tiré de : <https://lasp.colorado.edu/maven/science/instrument-package/swea/>

Figure 28: Photographie de STATIC

Tiré de : <https://lasp.colorado.edu/maven/science/instrument-package/static/>

Figure 29: Photographie d'une des sondes LPW avec un capteur (en haut à droite)

Tiré de : <https://lasp.colorado.edu/maven/science/instrument-package/lpw/>

Figure 30: Photographie du magnétomètre MAG

Tiré de : <https://lasp.colorado.edu/maven/science/instrument-package/mag/>

Figure 31: Photographie de l'instrument de mesure NGIMS

Tiré de : <https://lasp.colorado.edu/maven/science/instrument-package/ngims/>

Figure 32: Photographie du système IUVS

Tiré de : <https://mars.nasa.gov/resources/5584/maven-imaging-ultraviolet-spectrograph/>

Figure 33: Photographie du module Electra HUF

Tiré de : <https://mars.nasa.gov/resources/6045/electra-relay-radio-on-maven-mission-to-mars/>

Figure 34: Logo du programme Artemis

Tiré de : <https://www.nasa.gov/image-detail/amf-Artemis-logo-color-positive-rgb-july-2021/>

Figure 35: Logo de l'administration spatiale nationale chinoise (CNSA)

Tiré de : <https://www.space.com/22743-china-national-space-administration.html>

Figure 36: Logo de l'agence spatiale russe

Tiré de : <https://www.iafastro.org/membership/all-members/roscosmos.html>

Figure 37: Portrait de Reid Wiseman, NASA

Tiré de : <https://www.nasa.gov/people/reid-wiseman/>



Figure 38: Portrait de Victor J. Glover Jr., NASA

Tiré de : <https://www.nasa.gov/people/victor-j-glover-jr/>

Figure 39: Portrait de Christina Hammock Koch, NASA

Tiré de : <https://www.nasa.gov/people/christina-koch/>

Figure 40: Portrait de Jeremy Hansen, ASC

Tiré de : <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/multimedia/search/image/18544>

Figure 41: Illustration de la composition d'Orion

Tiré de : <http://www.pilote-virtuel.com/viewtopic.php?id=101723>

Figure 42: Photographie de la structure interne de la capsule Orion

Tiré de : <https://www.nasa.gov/reference/orion-spacecraft/#hds-sidebar-nav-7>

Figure 43: Photographie du module de service d'Orion

Tiré de : <https://www.nasa.gov/reference/orion-spacecraft/#hds-sidebar-nav-4>

Figure 44: Illustration des différentes version du SLS

Tiré de : <https://www.agences-spatiales.fr/space-launch-system-sls/>

Figure 45: Illustration de la structure externe du SLS

Tiré de : <http://www.pilote-virtuel.com/viewtopic.php?id=101723>

Figure 46: Illustration des modules ICPS (à gauche) et EUS (à droite)

Tiré de : <https://www.nasa.gov/image-article/rocket-moon-what-exploration-upper-stage/>

Figure 47: Illustration de la composition de la station orbitale Lunar Gateway

Tiré de : <https://www.thalesgroup.com/fr/monde/espace/news/halo-premiere-composante-station-spatiale-cislunaire-gateway-prend-forme>

Figure 48: Photographie d'un prototype du Starship

Tiré de : <https://thepressfree.com/ce-spacex-render-of-starship-se-separant-avec-super-heavy-booster-est-assez-proche-de-la-realite-dit-elon-musk/>

Figure 49: Illustration de l'atterrisseur Blue Moon

Tiré de : <https://edition.cnn.com/2023/05/19/world/nasa-lunar-lander-spacex-blue-origin-scni/index.html>

Figure 50: Illustration conceptuelle de l'astronef DRACO

Tiré de : <https://www.universetoday.com/159759/nasa-and-darpa-will-be-testing-a-nuclear-rocket-in-space/>

Figure 51: Illustration conceptuelle d'une imprimante 3D lunaire

Tiré de : <https://www.3dnatives.com/nasa-icon-lune-021220223/>

Figure 52: Photographie du prototype d'habitat gonflable

Tiré de : <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2022/bursting-the-bubble-with-inflatable-habitats.html>

Figure 53: Illustration d'un prototype de panneau solaire lunaire vertical

Tiré de : <https://www.honeybeerobotics.com/news-events/honeybee-robotics-and-mpower-technology-selected-as-lunar-power-grid-provider-for-Artemis-exploration/>

Figure 54: Illustration conceptuelle du module de production d'oxygène lunaire,

Tiré de : <https://fr.timesofisrael.com/lisraelien-helios-sassocie-a-ohb-se-pour-produire-de-loxygene-sur-la-lune/>

Figure 55: Photographie du prototype de la combinaison AxEMU

Tiré de : <https://www.gurumed.org/2023/03/21/la-nasa-prsente-sa-toute-nouvelle-combinaison-lunaire-inspire-de-la-science-fiction/>

Figure 56: Photographie du prototype Leidos LTV présenté pendant symposium de l'espace 2023

Tiré de : <https://spacenews.com/astrolab-to-send-rover-to-the-moon-on-spacexs-starship/>

Figure 57: Illustration du véhicule FLEX

Tiré de : <https://astrolab.space/flex>

## 9 ANNEXES

### A-1 : Interview de Nicolas Bettschart – Ingénieur aéronautique

(Réponse par mail)

- 1) Comment vous appelez-vous ?

« Nicolas Bettschart »

- 2) Pouvez-vous m'expliquer votre parcours jusqu'à aujourd'hui (étude, spécialisations, etc.) ?

« Après la maturité type C au gymnase du Bugnon (1982), j'ai entrepris des études de physique à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne où j'ai obtenu mon diplôme d'ingénieur Physicien en 1989 (aujourd'hui appelé Master of Science en Physique) en me spécialisant en physique expérimentale des Plasmas. Durant cette période, j'ai également effectué ma licence de pilote privé d'avion – PPL (A) et mon école de recrue à Payerne comme soldat d'aviation. J'ai aussi travaillé comme chauffeur de taxi et comme assistant étudiant au 1983CRPP – Centre de Recherche en Physique des Plasmas en support des activités expérimentales sur le TOKAMAK. »

« De 1989 à 1990, j'ai effectué une spécialisation en France et ai obtenu le diplôme d'Ingénieur en Aéronautique de l'Ecole Supérieure des Techniques Aérospatiales, Orsay, France. »

« Après quoi j'ai travaillé de 1990 à 2001 à l'ONERA - Office National d'Etudes et de Recherche Aérospatiales, Châtillon, France, sur l'aérodynamique des hélicoptères et plus particulièrement dans les interactions aérodynamiques entre le rotor principal et le fuselage, d'abord dans la validation de modèles numériques de simulation au moyen de tests dans des souffleries, puis en tant que chef de projets des interactions aérodynamiques et aérothermiques sur les hélicoptères. J'ai également participé à un échange de personnel entre l'US Army et l'ONERA dans lequel j'ai été me spécialiser à la NASA Langley en Virginie, USA, en 1992 / 93, sur les techniques de mesures et de qualification du champ aérodynamique autour des hélicoptères en souffleries. »

*« En 2001, j'ai été embauché à Dübendorf en tant qu'adjoint scientifique pour les phases d'acceptance du nouveau système FLORAKO de surveillance et d'engagement des Forces Aériennes Suisses. En 2016, j'ai endossé le rôle de chef RALUS (sous-système pour l'établissement de la situation aérienne) ainsi que le rôle de chef adjoint de la section Système Analyse FLORAKO dont le but est d'assurer la maintenance, le développement et le soutien aux utilisateurs du système FLORAKO. Je suis à ce jour toujours incorporé en tant qu'officier spécialiste milicien dans les Forces Aériennes, comme TDLO - Tactical Data Link Officier. »*

3) Qu'est-ce qui vous a motivé à persévérer dans ce domaine ?

*« L'aéronautique, l'aviation, l'aérospatiale, ... ainsi que les concepts, les technologies et les systèmes associés couvrent un immense spectre de domaines fascinants. Contrairement aux oiseaux, l'humain ne sait pas voler et ne maîtrise pas de manière innée la troisième dimension. Tous ces efforts vont dans le sens d'utiliser et de maîtriser justement ce qu'on ne sait pas faire de manière intuitive. »*

4) Dans quelles entreprises avez-vous travaillé (nom et pays) et qu'est-ce qui vous a poussé à changer d'entreprise ?

- « Centre de Recherche en Physique des Plasmas, EPFL, Suisse*
- ONERA, Chatillon France – Changement de la magnétohydrodynamique MHD à l'aérodynamique et aux techniques aéronautiques*
- Département de la Défense, Forces Aériennes Suisses – Application des savoirs informatiques et aéronautiques au bénéfice de la sécurité de la Suisse »*

5) Avec du recul, quel poste avez-vous préféré ?

*« Pas de préférence, tous ces postes et occupations ont été passionnants et plein de sources d'inspirations. »*

6) Y-a-t-il des particularités dans la façon dont sont menés les programmes spatiaux en rapport aux projets scientifiques menés sur Terre ?

*« Les programmes spatiaux ont une composante militaire importante. Par exemple les programme Mercury et Apollo avaient également comme finalité de maîtriser la technologie des missiles balistiques. A noter également que les armées de l'air complètent leur désignation avec une composante « espace » comme par exemple les Forces Aériennes Françaises qui se nomment maintenant « Armée de l'Air et de l'Espace ». Une différence importante est la fixation d'un but pour les programmes spatiaux qui devient le symbole du programme, comme par exemple marcher sur la Lune à une date donnée. Dans les programmes scientifiques, les aspects systémiques et systématiques sont privilégiés et les buts à atteindre en un temps donné sont plus secondaires comme par exemple la réalisation commerciale de réacteurs à fusion. »*

- 7) Que pensez-vous des échéances fixées par la NASA pour le retour de l'Homme sur la lune et sur Mars, paraissent-elles plausibles ? (Retour sur la Lune en 2025 (Artemis III) et premiers pas sur Mars en 2037)

*« La lune est envisageable en 2025 d'un point de vue technique. Après tout, nous y avons été et sommes revenu il y a plus de 50 ans avec peu de perte. Pour Mars, c'est plus compliqué et surtout plus loin. Dans les deux cas, les sommes colossales engagées associées à des retombées scientifiques finalement modestes sont parmi les plus grands challenges. »*

- 8) Quelles sont les opportunités de recherches scientifiques spécifiques que Mars offre aux chercheurs par rapport à la Lune et aux autres planètes (par exemple Vénus) ?

*« Un des points sûrement intéressant pour la Lune et pour Mars est de comprendre leur formation et en particulier si à l'image de la terre il y a eu une activité volcanique. De plus, pour Mars (et peut-être aussi pour la Lune), la présence éventuelle d'eau permettrait également de mieux connaître ce qui s'est passé il y a bien longtemps. Venus serait particulièrement hostile pour une promenade d'astronautes, car son atmosphère est extrêmement dense et à une pression gigantesque, environ 100 atm au niveau du sol. Néanmoins, je pense que des études approfondies de ces astres amèneraient certainement des éléments inattendus qui pourraient donner un coup d'accélérateur à notre compréhension de l'univers et de la matière. »*

- 9) Quels sont les futurs projets en matière de missions spatiales martiennes (missions habitées, robotisées) ?

*« Sans connaître vraiment les détails, je pense que les missions aussi lointaines dans un environnement relativement proche de celui de la terre, mais non viables pour l'homme, ouvrent la voie à de multitudes de projets allant de la science du vivant, la géologie, l'étude des radiations, des systèmes autonomes, de l'IA, des transmissions, sans oublier les études sur le confinement et la nutrition des astronautes. »*

- 10) Quelles percées physiques pourraient-ils apporter à notre compréhension de l'évolution de la planète rouge ?

*« Il est difficile de prédire quels seront les retombées des différentes études et projets qui seraient effectués sur Mars. Si on les connaissait déjà, on n'aurait alors pas besoin d'y aller. Toutefois il faut s'attendre à des avancées majeures, soit directement, soit indirectement dans de nombreux sujets. »*

- 11) Quels sont les avantages et les inconvénients des approches habitées et non-habitées pour explorer Mars du point de vue d'un physicien ?

*« Les missions non habitées sont moins risquées et coutent nettement moins chers car elles ne nécessitent pas d'aménagements particuliers pour la survie des astronautes. L'acceptance en cas de non-succès ou même d'échecs est beaucoup plus élevée que pour les missions habitées. En revanche, les résultats, les analyses et les synthèses à*

*faire sur place, en temps réels seront bien plus limitées que s'il y a une présence humaine. Ce débat est similaire à celui qu'il y a pour les drones de combats et les jets de combats : pour l'instant les drones excellent dans des missions spécifiques mais ils n'ont de loin pas le potentiel pour garantir la supériorité aérienne : il faut encore des pilotes ! »*

- 12) Quelles leçons tire-t-on des missions spatiales passées en ce qui concerne la conception des vaisseaux spatiaux et quels changements ont été appliqués ou seront appliqués dans les missions actuelles et futures ?

*« Une des questions fondamentales et de savoir si on veut rentrer sur Terre et si oui avec quoi. La grande différence entre aller sur la Lune ou sur Mars tient dans la trajectoire du vaisseau : pour la Lune on y va quasi directement, il n'y a de toute façon pas grand-chose entre la terre et la lune. Pour Mars il faut profiter de s'accélérer sur les planètes intérieures comme Venus ou peut-être Mercure à l'aller et/ou au retour. Vient ensuite le type carburant et sa quantité qui dépend des deux points précédents ainsi que du nombre d'astronautes et d'équipement à emporter. Ce que nous apprend le passé et qu'il vaut mieux procéder par étapes (comme Mercury puis les différentes missions d'Apollo) afin de maîtriser les nombreux problèmes progressivement. »*

- 13) Paraît-il possible d'établir des bases durables sur la Lune et sur Mars, avec les moyens techniques et les technologies actuelles ? Pourquoi ?

*« Les contraintes tant techniques que psychologiques et physiologiques me laissent songeur sur l'installation de bases habitées durables. En regardant en arrière, les cosmonautes d'Apollo sont restés que peu de temps loin de la terre en comparaison à un voyage sur Mars et à part un ils n'ont pas trop bien fini. »*

- 14) Quels sont les principaux défis physiques des missions spatiales martiennes ? Sont-ils différents des missions lunaires ou des missions en orbite terrestre ?

*« On peut citer le manque d'apesanteur (quasi nul pendant le voyage, puis env. 1/3 de celle de la terre sur Mars), l'exposition aux rayonnements cosmiques divers, le manque d'oxygène, les températures très froides, le manque de pression, etc... »*

- 15) Pouvez-vous expliquer comment les vaisseaux spatiaux sont conçus pour résister aux conditions thermiques extrêmes lors de l'entrée, de la descente et de l'atterrissage sur Mars, par exemple ?

*« Lors des rentrées atmosphériques des vaisseaux (qui s'effectuent forcément toujours à grande vitesse), le frottement chauffe l'air proche du vaisseau à des températures très élevées de plusieurs milliers de degrés. Les vaisseaux sont conçus pour que la face qui est exposée à cet échauffement (le dessous des capsules Apollo ou le ventre de la navette spatiale) soient protégées avec des matériaux supportant ces températures élevées. La forme de ces boucliers thermiques joue également un rôle déterminant. Finalement il faut pouvoir assurer ou contrôler que le vaisseau soit et reste dans la*

*bonne position c.à.d. avec le bouclier thermique dans le sens de la rentrée, sinon c'est la désintégration assurée. Pour anecdote, lors de rentrées atmosphériques, les communications radio ne sont plus possibles ; en effet les gaz autour du véhicule sont si chauds qu'ils s'ionisent (ils deviennent des plasmas) et bloquent ainsi les ondes radios. Il y aurait toutefois des solutions, en tout cas théoriques, pour s'affranchir de black-out de communication lors de rentrées atmosphériques ».*

- 16) Quels sont les principaux défis de conception auxquels les ingénieurs sont confrontés lorsqu'ils développent des vaisseaux spatiaux et des habitats durables pour des missions martiennes de longue durée ?

*« Le plus gros challenge est à mes yeux d'obtenir un environnement vivable et supportable pour l'humain. Outre les problèmes techniques, il faudra également tenir compte des aspects psychologiques. La réalité virtuelle devrait pouvoir aider grandement. »*

- 17) Quelles sont les stratégies de gestion des déchets mises en place dans les missions spatiales à longue durée et en quoi sont-elles différentes des pratiques terrestres ?

*« On ne pourra pas avoir de matière première et il faudra faire avec ce qui a été emporté. Il faudra par exemple boire plusieurs fois la même eau, certes traitée entre deux. Il sera important de limiter drastiquement les déchets. L'abandon de déchets sur place pourraient également poser un problème en particulier s'il y a une forme de vie : quelles seraient les interactions entre ne serait-ce des formes de vie primitives sur Mars et nos déchets organiques ? »*

- 18) Pouvez-vous expliquer l'importance de la propulsion ionique et des autres méthodes de propulsion avancées dans le contexte des missions interplanétaires ?

*« La propulsion ionique est intéressante car il n'y a pas de combustion ; ainsi on ne doit embarquer que le combustible mais pas le comburant. En revanche il faut embarquer une source d'électricité permettant l'ionisation du gaz utilisé. La poussée fournie par un moteur ionique est très modeste en regard des équipements nécessaires à son fonctionnement, typiquement poussée des quelques dizaines de grammes pour des moteurs de quelques kilos. Ceci ne suffit clairement pas pour s'arracher de l'attraction terrestre. En revanche une fois dans le vide sidéral où il n'y a pas de résistance / de traînée, une poussée constante ne serait-ce de quelques kilos représente en fait une accélération appréciable si appliquée suffisamment longtemps. Donc pour sortir de l'atmosphère, les moteurs électriques ne sont pas appropriés, en revanche pour un voyage dans le vide de plusieurs centaines de jours, c'est très prometteur. »*

- 19) Est-ce que les avancées en robotique et en intelligence artificielle ont transformé la façon dont les missions spatiales sont menées ?

*« L'automatisme, la robotique et probablement IA ou au moins des systèmes partiellement autonomes joueront un rôle capital dans les missions spatiales. En effet, de nombreuses tâches soit dangereuses soit répétitives peuvent être déléguées à des*



*machines et des ordinateurs. On a vu cette évolution dans le domaine aéronautique et plus particulièrement pour les avions de transport pour lesquels en moins de 100 ans les pilotes ne touchent plus beaucoup aux commandes. Le problème principal sera que les humains embarqués devront comprendre comme cela marche et palier correctement aux différentes pannes et problèmes qui ne manqueront pas de se déclarer. »*

- 20) Quelles sont les implications de la faible pression atmosphérique de Mars dans la conception des équipements et les combinaisons spatiales ?

*« La faible pression atmosphérique de Mars est nettement plus élevée que celle de la Lune qui est quasiment nul (car quasi pas d'atmosphère). Dans ce domaine les missions lunaires ont donc accumulé assez d'expérience pour ne pas avoir de grosses surprises sur Mars. Toutefois, sur Mars il faudra pressuriser les habitations ainsi que les scaphandres de sorties, ce qui compliquent les constructions et les interfaces entre l'intérieur et l'extérieur. »*

- 21) Comment la physique des matériaux est-elle mise à contribution pour développer des technologies capables de résister aux conditions martiennes extrêmes ?

*« Oui, les matériaux à utiliser seront à choisir soigneusement car tous devront être amenés depuis la terre. Ainsi la résistance mécanique devra être élevée en regard du poids. Dans un premier temps, je ne pense pas qu'il sera possible de fabriquer ou de transformer des matériaux sur place, car en principe il faut toujours passablement d'énergie et des infrastructures assez lourdes pour ce genre de transformations. »*

- 22) Quels matériaux innovants sont en cours de développement pour les missions lunaires et martiennes ? Quelles sont leurs propriétés (par exemple : la légèreté, la résistance et la capacité à être fabriqués sur place) ?

*« Bien entendu les matériaux devront être légers et avoir une grande résistance mécanique ; de plus ils devront être également résistants aux hautes et faibles températures ainsi qu'aux radiations rencontrées sur Mars. Je ne pense que les matériaux synthétiques comme les fibres de carbone associés à des designs étudiés tel que structure en nid d'abeille seront l'une des clefs d'une sédentarisation même temporaire sur Mars. Le problème fondamental est qu'on aura, au début au moins, pas d'expérience et de retour sur ce qui fonctionne (ou justement ne fonctionne pas ou moins bien) dans l'environnement martien. Il y aura donc des surprises ! »*

Merci d'avoir répondu à mes questions et d'avoir accepté de m'accorder cette interview.

*« Avec plaisir, bon succès dans tes études et dans ta vie en général. »*

## A-2 : Interview de Claude Nicollier – Ancien astronaute

Vidéo de l'interview : 43min 45s



## A-3 : Interview d'Alexandre Looten – Doctorant à l'EPFL en Science et génie des matériaux

Enregistrement audio : 1h 5min 5s



## A-4 : Accords Artemis

**LES ACCORDS ARTEMIS**

**PRINCIPES DE COOPÉRATION POUR L'EXPLORATION ET**

**L'UTILISATION CIVILES À DES FINS PACIFIQUES DE LA LUNE, DE**

**MARS, DES COMÈTES ET DES ASTÉROÏDES**

## TABLE DES MATIÈRES

## Numéro de page

PARAGRAPHE 1 – OBJET ET PORTÉE.....	3
PARAGRAPHE 2 – MISE EN ŒUVRE .....	3
PARAGRAPHE 3 – FINS PACIFIQUES .....	4
PARAGRAPHE 4 – TRANSPARENCE .....	4
PARAGRAPHE 5 – INTEROPÉRABILITÉ .....	4
PARAGRAPHE 6 – AIDE D'URGENCE .....	4
PARAGRAPHE 7 – IMMATRICULATION DES OBJETS SPATIAUX .....	4
PARAGRAPHE 8 – PUBLICATION DE DONNÉES SCIENTIFIQUES .....	5
PARAGRAPHE 9 – PRÉSERVATION DU PATRIMOINE DE L'ESPACE EXTRA- ATMOSPHERIQUE.....	5
PARAGRAPHE 10 – RESSOURCES SPATIALES .....	5
PARAGRAPHE 11 – PRÉVENTION DES INTERFÉRENCES .....	6
PARAGRAPHE 12 – DÉBRIS ORBITAUX.....	8
PARAGRAPHE 13 – DISPOSITIONS FINALES.....	8

Les signataires des présents accords ;

**RECONNAISSANT** leur intérêt mutuel pour l'exploration et l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique à des fins pacifiques et **SOULIGNANT** l'importance continue des ententes bilatérales de coopération spatiale existantes ;

**RELEVANT** les avantages pour l'humanité pouvant être obtenus par la coopération dans l'utilisation pacifique de l'espace extra-atmosphérique ;

**ENTRANT** dans une nouvelle ère d'exploration, plus de 50 ans après l'alunissage historique de la mission Apollo 11 et plus de 20 ans après l'établissement d'une présence humaine continue à bord de la Station spatiale internationale ;

**PARTAGEANT** un esprit commun et l'ambition que les prochaines étapes du voyage de l'humanité dans l'espace inspirent les générations actuelles et futures à explorer la Lune, Mars et plus loin encore ;

**S'APPUYANT** sur le legs du programme Apollo, qui a profité à l'humanité tout entière, le programme Artémis permettra d'envoyer la première femme et le prochain homme sur la Lune et de définir, en collaboration avec des partenaires internationaux et commerciaux, l'exploration humaine durable du Système solaire ;

**TENANT COMPTE** de la nécessité d'une coordination et d'une coopération accrues entre les acteurs anciens et nouveaux du secteur spatial ;

**RECONNAISSANT** les avantages mondiaux de l'exploration et du commerce spatiaux ;

**RECONNAISSANT** un intérêt collectif pour la préservation du patrimoine de l'espace extra-atmosphérique ;

**AFFIRMANT** l'importance de respecter le *Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes* (« Traité sur l'espace extra-atmosphérique »), ouvert à la signature le 27 janvier 1967, l'*Accord sur le sauvetage des astronautes, le retour des astronautes et la restitution des objets lancés dans l'espace extra-atmosphérique* (« Accord sur le sauvetage »), ouvert à la signature le 22 avril 1968, la *Convention sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux* (« Convention sur la responsabilité »), ouverte à la signature le 29 mars 1972, et la *Convention sur l'immatriculation des objets lancés dans l'espace extra-atmosphérique* (« Convention sur l'immatriculation »), ouverte à la signature le 14 janvier 1975, ainsi que les avantages d'une coordination par l'entremise de forums multilatéraux comme le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique de l'Organisation des Nations Unies (COPUOS) pour renforcer les efforts visant l'atteinte d'un consensus mondial sur des questions critiques liées à l'exploration et à l'utilisation de l'espace ;

**SOUHAITANT** mettre en œuvre les dispositions du Traité sur l'espace extra-atmosphérique et d'autres instruments internationaux pertinents pour ainsi établir une entente politique au sujet des pratiques mutuellement avantageuses pour l'exploration et l'utilisation futures de l'espace extra-atmosphérique, en se concentrant sur les activités menées en appui au programme Artémis ;

**S'ENGAGENT** à respecter les principes suivants :



## PARAGRAPHE 1 – OBJET ET PORTÉE

L'objet des présents accords est de définir une vision commune au moyen d'un ensemble concret de principes, de lignes directrices et de pratiques exemplaires pour améliorer la gouvernance de l'exploration et de l'utilisation civiles de l'espace extra-atmosphérique en vue de faire progresser le programme Artémis. Le respect d'un ensemble concret de principes, de lignes directrices et de pratiques exemplaires est censé accroître la sécurité des opérations, réduire l'incertitude et promouvoir l'utilisation durable et avantageuse de l'espace pour l'humanité tout entière. Les accords Artémis représentent un engagement politique envers les principes décrits ci-après, dont plusieurs permettent la mise en œuvre opérationnelle d'obligations importantes contenues dans le Traité sur l'espace extra-atmosphérique et d'autres instruments.

Les principes énoncés dans les présents accords visent à s'appliquer aux activités spatiales civiles menées par les agences spatiales civiles de chaque signataire. Ces activités peuvent avoir lieu sur la Lune, Mars, des comètes et des astéroïdes, y compris sur et sous leurs surfaces, ainsi qu'en orbite autour de la Lune ou de Mars, aux points de Lagrange du système Terre-Lune et en transit entre ces corps célestes et emplacements. Les signataires entendent mettre en œuvre les principes énoncés dans les présents accords dans le cadre de leurs propres activités en prenant, le cas échéant, des mesures comme la planification de mission et l'adoption de mécanismes contractuels avec des entités agissant en leur nom.

## PARAGRAPHE 2 – MISE EN ŒUVRE

1. Les activités de coopération liées à l'exploration et à l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique peuvent être menées au moyen d'instruments appropriés, comme des protocoles d'entente, des accords de mise en œuvre conclus dans le cadre d'ententes intergouvernementales existantes, des ententes inter-agences ou d'autres instruments. Ces instruments sont censés renvoyer aux présents accords et contenir des dispositions appropriées pour mettre en œuvre les principes qui y sont énoncés.
  - (a) Dans les instruments énoncés dans le présent paragraphe, les signataires ou leurs agences subordonnées devraient décrire la nature, la portée et les objectifs de l'activité civile de coopération.
  - (b) Les instruments bilatéraux des signataires susmentionnés sont censés contenir les autres dispositions nécessaires à la réalisation des activités de coopération, notamment celles liées à la responsabilité, à la propriété intellectuelle et au transfert de biens et de données techniques.
  - (c) Toutes les activités de coopération devraient être menées conformément aux obligations juridiques de chaque signataire.
  - (d) Chaque signataire s'engage à prendre les mesures appropriées pour s'assurer que les entités agissant en son nom respectent les principes énoncés dans les présents accords.

### PARAGRAPHE 3 – FINS PACIFIQUES

Les signataires affirment que les activités de coopération menées dans le cadre des présents accords sont censées être réalisées exclusivement à des fins pacifiques et conformément au droit international en la matière.

### PARAGRAPHE 4 – TRANSPARENCE

Les signataires sont déterminés à être transparents dans la large diffusion d'informations liées à leurs politiques spatiales nationales et à leurs plans d'exploration spatiale conformément à leurs règles et règlements nationaux.

En toute bonne foi et conformément à l'article XI du Traité sur l'espace extra-atmosphérique, les signataires prévoient de communiquer au public et à la communauté scientifique internationale les données scientifiques découlant de leurs activités menées dans le cadre des présents accords.

### PARAGRAPHE 5 – INTEROPÉRABILITÉ

Les signataires reconnaissent que l'établissement d'une infrastructure et de normes communes et interopérables en matière d'exploration, notamment en ce qui a trait aux systèmes de stockage et de livraison de carburant, aux structures d'atterrissage, aux systèmes de communication et aux systèmes d'alimentation, améliorera l'exploration spatiale, la recherche scientifique dans l'espace et l'utilisation commerciale de l'espace. Les signataires s'engagent à déployer les efforts raisonnables pour utiliser les normes actuelles d'interopérabilité pour les infrastructures spatiales, établir des normes lorsqu'elles sont inexistantes ou inadéquates et respecter ces normes.

### PARAGRAPHE 6 – AIDE D'URGENCE

Les signataires s'engagent à déployer tout effort raisonnable pour apporter l'aide nécessaire au personnel en détresse dans l'espace extra-atmosphérique et reconnaissent leurs obligations en vertu de l'Accord sur le sauvetage.

### PARAGRAPHE 7 – IMMATRICULATION DES OBJETS SPATIAUX

Pour les activités de coopération menées dans le cadre des présents accords, les signataires s'engagent à déterminer lesquels d'entre eux sont censés immatriculer les objets spatiaux pertinents conformément à la Convention sur l'immatriculation. En ce qui concerne les activités auxquelles participe une non-Partie à la Convention sur l'immatriculation, les signataires entendent se concerter avec ladite non-Partie afin de déterminer la méthode d'immatriculation appropriée.

**PARAGRAPHE 8 – PUBLICATION DE DONNÉES SCIENTIFIQUES**

1. Les signataires conservent le droit de communiquer au public des informations sur leurs propres activités. Les signataires entendent se coordonner avant la diffusion publique de renseignements liés aux activités menées par les autres signataires dans le cadre des présents accords afin de protéger adéquatement les renseignements confidentiels ou d'exportation contrôlée.
2. Les signataires s'engagent à communiquer ouvertement les données scientifiques. Les signataires prévoient de rendre rapidement accessibles au public et à la communauté scientifique internationale les résultats scientifiques découlant des activités de coopération menées dans le cadre des présents accords, le cas échéant.
3. L'engagement visant à communiquer ouvertement les données scientifiques n'est pas censé s'appliquer aux activités du secteur privé, sauf quand ces activités sont menées au nom d'un signataire des accords Artémis.

**PARAGRAPHE 9 – PRÉSERVATION DU PATRIMOINE DE L'ESPACE EXTRA-ATMOSPHERIQUE**

1. Les signataires entendent préserver le patrimoine de l'espace extra-atmosphérique, qui comprend selon eux les sites d'atterrissage historiquement importants de missions habitées ou robotiques, les artefacts, les véhicules spatiaux et d'autres preuves d'activité sur les corps célestes conformément aux normes et pratiques élaborées conjointement.
2. Les signataires entendent utiliser l'expérience acquise dans le cadre des accords Artémis pour contribuer aux efforts multilatéraux visant à développer davantage les pratiques et règles internationales applicables à la préservation du patrimoine de l'espace extra-atmosphérique.

**PARAGRAPHE 10 – RESSOURCES SPATIALES**

1. Les signataires notent que l'utilisation de ressources spatiales peut profiter à l'humanité en offrant un soutien essentiel pour la réalisation d'activités sûres et durables.
2. Les signataires rappellent que l'extraction et l'utilisation de ressources spatiales, y compris tout prélèvement sur ou sous la surface de la Lune, de Mars, de comètes ou d'astéroïdes, sont censés être effectuées conformément au Traité sur l'espace extra-atmosphérique et en vue d'appuyer des activités spatiales sûres et durables. Les signataires affirment que l'extraction de ressources spatiales ne constitue pas en soi une appropriation nationale aux termes de l'article II du Traité sur l'espace extra-atmosphérique et que les contrats et les autres instruments juridiques liés aux ressources spatiales sont censés concorder avec ce traité.

3. Les signataires s'engagent à informer le Secrétaire général des Nations Unies, le public et la communauté scientifique internationale de leurs activités d'extraction de ressources spatiales, conformément au Traité sur l'espace extra-atmosphérique.
4. Les signataires entendent utiliser l'expérience acquise dans le cadre des accords Artémis pour contribuer aux efforts multilatéraux visant à développer davantage les pratiques et les règles internationales applicables à l'extraction et à l'utilisation des ressources spatiales, notamment au moyen d'efforts soutenus au COPUOS.

#### PARAGRAPHE 11 – PRÉVENTION DES INTERFÉRENCES

1. Les signataires reconnaissent et réaffirment leur engagement envers le Traité sur l'espace extra-atmosphérique, y compris les dispositions relatives à la prise en compte des intérêts des autres Parties et aux interférences nuisibles.
2. Les signataires affirment que l'exploration et l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique sont censés être réalisées en tenant compte des Lignes directrices aux fins de la viabilité à long terme des activités spatiales préparées par les Nations Unies et adoptées par le COPUOS en 2019, avec les changements appropriés pour traduire la nature des activités menées au-delà de l'orbite basse terrestre.
3. Conformément à l'article IX du Traité sur l'espace extra-atmosphérique, un signataire autorisant une activité dans le cadre des présents accords s'engage à respecter le principe de la prise en compte des intérêts des autres Parties. Un signataire des présents accords ayant des raisons de penser qu'il pourrait souffrir ou a souffert d'interférences nuisibles peut demander une consultation avec un autre signataire ou toute autre Partie au Traité sur l'espace extra-atmosphérique autorisant l'activité.
4. Les signataires s'engagent à s'efforcer d'éviter toute action intentionnelle qui pourrait causer des interférences et nuire aux autres signataires dans leur utilisation de l'espace extra-atmosphérique aux fins d'activités menées dans le cadre des présents accords.
5. Les signataires s'engagent à s'échanger les renseignements nécessaires au sujet de l'emplacement et de la nature des activités spatiales menées dans le cadre des présents accords si un signataire a des raisons de penser que les activités des autres signataires peuvent causer des interférences nuisant à ses activités spatiales ou présenter un danger pour la sécurité.
6. Les signataires entendent utiliser l'expérience acquise dans le cadre des accords Artémis pour contribuer aux efforts multilatéraux visant à développer davantage les pratiques, les règles et les critères internationaux applicables à la définition et à la détermination des zones de sécurité et des interférences nuisibles.



7. Afin de mettre en œuvre leurs obligations en vertu du Traité sur l'espace extra-atmosphérique, les signataires entendent aviser tout acteur concerné de leurs activités et s'engagent à se coordonner avec lui pour éviter les interférences nuisibles. La « zone de sécurité » est la zone dans laquelle ces mesures d'avis et de coordination seront mises en œuvre pour éviter les interférences nuisibles. Une zone de sécurité devrait représenter une zone dans laquelle les opérations normales d'une activité pertinente ou un événement anormal pourraient raisonnablement causer des interférences nuisibles. Les signataires entendent respecter les principes ci-après liés aux zones de sécurité :
  - (a) La taille et la portée de la zone de sécurité ainsi que la notification et la coordination devraient refléter la nature des opérations exécutées ainsi que l'environnement dans lequel lesdites opérations sont menées ;
  - (b) La taille et la portée de la zone de sécurité devrait être déterminées de façon raisonnable en mobilisant les principes scientifiques et techniques généralement acceptés.
  - (c) La nature et l'existence de zones de sécurité sont censées changer au fil du temps pour tenir compte du statut de l'opération visée. Si la nature d'une opération change, le signataire concerné devrait modifier la taille et la portée de la zone de sécurité correspondante. Les zones de sécurité seront temporaires à terme, et abolies à la fin de l'opération visée.
  - (d) Les signataires sont censés rapidement s'aviser mutuellement et aviser le Secrétaire général des Nations Unies de l'établissement, de la modification ou de l'abolition d'une zone de sécurité, conformément à l'article XI du Traité sur l'espace extra-atmosphérique.
8. Le signataire qui maintient une zone de sécurité s'engage à fournir sur demande à tout signataire le fondement de ce maintien, conformément aux règles et aux règlements nationaux s'appliquant à chaque signataire.
9. Le signataire qui établit, maintient ou abolit une zone de sécurité devrait le faire de façon à protéger son personnel et celui d'entités privées, le matériel et les activités des interférences nuisibles. Les signataires devraient, le cas échéant, rendre publics dès que possible les renseignements relatifs aux zones de sécurité, dont l'ampleur et la nature générale des activités qui y sont menées, tout en protégeant adéquatement les renseignements confidentiels et d'exportation contrôlée.
10. Les signataires s'engagent à respecter les zones de sécurité raisonnables pour éviter de causer des interférences nuisant aux activités menées dans le cadre des présents accords, notamment en avisant au préalable les autres signataires et en se coordonnant avant la réalisation d'activités dans une zone de sécurité établie conformément aux accords.

11. Les signataires s'engagent à utiliser des zones de sécurité, qui sont censées changer, évoluer ou être abolies en fonction du statut de l'activité visée, de façon à encourager la recherche scientifique et la démonstration de technologies ainsi que l'extraction et l'utilisation sûres et efficaces des ressources spatiales en vue d'appuyer l'exploration spatiale durable et d'autres activités. Dans leur utilisation des zones de sécurité, les signataires s'engagent à respecter le principe du libre accès à toutes les régions des corps célestes ainsi que l'ensemble des autres dispositions du Traité sur l'espace extra-atmosphérique. Les signataires s'engagent en outre à modifier leur utilisation des zones de sécurité au fil du temps en fonction de leurs expériences et des consultations menées entre eux et auprès de la communauté internationale.

#### PARAGRAPHE 12 – DÉBRIS ORBITAUX

1. Les signataires s'engagent à planifier l'atténuation des débris orbitaux, notamment la passivation et l'élimination sûres, rapides et efficaces des véhicules spatiaux après les missions, le cas échéant, dans leur cadre de leur processus de planification de mission. En cas de missions de coopération, de tels plans sont censés désigner clairement le signataire ayant la responsabilité principale du plan de fin de mission et de sa mise en œuvre.
2. Les signataires s'engagent à limiter, dans la mesure du possible, la génération de nouveaux débris nuisibles à longue durée de vie, rejetés lors des activités normales, de la fragmentation pendant les phases opérationnelles ou après la mission, d'accidents et de conjonctions, en prenant des mesures appropriées comme la sélection de profils de vol et de configurations opérationnelles sûres ainsi que l'élimination de structures spatiales après les missions.

#### PARAGRAPHE 13 – DISPOSITIONS FINALES

1. S'appuyant sur les mécanismes de consultation figurant dans des ententes préexistantes au besoin, les signataires s'engagent à se concerter régulièrement pour examiner la mise en œuvre des principes énoncés dans les présents accords et pour échanger leurs points de vue sur d'éventuels domaines de collaboration future.
2. Le gouvernement des États-Unis d'Amérique conservera le texte original des accords Artémis et transmettra au Secrétaire général des Nations Unies une copie des accords, qui n'est pas admissible à l'enregistrement en vertu de l'article 102 de la Charte des Nations Unies, dans le but de la diffuser à tous les membres de l'Organisation en tant que document officiel des Nations Unies.
3. Après le 13 octobre 2020, tout État souhaitant devenir signataire des accords Artémis peut présenter sa signature au gouvernement des États-Unis aux fins d'ajout au présent texte.

Adopté le 13 octobre 2020, en langue anglaise.