

Observatoire de Paris

Diplôme d'Université
« Structuration de l'Univers »
Année 2023-2024

présenté par
Daniel ROGER

Exploration spatiale
La mission MMX de la JAXA

sous la direction de
Jean-Michel Reess

Ce document a pour but de décrire le déroulement de la mission MMX dont le lancement vers les satellites de Mars est prévu en 2026, et qui prévoit la relève d'échantillons sur Phobos

- *Objectifs*
- *Organisation*
- *Instruments*
- *Éléments caractéristiques*

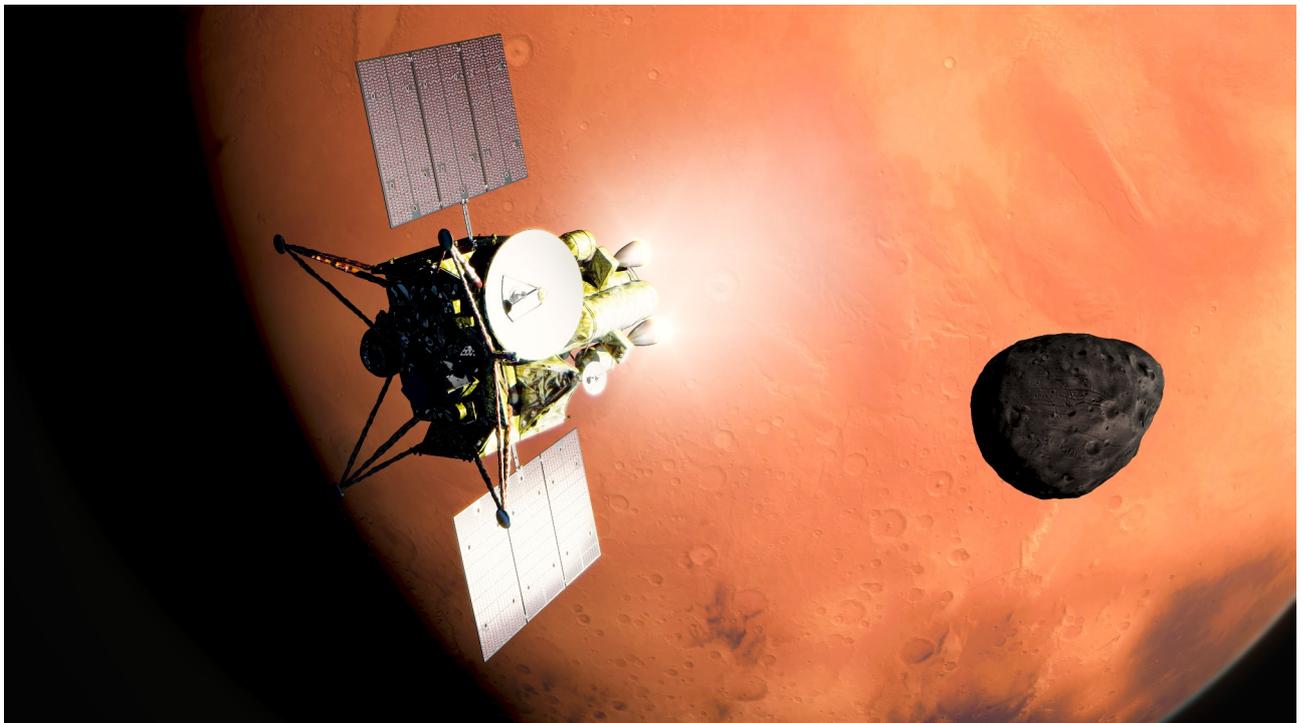


Figure 1: Vue d'artiste "The MMX spacecraft just before landing on Phobos"
<https://www.mmx.jaxa.jp/en/gallery/>

Table des matières

1	Présentation de la mission MMX « Martian Moon eXploration ».....	5
1.1	Une nouvelle étape après les missions Hayabusa.....	5
1.1.1	Enjeu technique.....	5
1.1.2	Le savoir-faire de la JAXA.....	5
1.1.3	Enjeu scientifique.....	6
2	Organisation.....	7
2.1	Un projet de la JAXA, l'agence d'exploration aérospatiale japonaise.....	7
2.2	Les partenaires internationaux de la JAXA.....	7
2.2.1	NASA (USA).....	7
2.2.2	ESA (Europe).....	7
2.2.3	CNES (France).....	7
2.2.4	DLR (Allemagne).....	7
2.2.5	Australie.....	7
3	Les objectifs scientifiques.....	8
3.1	Priorités.....	8
3.2	Les satellites Phobos et Deimos.....	8
3.3	Choix entre Phobos et Deimos.....	9
3.4	L'origine des Lunes de Mars.....	9
3.4.1	La capture d'astéroïdes.....	9
3.4.2	La création suite à un impact géant.....	9
3.4.3	L'évolution de la surface de Phobos.....	10
3.4.4	Le dernier scénario : la construction simultanée.....	12
3.5	Ce qui permettra de différencier les scénarios.....	12
3.6	Les autres objectifs scientifiques.....	13
3.6.1	Survol de Deimos.....	13
3.6.2	Analyse de la surface martienne.....	13
4	Calendrier de la mission.....	14
4.1	La volonté d'être les premiers à ramener des échantillons du système martien.....	14
4.2	Un retard lié à la mise à disposition du lanceur.....	14
4.3	Le nouveau calendrier.....	14
5	Le lancement.....	16
6	La Sonde.....	17
6.1	Caractéristiques générales.....	17
6.2	Des moteurs chimiques.....	17
6.3	Les trois modules.....	17
7	Les instruments.....	19
7.1	Localisation des instruments sur la sonde.....	19
7.2	TENGOO : TElescopic Nadir imager for GeOmOrphology (Japon, Université de Rikkyo).....	19
7.3	OROCHI : Optical RadiOmeter composed of CHromatic Imagers (Japon, Université de Rikkyo).....	20
7.4	LIDAR : LIght Detection And Ranging (Japon, Institut de Technologie Chiba).....	21

La mission MMX de la JAXA

7.5 CMDM : Circum-Martian Dust Monitor (Japon, Planetary Exploration Research Center, Institut de technologie Chiba).....	22
7.6 MSA : Mass Spectrum Analyser (Japon, Université d’Osaka).....	23
7.7 MEGANE : Mars-moon Exploration with Gamma rays and Neutrons (USA-NASA, JHUAPL).....	24
7.8 MIRS : MMX InfraRed Spectrometer (France – CNES/LESIA).....	24
7.9 P-SAMPLER : Pneumatic Sampler (USA-NASA, Honeybee Robotics).....	27
7.10 C-SMP : Coring Sampler (JAXA).....	28
7.11 SRC : Sample return Capsule (JAXA).....	29
7.12 IREM ; Interplanetary Radiation Environment Monitor (JAXA).....	30
7.13 SHV : Super Hi-Vision Camera (JAXA).....	30
7.14 Rover IDEFIX® 1.....	31
7.14.1 L’éclaireur.....	31
7.14.2 Le démonstrateur.....	31
7.14.3 L’explorateur.....	31
7.15 Caractéristiques techniques.....	32
7.15.1 La communication.....	32
7.15.2 Informatique.....	32
7.15.3 Sensibilité à l’environnement.....	32
7.15.4 Alimentation.....	32
7.16 Les instruments du Rover.....	32
7.17 La phase d’atterrissage.....	33
7.18 La question des tests.....	33
8 La gravité sur Phobos.....	34
8.1 La faiblesse de la gravité complique les manœuvres.....	34
8.2 La nécessité d’une orbite quasi stationnaire.....	35
9 La prise d’échantillons.....	36
10 Les cinq types d’usages prévus pour les instruments.....	38
10.1 Préparer la relève d’échantillons.....	38
10.2 Relève d’échantillon.....	39
10.3 Observation directe du sol.....	40
10.4 Études géographiques.....	41
10.5 Préparer le futur.....	42
11 Capitaliser sur la mission MMX.....	43
12 Figures et références.....	43

1 Présentation de la mission MMX « Martian Moon eXploration ».

1.1 Une nouvelle étape après les missions Hayabusa.

À la suite de ses deux missions d'observations d'astéroïdes et de retour d'échantillon Hayabusa¹ et Hayabusa 2², l'agence spatiale japonaise la JAXA a décidé de lancer une nouvelle mission du même type à destination du satellite de Mars : Phobos.

Cela rend possible des observations qui sont impossibles avec une telle précision et une telle gamme de moyens techniques à distance.

Cette mission spatiale scientifique est ambitieuse, tout en restant dans un cadre budgétaire limité. L'effort financier est important, mais il reste sous la barre des 400 millions d'Euros €³. Cela permet d'obtenir de solides résultats scientifiques pour un coût très inférieur aux missions de la NASA comme celle du Rover Perseverance⁴. On envisage des missions humaines vers Mars avec des enjeux humains et financiers beaucoup plus importants, et dans ce contexte les enseignements d'une mission martienne comme MMX peut aider à dépenser moins d'argent dans le futur, et à sauver des vies.

Le projet s'appuie sur les acquis techniques des expériences précédentes, et se déroule dans le cadre d'un partenariat international. En France cela concerne en particulier l'ESA, le CNES, et le LESIA.

Il y a un enjeu technique et l'occasion pour la JAXA d'afficher son savoir-faire, mais surtout un enjeu scientifique⁵.

1.1.1 Enjeu technique.

L'enjeu technique est pour la JAXA est de franchir une étape en s'éloignant un peu plus de la zone de l'orbite terrestre pour atteindre le système martien et en allant au contact d'un des trois satellites de planètes rocheuses du système solaire.

1.1.2 Le savoir-faire de la JAXA.

L'agence spatiale japonaise peut espérer mettre en valeur ses compétences en réalisant des premières.

- Le premier atterrissage sur Phobos.
- La première fois qu'une sonde réalise un aller-retour avec le système martien.
- Pour le système martien en général le premier prélèvement avec retour sur Terre des prélèvements.

La mission MMX de la JAXA

- Comme en plus il y a bonne espoir de récupérer des fragments de Mars venant d'éjection de matière de la planète et déposés à la surface de Phobos, ce serait aussi la première fois qu'on ramènerait des échantillons venant de la planète rouge.

1.1.3 Enjeu scientifique.

Sur le plan scientifique ces nouvelles observations dans le système martien permettront d'approfondir la connaissance du système martien, et d'essayer de résoudre le mystère de l'origine de ses satellites, et de construire des outils pour les futurs projets d'exploration spatiale.

2 Organisation

2.1 Un projet de la JAXA, l'agence d'exploration aérospatiale japonaise

La JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency,) est l'organisation chargée du développement programme spatial japonais. Son domaine d'intervention inclut le développement, le lancement et la mise en œuvre de lanceurs, des satellites d'application civils, des satellites scientifiques (télescopes spatiaux, sondes spatiales) et des satellites militaires⁶.

2.2 Les partenaires internationaux de la JAXA

2.2.1 NASA (USA)

- L'agence spatiales des États-Unis fournit l'instrument d'observation MEGANE, et le P-Sampler qui est un des outils de prélèvement d'échantillons.
- La NASA participe au système de contrôle et de réception des données sur le segment terrestre (Ground station support).

2.2.2 ESA (Europe)

- L'agence spatiale européenne met à disposition des moyens permettant de communiquer en bande Ka avec la sonde à grande distance (Deep space communication).

2.2.3 CNES (France)

- L'agence spatiales française fournit l'instrument d'observation MIRS, et le Rover (IDEFIX), en collaboration avec la DLR.
- Étude des trajectoires et de la dynamique de vol en amont.
- Support opérationnel de proximité pour les opérations

2.2.4 DLR (Allemagne).

- L'agence spatiales allemande fournit le Rover (IDEFIX), en collaboration avec le CNES.
- Mise à disposition d'outils de simulation en microgravité et de tests de choc (Drop Tower)⁷.

2.2.5 Australie.

- Un accord est passé entre les États Japonais et Australiens pour mettre en place le dispositif permettant de récupérer la capsule de retour qui atterrira en Australie⁸.

3 Les objectifs scientifiques.

La mission doit permettre de contribuer à la connaissance du système martien, et du système solaire en général, dont notre planète fait partie ⁹.

3.1 Priorités

La priorité la plus importante est de clarifier ce qui concerne l'évolution et l'origine de Phobos, les instruments d'observation doivent permettre de progresser sur le sujet de manière décisive. Ce point est détaillé dans ce chapitre.

Le second niveau de priorité est de tirer parti des échantillons pour une analyse détaillée du sol sous la surface, et étudier en particulier le scénario de l'impact géant ayant donné naissance à la planète

Le troisième niveau concerne l'évolution de la surface de Mars. Les observations, et éventuellement l'analyse des échantillons s'il y a de la matière d'origine martienne peuvent y contribuer.

3.2 Les satellites Phobos et Deimos.

Phobos fait un peu plus de 20 km de large ($26,8 \times 22,4 \times 18,4$ km), et est à 9600 km du sol de Mars. Sa période orbitale n'est que de 7 h 39 min, tandis que le jour martien est de l'ordre de 24 h 36 min. Sa rotation est synchrone.

Deimos fait un peu plus de 10 km de large ($15,0 \times 12 \times 10,4$ km), mais est à 18 000 km du sol de Mars. Sa rotation est synchrone, et sa période orbitale de 30 h 18 min.



Comparaison de la taille visible des satellites martiens depuis Mars, avec celle de la Lune depuis la Terre : ils sont beaucoup plus petits, mais beaucoup plus proches.

Figure 2: comparaison des tailles apparentes des satellites de la Terre et de Mars depuis le sol des planètes <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-Rover-gets-movie-as-a-mars-moon-passes-another>

3.3 Choix entre Phobos et Deimos

Phobos a été choisi comme cible principale pour les raisons suivantes.

- Le satellite a une plus grande variété dans la composition de sa surface telle que révélée par l'analyse spectrale
- Le satellite étant plus proche de Mars, il y a sans doute une partie du sol qui vient de l'éjection de matière depuis Mars sous l'effet d'impact d'astéroïdes et pendant la jeunesse de la planète, ce qui donnerait des informations sur la surface de Mars à ses débuts.
- Il y a déjà plus d'informations sur Phobos, ce qui permet de s'appuyer sur plus de données pour la réussite de la mission

3.4 L'origine des Lunes de Mars

Il y a trois scénarios, dont deux principaux et un favori.

3.4.1 La capture d'astéroïdes.

De petites tailles, Phobos (le plus proche) et Deimos pourraient être des astéroïdes capturés par le champ gravitationnel de Mars après une lente dérive hors de la ceinture principale d'astéroïdes. Que ce soit au point de vue, forme, taille ou apparence visuelles, Phobos et Deimos ressemblent à des astéroïdes.

Si c'est le cas, elles seraient de véritables capsules temporelles pouvant expliquer l'apparition de l'eau sur les planètes telluriques du Système solaire. Il faisait trop chaud dans la zone où se sont agrégées Mercure, Vénus, la Terre et Mars pour que ces planètes préservent la présence d'eau lors de leur formation initiale. Cet élément n'est venu qu'après, et a dû être apporté par des corps créés dans une zone au-delà de la ligne des glaces¹⁰. Les deux candidats pour que l'opération soit possible sont les astéroïdes et les comètes. Si les satellites de Mars sont d'anciens astéroïdes venant d'au-delà de la ligne des glaces, ils contiennent peut-être beaucoup d'eau ?

Le point qui étonne en ce qui concerne ce scénario est la grande régularité des orbites des satellites qui ont une très faible inclinaison, ils orbitent au dessus de l'équateur de Mars et une très faible excentricité, l'ellipse de leurs orbites est très proche du cercle¹¹. Cela ne devrait pas être possible en cas de capture d'astéroïdes. Leurs paramètres orbitaux sont plus caractéristiques d'un objet qui serait issu d'un impact géant, comme notre Lune¹².

3.4.2 La création suite à un impact géant.

Ces lunes pourraient être issues d'un impact géant avec la jeune planète Mars. Ils seraient constitués de fragments de l'objet impactant et de Mars. C'est le scénario qui semble le plus probable¹³.

La ressemblance extérieure avec les astéroïdes pourrait avoir pour origine l'évolution de la surface des satellites plutôt que leur composition intérieure.

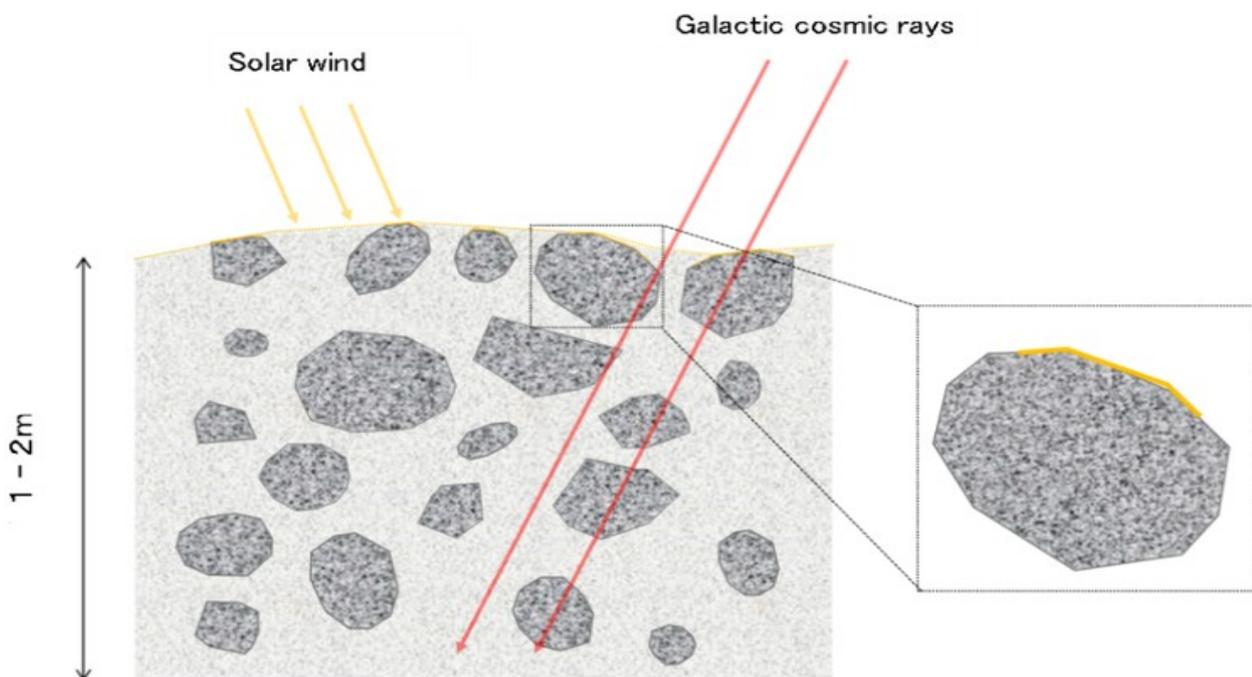
3.4.3 L'évolution de la surface de Phobos

La surface n'est pas représentative uniquement de la composition interne de l'astre. On a vu qu'on espère y retrouver des éjections venant de la planète Mars, et on envisage qu'il y en ait venant de Deimos, mais ce n'est pas tout.

Voici la manière dont on a pu analyser l'évolution de la surface de l'astéroïde Ryugu au fil du temps suite à la mission Hayabusa 2.

Influence des rayonnements¹⁴.

Le vent solaire a une action superficielle mais les rayons cosmiques peuvent avoir un effet à plus d'un mètre de profondeur.



©Kyushu University

Figure 4: Solar wind (orange arrows) and the galactic cosmic ray irradiation (red arrows) on the asteroid surface. The solar wind reaches only 100 nm into the surface material, while galactic cosmic rays can affect depths down to 1-2 m.

Figure 3: influence du vent solaire et des rayons cosmiques
https://global.jaxa.jp/press/2022/10/20221021-1_e.html

Influence de la température¹⁵.

Les différences de température telles que celles entre le jour et la nuit peuvent avoir une influence sur les éléments de surface et entraîner des mélanges de matière sur plusieurs mètres.

La mission MMX de la JAXA

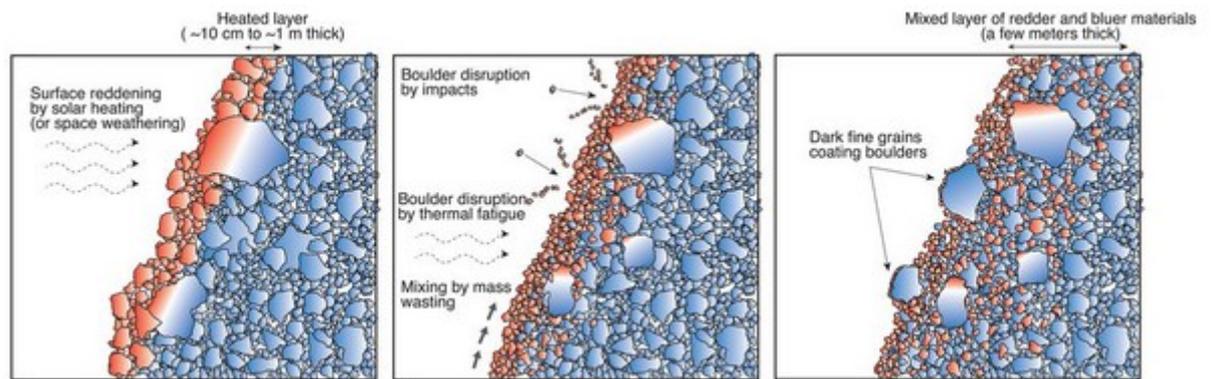


Figure 4: influence des écarts thermiques

<https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aaz6306>

Les phénomènes actifs sur Rygu devraient l'être également sur Phobos.

Cela s'ajoute aux effets de marée causés par Mars. Dans seulement 20 à 40 millions d'années ils devraient d'aboutir à disloquer le satellite¹⁶.

Enfin on voit des traces d'impact d'astéroïdes qui ont naturellement laissé de la matière sur place. Voici une photo de la Nasa en fausses couleurs du cratère Stickney. C'est le plus grand cratère à la surface de Phobos et il fait 9,5km de large. On constate que c'est loin d'être le seul.

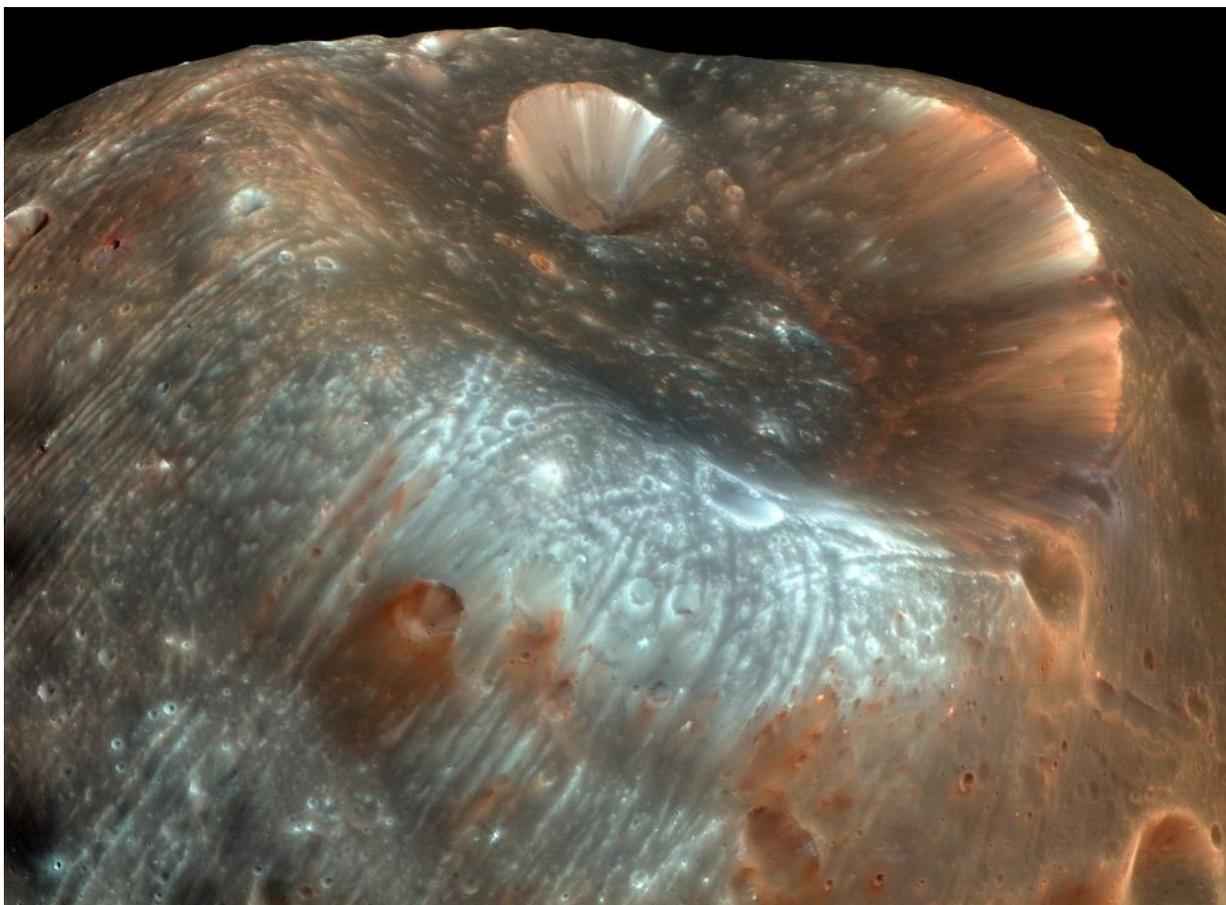


Figure 5: cratère Stickney <https://science.nasa.gov/resource/stickney-crater-phobos>

3.4.4 Le dernier scénario : la construction simultanée.

Il existe un troisième scénario de construction simultanée avec Mars, il n'est pas ignoré mais semble difficile à envisager.

En étudiant de près ces petits corps, et en ramenant des échantillons, la mission tentera d'apporter des éléments de réponse définitifs pour l'une ou l'autre hypothèse.

3.5 Ce qui permettra de différencier les scénarios.

- La présence d'eau ou d'éléments volatiles éliminerait le scénario de création similaire à celui de la Lune. Ces éléments auraient disparu lors de la phase d'éjection de matière en fusion ayant donné naissance aux satellites.
- La présence de glace souterraine indiquerait une origine de l'astéroïde au-delà de la limite des glaces et des planètes telluriques. Le détecteur d'ion décrit plus loin doit permettre de détecter des émanations d'eau.
- Suite à l'impact géant il doit y avoir moins d'éléments volatiles comme H (hydrogène), Pb (Plomb), C (Carbone), Na (Sodium) K (Potassium), et Rb (Rubidium). Les spectromètres Gamma (MEGANE)¹⁷ et Infrarouge (MIRS)¹⁸ donneront des éléments, sur ces points, ainsi que les images lumineuses en bande étroite avec ORCHI. L'analyse spectroscopique permettra aussi de faire la différence entre des familles d'astéroïdes
- Le calcul des rapports Fe/Si et Fe/O permet de faire la différence entre le scénario d'impact géant (Moins de Fer car le fer de Mars est concentré dans le noyau de la planète). Cela permet également de différencier les astéroïdes venant à l'origine du système Solaire Interne, ils ont moins d'oxygène.
- Examens complexe des grains rapportés sur Terre (exemple : rapport isotopique $^{53}\text{Cr}/^{54}\text{Cr}$ avec une précision de 10^{-6} pour différencier des types d'astéroïdes).
- L'ensemble des données recueillies permettront de bâtir un scénario plausible. Pour l'examen des grains il faudra tenir compte de la taille et de la forme des poussières. On espère qu'en majorité la matière vient de Phobos mais il faudra tenir compte de tout ce qui a été décrit plus haut § 3.4.3.
- Le résultat ne sera pas immédiat car il faudra attendre le retour de la capsule contenant les échantillons et les données qui n'avaient pu être transmises, et prendre le temps de les analyser.

3.6 Les autres objectifs scientifiques.

3.6.1 Survol de Deimos

La mission prévoit des observations de Deimos pour être en mesure d'analyser sa surface également, et compléter les analyses concernant les satellites.

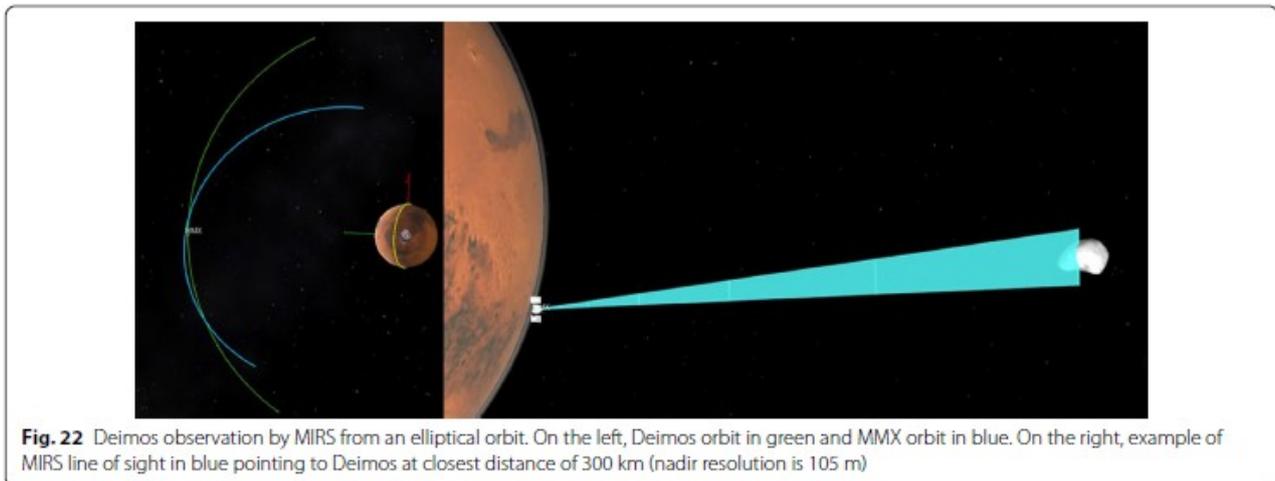


Figure 6: approche de Deimos pour les observations <https://insu.hal.science/insu-03474821>

3.6.2 Analyse de la surface martienne.

Les instruments permettent d'avoir une vue globale de la surface de Mars permettant d'aider à la compréhension de la circulation des fluides à sa surface. Les observations en infrarouge peuvent donner une carte des températures, et le détecteur d'ion mesurer les éjections de gaz dans l'atmosphère. Cela peut permettre une meilleure connaissance de la météo martienne.

4 Calendrier de la mission.

4.1 La volonté d'être les premiers à ramener des échantillons du système martien.

Jusqu'en 2023 il était prévu que la mission soit lancée en 2024. Cela lui aurait permis de ramener les échantillons dans la décennie 2020 en 2029, et de précéder la Nasa qui avait prévu de récupérer sur Terre les échantillons prélevés par le Rover Perseverance dans la première partie de la décennie suivante avec la mission Mars Sample Return (NASA/ESA)¹⁹.

4.2 Un retard lié à la mise à disposition du lanceur.

Le lanceur prévu, le H3 de la Jaxa, n'est pas prêt à temps, et le début est repoussé de deux ans. Cela ne permet plus d'avoir les échantillons avant 2030, mais cela ne remet pas en question le fait d'être les premiers à le faire. La mission Mars Sample Return avait un objectif initial de voir les échantillons revenir en 2033. Une date nettement postérieure est maintenant prévue.

La NASA avait affiché 2040²⁰ comme cible pour Mars Sample Return, mais a subi des critiques en raison des coûts et du délai. La mission est maintenant en zone d'incertitude quant à son financement, son calendrier et les techniques à mettre en œuvre. Il y aura peut-être une solution pour faire plus rapide et moins cher, mais il est difficile d'imaginer un cas où des échantillons reviendraient avant 2035.

4.3 Le nouveau calendrier.

Il y a une fenêtre de lancement tous les deux environ pour lancer une sonde vers Mars en utilisant une orbite de transfert d'Hohmann²¹. Le site du CNES, partenaire de la mission, affiche une prévision de lancement en octobre 2026²². La NASA précise sur son site que le lancement aurait lieu en novembre 2026²³. Ce sont des dates approximatives, comme pour toutes les autres étapes affichées pour la mission.

La mission effectuera un voyage aller-retour en cinq ans, avec retour sur Terre des échantillons de Phobos en août 2031.

- **Octobre 2026** Décollage
- **Septembre 2027** Orbite martienne. Début des observations scientifiques de Phobos. Des observations de Mars sont également prévues tout au long de la mission
- **Novembre 2027** Orbite Quasi Satellitaire (QSO) § 8.2 autour de Phobos, le module de propulsion a été abandonné en le mettant sur une trajectoire évitant les contacts avec la planète Mars et ses satellites pour éviter toute contamination.
- **Avril 2029** Rover franco-allemand sur la surface de Phobos.

La mission MMX de la JAXA

- **Avril & été 2029** Deux collectes successives d'échantillons de Phobos sur des sites différents.
- **Mai & août 2030** Fin des opérations d'observation rapprochée de Phobos, et survols multiples de Deimos.
- **Septembre 2030** Scission du véhicule et départ du module de retour vers la Terre, le module d'exploration est abandonné en le mettant sur une trajectoire évitant les contacts avec la planète Mars et ses satellites pour éviter toute contamination.
- **Octobre 2031** Retour des échantillons de Phobos sur Terre dans le désert australien.

Mission sequence

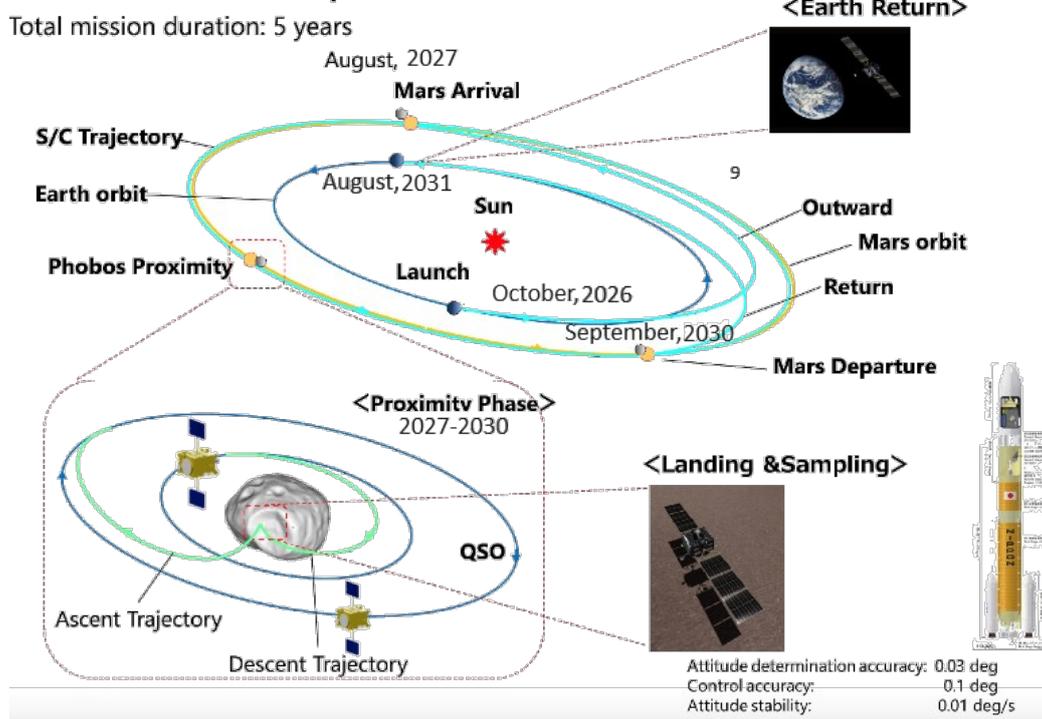


Figure 7: étapes de la mission, site <https://lesia.obspm.fr/Spectro-imageur-MIRS-pour-la.html> , avec mise à jour des dates

5 Le lancement.

C'est la dernière version des lanceurs Japonais, le H3 (maquette de la fusée de 67 m de haut ci-dessous)²⁴ qui lancera la sonde depuis la base de lancement de Tanegashima au sud du Japon²⁵.

Une fois que le lanceur est choisi la charge utile est conçue pour s'y adapter, et il n'est pas possible de changer. Il y a trop de dépendance entre le lanceur et la charge utile pour cette mission scientifique.

Le site de lancement de Tanegashima 30° 22' 40" N, par comparaison CAP Canaveral est à 28° 28' 32" N et Kourou à 5° 13' 51" N. Le lancement depuis Kourou nécessite un peu moins de carburant en raison de la position favorable plus près de l'équateur, mais la complexité et le coût supplémentaire pour transporter tous les éléments de la fusée à si grande distance annulent ces avantages.



Figure 8: Localisation de Tanegashima au Japon
https://fr.wikipedia.org/wiki/Base_de_lancement_de_Tanegashima



Figure 9: Maquette de la sonde H3, hauteur 67m, d'après
[https://fr.wikipedia.org/wiki/H3_\(lanceur\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/H3_(lanceur))

6 La Sonde.

6.1 Caractéristiques générales.

La sonde MMX sera après ExoMars TGO (une sonde interplanétaire développée par l'Agence spatiale européenne et lancée en 2016), la deuxième mission la plus massive jamais envoyée vers Mars. Elle atteint les 4 000 kg²⁶ contre 4332 pour ExoMars TGO).

C'est une sonde spatiale de quatre tonnes, dont la moitié du poids en carburant, stabilisée 3 axes, dont l'énergie est fournie par des panneaux solaires déployés dans l'espace.

Pour les communications, MMX dispose d'une antenne grand gain fixe, d'une antenne à moyen gain et d'antennes à faible gain. La bande passante des communications entre la sonde et la Terre est limitée (128 kbps depuis la sonde vers la Terre²⁷). Pour économiser cette bande passante une grande partie des données d'observation seront stockées dans le SRC et ne seront disponibles qu'au retour de ce module.

La propulsion principale et le contrôle d'attitude sont assurés par des moteurs-fusées à ergols liquides.

6.2 Des moteurs chimiques.

Les missions Hayabusa avaient des moteurs ioniques. L'avantage est qu'ils sont très économiques en carburant. Cela permet d'avoir une durée de fonctionnement longue avec une masse faible. La sonde Hayabusa 2 avait assez de carburant pour entreprendre une deuxième mission de plus de 10 ans vers un autre satellite. Il est prévu qu'elle arrive à destination en 2031.

Il y a deux défauts.

- Ils ne peuvent fournir la poussée nécessaire pour des manœuvres rapides, pour cette raison les sondes Hayabusa avaient aussi des moteurs chimiques.
- Ils ne peuvent atteindre rapidement une grande vitesse pour atteindre Mars en moins d'un an. Les sondes Hayabusa avaient mis toutes les deux plus de deux ans pour atteindre une cible plus proche, en ayant recours à l'accélération gravitationnelle de la Terre.

Pour diminuer le temps de trajet entre Mars et la Terre, le choix de moteurs chimiques a été fait, et pour limiter les besoins en carburant la sonde a été décomposée en trois modules dont un seul fera l'ensemble du trajet²⁸.

6.3 Les trois modules.

La sonde comprend trois modules.

- un module de propulsion chargé d'amener la sonde spatiale jusqu'à Mars et abandonné quand c'est fait ;

La mission MMX de la JAXA

- un module d'exploration comprenant le train d'atterrissage à quatre pieds et le système de prélèvement d'échantillon du sol lunaire, il ne fait pas le voyage de retour ;
- un module chargé de ramener la capsule contenant l'échantillon de sol sur Terre.

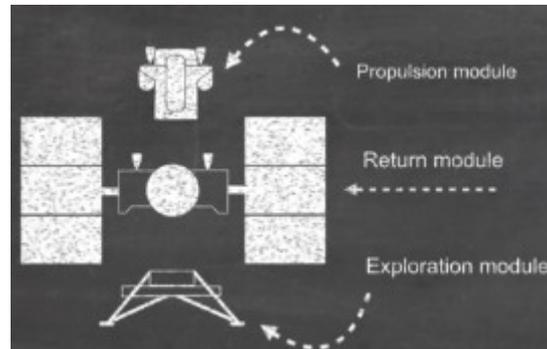
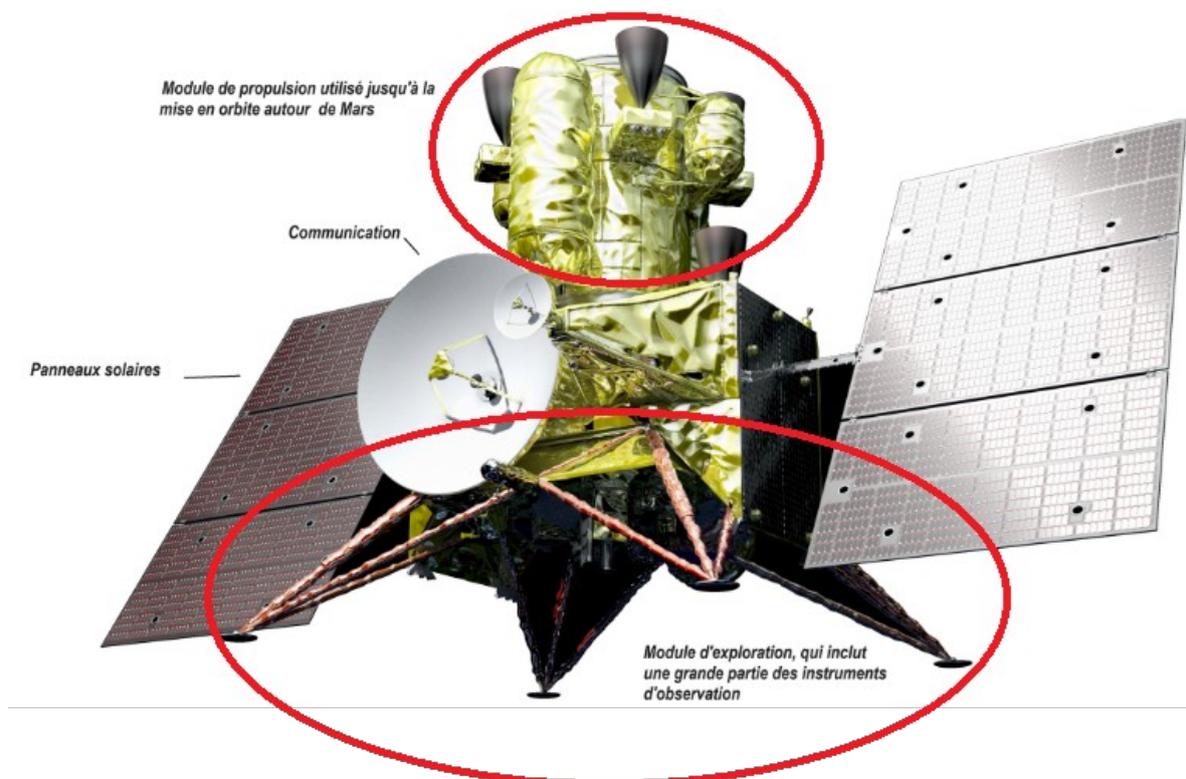


Figure 10: Schéma "à la craie" d'après la présentation de la mission sur le site de la Jaxa "Chalkboard: A sample from Mars" <https://www.mmx.jaxa.jp/en/gallery/>



Le module de propulsion est abandonné une fois la mise en orbite autour de Mars réussie, et le module d'exploration se sépare du module de retour quand la phase d'exploration est terminée

Figure 11: La sonde MMX, vue d'artiste venant du site de la Jaxa où sont ajoutées des légendes <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=8e3b804a5de9a72f71bf63970469cf26>

7 Les instruments.

Leur localisation sur la sonde est précisée dans un premier temps, ensuite ils sont décrits avec plus de précision.

7.1 Localisation des instruments sur la sonde.

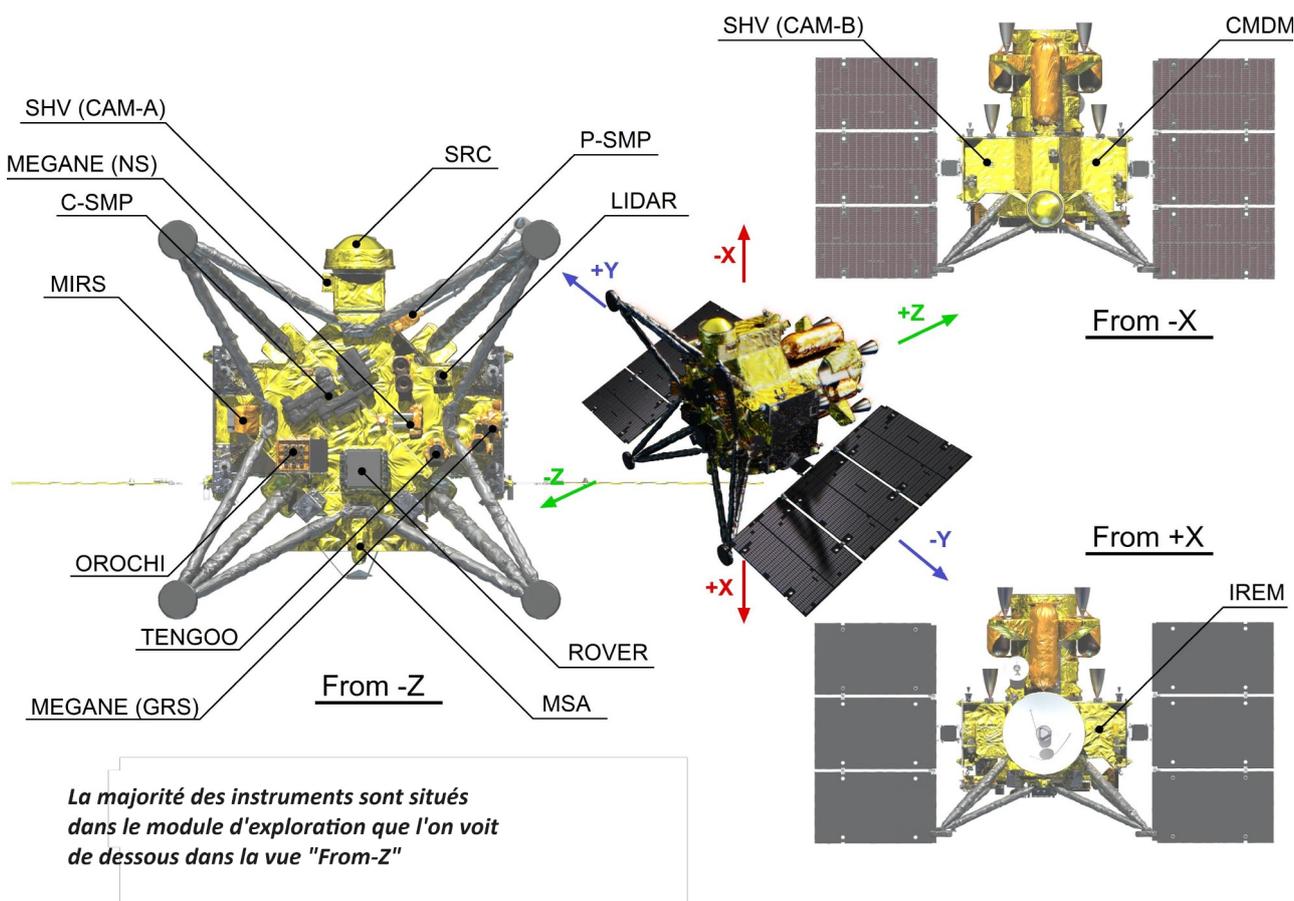


Figure 12: Localisation des instruments d'après une vue d'artiste venant du site de la Jaxa
<https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>

7.2 TENGOO : TElescopic Nadir imager for GeOmOrphology (Japon, Université de Rikkyo)

Cet instrument ²⁹est une caméra haute résolution destinée à observer les détails de la surface de Phobos depuis la phase de quasi-orbite de la sonde MMX, avec une résolution estimée à 40 cm/pixel à plus de 20 kilomètres de distance. Ses capacités seront utiles pour déterminer la topologie des différents sites candidats pour l'atterrissage, ainsi que la distribution des différents types de matériaux à la surface des lunes de Mars.

La mission MMX de la JAXA

- Longueur d'onde dans la lumière visible.
- Objectif d'identifier une zone de 5 m de diamètre qui soit plate à 30 cm près.
- TENGOO-S : télescope Cassegrain de 120 mm de diamètre avec capteur CCD.

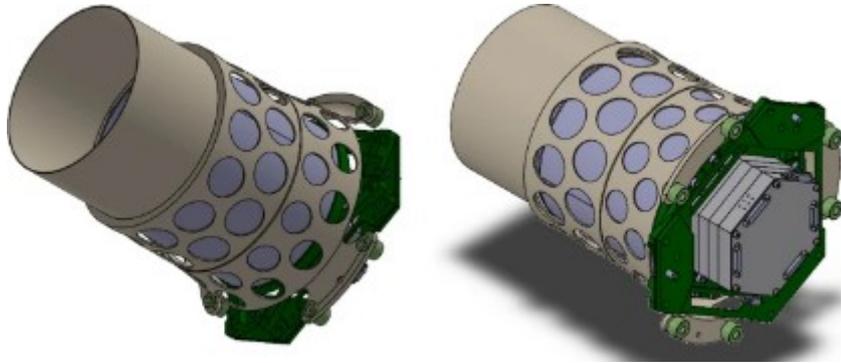


Figure 13: TENGOO-S <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01462-9>

- TENGOO-E : interface de communication avec TENGOO-E

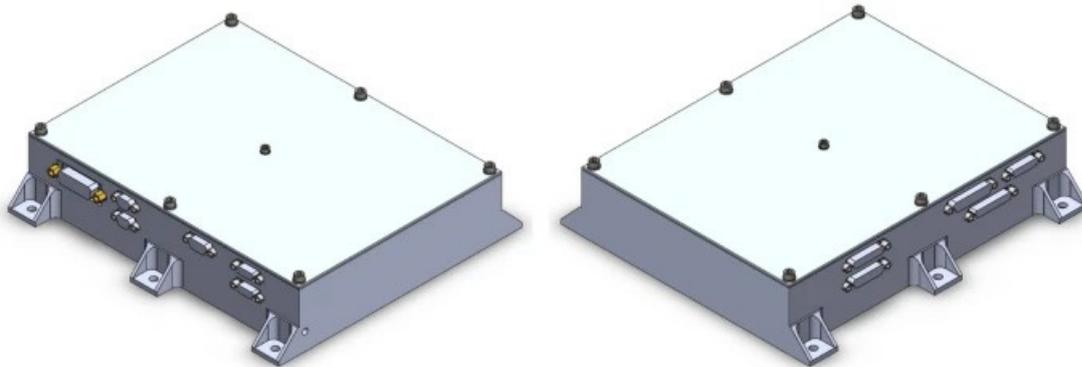


Figure 14: TENGOO-E <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01462-9>

7.3 OROCHI : Optical RadiOmeter composed of CHromatic Imagers (Japon, Université de Rikkyo)

Cela forme un ensemble avec TENGOO dont il partage une partie des composants.

Cet instrument observera la surface des lunes de Mars à l'aide d'un objectif grand angle pour relever leur topographie et la composition des matériaux. OROCHI capture des images de la lumière visible et du proche infra-rouge (390-950 nm), réfléchies par la surface à plusieurs bandes de fréquences pour identifier les matériaux hydratés et la matière organique, sur la globalité des lunes ainsi que sur les sites de collecte. Le diamètre des télescopes utilisé est de 46 mm.

La mission MMX de la JAXA

Résolution spatiale de 20 m à 20 km de distance, 10 cm sur une surface de 100*100m² autour du site d'atterrissage, 1mm, pour une surface de 1*1m² autour des sites de prélèvement des échantillons

L'instrument sera opérationnel à distance, mais aussi pendant les phases d'atterrissage à 80cm du sol.

- Instrument sans son heaume (hood) de protection. Il y a 8 caméras différentes. 7 avec un filtre différent chacune (390, 480, 550, 650, 730, 860, and 950 nm), et une caméra dédiée pour des observations sur le site d'atterrissage, avec un filtre 550 nm. Une LED pourra éclairer le terrain s'il est dans l'obscurité
- Sur le schéma ci-dessous on voit à la fois les ouvertures des instruments ORCHI et TENGOO.

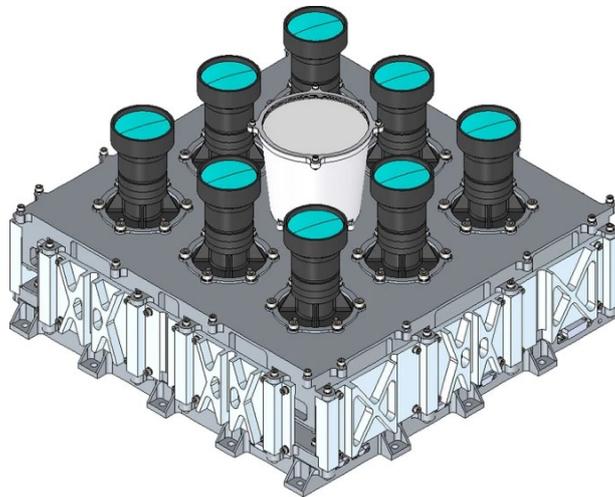


Figure 15: TENGOO et OROCHI
<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01462-9>

7.4 LIDAR : Light Detection And Ranging (Japon, Institut de Technologie Chiba)

Un LIDAR ³⁰ est un instrument utilisant la réflexion d'un ou plusieurs rayons laser sur un objet pour en déterminer la distance, la forme et la réflectivité. Il sert à caractériser les matériaux observés à la surface, mais aussi à déterminer avec précision l'altitude de la sonde.

Laser de longueur d'onde 1 064 nm (proche infra-rouge).

Résolution spatiale inférieure à 22 m à 100 km d'altitude.

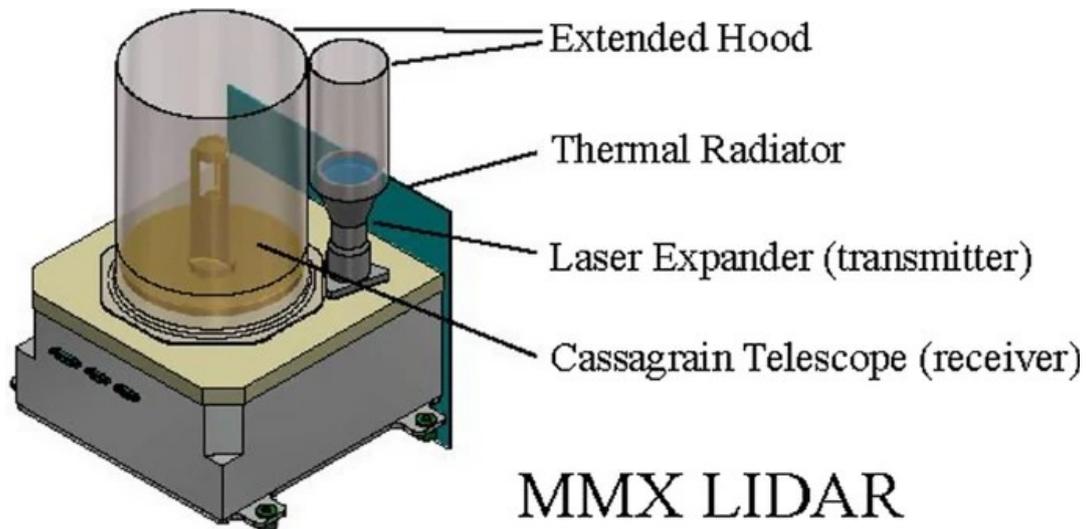


Figure 16: LIDAR

<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01537-7>

7.5 CMDM : Circum-Martian Dust Monitor (Japon, Planetary Exploration Research Center, Institut de technologie Chiba)

Détecteur de poussière avec des capacités de mesure in-situ de particules jusqu'à 10 µm, le CMDM³¹ sera utilisé pour caractériser l'environnement des lunes martiennes. L'instrument sera également utile pour estimer la fréquence de collisions des particules générant des poussières et observer la chute et la réintégration des poussières sur Phobos et Deimos.

Un film installé sur la sonde spatiale détecte les collisions, et suivant les mouvements des poussières les classe dans la catégorie : interstellaire, interplanétaire, ou origine martienne.

Détecte des vitesses supérieures à 0,16 km/s (576 km/h).

La mission MMX de la JAXA

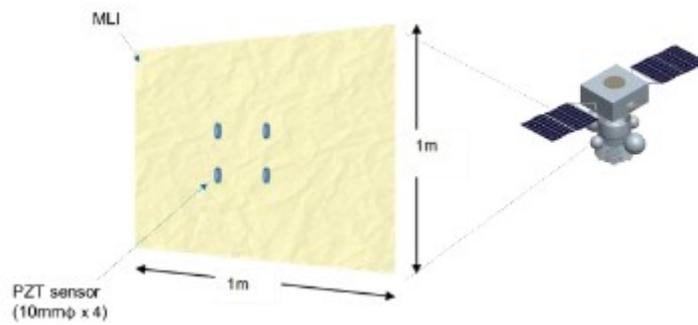


Figure 17: CDDM

<https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2019/EPSC-DPS2019-1669-1.pdf>

7.6 MSA : Mass Spectrum Analyser (Japon, Université d'Osaka)

Cet instrument³² a pour objectif d'observer et de déterminer la présence d'ions autour des lunes martiennes. En cherchant et mesurant les ions émis par les lunes, Mars et le vent solaire, il est possible d'investiguer la présence de glace au sein de Phobos et Deimos, les effets de marées et d'érosion, ainsi que l'échappement de l'atmosphère martienne.

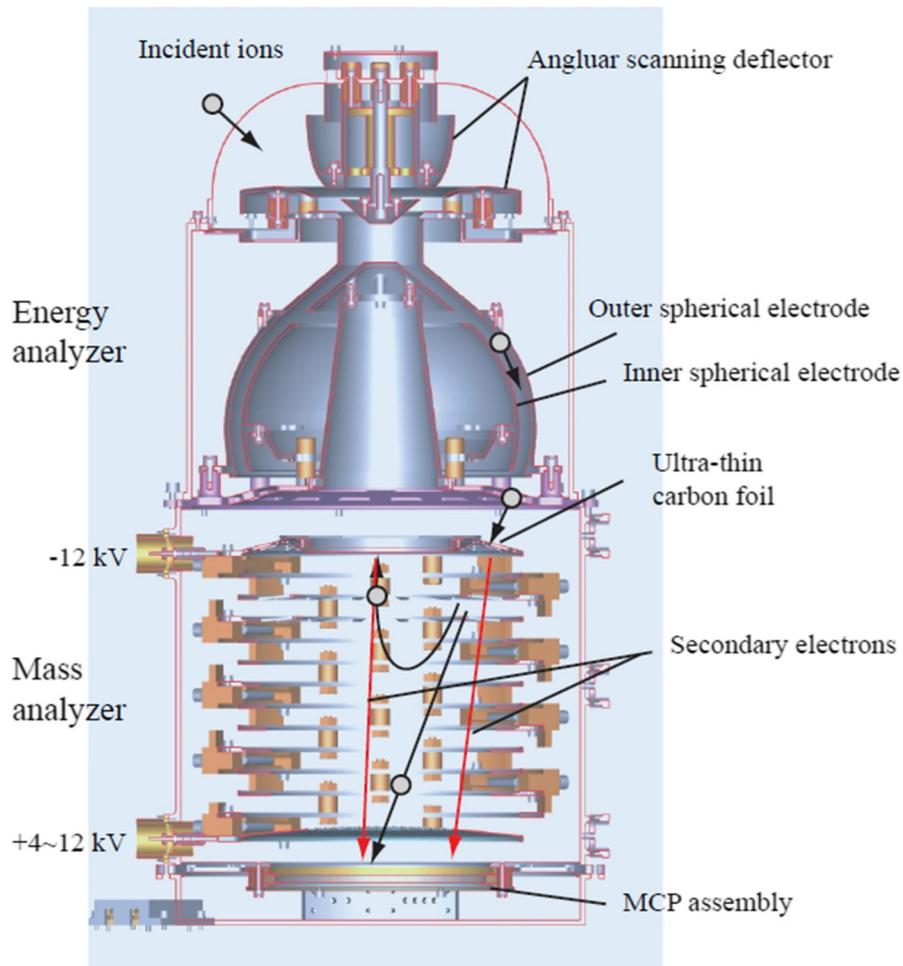


Figure 18: MSA

<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01452-x>

- Contraintes concernant la masse (1–100 amu³³) et l'énergie (5 to ~ 30 k eV/q) des ions.
- L'instrument analyse les ions passant dans le détecteur et suivant leurs propriétés et leurs directions détermine leur origine.

7.7 MEGANE : Mars-moon Exploration with Gamma rays and Neutrons (USA-NASA, JHUAPL)

Développé en partenariat entre la JAXA et la NASA, cet instrument observera les émissions de rayons gamma et de neutrons de la surface des lunes de Mars³⁴. Cette analyse permettra de déterminer la composition chimique des éléments à la surface, et ainsi qu'à aider au choix des sites candidats pour les prélèvements.

- Contrainte concernant l'énergie des rayons Gamma et des Neutrons.
- Gamma-ray energy: 0.4–8 MeV with energy resolution: < 5.1 keV (FWHM) @ 1454 keV
Neutron energy: thermal (0.01–0.5 eV), epithermal (0.5–0.5 MeV), fast (0.5–7 MeV).

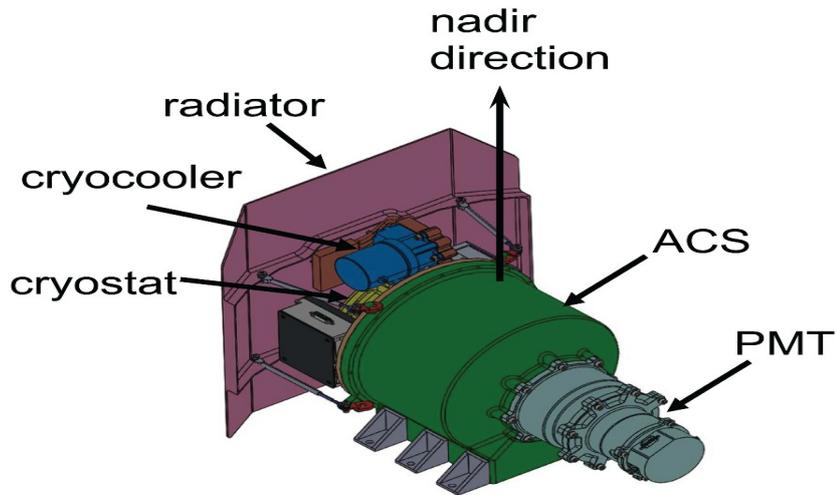


Figure 19: MEGANE

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019EA000811>

7.8 MIRS : MMX InfraRed Spectrometer (France – CNES/LESIA)

Ce spectromètre imageur proche infrarouge collectera la lumière réfléchie par la surface des satellites de Mars, et pourra déterminer leur composition minéralogique selon les différentes longueurs d'onde absorbées. 1 Gbit de données pourra être transmis pour aider à identifier le site d'atterrissage, le reste sera stocké dans le SRC. L'instrument a été livré à la JAXA.

- Longueur d'ondes 900 - 3 600 nm, résolution 10 nm.
- Résolution spatiale inférieure à 20 m à 20 km de distance.

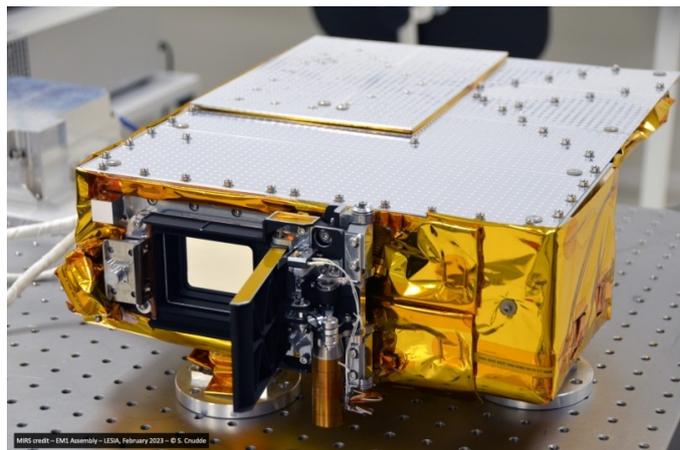


Figure 20: vue externe du module MIRS

<https://mmx.cnes.fr/fr/mmx-martian-moons-exploration/en-detail/mirs>

La mission MMX de la JAXA

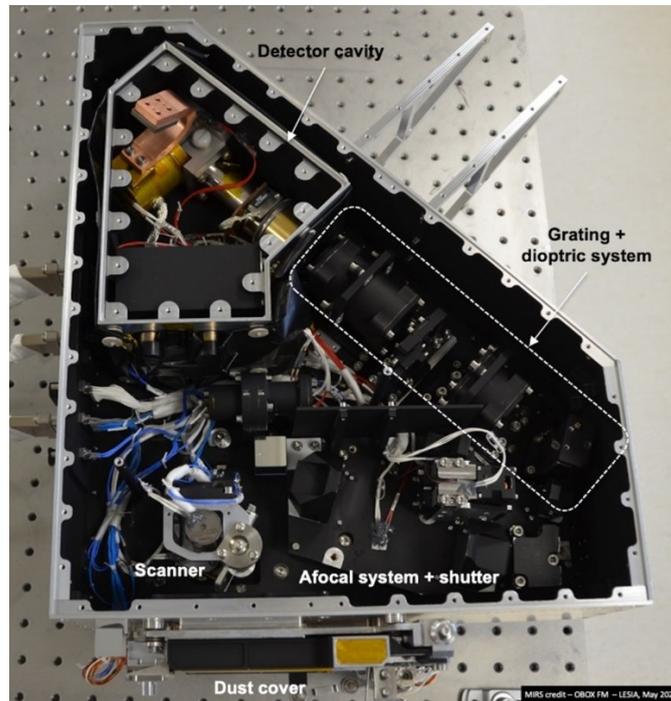


Figure 21: vue interne du module MIRS
<https://mmx.cnes.fr/fr/mmx-martian-moons-exploration/en-detail/mirs>

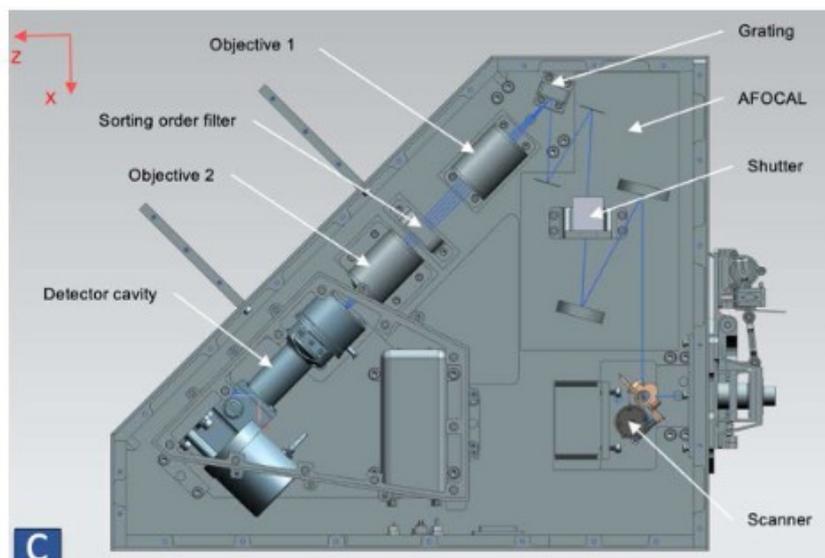


Figure 22: dispositifs optiques dans le MIRS
<https://insu.hal.science/insu-03474821>

La mission MMX de la JAXA

L'instrument MIRS est construit au LESIA en collaboration avec quatre autres laboratoires français : le Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux (LAB), le Laboratoire atmosphères, milieu, observations spatiales (LATMOS), le Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM), l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), sous maîtrise d'ouvrage du CNES.

- Simulation d'une cartographie détaillée de Phobos

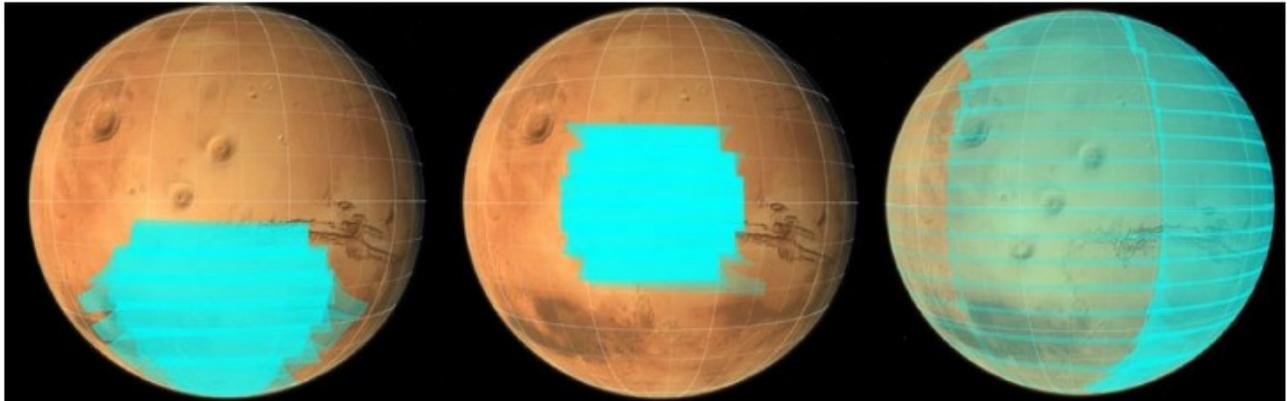


Figure 23: simulation cartographie de Phobos <https://insu.hal.science/insu-03474821>

- Simulation d'une cartographie de Mars, précision 2,4 km

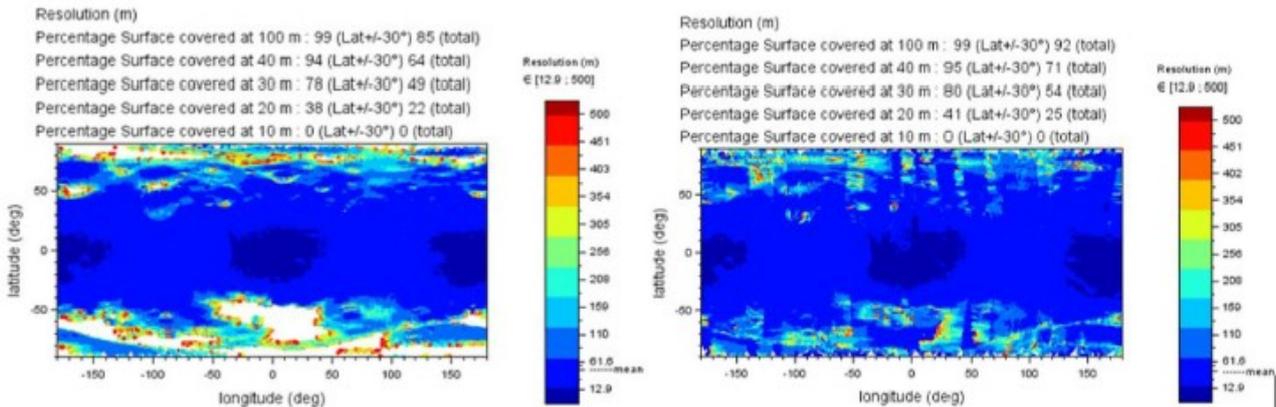


Figure 24: simulation cartographie de Mars <https://insu.hal.science/insu-03474821>

- Observation de Deimos § 3.6.1

7.9 P-SAMPLER : Pneumatic Sampler (USA-NASA, Honeybee Robotics)

L'objectif de ce mécanisme par un système pneumatique injectant du gaz est de récolter des échantillons à la surface de PHOBOS et de les stocker dans le module de retour pour être analysé au retour sur Terre³⁵.

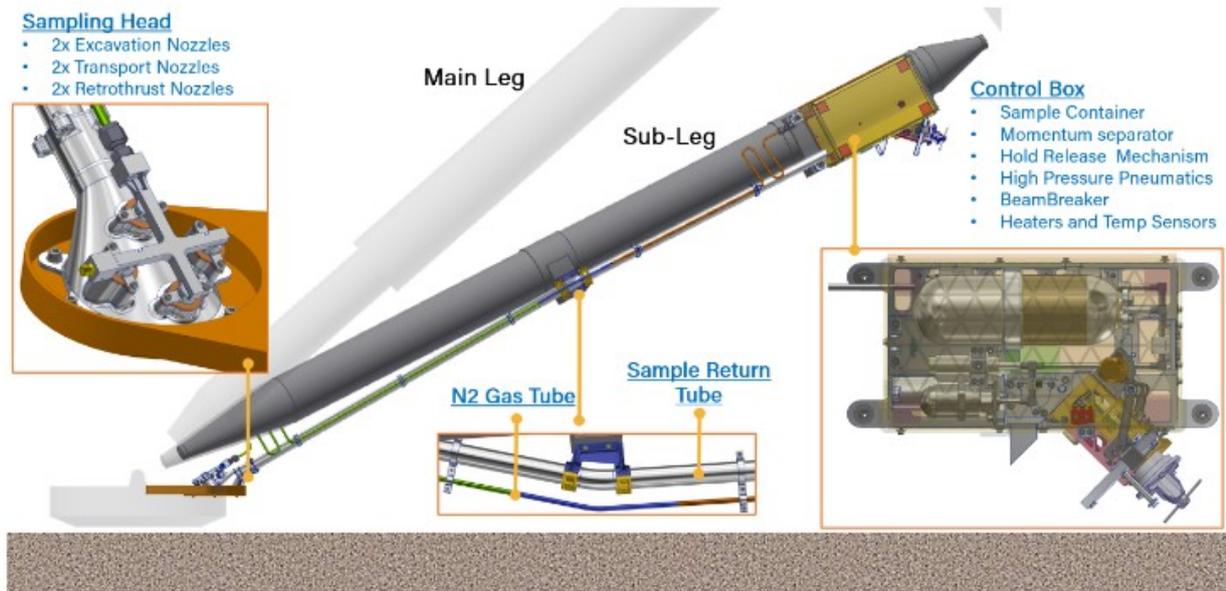


Fig 3. Components of P-Sampler.

Figure 25: Pneumatic Sampler

https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210013273/downloads/ASCEND-Abstract-MMX_4April2021.pdf

7.10 C-SMP : Coring Sampler (JAXA)

L'objectif de cet instrument est de collecter des échantillons et de les stocker dans le module de retour pour être analysé au retour sur Terre³⁶.

C-SMP

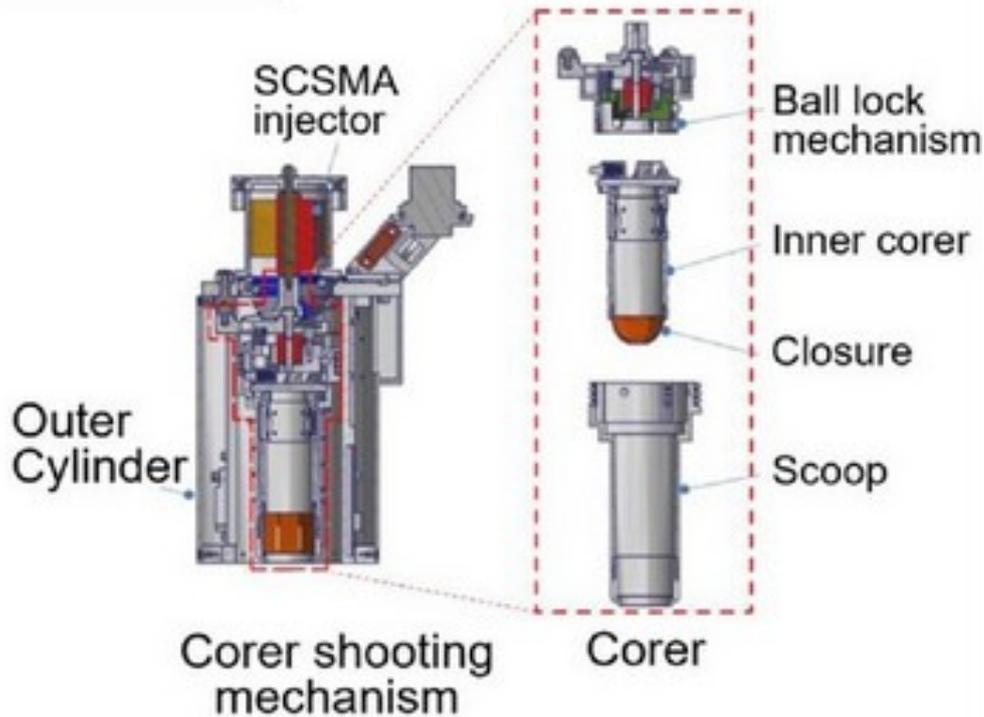


Figure 26: C-SMP, d'après <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/maps.14121>

7.11 SRC : Sample return Capsule (JAXA)

Capsule de retour des échantillons et de données d'observations qui n'auront pas encore été transmises³⁷. C'est un module de 60 cm de diamètre qui entrera dans l'atmosphère terrestre à la vitesse de 12 km/s.

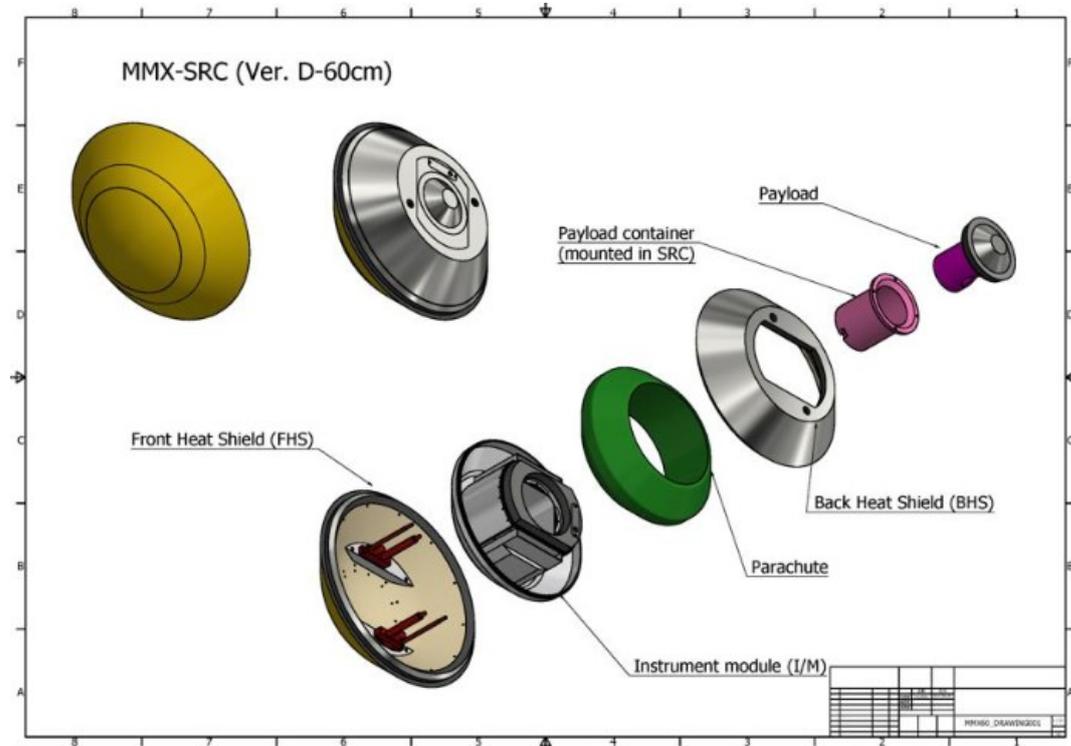


Figure 27: Intérieur du SRC

https://www.colorado.edu/event/ippw2018/sites/default/files/attached-files/aeroentrytech_1_yamada_presid651_presslides_docid1226.pdf

7.12 IREM ; Interplanetary Radiation Environment Monitor (JAXA).

Il s'agit d'une mission hébergée qui a pour but l'étude des radiations en particulier venant du Soleil. L'objectif est de mettre au point des technologies adaptées a ces radiations pour les futures explorations du système martien.

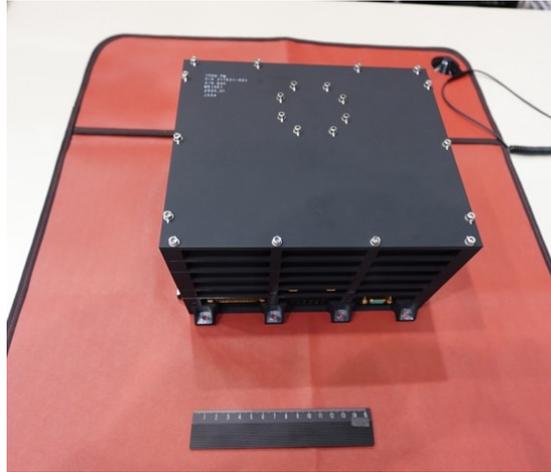


Figure 28: IREM <https://mmx-news.isas.jaxa.jp/?p=2253&lang=en>

7.13 SHV : Super Hi-Vision Camera (JAXA).

Il s'agit d'une autre mission hébergée ³⁸ qui permet des Photos de très hautes définitions 8 K et 4 K, objectif de mise au point pour le futur et de pouvoir présenter des images spectaculaires, en particulier pour la télévision japonaise.

On voit ci-dessous la localisation des deux caméras sous formes de rectangles jaunes. L'une est à côté du détecteur de poussières, et l'autre du SRC, qui sera en charge du retour des échantillons.

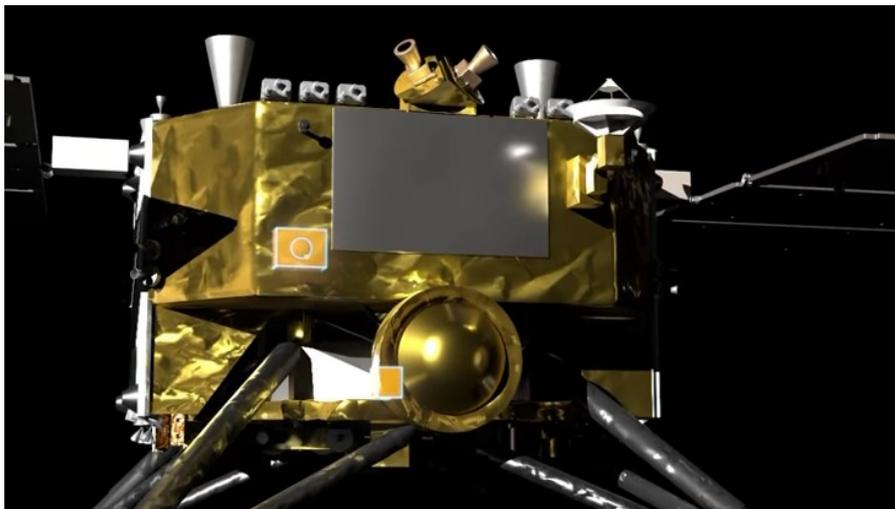


Figure 29: Localisation des caméras SHV
<https://www.youtube.com/watch?v=Wt0l7yGzQ5s>

7.14 Rover IDEFIX® 1

En coopération, le CNES et l'agence spatiale allemande DLR développent un petit Rover de moins de 30 kg qui sera transporté sur la sonde MMX, puis déployé sur la surface de la plus grande lune de Mars, Phobos. L'instrument a été livré à la JAXA. Ce Rover nommé IDEFIX® est un éclaireur, un démonstrateur et un explorateur ³⁹.

7.14.1 L'éclaireur.

Il doit toucher la surface de Phobos, s'assurer du comportement de la surface à des actions mécaniques et relayer ces informations à la JAXA. Une fois les propriétés du sol connues, la JAXA pourra prévoir ce qui se passera pour sa propre séquence d'atterrissage. C'est le rôle de l'éclaireur : le régolite de Phobos, cette couche de poussière et de grains présent à la surface des corps, doit être caractérisé.

7.14.2 Le démonstrateur.

Il doit démontrer qu'il est possible d'utiliser la locomotion à roues sur un corps avec une si faible gravité. S'ils peuvent rouler sur Phobos alors ils pourraient rouler sur tous les corps où la gravité y est plus forte : astéroïdes, lunes joviennes, etc.

7.14.3 L'explorateur.

Il sera un explorateur scientifique, capable de faire ses mesures in-situ. Le Rover sera le premier à observer le sol de Phobos à une résolution de 100µm, et à s'y déplacer. L'objectif est de parcourir entre 30 et 100 m, avec des déplacements planifiés d'environ 1 m, et d'avoir une durée de vie de 100 jours. Il pourrait être encore fonctionnel au-delà de cette période, mais ne serait plus utilisé.

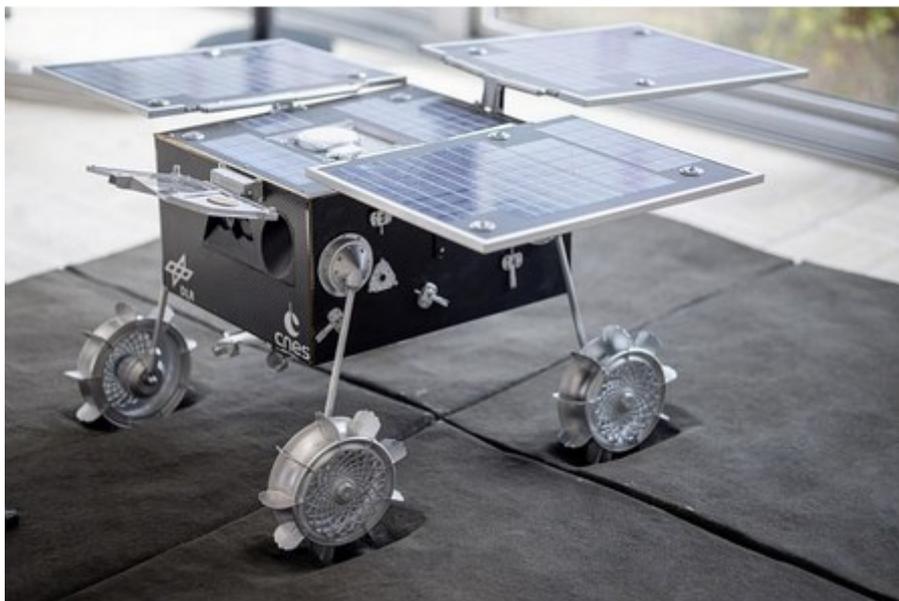


Figure 30: Rover Idefix <https://phototheque.cnes.fr/cnes/homepage/>

Pendant les phases d'exploration il y aura partage des responsabilités entre le CNES et la DLR, avec une alternance de surveillance et de pilotage par l'une ou l'autre entité.

7.15 Caractéristiques techniques.

7.15.1 La communication.

La communication utilisera le relais de l'antenne de la sonde MMX, et elle se fera presque toujours en différée, sauf à l'atterrissage. Les données ne seront pas retransmises en direct.

Il y aura une communication terre-sonde par jour, et deux communications sonde-Rover par jour. Les communications ne sont pas en même temps. Il y aura une boucle entre une observation et une commande terrestre au Rover de 48 h. Il doit avoir beaucoup d'autonomie et surtout se mettre en sécurité de manière autonome.

7.15.2 Informatique

Langage informatique : comme les capacités de calcul sont faibles, un langage de bas niveau est utilisé, le langage C.

Il y a un seul logiciel qui est partitionné. Il vient de l'aéronautique. On peut lancer ou non certaines parties du logiciel. Deux expérimentations de navigation autonome par DLR ou CNES sont prévues, et on ne chargera qu'une des deux partitions de la DLR ou du CNES à la fois.

Le Rover MMX inclut un équivalent PC de 2001 avec un pentium 3. Processeur 800 MHz double cœur ARM9. Pour ce qui concerne le spatial où les procédures de validations des équipements informatiques sont longues, coûteuses et complexe, il ne faut pas considérer qu'il s'agit de matériel ancien.

Il n'y a pas de redondance mais une procédure facilitant le redémarrage en cas de panne.

7.15.3 Sensibilité à l'environnement.

La sensibilité au rayonnement cosmique est plus importante que sur Mars où la faible atmosphère a un rôle protecteur.

Le stress thermique très important – 130° à +50°.

Il n'y a pas de bouclier protégeant l'ensemble de l'extérieur du Rover, mais des protections internes des composants.

7.15.4 Alimentation.

Des panneaux solaires permettent de rendre le Rover autonome, même s'il doit utiliser l'énergie disponible avec parcimonie.

7.16 Les instruments du Rover.

- Petit spectromètre RAX, analyse de la surface .
- Radiomètre RAD, mesure des flux d'énergie émis par la surface.
- OBC : On board Computer.
- Caméra : vue détaillée du régolithe avant la mission de prélèvement d'échantillon.

La mission MMX de la JAXA

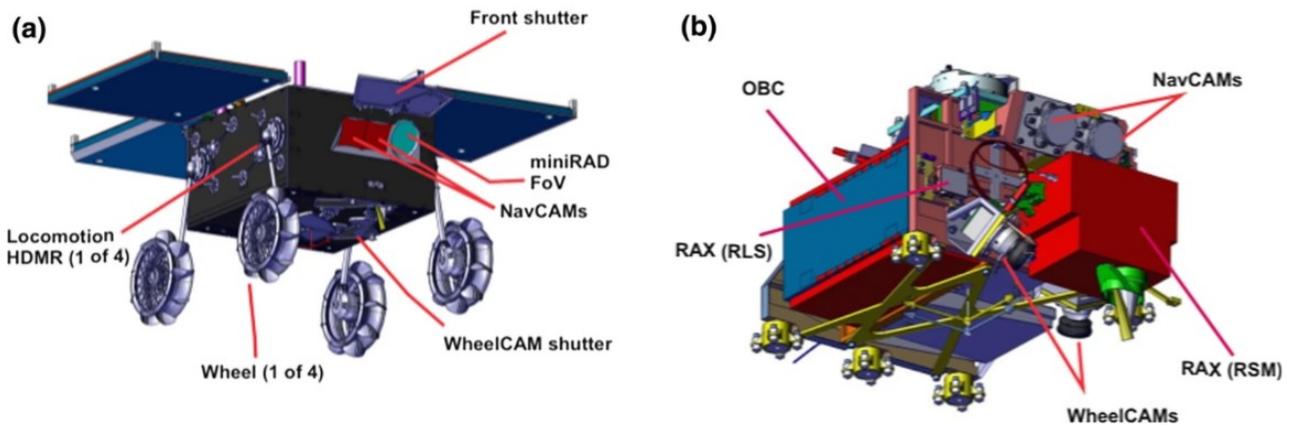


Figure 31: Dessin technique du Rover

<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01464-7>

7.17 La phase d'atterrissage.

Le Rover sera lancé le plus près possible de Phobos, au maximum à 100 mètres, et arrivera en chute libre vers la surface du Satellite. Impact 5 km/h.

Il suivra une période de 7 heures sans communication où le Rover rebondira sur le sol, finira par y rester, et devra se redresser automatiquement tout seul.

7.18 La question des tests.

Il n'est pas possible de tester l'ensemble du comportement du Rover en micro gravité⁴⁰. Une tour de test permet de simuler la micro gravité pendant 4 secondes et un vol parabolique pendant 20 secondes, mais ce n'est pas assez pour valider le comportement du Rover.

La DLR peut simuler avec sa tour de test le premier contact avec le sol pour vérifier que l'équipement résiste, mais c'est tout. Pour le reste un logiciel de simulation a été mise au point pour des tests en environnement virtuel.

8 La gravité sur Phobos.

Que ce soit pour l'atterrissage du Rover, celui de la sonde pour récupérer des échantillons, et même celui de la mise en orbite autour de Phobos, la gravité pose des problèmes particuliers⁴¹.

8.1 La faiblesse de la gravité complique les manœuvres.

La force d'attraction varie fortement sur le corps céleste suivant l'endroit où l'on se trouve⁴². Sur la face orientée vers Mars il faut tenir compte de l'attraction de la planète, et sur la face opposée de la force centrifuge.

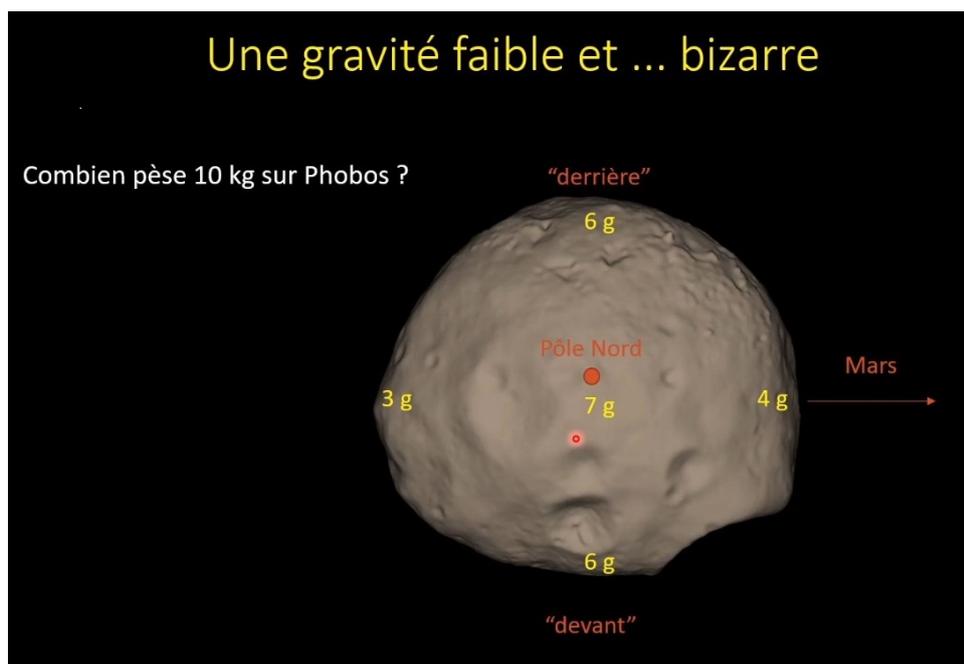


Figure 32: différence de gravité sur Phobos, d'après <https://www.youtube.com/watch?v=S7EB2ZpdTqc>

La gravité est très faible par rapport à celle de la Terre

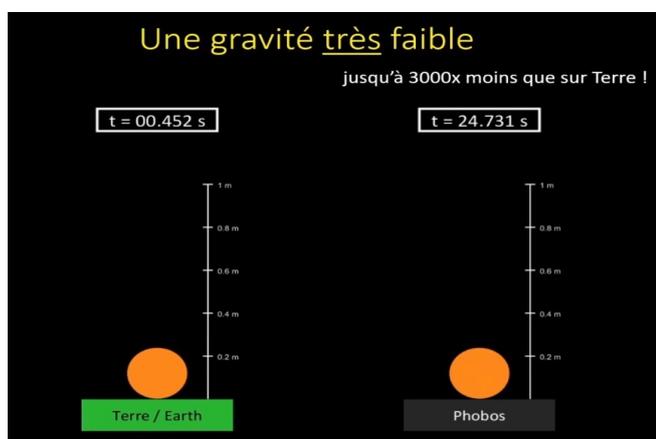


Figure 33: comparaison gravité sur la Terre et sur Phobos d'après <https://www.youtube.com/watch?v=S7EB2ZpdTqc>

Elle n'est pas complètement négligeable, ce qui fait qu'il faut que la sonde freine pour compenser le supplément d'accélération donné par l'attraction de Phobos en approchant. Une fois au contact il faut dépenser de l'énergie pour éviter que le module d'exploration ne rebondisse de manière incontrôlée. Il pourrait par exemple basculer sur le côté si un pied était sur une surface meuble et un autre sur une surface élastique.

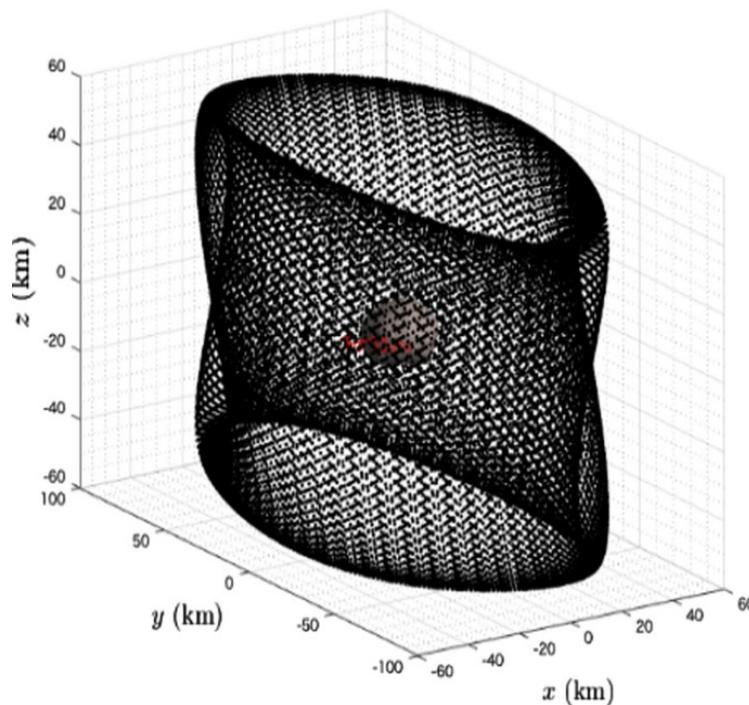
Le choix pour le Rover est d'accepter la situation, de rebondir et de se redresser dans la position finale où il se trouve. Les solutions prévues pour l'atterrissage d'un module sur la comète Philae n'ont pas fonctionné, et c'est ce qui a été choisi pour tirer parti de l'expérience.

Le choix pour le module d'exploration est d'arriver à compenser les effets pour rester en place. Si cela fonctionne la solution pourra être réutilisée pour d'autres corps à faible gravité.

8.2 La nécessité d'une orbite quasi stationnaire.

En raison de la faible gravité de Phobos, et de l'influence gravitationnelle de Mars, la sonde ne peut se mettre en orbite pour tourner autour de Phobos, comme les sondes peuvent le faire autour de la Lune.

Au lieu de tourner « autour » la sonde MMX va tourner en même temps que le satellite de Mars et en effectuant des changements de trajectoire pour modifier la vue sur les points à observer. La mise au point des trajectoires est complexe, et le CNES a une expertise dans la question⁴³.

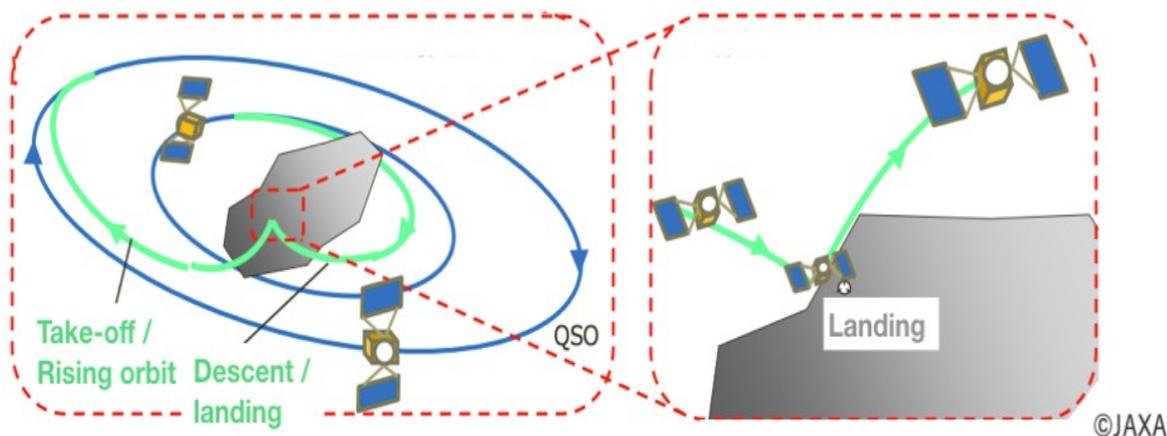


Trajectoires de la sonde MMX envisagées autour de Phobos

Figure 34: Trajectoires de la sonde MMX envisagées autour de Phobos

9 La prise d'échantillons.

Il est prévu deux contacts de moins de 2h30 pour prélever les échantillons en deux lieux différents. La cible à priori est de choisir un site sur le côté exposé à Mars, et un de l'autre côté, pour pouvoir accéder à deux types de sols différents.

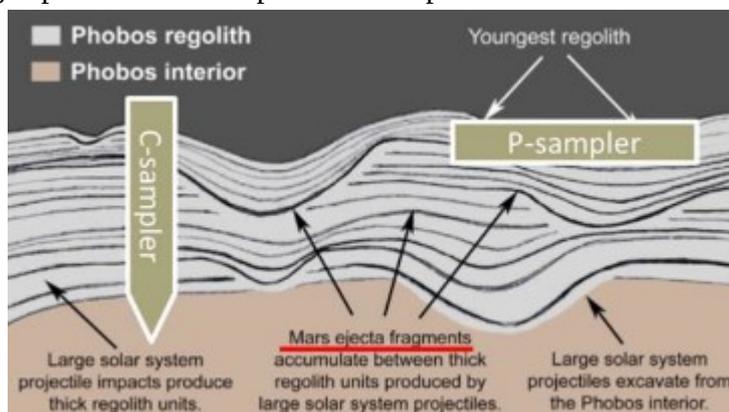


Dessin 1: Phase de la mission contact pour prélever des échantillons

<https://www.mmx.jaxa.jp/en/mission/>

Le Coring Sampler (C-SMP) sera utilisé deux fois, un cylindre qui prélèvera une carotte d'au moins deux centimètres de profondeur, en espérant traverser la couche de régolithe la plus fine et récente.

Le Pneumatic Sampler (P-SMP) ne sera utilisé qu'une seule fois. Il est logé dans un des pieds, qui utilisera du gaz pour soulever et permettre de prélever des échantillons de surface.



Dessin 2: Prélèvement des échantillons

https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210013273/downloads/ASCEND-Abstract-MMX_4April2021.pdf

Si on regarde les photos de deux sites où ont déjà été prélevés des échantillons sur d'autres astres on peut avoir une idée des difficultés pour choisir le site de prélèvement et réussir l'opération. Cela explique la préparation minutieuse prévue pour faire le choix. Il est également d'avoir un temps de décision de 20 minutes pour le choix une fois la sonde au contact de Phobos.

La mission MMX de la JAXA

Exemple 1 : sur ce type de surface il faut bien choisir l'endroit pour creuser.



Surface de Ryugu

Figure 35: Surface de Ryugu <https://www.bbc.com/news/science-environment-45667350>

Exemple 2 : si la couche de régolithe fine est aussi épaisse que sur certains endroits de la Lune creuser de 2 cm ne suffira pas à la traverser.



Figure 36: Empreinte de pied sur la Lune <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/03/as11-40-5878-orig.jpg>

10 Les cinq types d'usages prévus pour les instruments.

10.1 Préparer la relève d'échantillons.

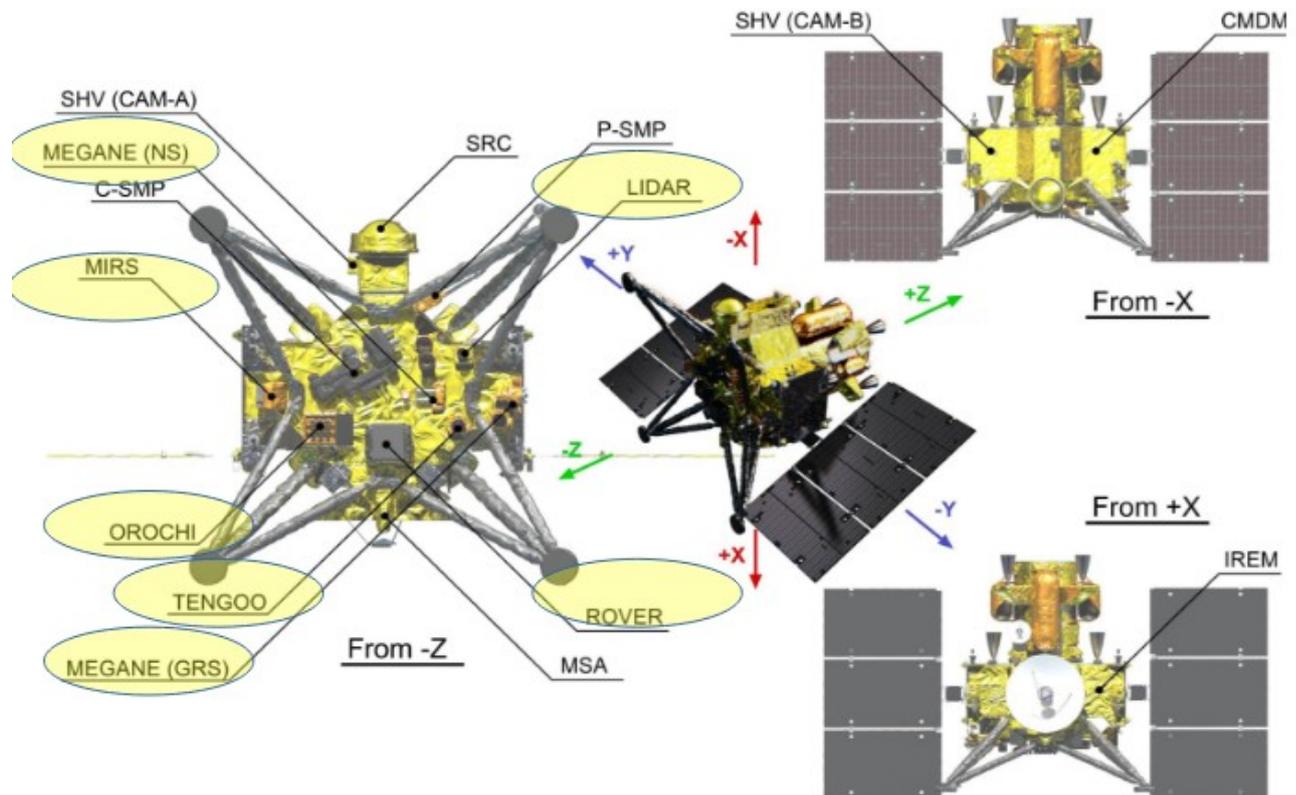


Figure 37: instruments pour préparer la relève d'échantillon <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>

MEGANE : émissions neutrons et rayons Gamma.

LIDAR: image surface 3D.

MIRS : infrarouge.

OROCHI : télescopes 50 mm centrés sur des longueurs d'ondes.

TENGOO : télescope optique diamètre 120 mm.

=> Ces instruments vont aider au choix du site.

Rover : analyse du sol sur place pour compléter l'information avant la relève d'échantillon.

Petit spectromètre RAX, analyse de la surface.

Radiomètre RAD, mesure des flux d'énergie émis par la surface.

Caméra : vue détaillée du régolithe.

10.2 Relève d'échantillon.

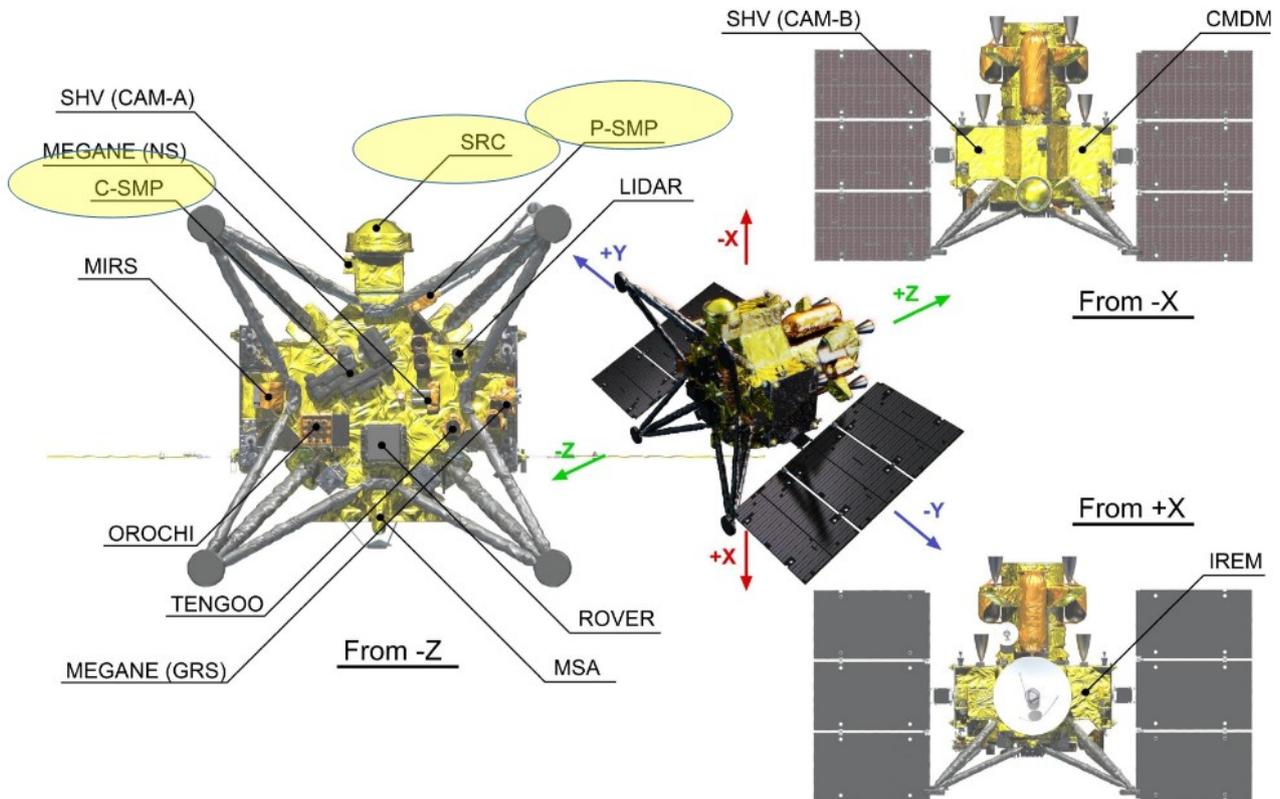


Figure 38: instruments pour la relève d'échantillon <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>

P-SMP : poussière récupérée après envoi de gaz pour la faire voler.

C-SMP: récupération matière après forage.

SRC : système de retour d'échantillons, et de données de la mission.

10.3 Observation directe du sol

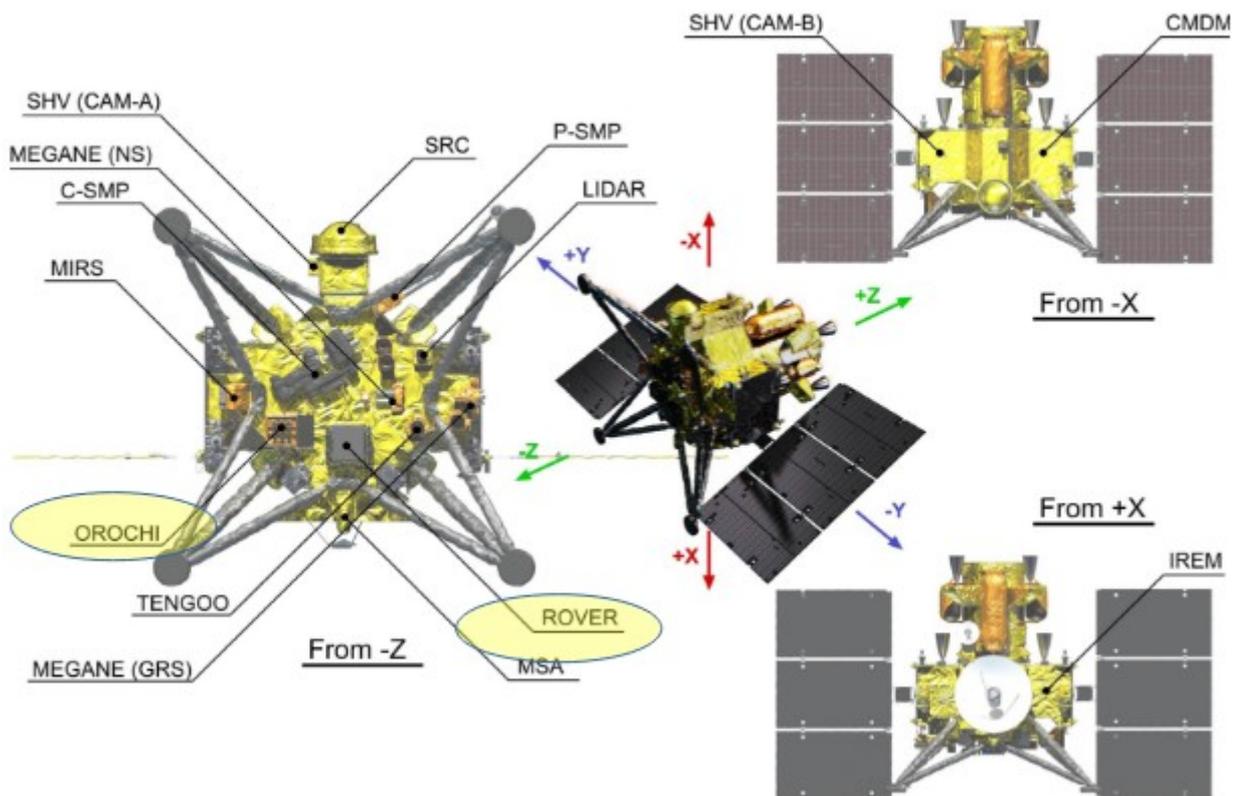


Figure 39: instrument pour observation directe du sol <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>

OROCHI : observation possible lors de l'atterrissage avec un des 8 télescopes 50mm.

Rover : analyse du sol sur place pour compléter l'information avant la relève d'échantillon.

Petit spectromètre RAX, analyse de la surface.

Radiomètre RAD, mesure des flux d'énergie émis par la surface.

Caméra : vue détaillée du régolithe.

10.4 Études géographiques

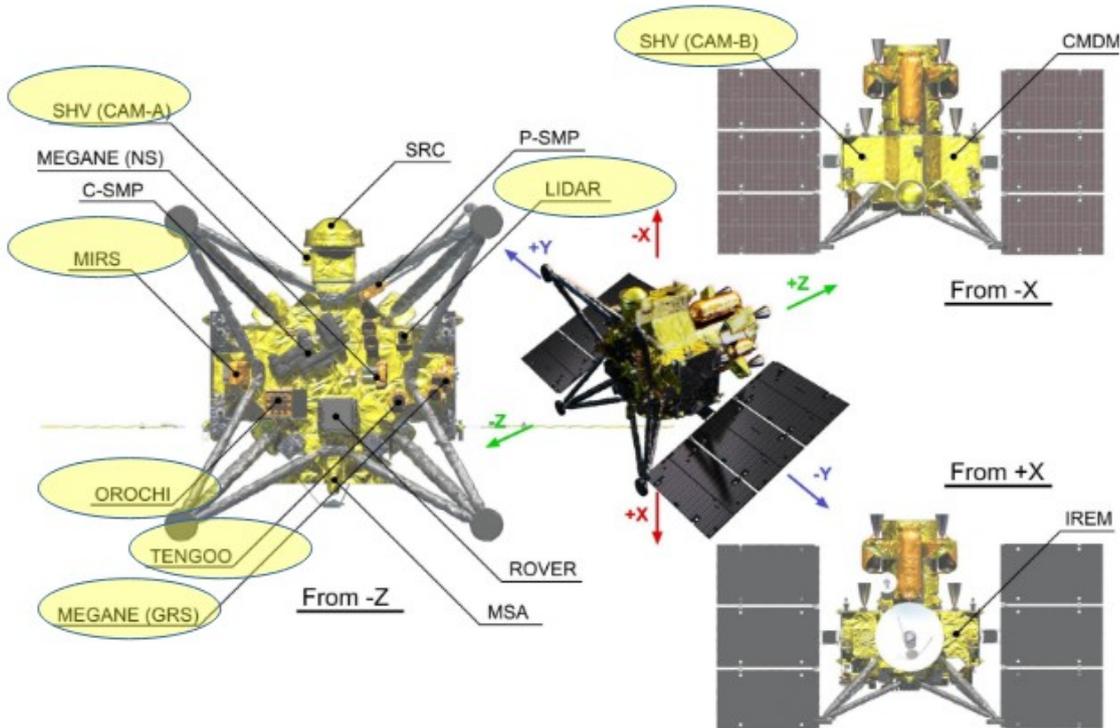


Figure 40: instruments pour études de la géographie de Mars et de ses satellites
<https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>

MEGANE : émissions neutrons et rayons Gamma.

LIDAR: image surface 3D.

MIRS : infrarouge.

OROCHI : télescopes 50 mm centrés sur des longueurs d'ondes.

TENGOO : télescope optique diamètre 120mm.

SHV : Caméras 64 K ayant pour premier objectif de fournir de « belles » images.

10.5 Préparer le futur

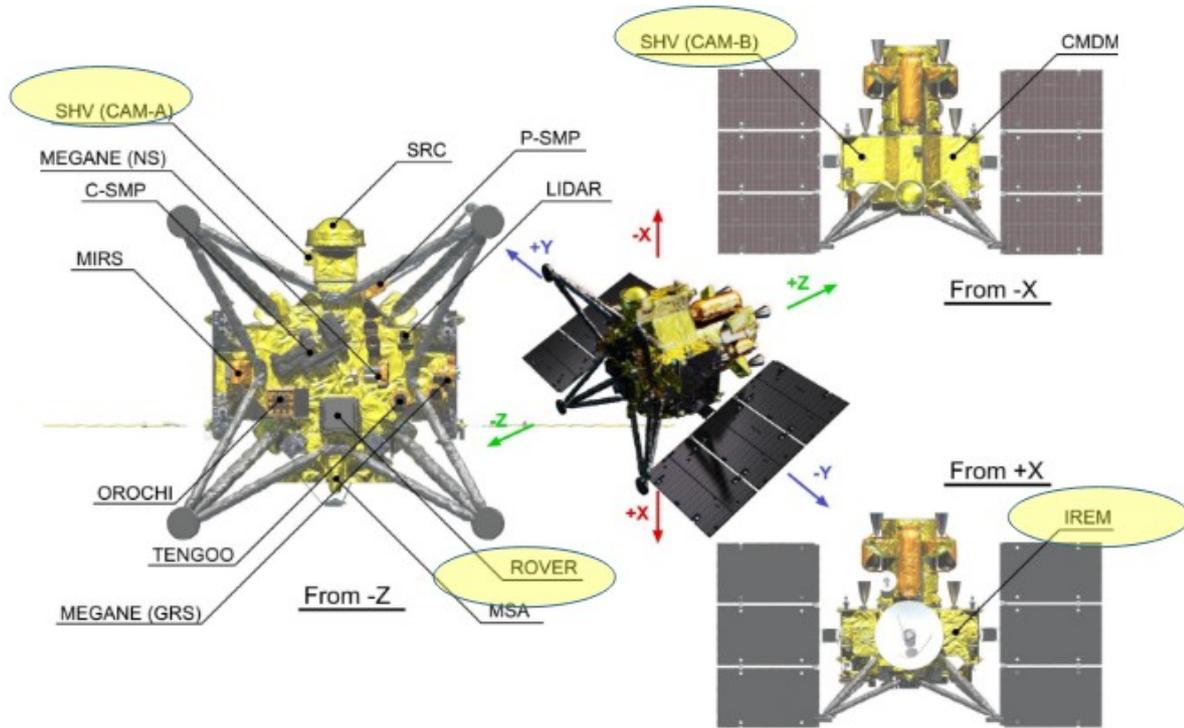


Figure 41: instruments pour préparer le futur <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>

SHV : Caméras 64 K pouvant être réutilisées dans des missions futures.

Rover : démontrer la possibilité de faire déplacer des Rovers sur ce type de surface.

IREM : étude du rayonnement interstellaire en vue, entre autres, de missions habitées.

11 Capitaliser sur la mission MMX.

Aucune des trois agences, NASA, ESA ou JAXA ne prévoit dans les prochaines années de mission avec prélèvement d'échantillon ou atterrissage d'un Rover sur un corps à faible gravité, et la Chine ne semble pas non plus en avoir au programme.

On pourrait imaginer que ce type d'outils soit utilisé dans le futur pour faire de la prospection dans la ceinture d'astéroïde. Le Rover pourrait servir de base à un véhicule utilisé sur des lunes de Saturne ou Jupiter.

L'expérience concernant les autres instruments d'observations pourra être réutilisée dans le cadre d'autres programmes internationaux.

Le LESIA participe en particulier aux futures missions suivantes⁴⁴.

- JUICE (ESA) : Lunes de Jupiter.
- EnVision (ESA) : objectif Vénus.
- Dragonfly (NASA) : Titan.
- VERITAS (NASA) : Vénus.

12 Figures et références.

Voir pages suivantes

Index des figures

Figure 1: Vue d'artiste "The MMX spacecraft just before landing on Phobos" https://www.mmx.jaxa.jp/en/gallery/	2
Figure 2: comparaison des tailles apparentes des satellites de la Terre et de Mars depuis le sol des planètes https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-Rover-gets-movie-as-a-mars-moon-passes-another...	8
Figure 3: influence du vent solaire et des rayons cosmiques https://global.jaxa.jp/press/2022/10/20221021-1_e.html	10
Figure 4: influence des écarts thermiques https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aaz6306	11
Figure 5: cratère Stickney https://science.nasa.gov/resource/stickney-crater-phobos	11
Figure 6: approche de Deimos pour les observations https://insu.hal.science/insu-03474821	13
Figure 7: étapes de la mission, site https://lesia.obspm.fr/Spectro-imageur-MIRS-pour-la.html , avec mise à jour des dates.....	15
Figure 8: Localisation de Tanegashima au Japon https://fr.wikipedia.org/wiki/Base_de_lancement_de_Tanegashima	16
Figure 9: Maquette de la sonde H3, hauteur 67m, d'après https://fr.wikipedia.org/wiki/H3_(lanceur)	16
Figure 10: Schéma "à la craie" d'après la présentation de la mission sur le site de la Jaxa "Chalkboard: A sample from Mars" https://www.mmx.jaxa.jp/en/gallery/	18
Figure 11: La sonde MMX, vue d'artiste venant du site de la Jaxa où sont ajoutées des légendes https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=8e3b804a5de9a72f71bf63970469cf26	18
Figure 12: Localisation des instruments d'après une vue d'artiste venant du site de la Jaxa https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df	19
Figure 13: TENGOO-S https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01462-9	20
Figure 14: TENGOO-E https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01462-9	20
Figure 15: TENGOO et OROCHI https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01462-9	21
Figure 16: LIDAR https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01537-7	22
Figure 17: CMDM https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2019/EPSC-DPS2019-1669-1.pdf	22
Figure 18: MSA https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01452-x	23
Figure 19: MEGANE https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019EA000811 ...24	24
Figure 20: vue externe du module MIRS https://mmx.cnes.fr/fr/mmx-martian-moons-exploration/en-detail/mirs	25
Figure 21: vue interne du module MIRS https://mmx.cnes.fr/fr/mmx-martian-moons-exploration/en-detail/mirs	25
Figure 22: dispositifs optiques dans le MIRS https://insu.hal.science/insu-03474821	26
Figure 23: simulation cartographie de Phobos https://insu.hal.science/insu-03474821	26
Figure 24: simulation cartographie de Mars https://insu.hal.science/insu-03474821	27

La mission MMX de la JAXA

Figure 25: Pneumatic Sampler
https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210013273/downloads/ASCEND-Abstract-MMX_4April2021.pdf.....27

Figure 26: C-SMP, d'après <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/maps.14121>.....28

Figure 27: Intérieur du SRC https://www.colorado.edu/event/ippw2018/sites/default/files/attached-files/aeroentrytech_1_yamada_presid651_presslides_docid1226.pdf.....29

Figure 28: IREM <https://mmx-news.isas.jaxa.jp/?p=2253&lang=en>.....30

Figure 29: Localisation des caméras SHV <https://www.youtube.com/watch?v=Wt0l7yGzQ5s>.....30

Figure 30: Rover Idefix <https://phototheque.cnes.fr/cnes/homepage/>.....31

Figure 31: Dessin technique du Rover
<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01464-7>.....33

Figure 32: différence de gravité sur Phobos, d'après <https://www.youtube.com/watch?v=S7EB2ZpdTqc>.....34

Figure 33: comparaison gravité sur la Terre et sur Phobos d'après <https://www.youtube.com/watch?v=S7EB2ZpdTqc>.....34

Figure 34: Trajectoires de la sonde MMX envisagées autour de Phobos.....35

Figure 35: Surface de Ryugu <https://www.bbc.com/news/science-environment-45667350>.....37

Figure 36: Empreinte de pied sur la Lune
<https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/03/as11-40-5878-orig.jpg>.....37

Figure 37: instruments pour préparer la relève d'échantillon <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>.....38

Figure 38: instruments pour la relève d'échantillon <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>.....39

Figure 39: instrument pour observation directe du sol <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>.....40

Figure 40: instruments pour études de la géographie de Mars et de ses satellites
<https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>.....41

Figure 41: instruments pour préparer le futur <https://jda.jaxa.jp/result.php?lang=e&id=23eac3235190545c84690cf5b6dbd4df>.....42

La mission MMX de la JAXA

- 1 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Hayabusa_\(sonde_spatiale\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hayabusa_(sonde_spatiale))
- 2 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hayabusa2>
- 3 https://fr.wikipedia.org/wiki/Martian_Moons_Exploration
- 4 <https://lepetitastronaute.fr/blogs/top-22-des-missions-spatiales-les-plus-chers/>
- 5 <https://www.geologybites.com/tomo-usui> (Projet MMX)
- 6 https://fr.wikipedia.org/wiki/Agence_d%27exploration_a%C3%A9rospatiale_japonaise
- 7 <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/projects-and-missions/mmx> (DLR)
- 8 <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100410296.pdf> (Accor Japon Australie)
- 9 <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01545-7> (Mission MMX)
- 10 https://fr.wikipedia.org/wiki/Ligne_des_glaces
- 11 https://mepag.jpl.nasa.gov/meeting/2016-03/17_Miyamoto.pdf (Mission MMX)
- 12 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lune>
- 13 <https://cnes.fr/fr/les-mardis-de-lespace/saison-20232024> (Mardi de l'espace MMX Idefix)
- 14 https://global.jaxa.jp/press/2022/10/20221021-1_e.html (Analyse Ryugu)
- 15 <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aaz6306> (Analyse Ryugu)
- 16 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Phobos_\(lune\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Phobos_(lune))
- 17 <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019EA000811> (MEGANE)
- 18 <https://insu.hal.science/insu-03474821> (MIRS)
- 19 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_Sample_Return_\(NASA/ESA\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_Sample_Return_(NASA/ESA))
- 20 <https://science.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/04/mirt-04152024-updated-signed.pdf> (Mars Sample Return)
- 21 https://www.cite-sciences.fr/fileadmin/fileadmin_CSI/fichiers/vous-etes/enseignant/Documents-pedagogiques/_documents/Expositions-permanentes/Mission_spatiale/Mission_spatiale_-_Orbites.pdf (Les orbites de transfert de Hohmann)
- 22 <https://mmx.cnes.fr/fr/> (CNES MMX)
- 23 <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=MMX-MARS> (Fiche NASA MMX)
- 24 [https://fr.wikipedia.org/wiki/H3_\(lanceur\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/H3_(lanceur))
- 25 https://fr.wikipedia.org/wiki/Base_de_lancement_de_Tanegashima
- 26 https://fr.mitsubishielectric.com/fr/news/releases/global/2020/0221-b/pdf/200221-b_3340_fr_fr.pdf (Sonde Spatiale MMX)
- 27 https://soma.larc.nasa.gov/mmx/pdf_files/JAXA-RPR-MX16302_MMX_SystemDescription_NC.pdf (caractéristiques de la Sonde MMX)
- 28 <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/2143.pdf> (Conception de la sonde MMX)
- 29 <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01462-9> (TENGOO et OROCHI)
- 30 <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01537-7> (LIDAR)
- 31 <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2019/EPSC-DPS2019-1669-1.pdf> (CMDM)
- 32 <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01452-x> (MSA)
- 33 https://fr.wikipedia.org/wiki/Unit%C3%A9_de_masse_atomique_unifi%C3%A9e (UMA)
- 34 <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01509-x> (MEGANE)
- 35 https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210013273/downloads/ASCEND-Abstract-MMX_4April2021.pdf (P-SAMPLER)
- 36 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/maps.14121> (Relève des échantillons)
- 37 https://www.colorado.edu/event/ippw2018/sites/default/files/attached-files/aeroentrytech_1_yamada_presid651_presslides_docid1226.pdf (SRC)
- 38 https://global.jaxa.jp/press/2020/09/20200910-2_e.html (SHV)
- 39 <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-021-01464-7> (Rover Idefix)
- 40 <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/projects-and-missions/mmx/simulation-realistically-recreating-the-conditions-on-phobos> (Simulation Rover)
- 41 <https://mmx-news.isas.jaxa.jp/?p=331&lang=en> (Gravité sur Phobos)
- 42 <https://www.youtube.com/watch?v=S7EB2ZpdTqc> (Présentation mission)
- 43 <https://mmx.cnes.fr/fr/dynamique-du-vol> (Orbites QSO)
- 44 <https://lesia.obspm.fr/Missions-spatiales-du-pole.html> (Missions spatiales du pôle planétologie du LESIA)