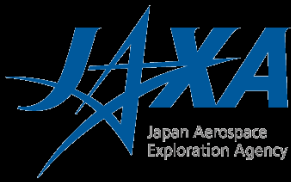


La mission Martian Moons eXploration





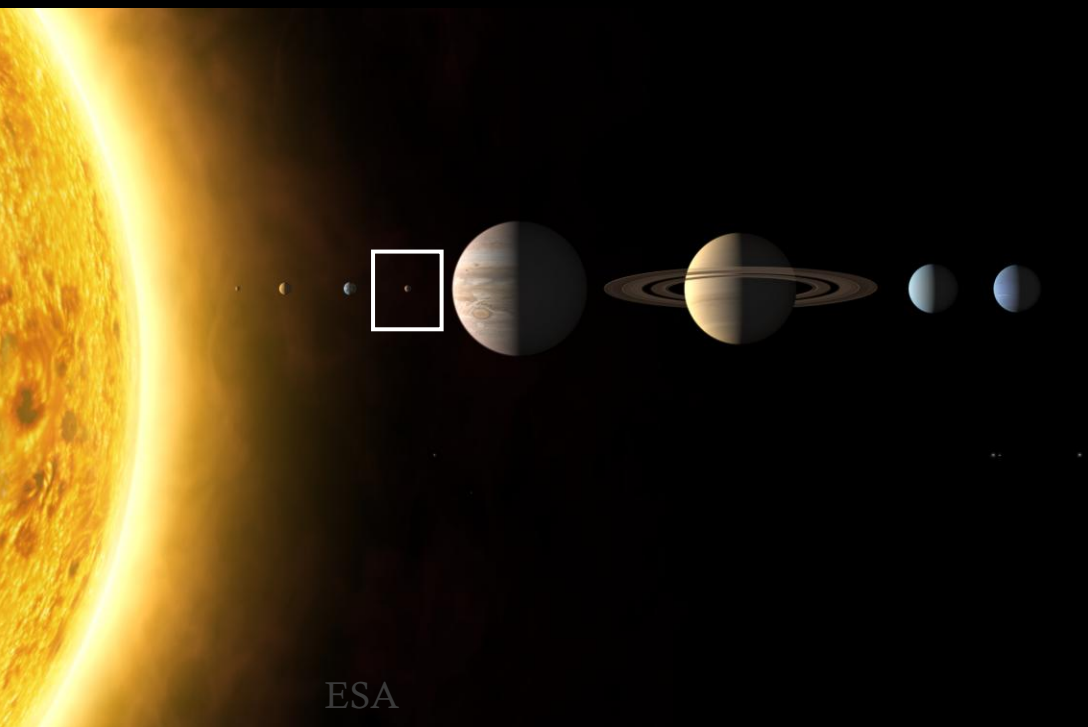
Le contexte de la mission

Mars et ses lunes

Mars

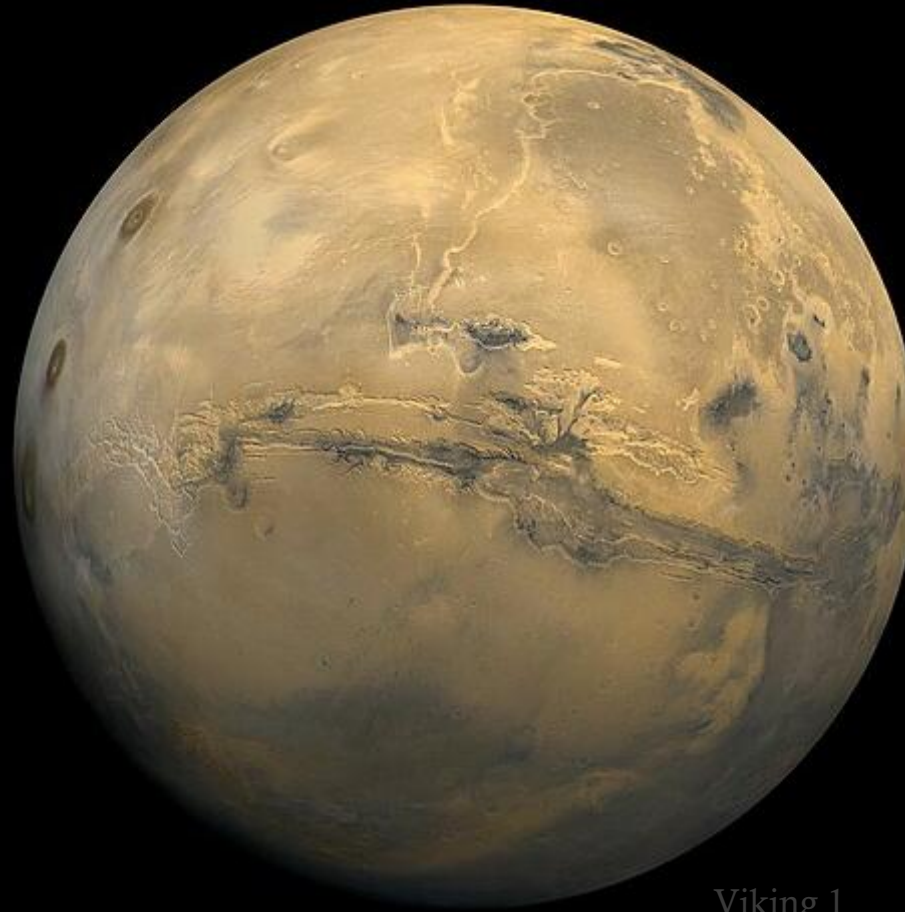
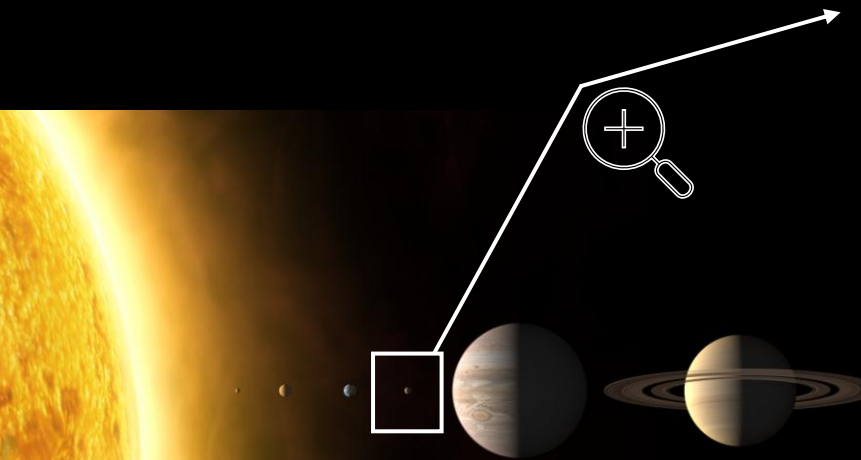
4^e planète du Système Solaire

Distance moyenne au Soleil : 1.5 UA



Mars

4^e planète du Système Solaire
Distance moyenne au Soleil : 1.5 UA



- 2 fois plus petite que la Terre
- **Gravité** : 1/3 de la Terre
- 1 jour martien = 1 sol = 24 h 39 min 35 sec
- 1 année = 687 jours terrestres
- Température moyenne : - 67°C (-128°C / +27°C)
- Atmosphère ténue : pression de 6 mbar, majoritairement CO₂
- 2 lunes : Phobos et Déimos

Les lunes de Mars

Découvertes en 1877 par Asaph Hall

- Faibles excentricité et inclinaison
- Albédo faible : 0.06-0.07
- Densité faible : 1.6 g/cm^3



≈ 27 km
Phobos



≈ 15 km
Déimos

→ On peut les caractériser géologiquement et spectralement

Question

Géologiquement : que pouvez-vous dire sur ces lunes ?

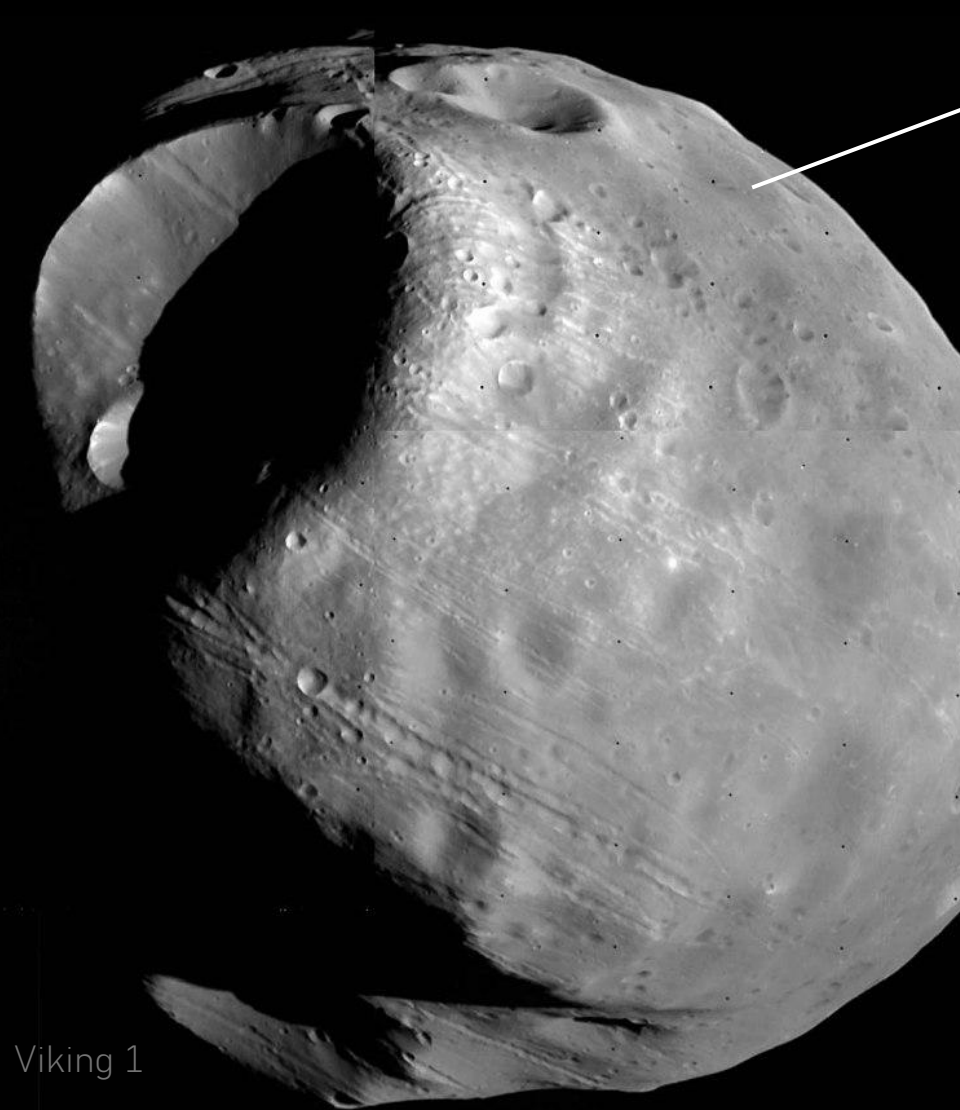


Phobos



Déimos

Caractéristiques géologiques de Phobos



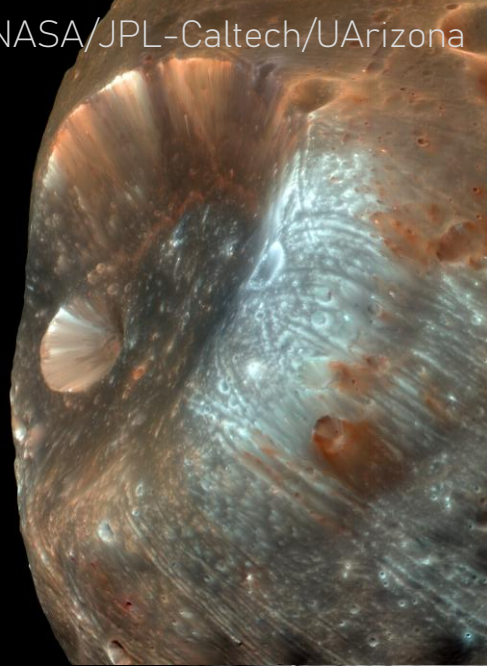
Surface fortement
cratérée

Viking 1

Caractéristiques géologiques de Phobos

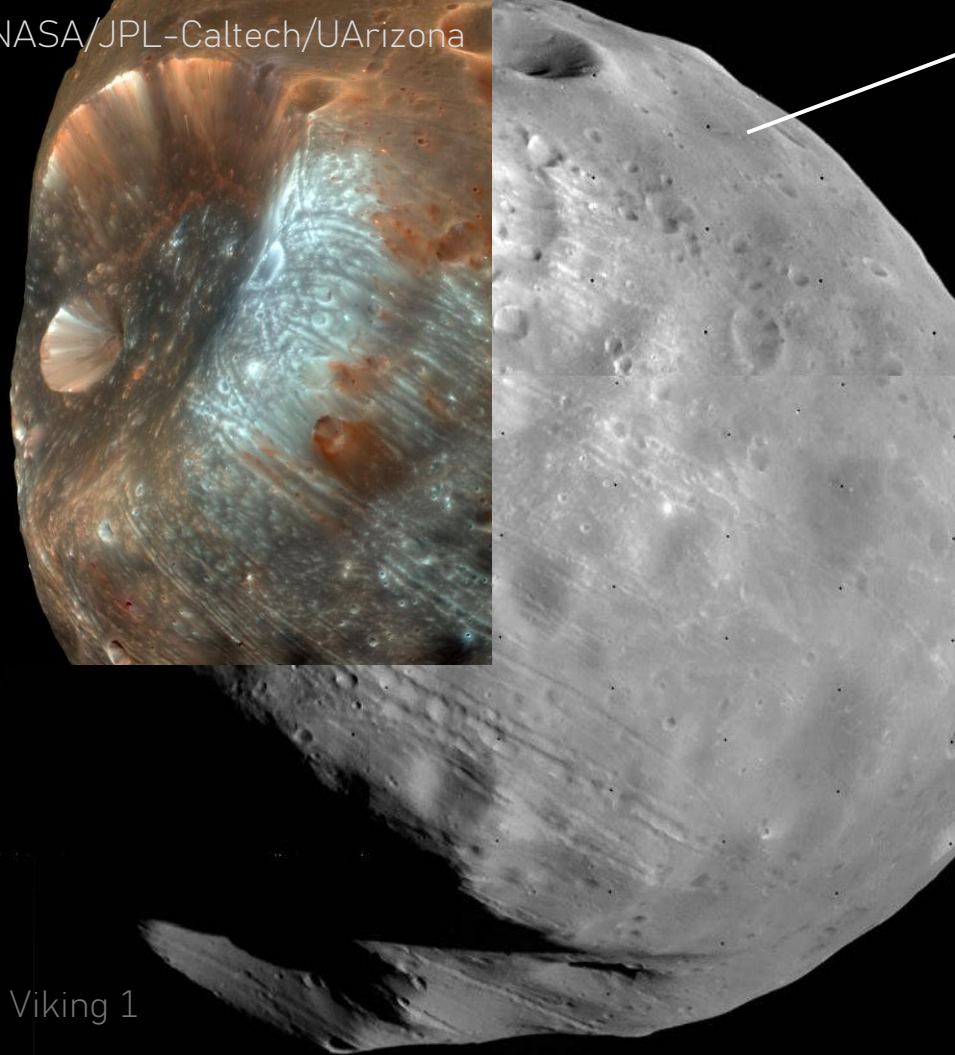
Cratère Stickney :
diamètre de 9 km

NASA/JPL-Caltech/UArizona



Surface fortement
cratérisée

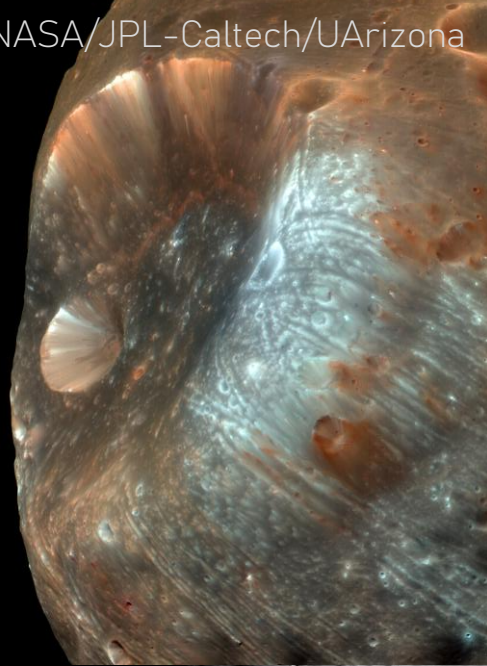
Viking 1



Caractéristiques géologiques de Phobos

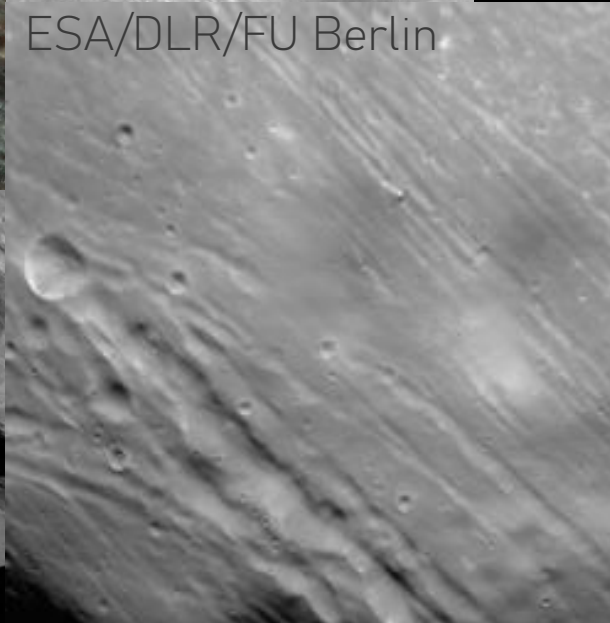
Cratère Stickney :
diamètre de 9 km

NASA/JPL-Caltech/UArizona



Surface fortement
cratérisée

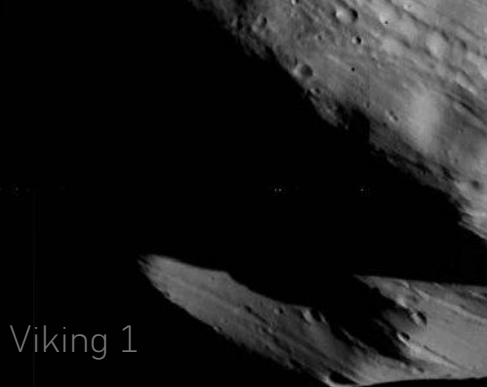
ESA/DLR/FU Berlin



Présence de blocs
rocheux

Présence de
sillons

Viking 1



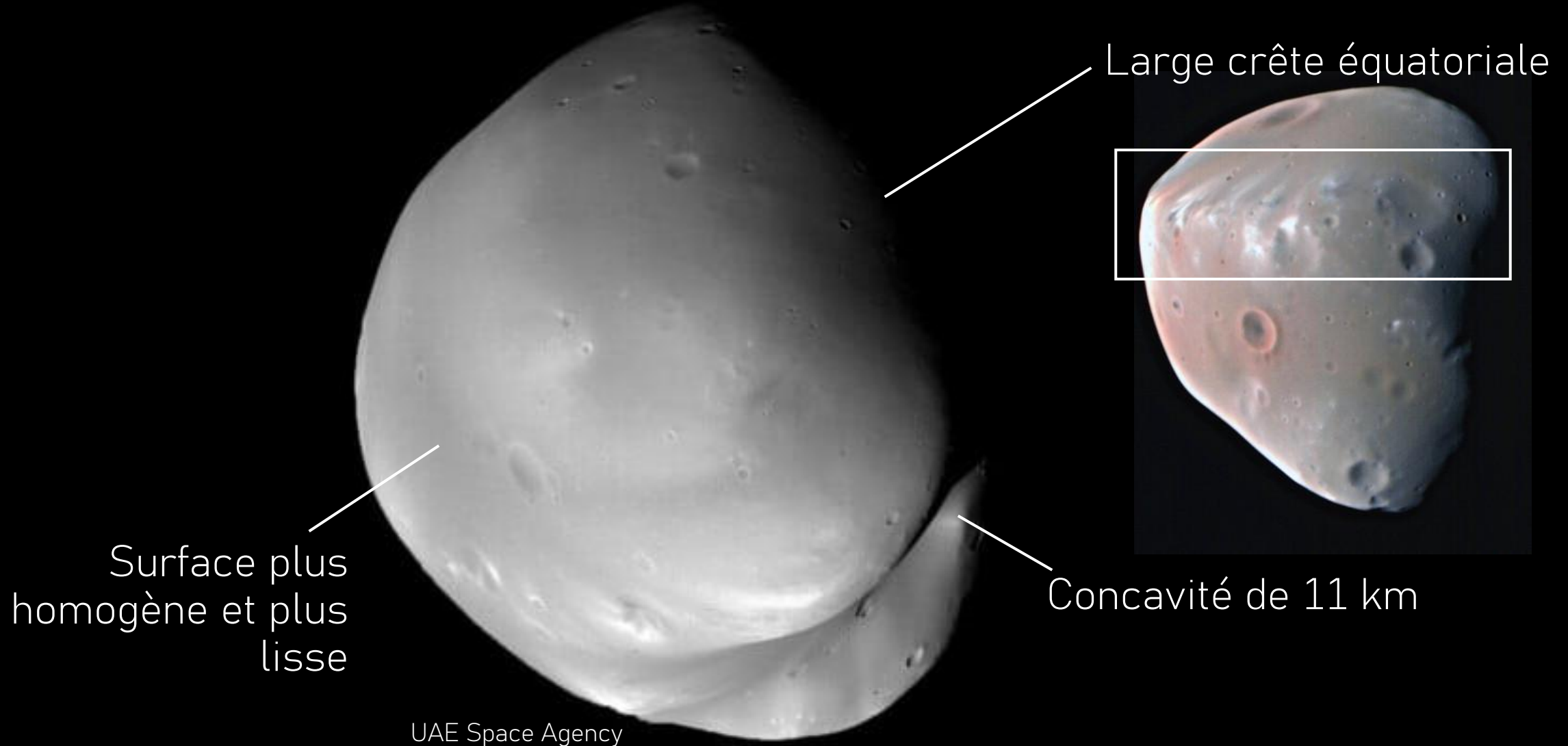
Caractéristiques géologiques de Déimos



Caractéristiques géologiques de Déimos



Caractéristiques géologiques de Déimos

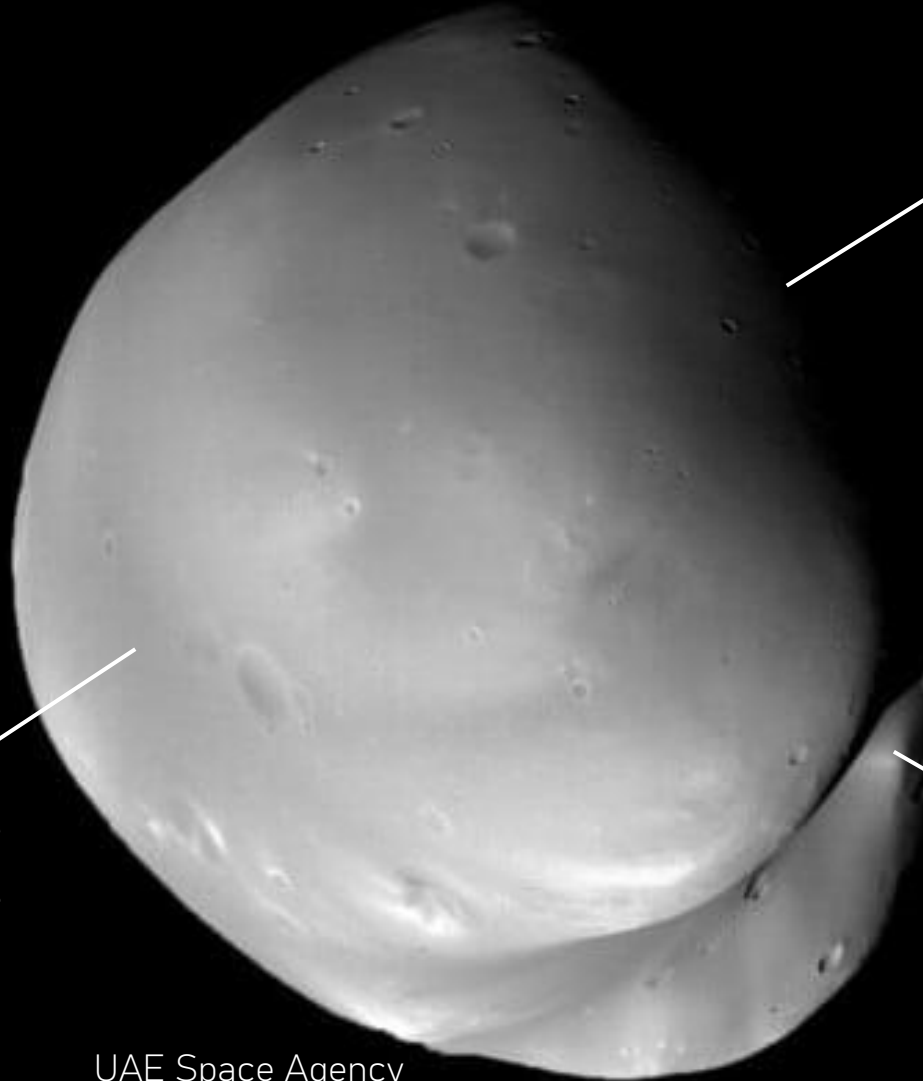


Caractéristiques géologiques de Déimos



Vue de la sonde Hera

Surface plus
homogène et plus
lisse



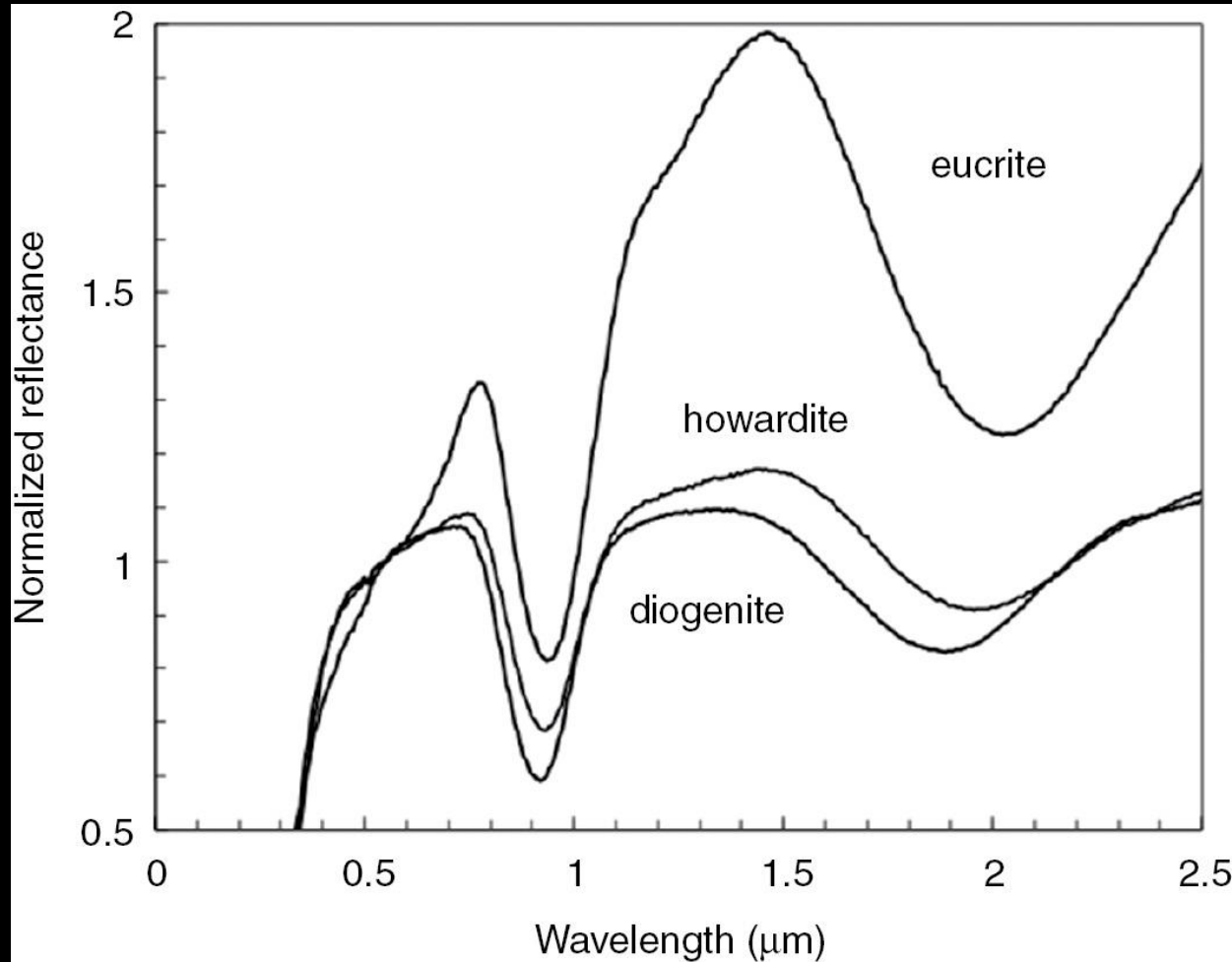
UAE Space Agency

Large crête équatoriale



Concavité de 11 km

La spectroscopie en réflectance



Burbine TH, 2016

- Réflectance : proportion de lumière réfléchiée par une surface
- Mesure de la réflectance d'un objet en fonction de la longueur d'onde
- Caractéristiques :
 - Rouge/Bleu : évolution réflectance avec longueur d'onde
 - Bande d'absorption : composition

La spectroscopie en réflectance

→ Classification des astéroïdes

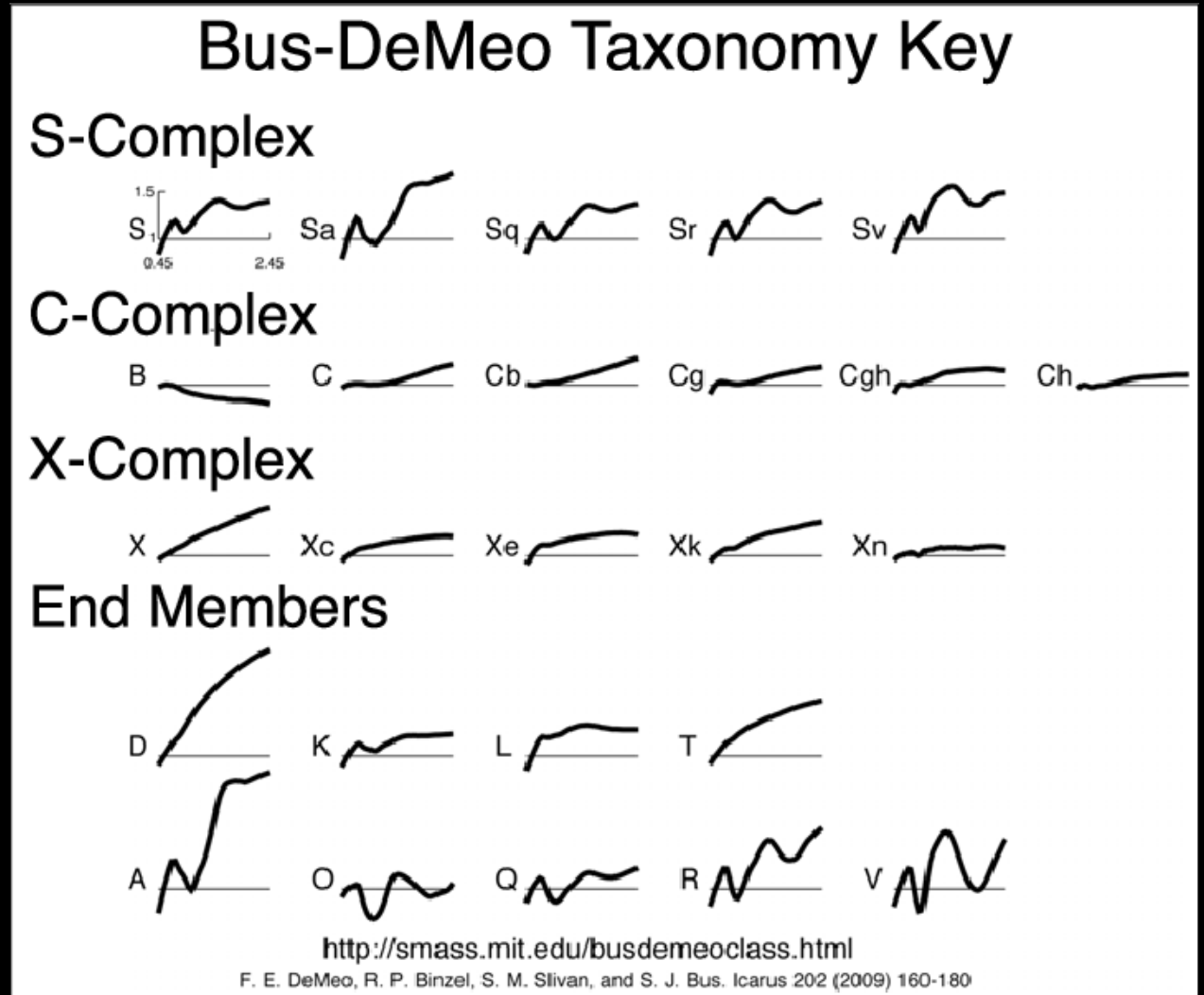
Astéroïdes silicatés



Astéroïdes carbonés



Astéroïdes à diverses compositions



La spectroscopie en réflectance

→ Classification des astéroïdes

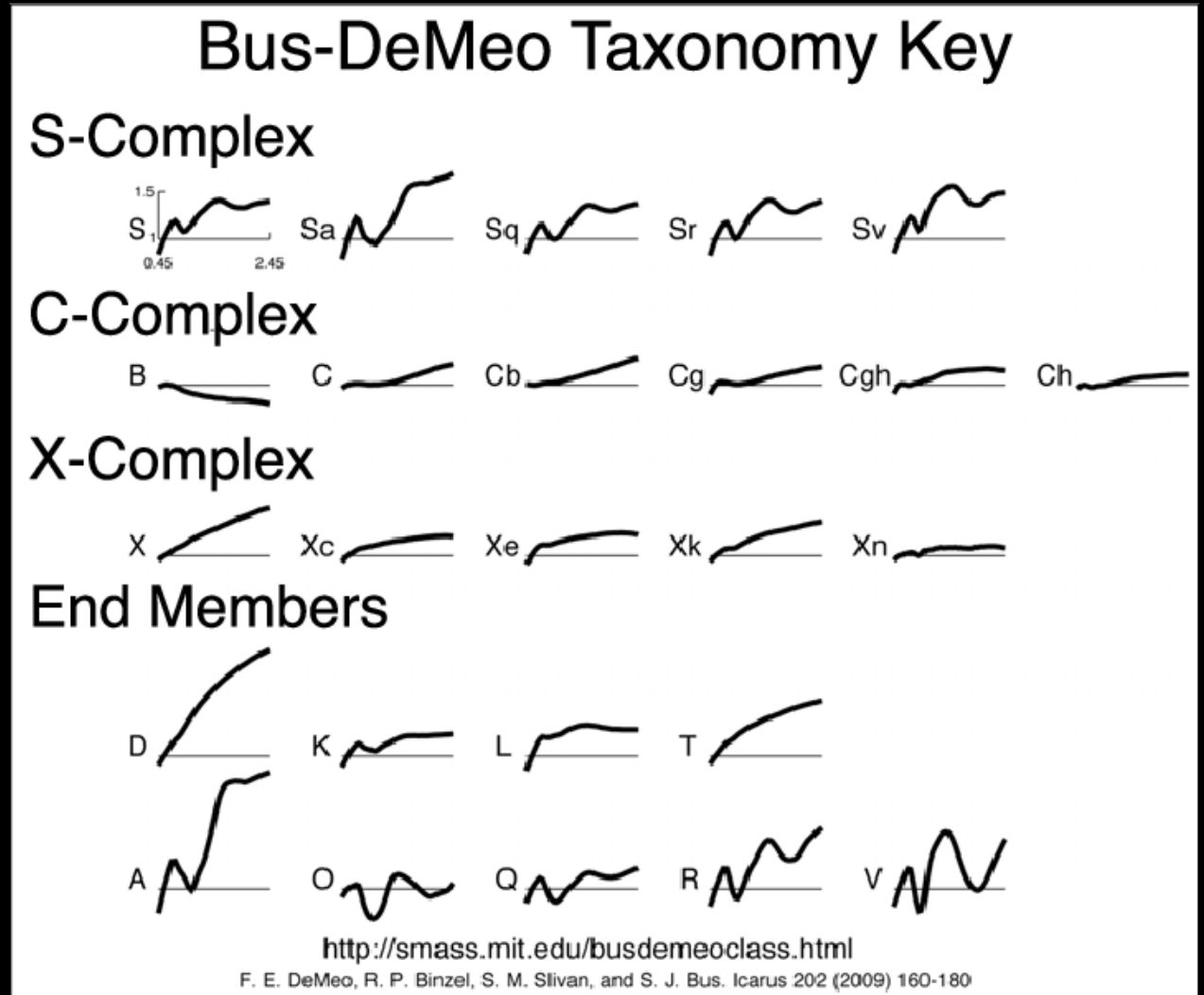
Astéroïdes silicatés →

Astéroïdes carbonés →

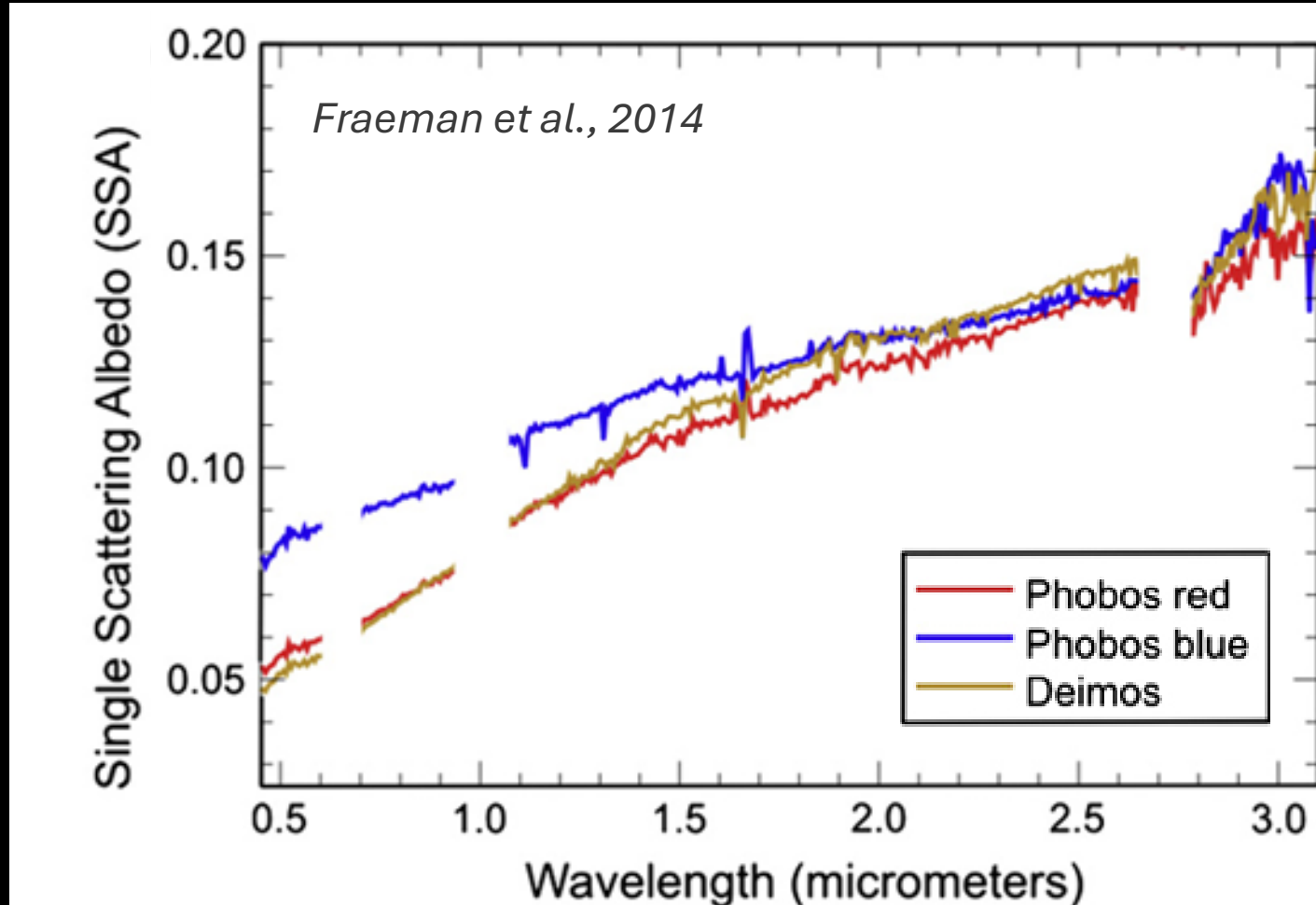
Astéroïdes à diverses compositions →

Bandes d'absorption:

- Minéraux hydratés : 1,9 μm et 2,7 μm
- Carbonates : ~3,3 μm
- Organiques : ~3,4 μm



Propriétés spectroscopiques des lunes



➤ 2 régions sont clairement identifiables sur Phobos: l'unité **bleue** et l'unité **rouge**

L'unité bleue est principalement présente aux abords des cratères mais pas que...

➤ Moins de variations de réflectance sur Déimos

La crête équatoriale est plus brillante que le reste de la surface

➔ Encore beaucoup d'incertitudes sur leur composition

Résumé sur les lunes

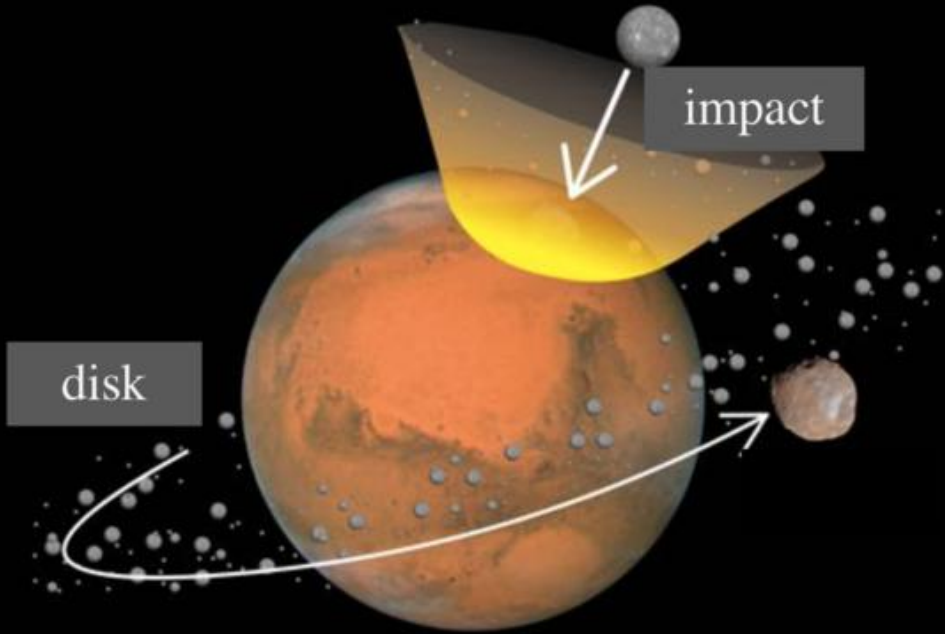
- Géologiquement : formes irrégulières, sombres, avec cratères
- Spectralement : rouges, sans caractéristique particulière

Incertitudes sur leur composition → quelle est leur origine ?

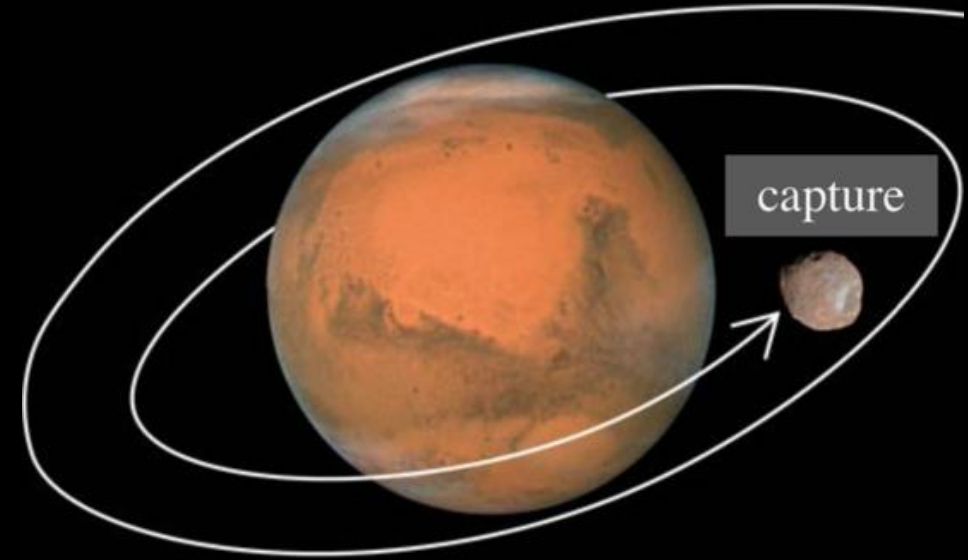
Incertitudes sur l'origine des lunes



Les hypothèses de formation

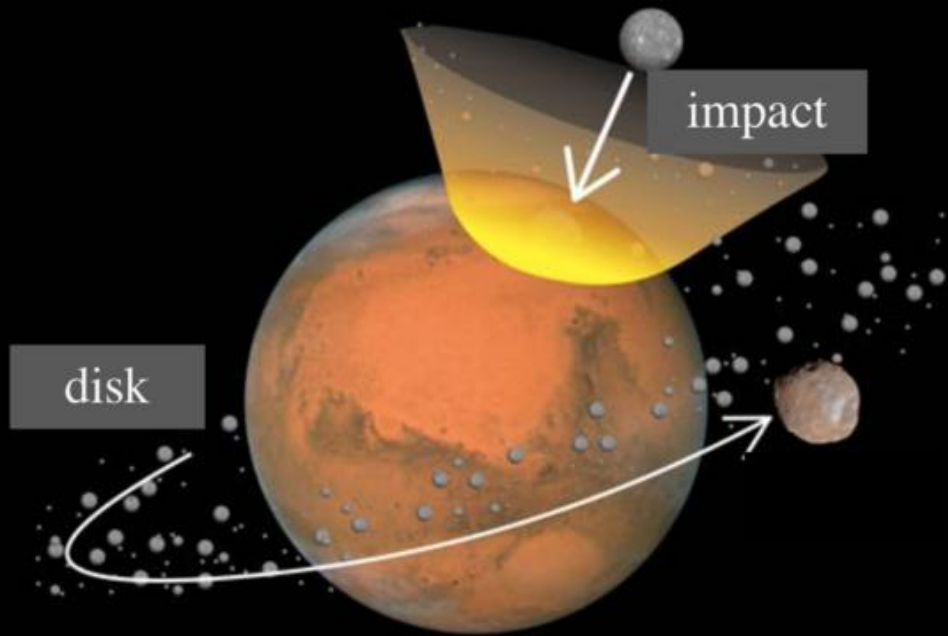


Collision entre un impacteur et Mars



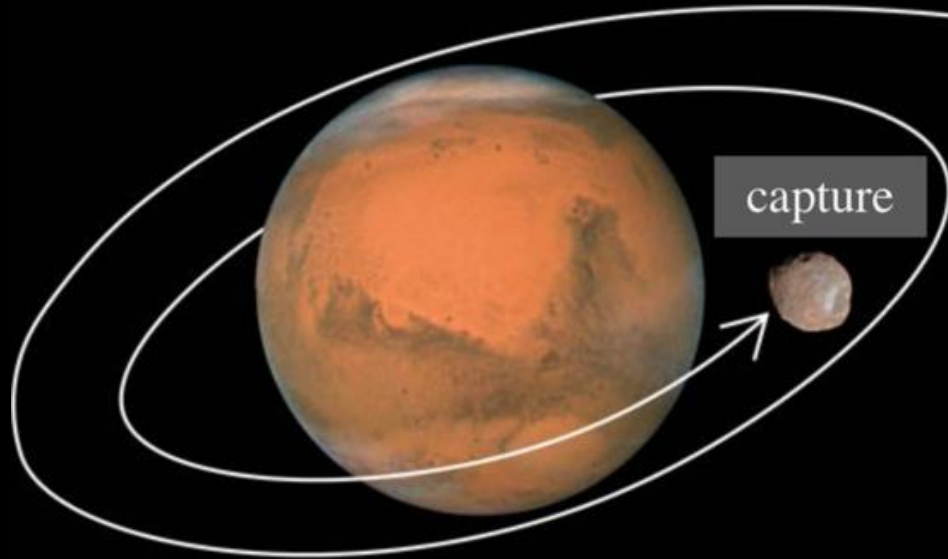
Capture d'astéroïdes

Hypothèse d'un impact



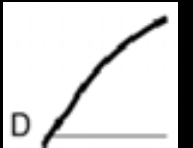
- Excentricité et inclinaison faibles : impact géant, similaire à ce qui est arrivé à la Terre pour former la Lune
- Composition potentielle : mélange entre composition martienne et de l'impacteur
- Mais pas cohérent avec caractéristiques spectrales (=> altération spatiale ?)

Hypothèse d'une capture



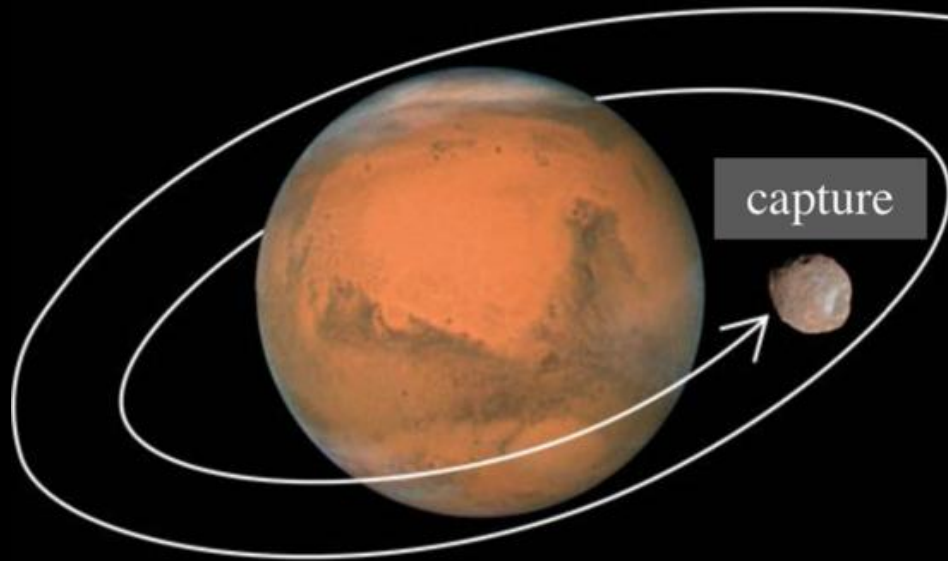
→ La forme des lunes et leur spectre sont similaires à ce qu'on observe pour des astéroïdes (chez le groupe Hilda ou des troyens)

→ Composition potentielle : astéroïde primitif



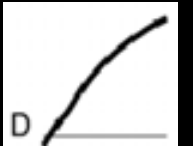
→ Mais n'explique pas l'orbite actuelle

Hypothèse d'une capture



→ La forme des lunes et leur spectre sont similaires à ce qu'on observe pour des astéroïdes (chez le groupe Hilda ou des troyens)

→ Composition potentielle : astéroïde primitif



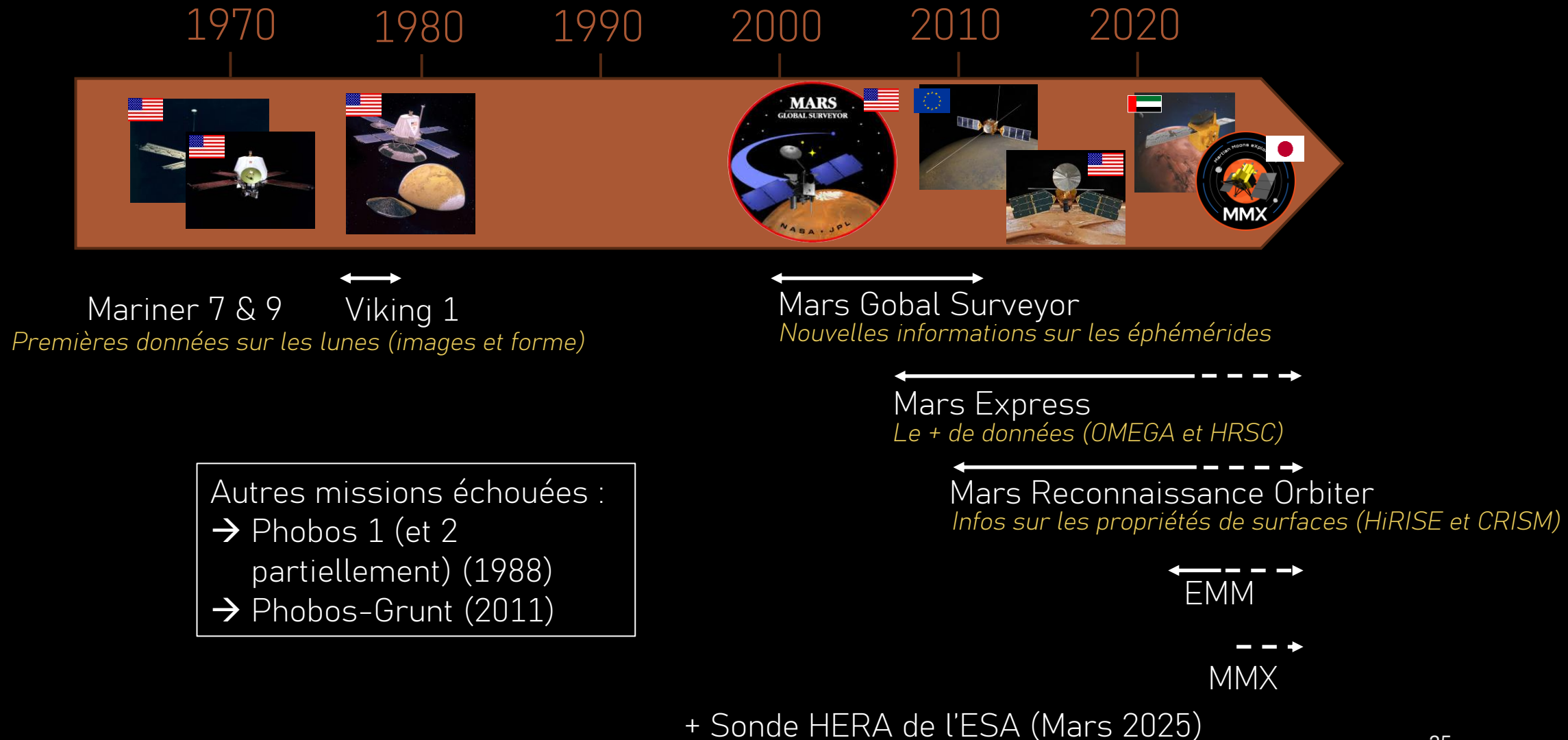
→ Mais n'explique pas l'orbite actuelle

Nécessité d'une mission *in situ* pour en savoir plus

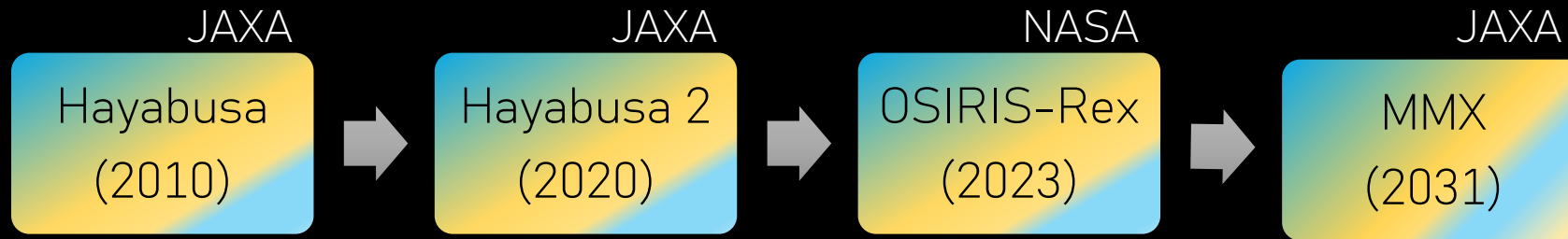


Les missions vers Mars et les petits corps

Missions passées vers Mars et ses lunes

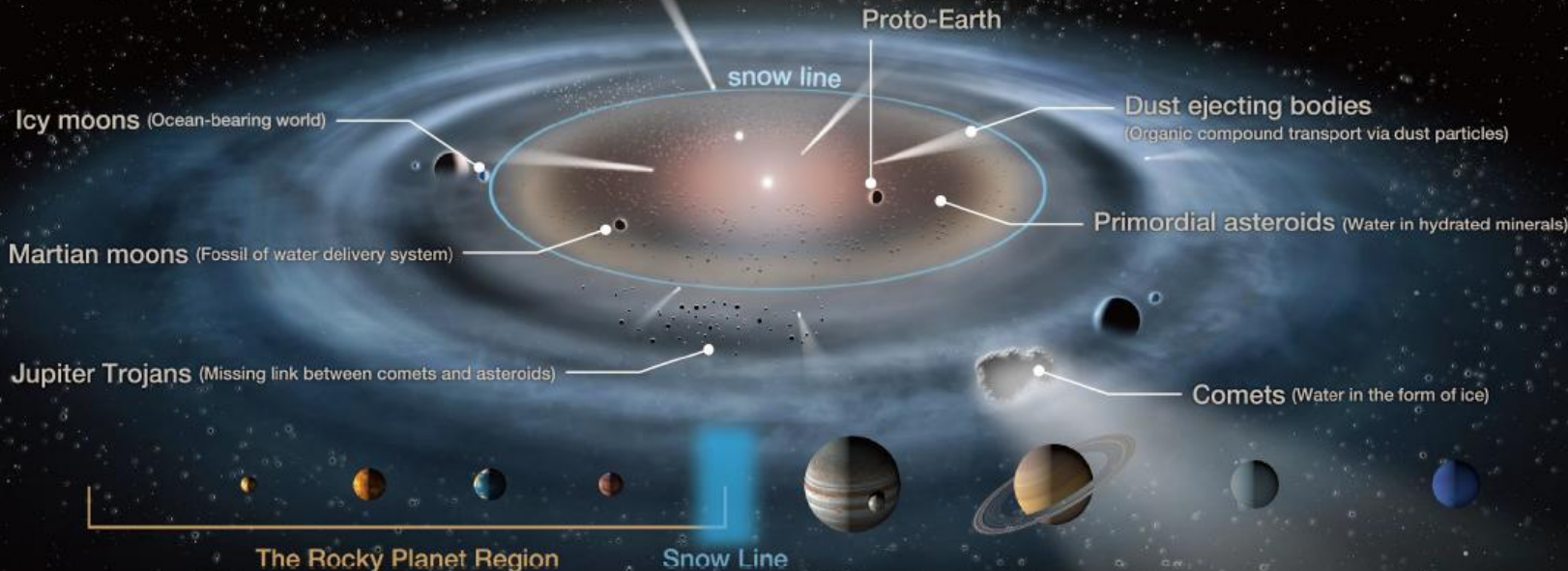


Missions de retour d'échantillons vers les petits corps



Many small bodies are born outside the snow line. These are initially comet-like but can evolve to show a variety of faces. By delivering water and organic compounds, these small bodies may have enabled the habitability of our planet.

When, who and how?



Autres:

- Tianwen 2 (2025-2035)
- Comet-I

The background of the slide is a composite image. It features a reddish-orange, cratered surface, likely Mars, in the upper half. In the lower half, a dark, irregularly shaped asteroid is visible against a black background. A spacecraft, resembling the Orion crew module, is positioned in the center-left, with its solar panels extended. The spacecraft is illuminated from the left, casting a shadow on the surface below it.

La mission

Conception et objectifs

Conception d'une mission

Années 2010 : intérêt de la JAXA pour les lunes martiennes

Planification de la mission 2015 - 2020

9 juin 2015 : Annonce de la mission MMX par la JAXA

Phase 0-A : concept → analyses → choix lanceur → risques → simulations

2015 - 2020 : évaluation, étude faisabilité, collaborations avec autres agences

Développement de la mission 2020 - 2026

Développement, construction et test des instruments (phases B → C/D)

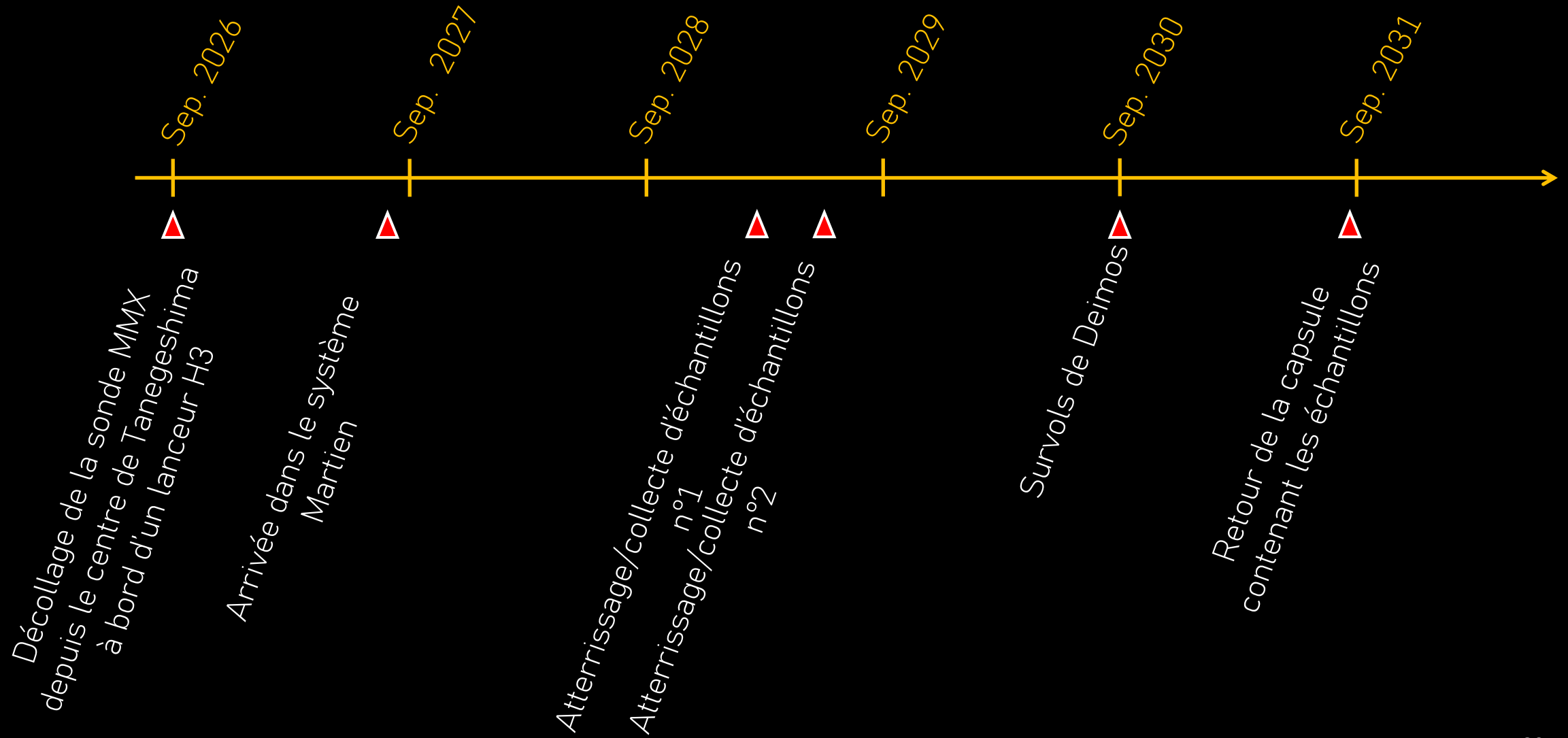
Environ 10 ans après le début de sa planification, la mission peut être lancée !

La mission



- Lancement en octobre 2026
- En orbite autour de Mars durant 3 ans (2027 – 2030)
- Etude des lunes :
 - Phobos : obs. à distance & in situ
 - Déimos : obs. à distance
- et du système martien
- Retour d'échantillon (>10g) de Phobos (2031)
- Le premier retour d'échantillon du système martien

Le calendrier de la mission



Objectifs de la mission

- ❖ Clarifier l'origine des lunes martiennes et les processus de formation planétaire dans le Système Solaire

Composition ? Matériaux organiques, exogènes, minéraux hydratés ? Glace ?
Différence unité bleue/rouge ?
Expliquer la faible densité : « rubble-pile » ? Glace d'eau à l'intérieur ?
Origines de Phobos et Déimos similaire ?
Evolution des lunes martiennes dans cet environnement spécifique ?

Objectifs de la mission

- ❖ Clarifier l'origine des lunes martiennes et les processus de formation planétaire dans le Système Solaire

Composition ? Matériaux organiques, exogènes, minéraux hydratés ? Glace ?
Différence unité bleue/rouge ?
Expliquer la faible densité : « rubble-pile » ? Glace d'eau à l'intérieur ?
Origines de Phobos et Déimos similaire ?
Evolution des lunes martiennes dans cet environnement spécifique ?

- ❖ Révéler les processus évolutifs dans le système martien

La sonde MMX

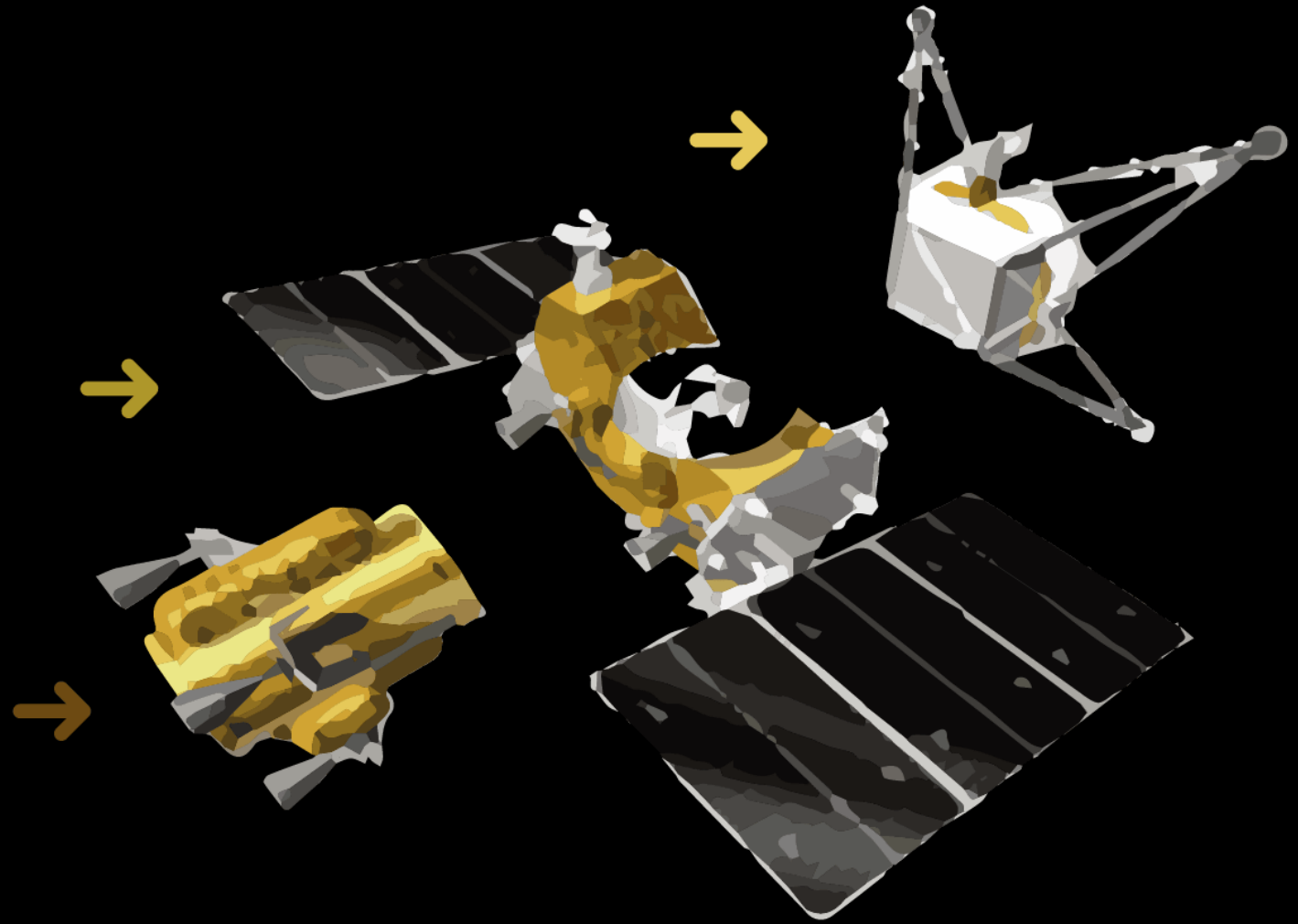
Module d'exploration

Module de retour

1100 kg

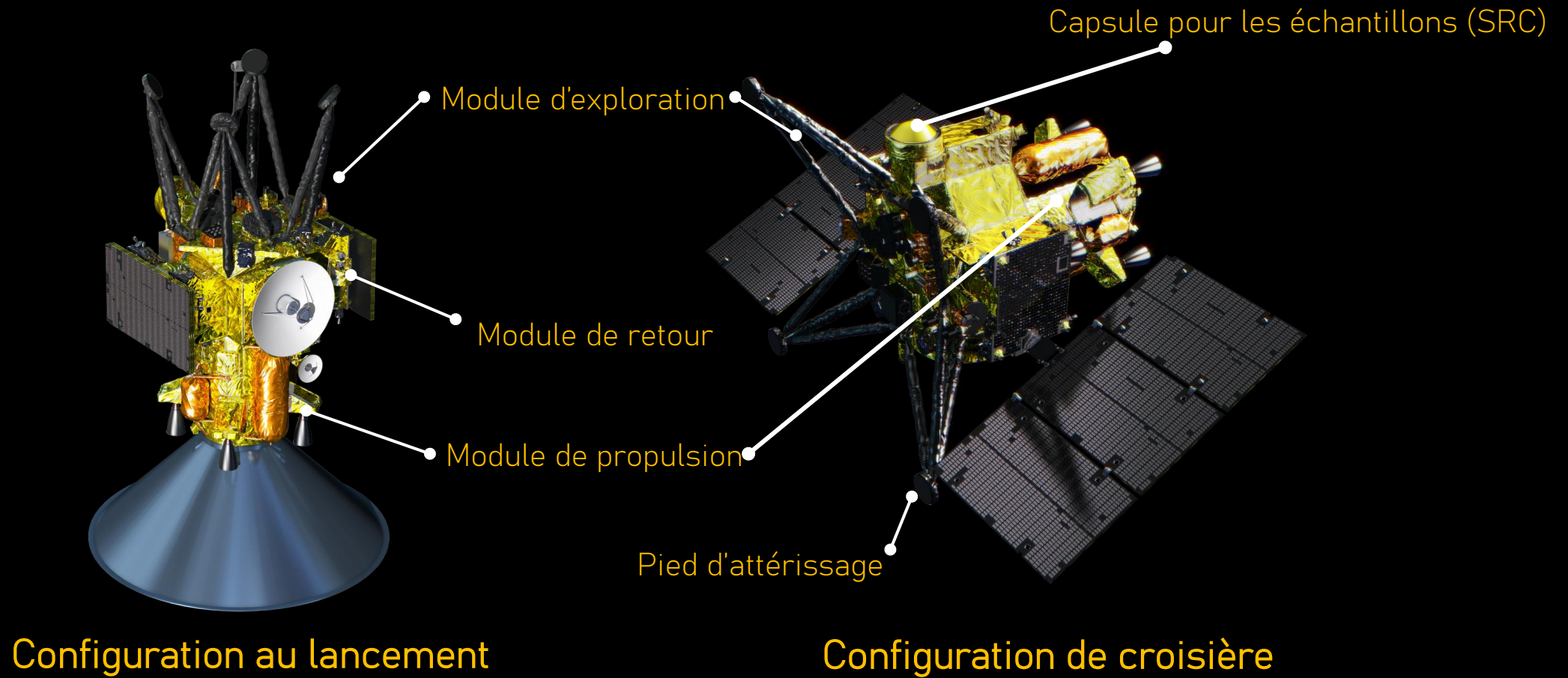
Module de propulsion

1750 kg







Au lancement, la sonde pèse 4200 kg

La sonde MMX

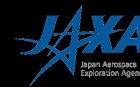


Les instruments à bord de MMX

13 instruments:

- TENG00: TElescopic Nadir imager for GeOmOrphology
- OROCHI: Optical RadiOmeter composed of Chromatic Imagers
- MIRS: MMX InfraRed Spectrometer 
- MEGANE: Mars-moon Exploration with Gamma rays and NEutrons 
- LIDAR: LIght Detection And Ranging
- IDEFIX: A rover with a raman spectrometer, cameras, and a radiometer  
- CMDM: Circum-Martian Dust Monitor
- MSA: Mass Spectrum Analyzer
- SMP: Pneumatic and Coring samplers
- SRC: Sample Return Capsule
- IREM: Interplanetary Radiation Environment Monitor
- SHV: Super Hi-Vision Camera

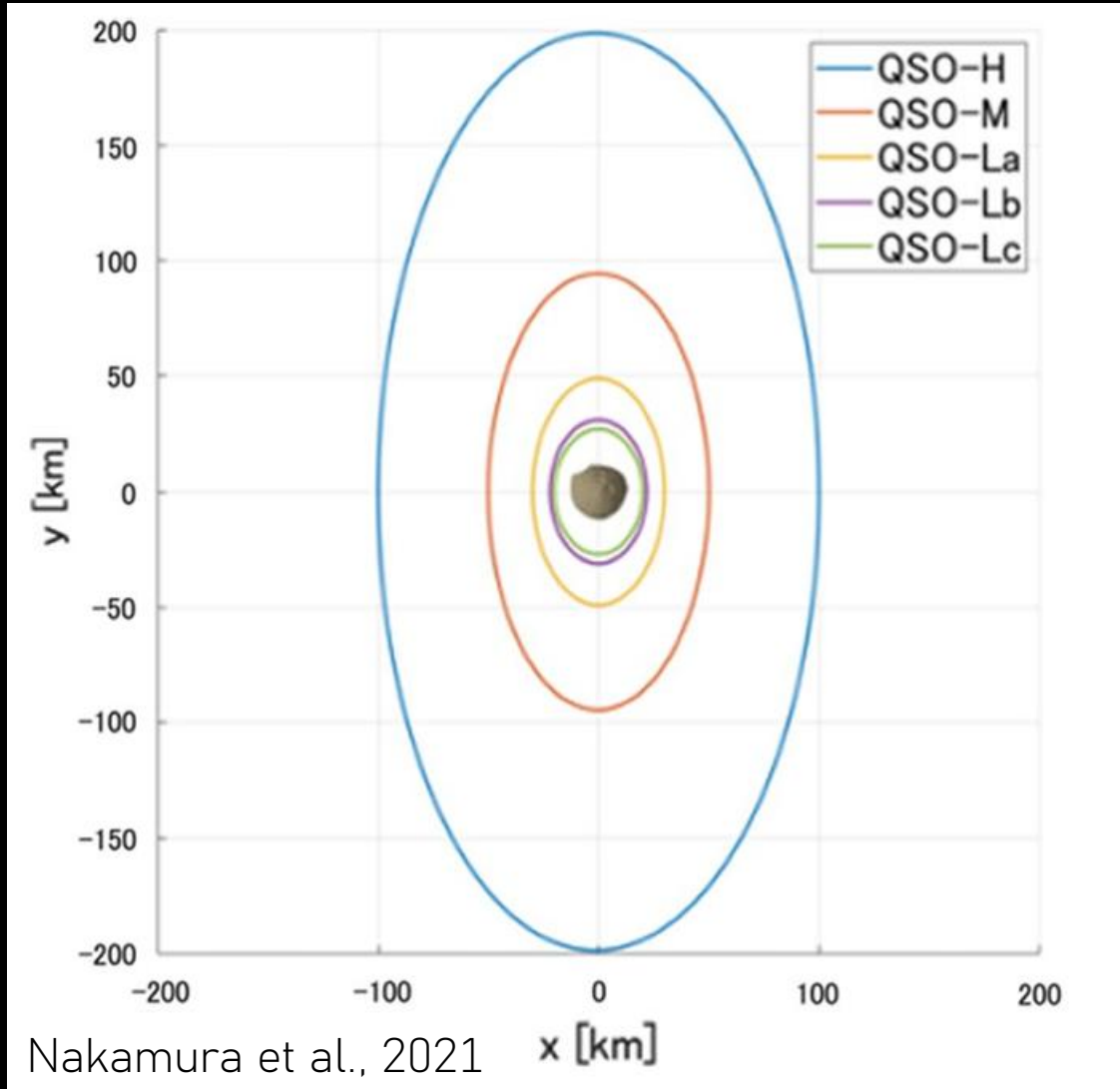
Collaboration internationale :
JAXA, NASA, ESA, CNES, DLR



→ apport de l'expertise de chaque agence

La sonde MMX

La sonde se mettra en orbite quasi-satellitaire autour de Phobos à différentes altitudes







Chaque instrument jouera un rôle selon l'altitude :

- Phases QSO-H : cartographie (spectrale et géomorphologique) globale de Phobos
- Phases QSO-M : cartographie à meilleure résolution
- Phases QSO-L : Caractériser les sites d'atterrissage (MIRS, OROCHI, TENG00) ; comprendre les processus de modification de surface (MEGANE)

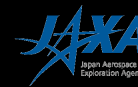
+ Déimos observé en survol

Les instruments à bord de MMX

13 instruments:

- TENG00: TElescopic Nadir imager for GeOmOrphology
- OROCHI: Optical RadiOmeter composed of Chromatic Imagers
- MIRS: MMX InfraRed Spectrometer 
- MEGANE: Mars-moon Exploration with Gamma rays and NEutrons 
- LIDAR: LIght Detection And Ranging
- IDEFIX: A rover with a raman spectrometer, cameras, and a radiometer  
- CMDM: Circum-Martian Dust Monitor
- MSA: Mass Spectrum Analyzer
- SMP: Pneumatic and Coring samplers
- SRC: Sample Return Capsule
- IREM: Interplanetary Radiation Environment Monitor
- SHV: Super Hi-Vision Camera


Collaboration internationale :
JAXA, NASA, ESA, CNES, DLR



→ apport de l'expertise de chaque agence

The background of the slide is a composite image. It shows a reddish-orange planet, likely Mars, with numerous impact craters. In the upper left, a satellite with two large solar panel arrays is in orbit. In the lower right, a dark, irregularly shaped asteroid is visible. A semi-transparent black rectangular box is centered over the image, containing the title text in white.

Les instruments IDEX et MIRS



L'instrument IDEFIX

Le rover

IDEFIX



Développé dans
le cadre d'une
collaboration
CNES/DLR



CNES /DLR

- Un rover (25 kg) équipé de 4 instruments:
des caméras (navigation & observation), un
spectromètre Raman, et un radiomètre
infrarouge
- Lâché depuis la sonde principale à une
altitude de 40m, début 2029
- Conçu pour survivre > 100 jours à la surface
de Phobos (g/1700) (Vitesse : 1 mm/s)
- Mesure des propriétés mécaniques,
thermiques et minéralogiques de surface
➔ « Eclaireur » pour les sites
d'atterrissage

The background of the slide is a composite image. It features the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) in the foreground, showing its solar panels and instruments. The orbiter is positioned as if it's in orbit over the surface of Mars, which is visible as a reddish-orange, cratered landscape. In the upper right background, there is a dark, irregularly shaped asteroid or small planet. The text 'L'instrument MIRS' and 'Le spectro-imageur' is overlaid on a dark, semi-transparent rectangular area in the center of the image.

L'instrument MIRS

Le spectro-imageur

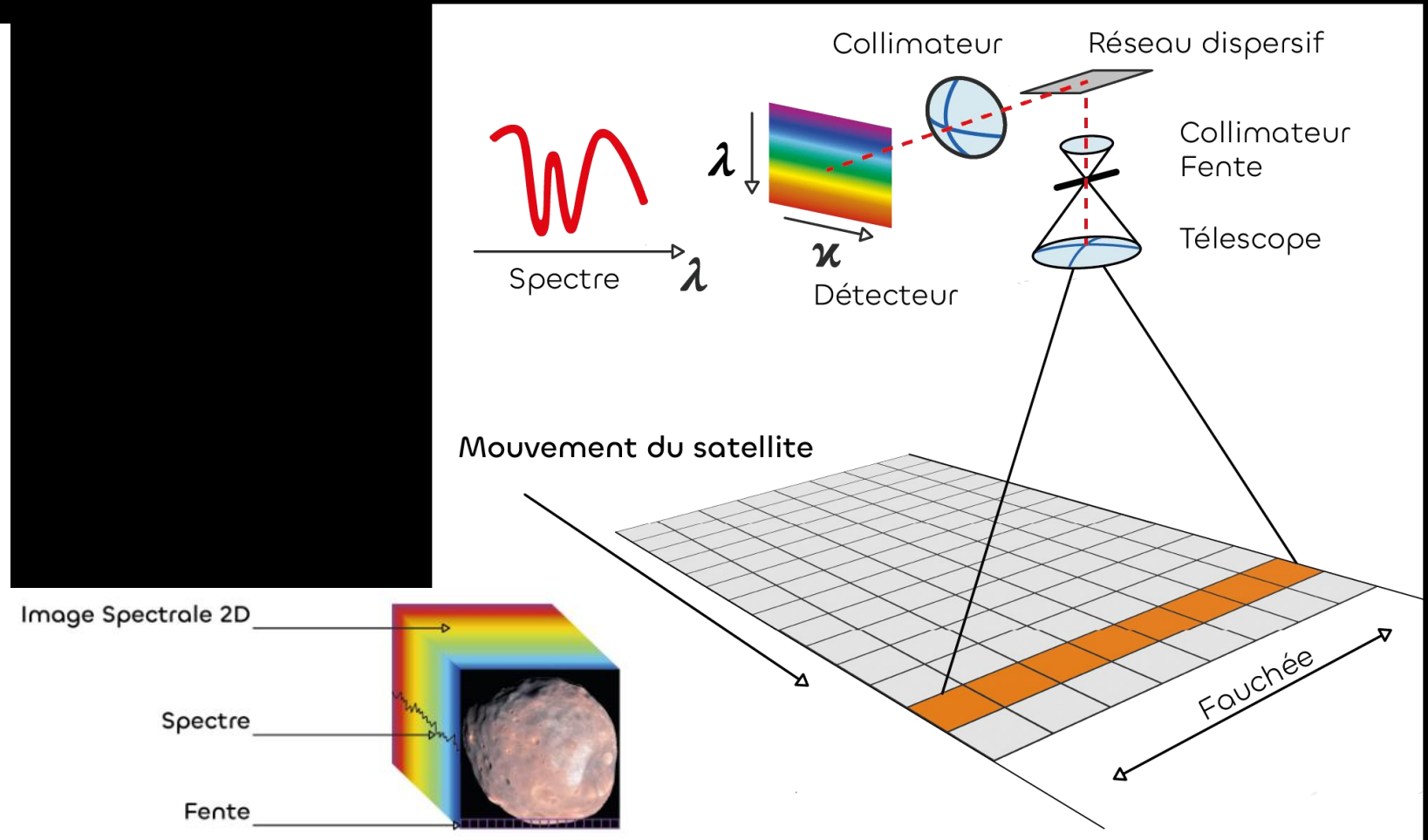
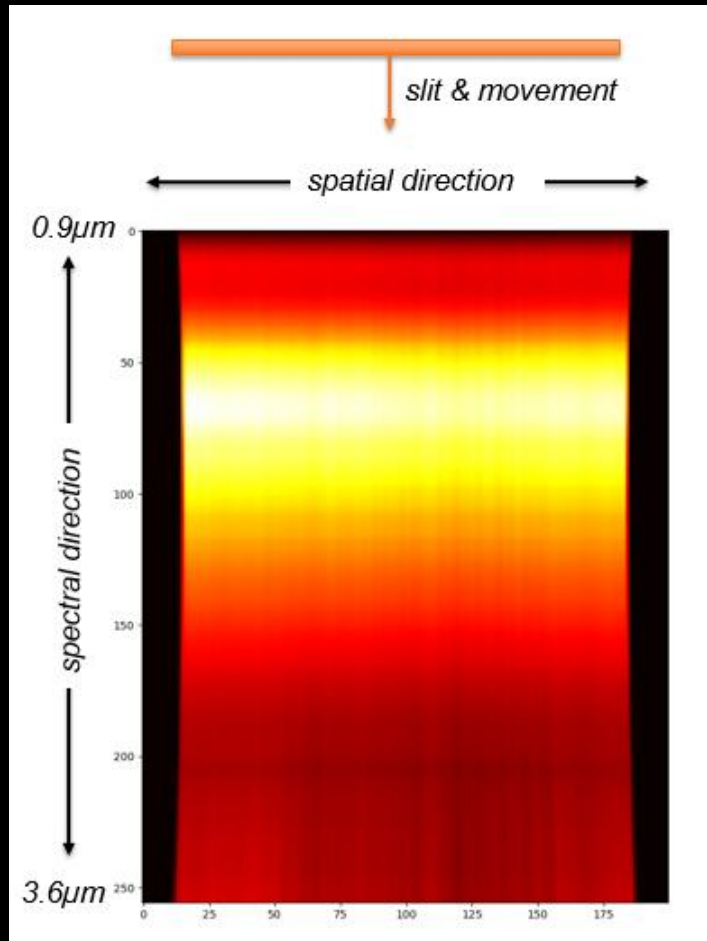
Les laboratoires concernés par MIRS

Plus de 100 ingénieurs en France et plus de 40 scientifiques en France et au Japon impliqués dans le développement de MIRS

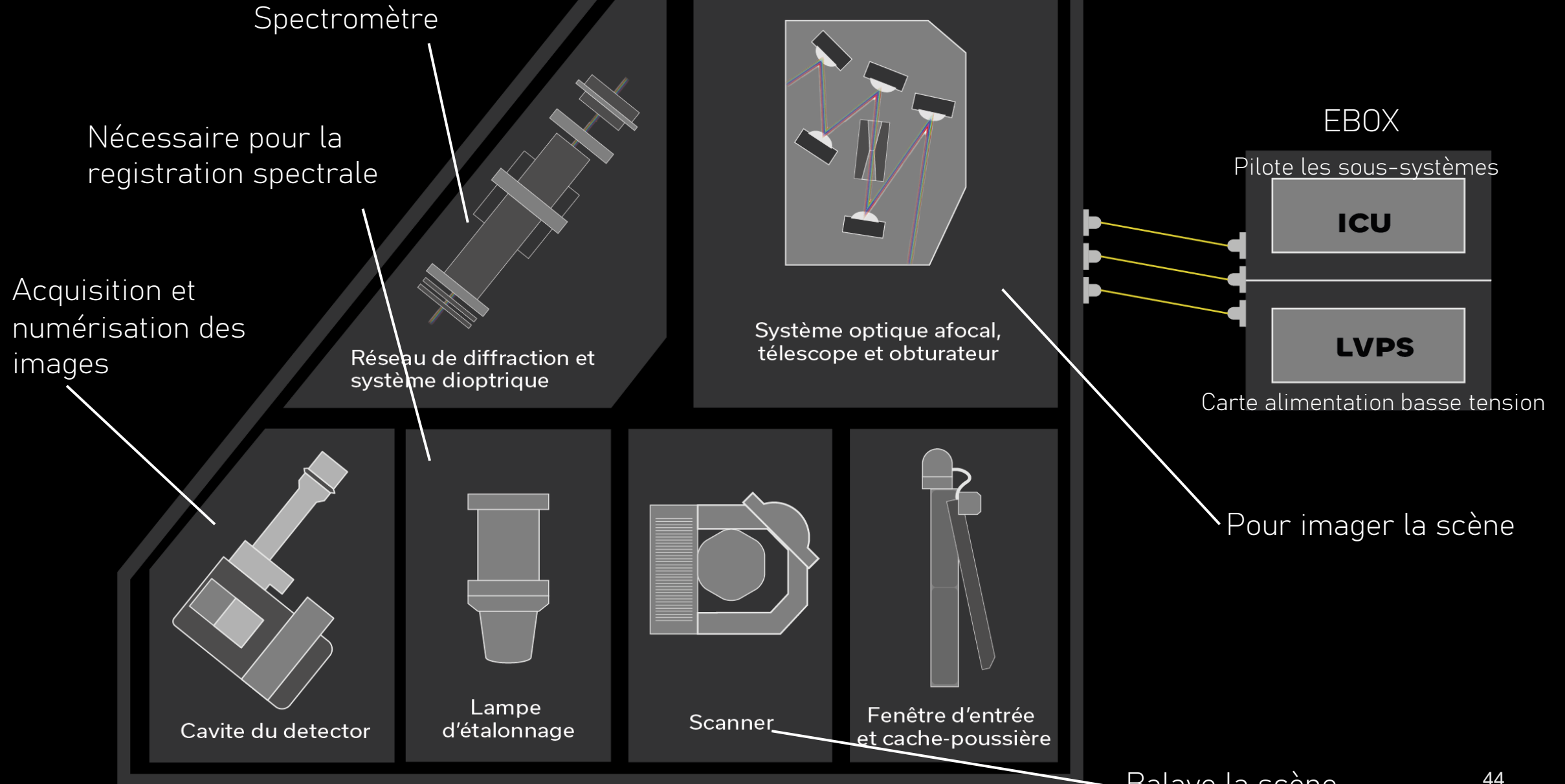


Concept

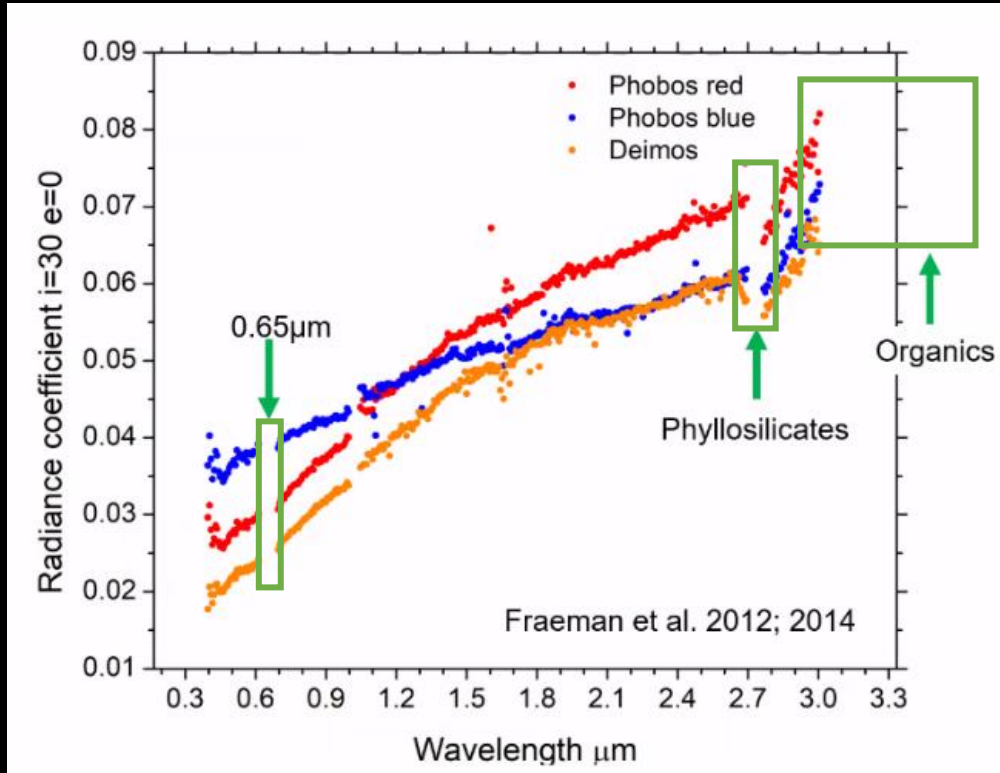
- Spectro-imageur infrarouge
- « Push-broom scanner »
- Domaine spectral: 0.9 – 3.6 μm résolution 20 m/px)
- Acquisition de données des lunes et de l'atmosphère de Mars



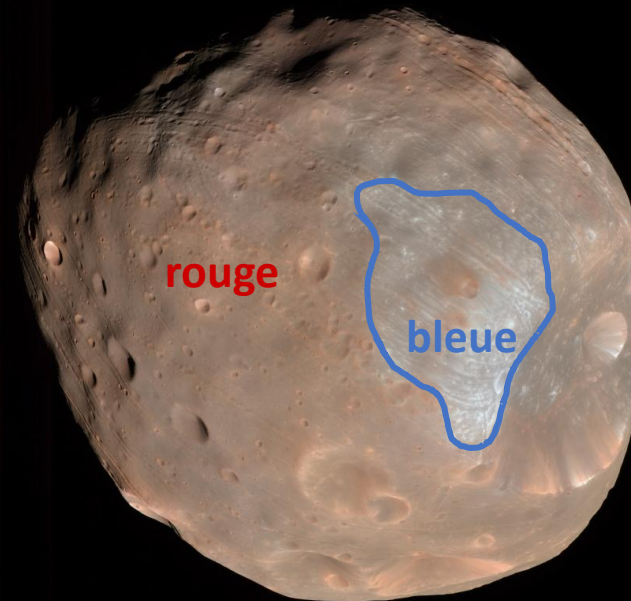
Modèle de vol



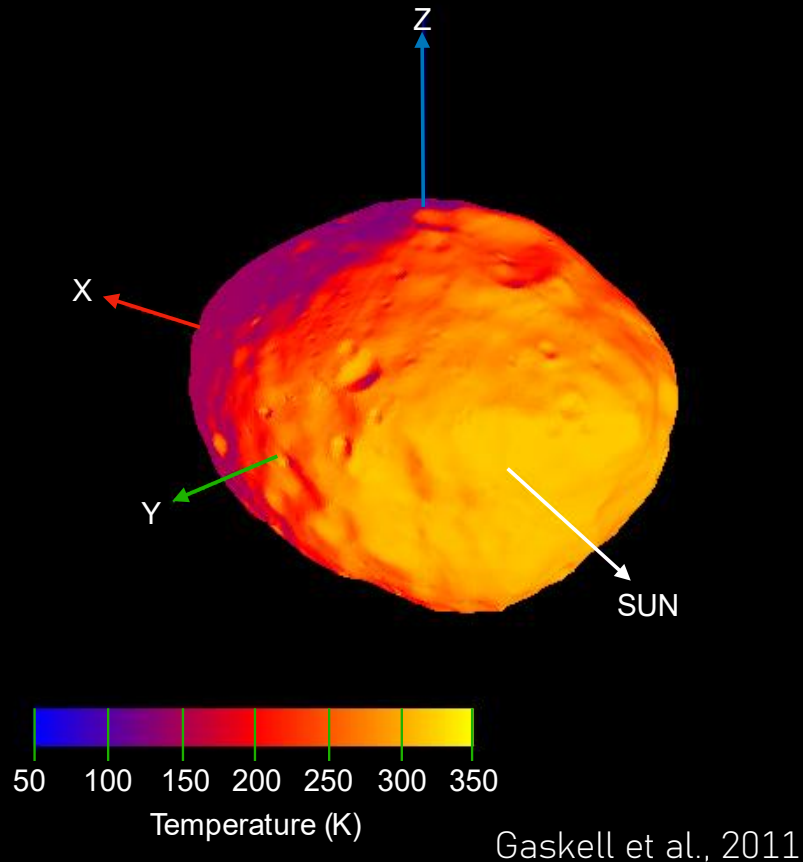
Objectif de l'instrument – sur les lunes



- Couvrir les précédents **manques de données spectrales**
- Observer les bandes d'absorption des minéraux (eau, organiques, silicates hydratés) (2,6 – 3,5 μm)
- Identifier l'unité **rouge** (rougie par l'érosion spatiale) et l'unité **bleue** (localisé et frais).



Objectif de l'instrument – sur les lunes



- Température de surface (variation spatiale et temporelle)
- Inertie thermique

+ Instrument fondamental pour contribuer à la sélection des deux sites de collecte des échantillons sur la surface de Phobos (observera à 400 m au dessus de Phobos)

Objectif de l'instrument – sur Mars

- Observation globale, de longue durée et fréquente de Mars pour élucider (pendant éclipses de Phobos):

Les transports d'eau et de poussières dans l'atmosphère, la formation des nuages, genèse des tempêtes de poussière

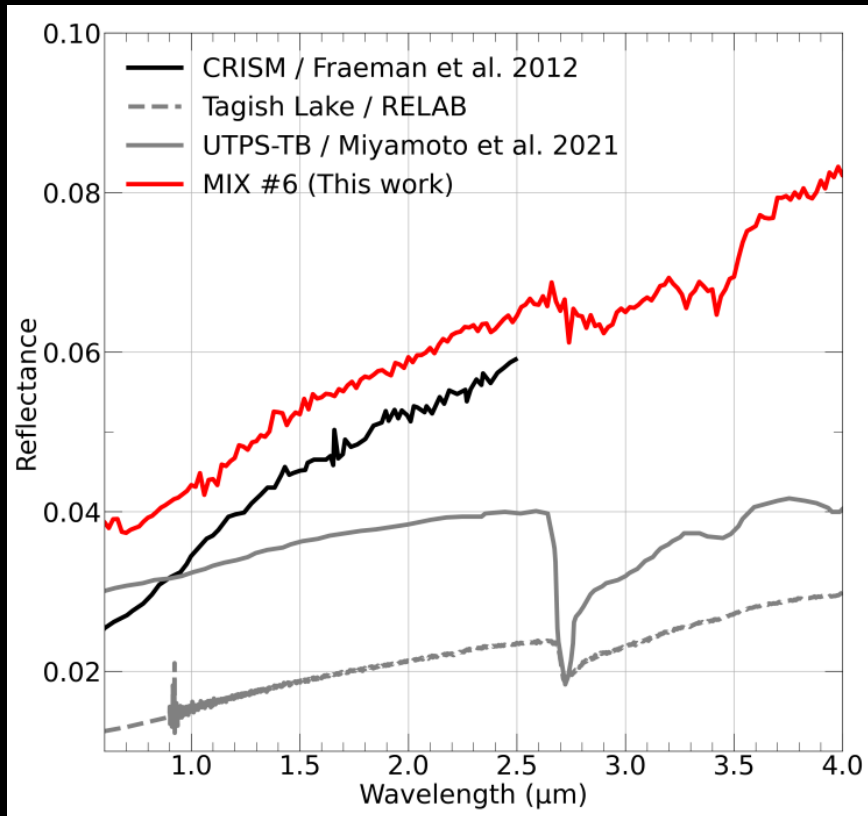


Viking 1

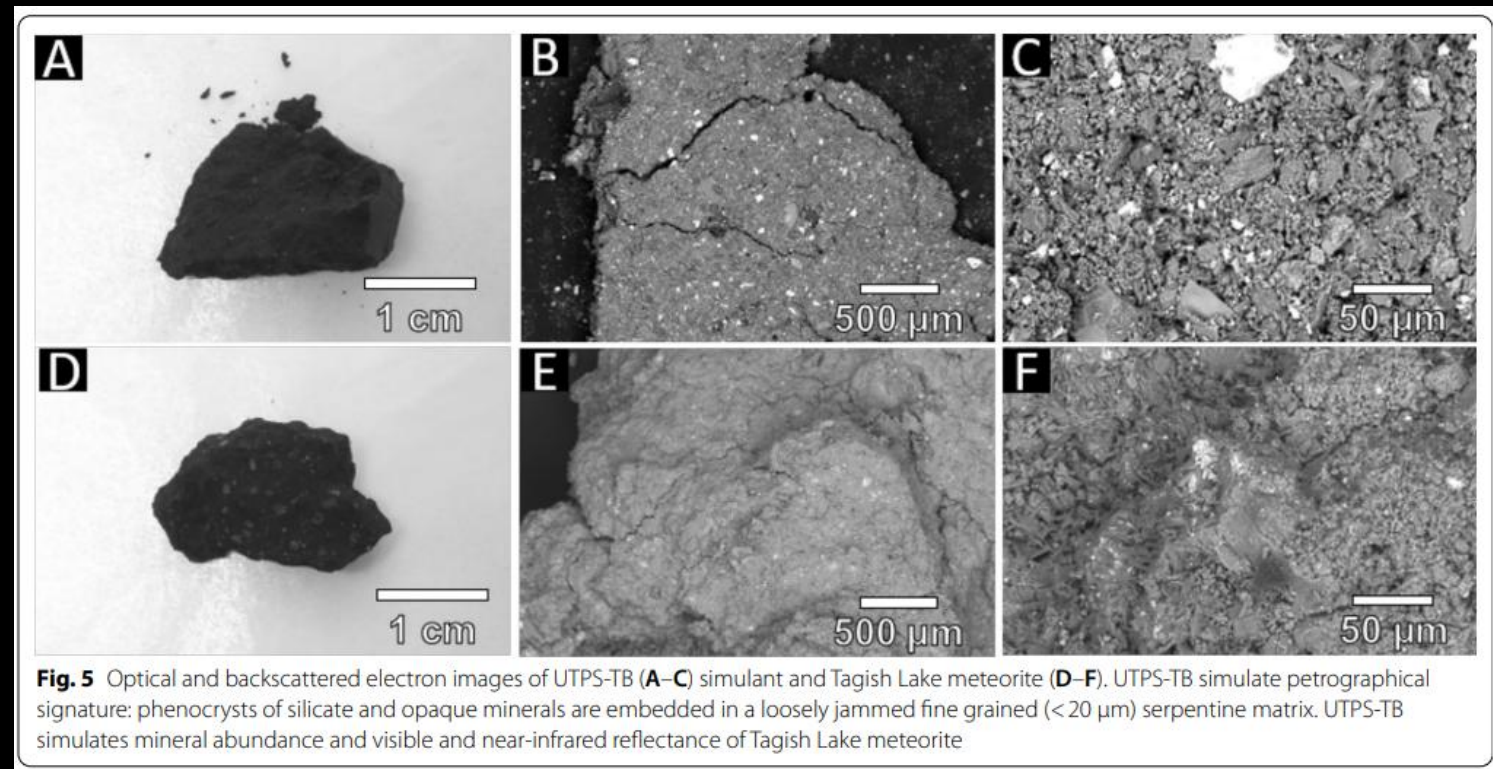
Préparer la mission

En préparation à la mission – Laboratoire

Création de « simulants » (analogues aux lunes) selon le scénario de formation



Wargnier et al., 2023



Miyamoto et al., 2021

En préparation à la mission – Laboratoire

Etude de paramètres influençant les spectres observés sur les lunes

- ➔ Nécessité de mesures en laboratoire
- ➔ Utilisation du modèle d'ingénierie (EM = engineering model) de MIRS

Paramètres qui exercent une influence sur les spectres :

- La taille des grains
- La composition
- La géométrie d'observation

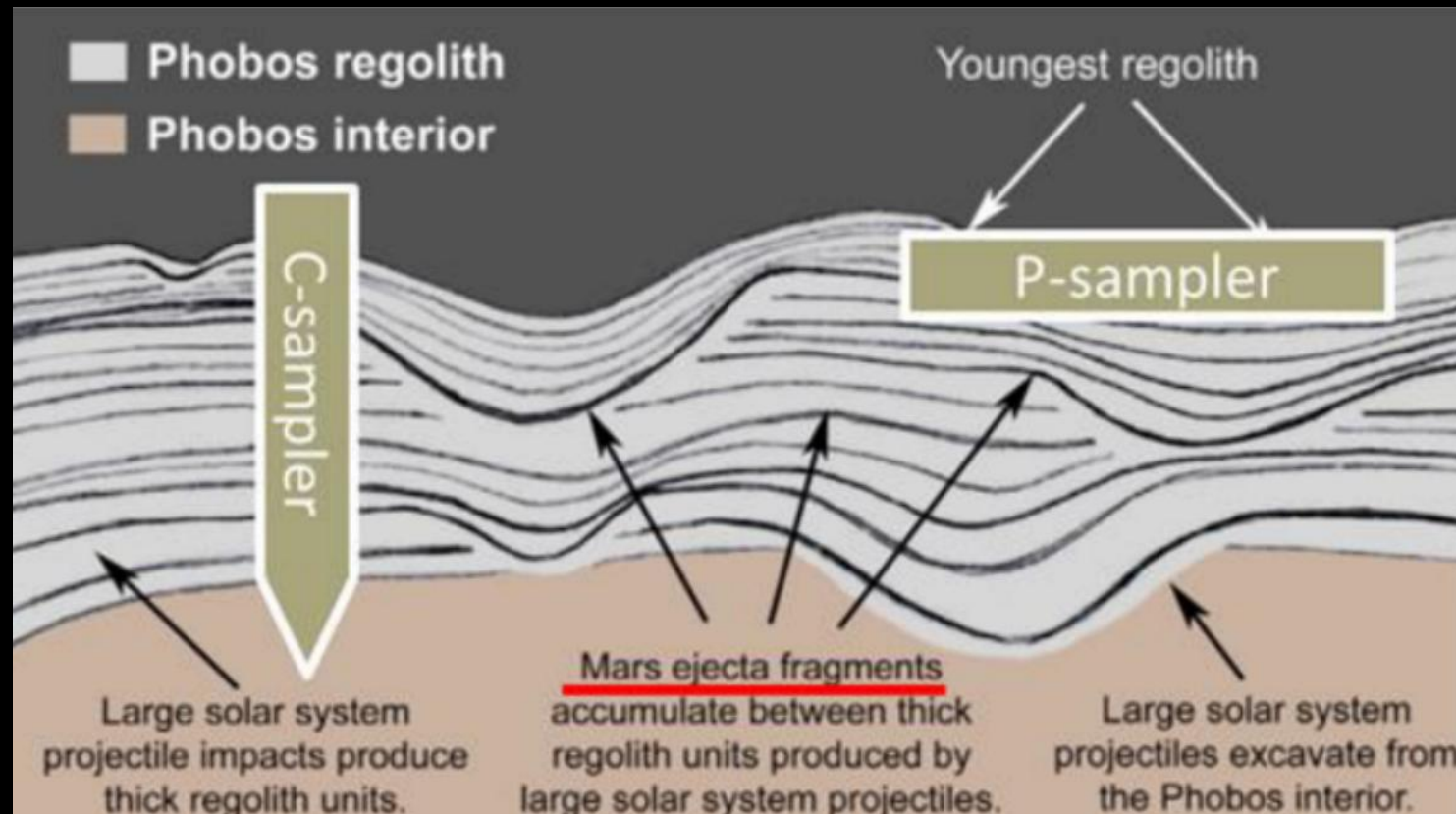
Retour d'échantillons



Mécanismes d'échantillonnage

- Différence avec Hayabusa et Osiris-Rex : 2 mécanismes
- Deux mécanismes d'échantillonnages:
 - carottage C-sampler de la JAXA
 - pneumatique P-sampler de la NASA

Proposer 2 types d'échantillonnage assure la bonne collecte d'échantillons sur une surface complexe



Les échantillons de Phobos

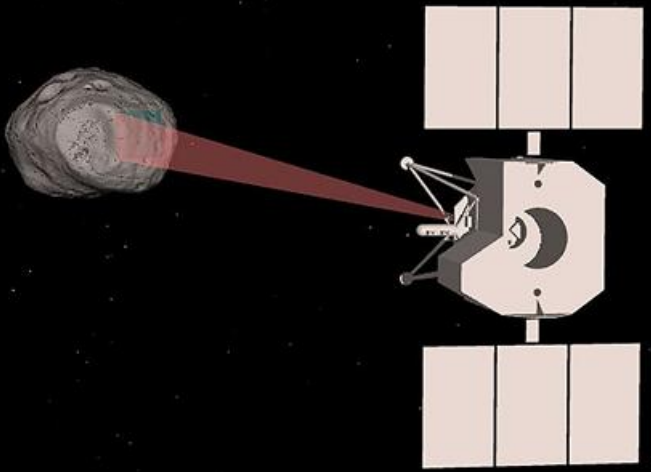
- La capsule contenant les échantillons arrivera dans le désert australien en 2031
- Analyses pétrologiques, chimiques, minéralogiques, isotopiques, recherche de composés organiques
- Une partie des échantillons sera délivrée à la France en 2032 (au MNHN)



Exemple des échantillons de Ryugu

Conclusion

Résultats attendus pour les lunes



Les données aideront à déterminer si :

- Composition proche des astéroïdes primitifs : similaire aux chondrites carbonées, matière organique/glace → une origine par capture
- Composition de matériaux formés à haute température, mélange de la croûte et du manteau martien → origine par impact géant

Ce qu'il faut retenir

- ➔ La mission est le fruit d'une collaboration internationale, proposant une étude complète des lunes
- ➔ Le rover et la collecte d'échantillons seront un défi technologique pour la mission
- ➔ Elle permettra d'élucider les processus d'évolution de l'environnement de Mars
- ➔ Les instruments de MMX ainsi que l'analyse des échantillons permettront de clarifier l'origine des lunes
= préciser l'histoire de la formation des planètes du Système solaire et apporter des indices sur la provenance de l'eau sur Terre

Petit récapitulatif sur MMX (et MIRS surtout)

<https://youtu.be/ibFYY9D4gm8>

Références

Barucci, M.A., Bernardi, P., Reess, J.M. *et al.* The MMX InfraRed Spectrometer (MIRS) for the spectral characterization of the Martian system. *Prog Earth Planet Sci* **12**, 69 (2025). <https://doi.org/10.1186/s40645-025-00746-y>

Burbine T.H. Reflectance Spectroscopy and Asteroid Taxonomy. In: *Asteroids: Astronomical and Geological Bodies*. Cambridge Planetary Science. Cambridge University Press; 2016:133-184.

Fraeman, A. A., Murchie, S. L., Arvidson, R. E., Clark, R. N., Morris, R. V., Rivkin, A. S., & Vilas, F. (2014). *Spectral absorptions on Phobos and Deimos in the visible/near infrared wavelengths and their compositional constraints*. *Icarus*, 229, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.11.021>

Kuramoto, K., Kawakatsu, Y., Fujimoto, M. *et al.* Martian moons exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets. *Earth Planets Space* **74**, 12 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01545-7>

Miyamoto, H., Niihara, T., Wada, K. *et al.* Surface environment of Phobos and Phobos simulant UTPS. *Earth Planets Space* **73**, 214 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01406-3>

Nakamura, T., Ikeda, H., Kouyama, T. *et al.* Science operation plan of Phobos and Deimos from the MMX spacecraft. *Earth Planets Space* **73**, 227 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01546-6>

Poggiali, G., Iannini Lelarge, S., Brucato, J. R., Barucci, M. A., Masotta, M., Corazzi, M. A., Fornaro, T., Brown, A. J., Mandon, L., & Randazzo, N. (2023). *Laboratory measurements of anhydrous minerals mixed with hyperfine hydrated minerals to support interpretation of infrared reflectance observations of planetary surfaces*. *Icarus*, 394, 115449. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115449>

Van Dyne, D., Zacny, K., Thomas, L., Paulsen, G., Lam, S., Williams, H., Sabahi, D., Chu, P., Spring, J., Satou, Y., Kato, H., Sawada, H., Usui, T., Fujimoto, M., Imada, T., Mueller, R., Zolensky, M., Statler, T., Dudzinski, L., & Zavodsky, B. (2021). *Pneumatic Sampler (P-Sampler) for the Martian Moons Exploration (MMX)*. AGU Fall Meeting Abstracts, P54C-03.

Wargnier, A., Poggiali, G., Doressoundiram, A., Gautier, T., Beck, P., Buch, A., Ruscassier, N., Fornasier, S., & Barucci, M. A. (2023). *Development of a new Phobos spectral simulant: spectral properties from visible to the mid-infrared range*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 524(3), 3809–3820. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad2132>