

# La mission Martian Moons eXploration



Formation *Odyssées de l'espace*

Le jeudi 11 décembre 2025

Cassandre Chaudesaygues

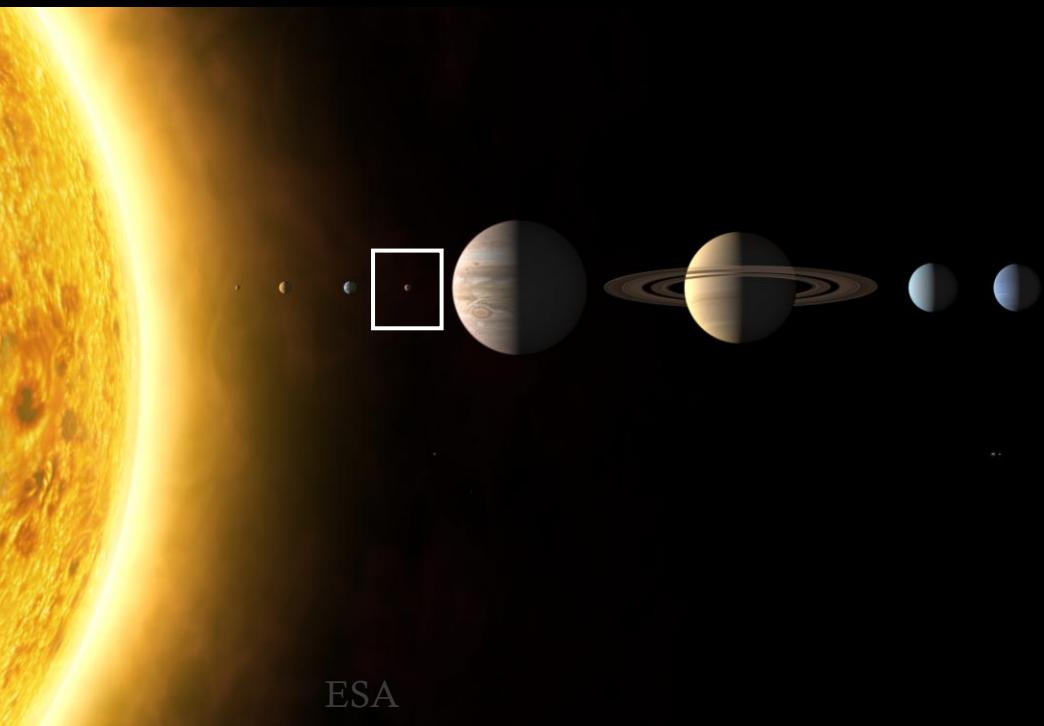
# Le contexte de la mission Mars et ses lunes



# Mars

4<sup>e</sup> planète du Système Solaire

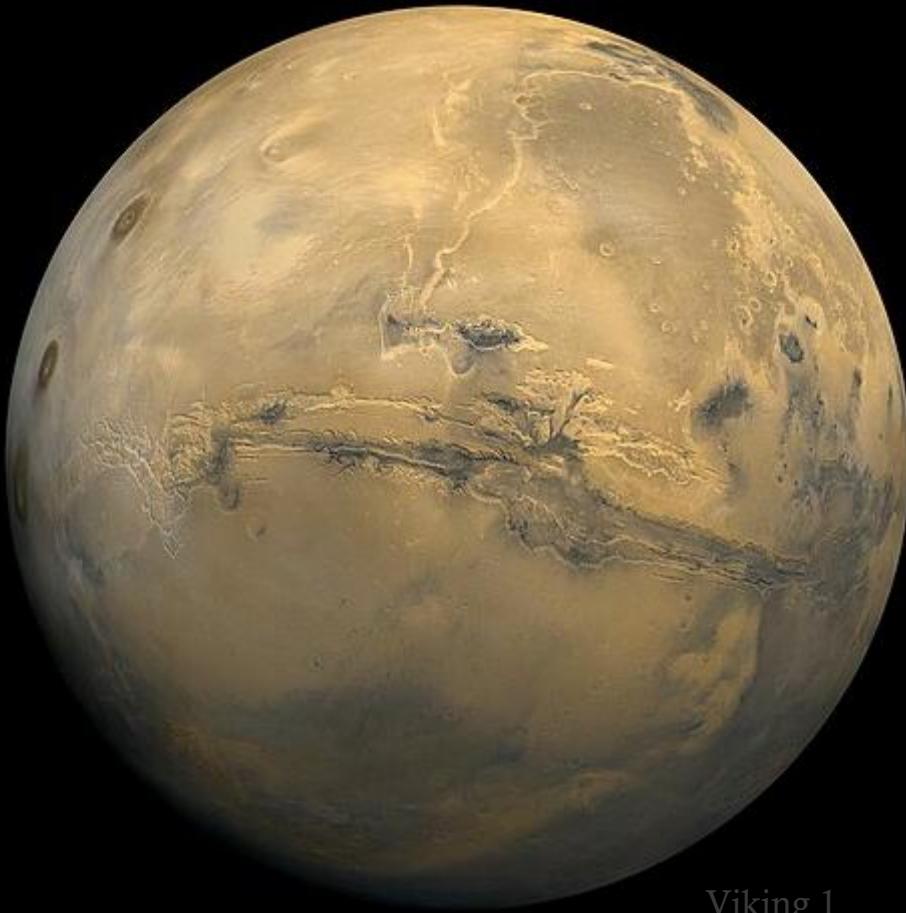
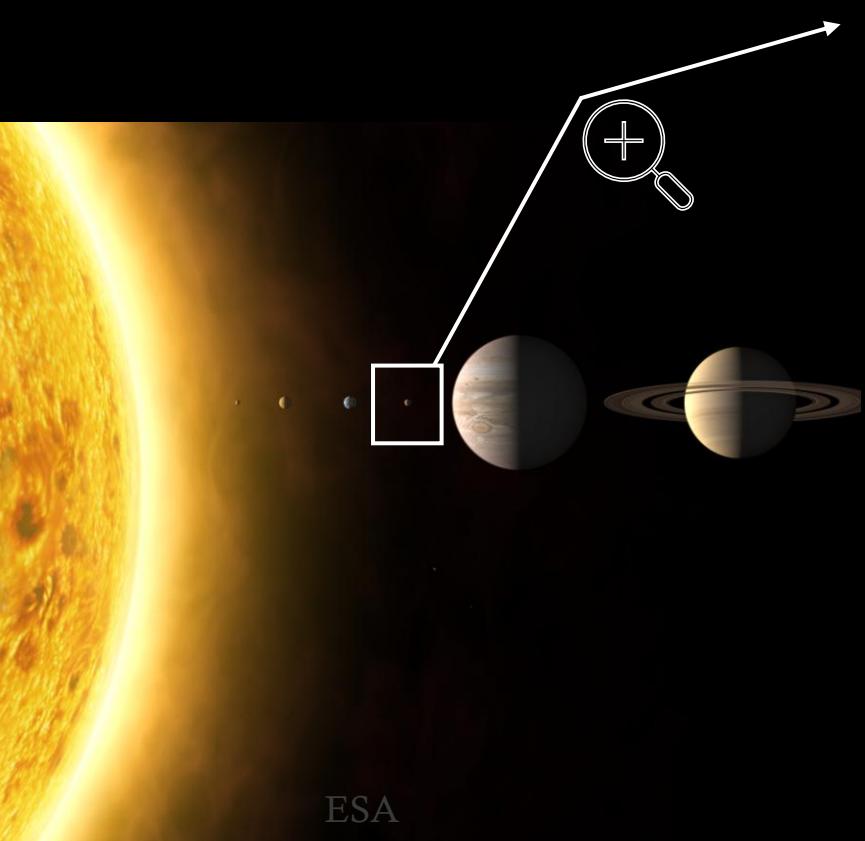
Distance moyenne au Soleil : 1.5 UA



# Mars

4<sup>e</sup> 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 CO<sub>2</sub>
- 2 lunes : Phobos et Déimos

# Les lunes de Mars

Découvertes en 1877 par Asaph Hall



≈ 27 km  
Phobos



≈ 15 km  
Déimos

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

→ On peut les caractériser géologiquement et spectralement

# Question



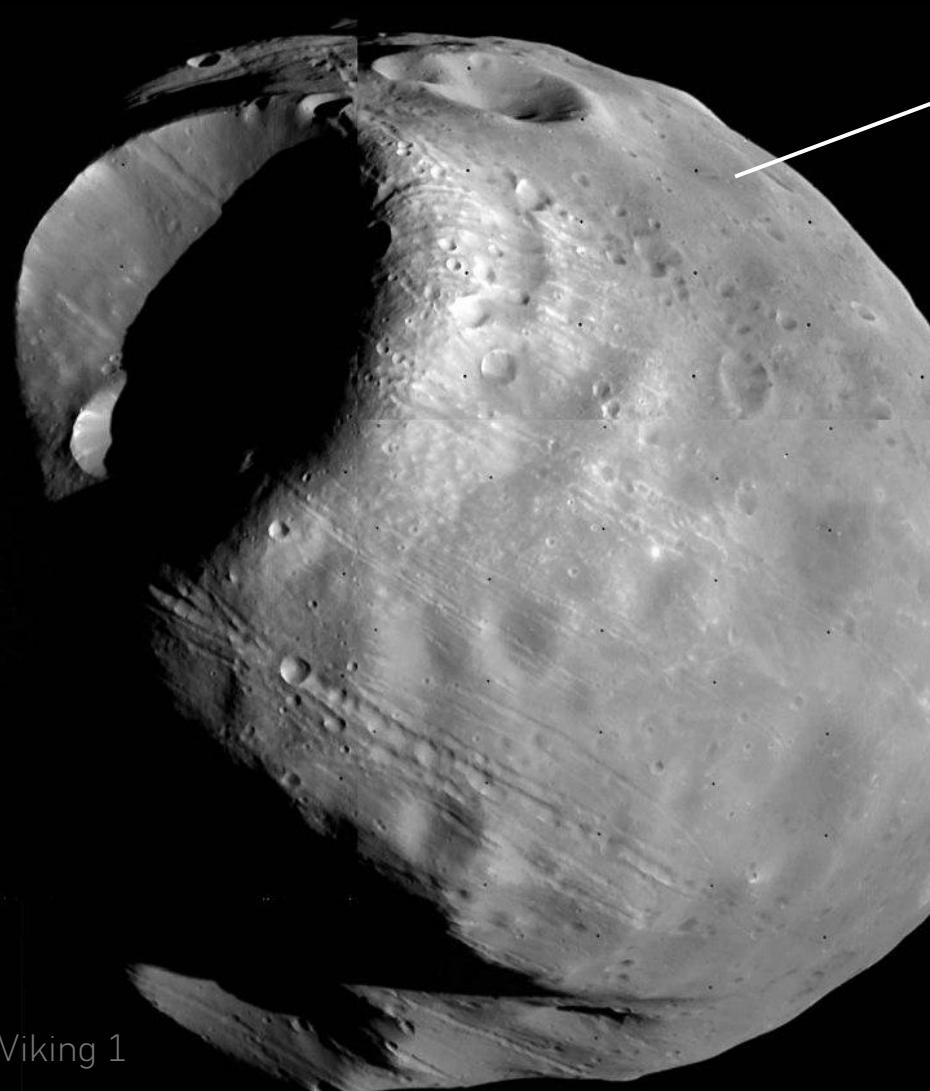
Phobos

Géologiquement : que pouvez-vous dire sur ces lunes ?



Déimos

# Caractéristiques géologiques de Phobos

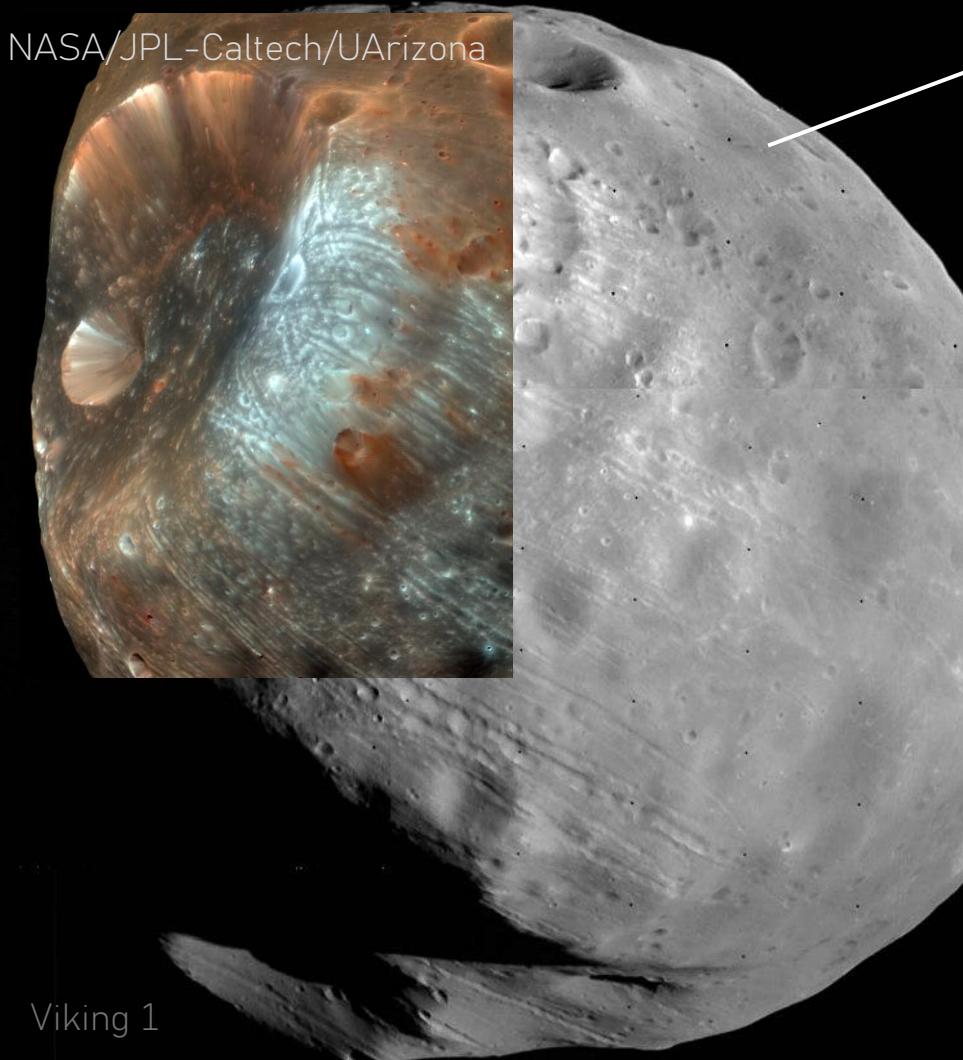


Surface fortement  
cratérisée

Viking 1

# Caractéristiques géologiques de Phobos

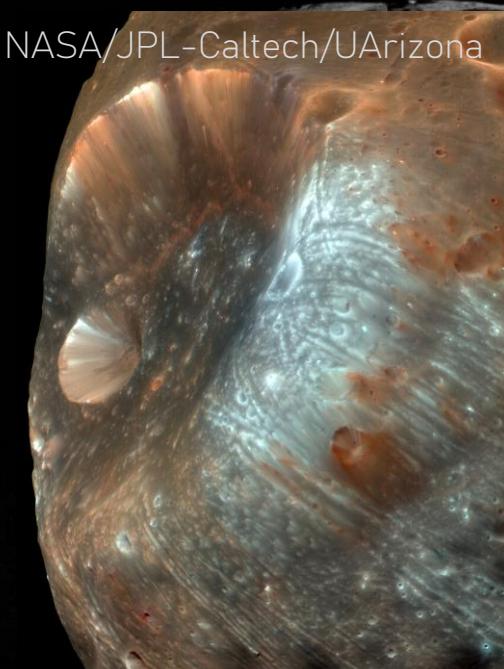
Cratère Stickney :  
diamètre de 9 km



Surface fortement  
cratérisée

# Caractéristiques géologiques de Phobos

Cratère Stickney :  
diamètre de 9 km



Viking 1



Surface fortement  
cratérisée

Présence de blocs  
rocheux

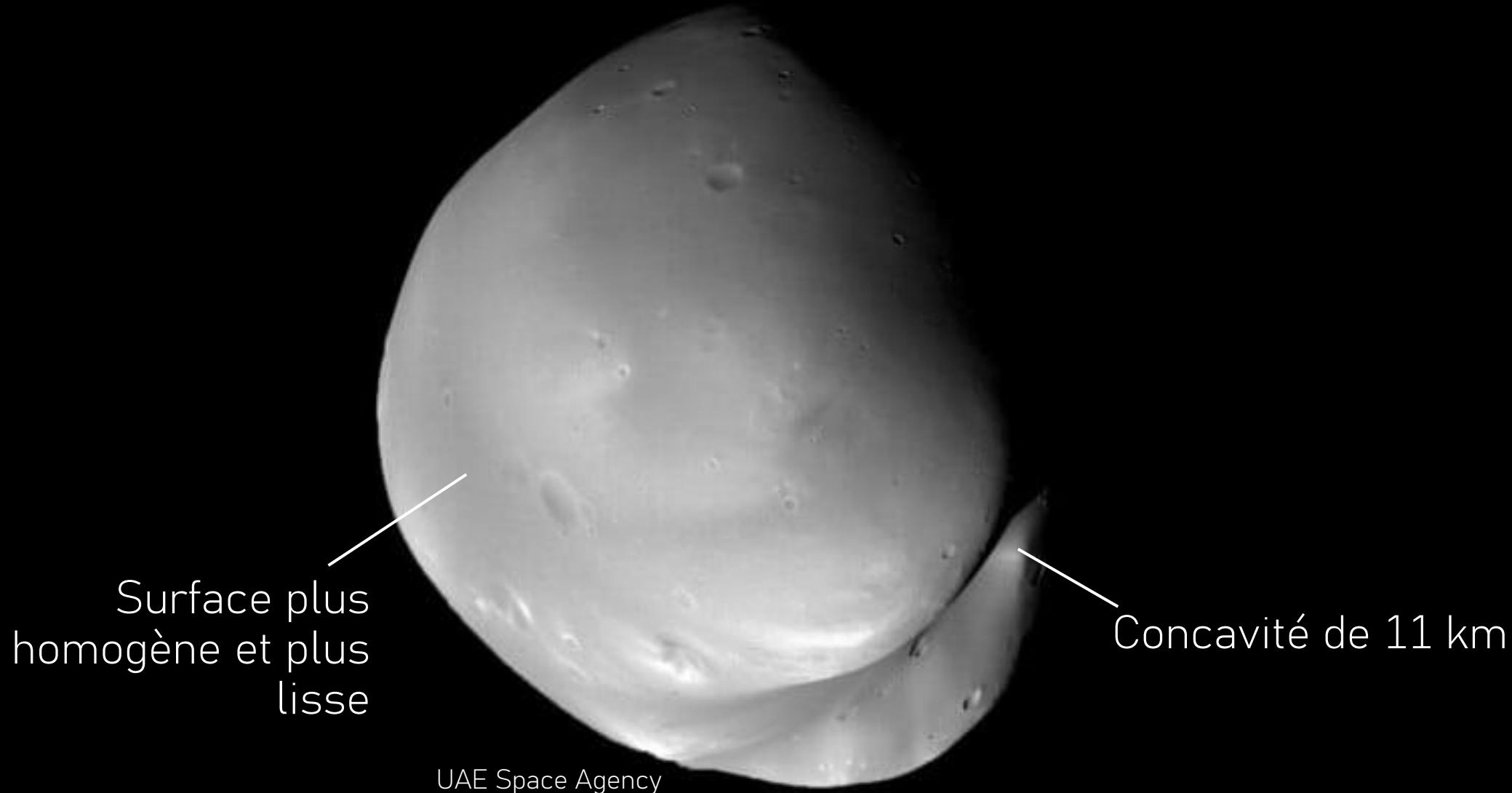
Présence de  
sillons

# Caractéristiques géologiques de Déimos

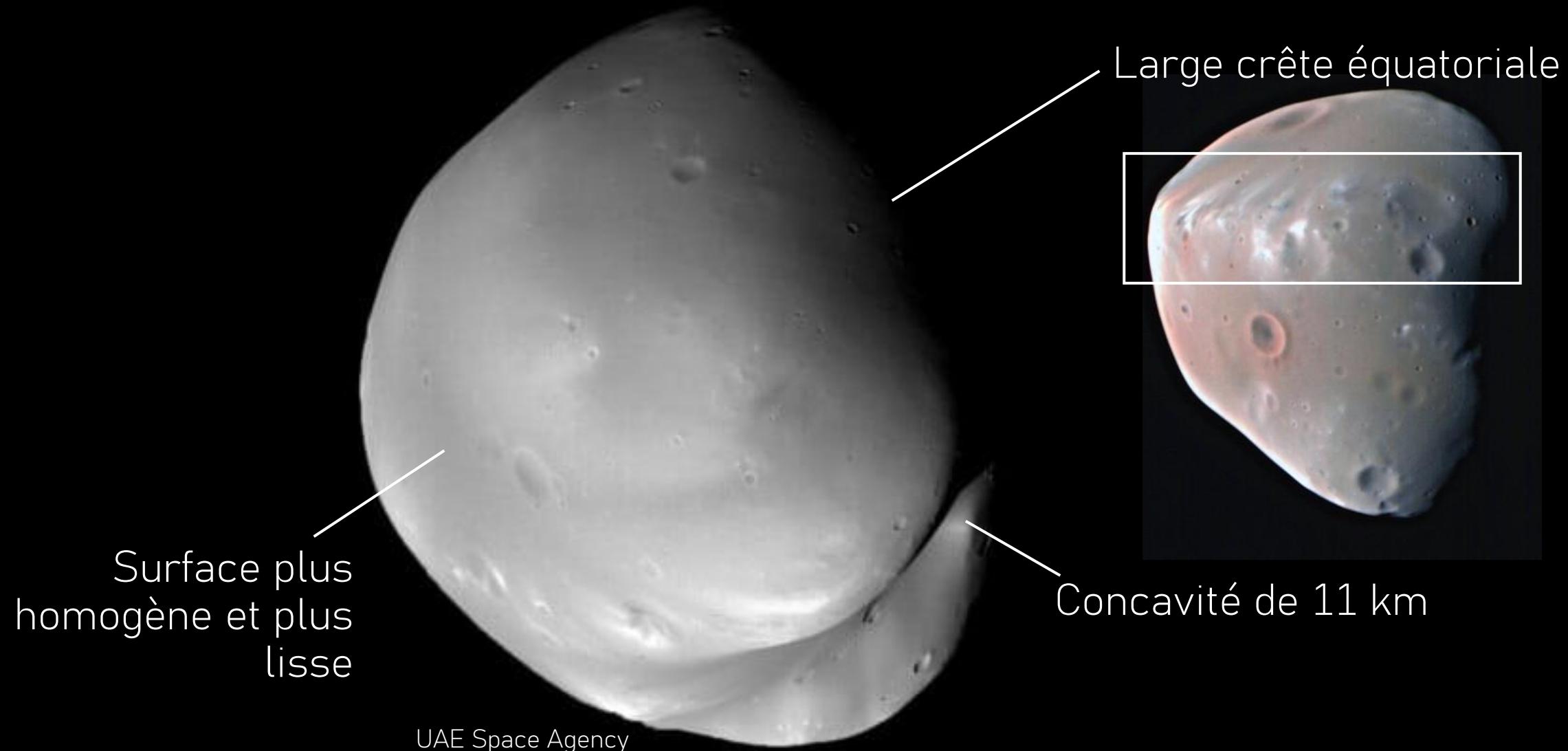


UAE Space Agency

# Caractéristiques géologiques de Déimos



# Caractéristiques géologiques de Déimos

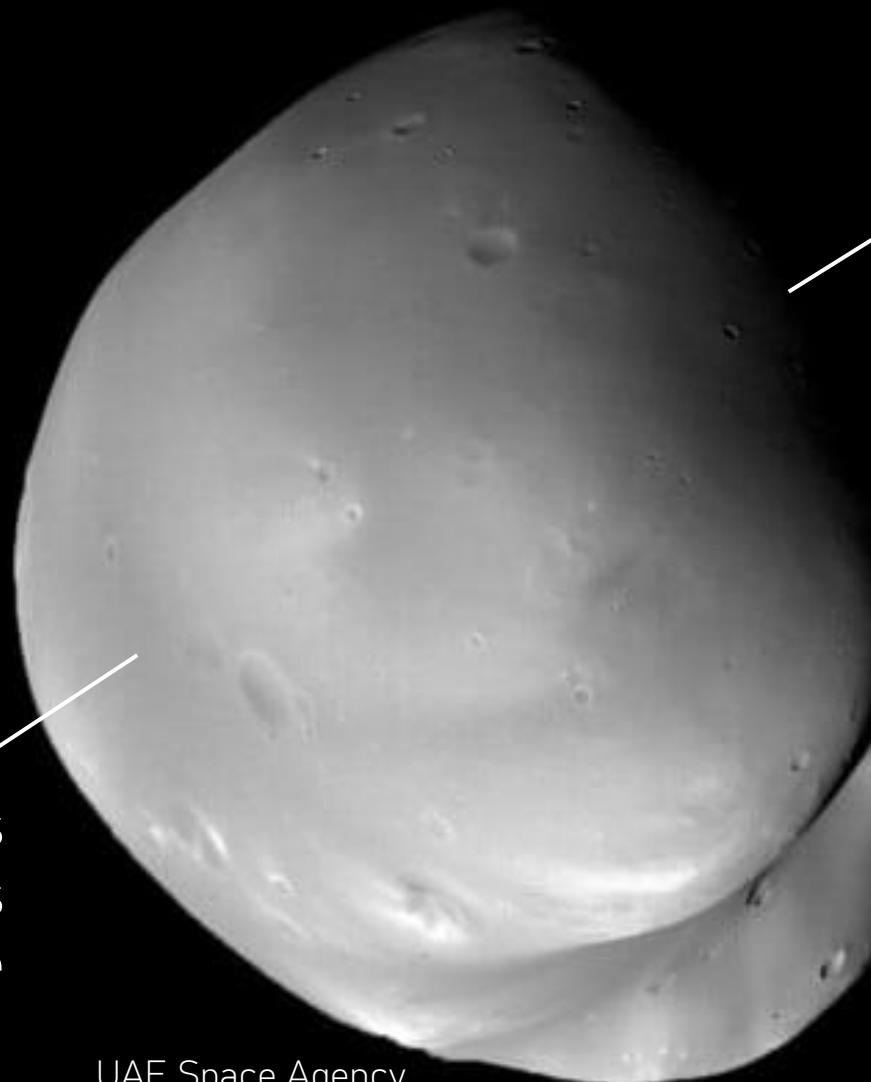


# Caractéristiques géologiques de Déimos



Vue de la sonde Hera

Surface plus homogène et plus lisse



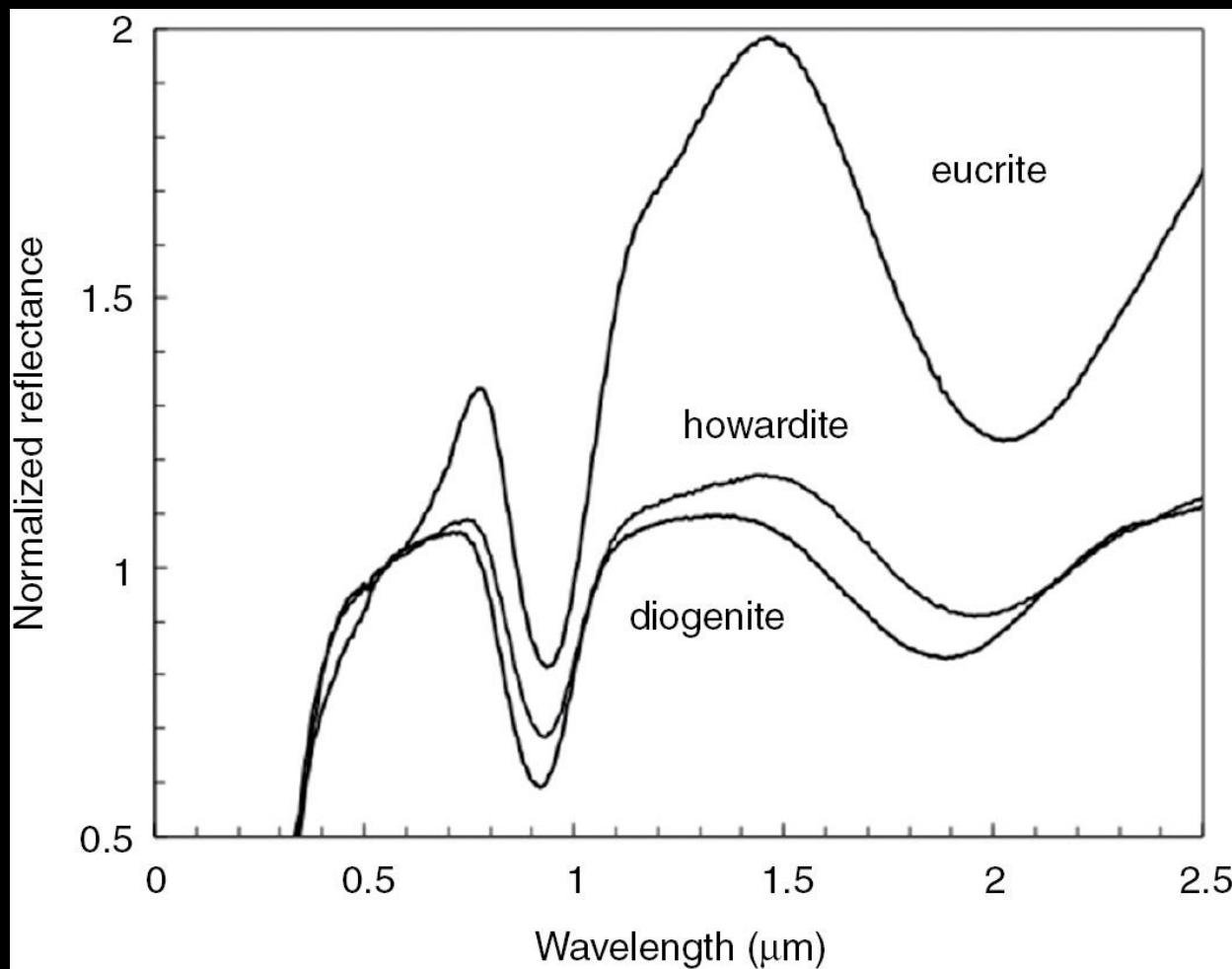
UAE Space Agency

Large crête équatoriale



Concavité de 11 km

# La spectroscopie en réflectance



- Réflectance : proportion de lumière réfléchie 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

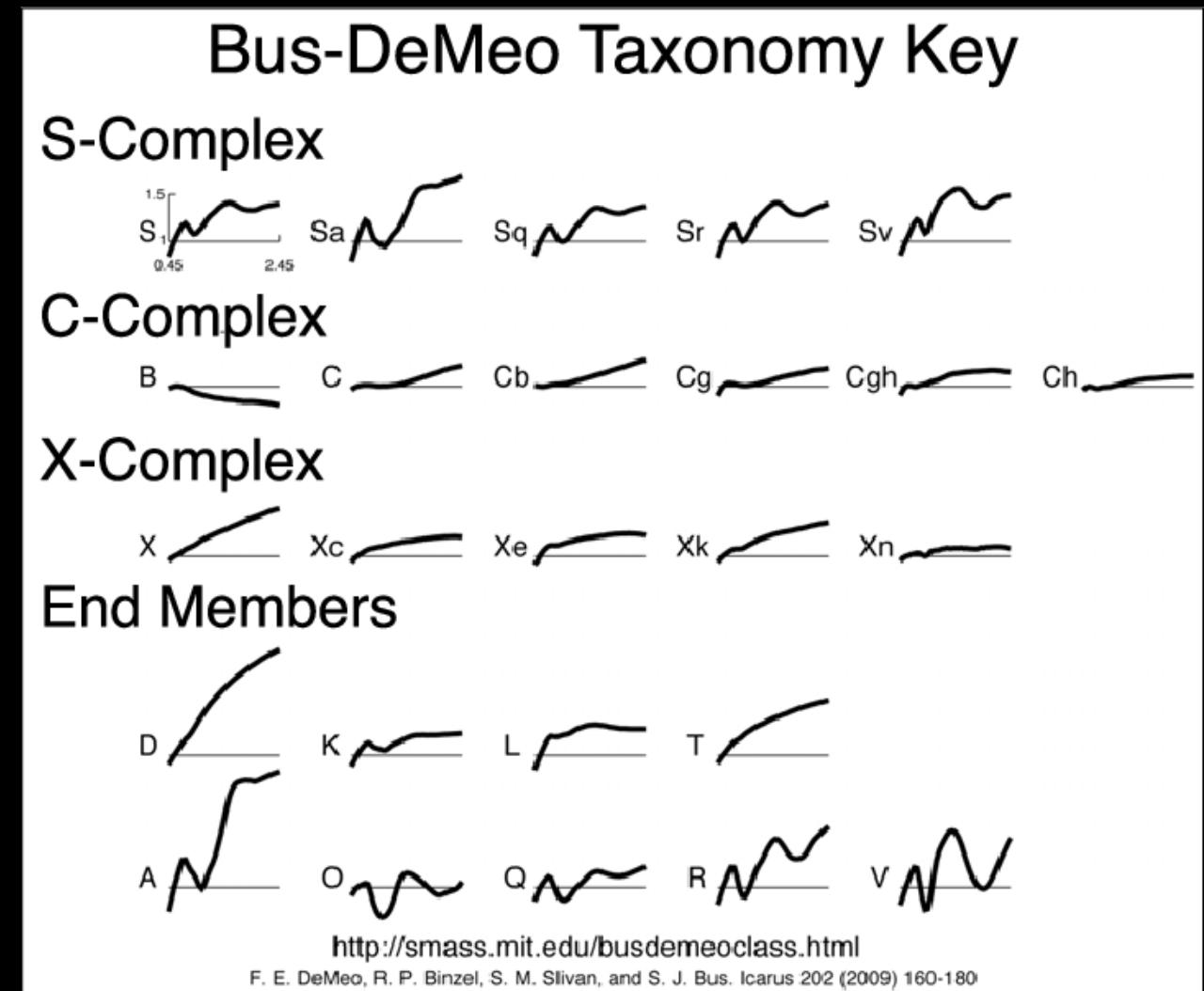
Astéroïdes silicatés



Astéroïdes carbonés



Astéroïdes à diverses  
compositions



# La spectroscopie en réflectance

→ Classification des astéroïdes

Astéroïdes silicatés



Astéroïdes carbonés

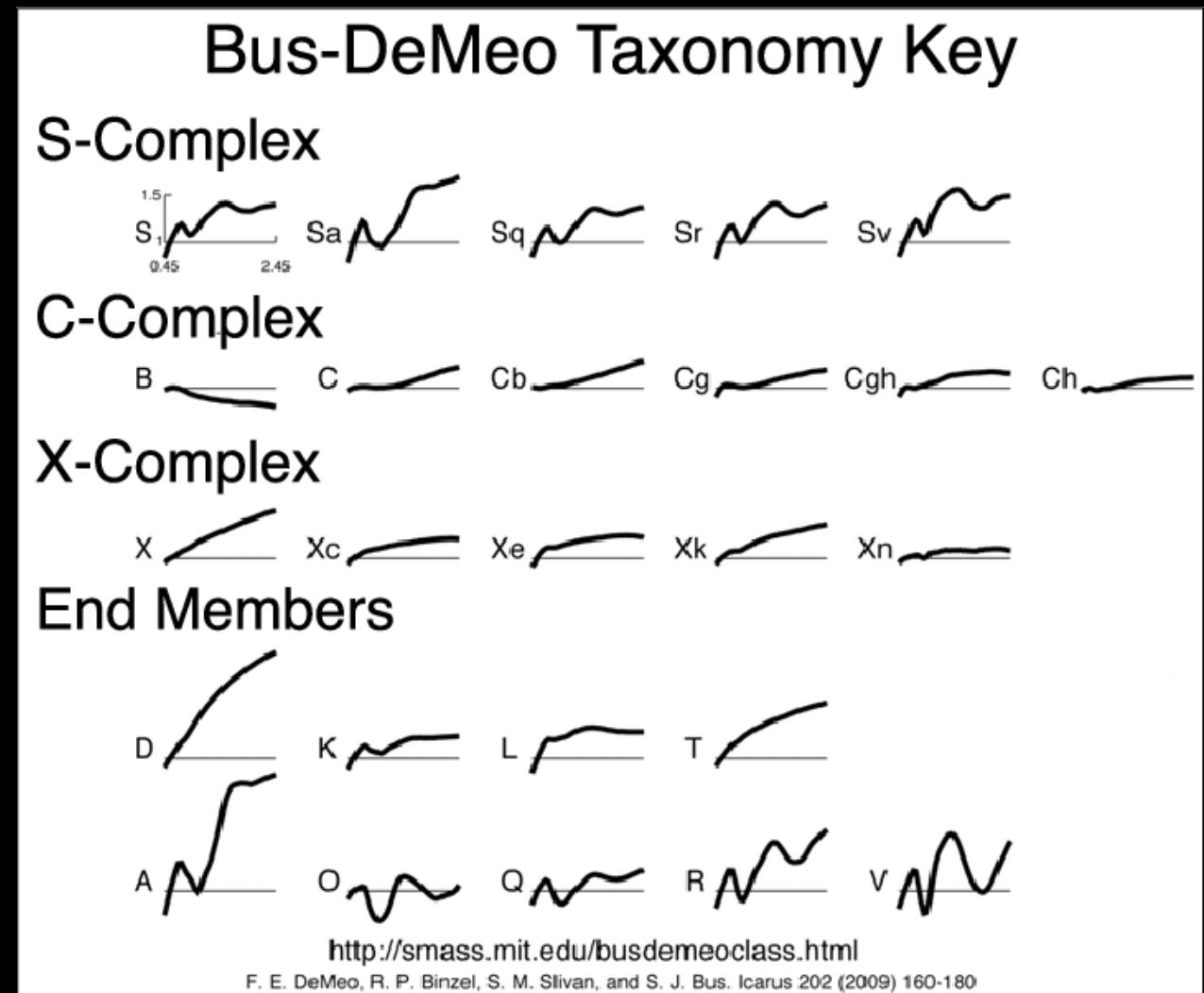


Astéroïdes à diverses  
compositions

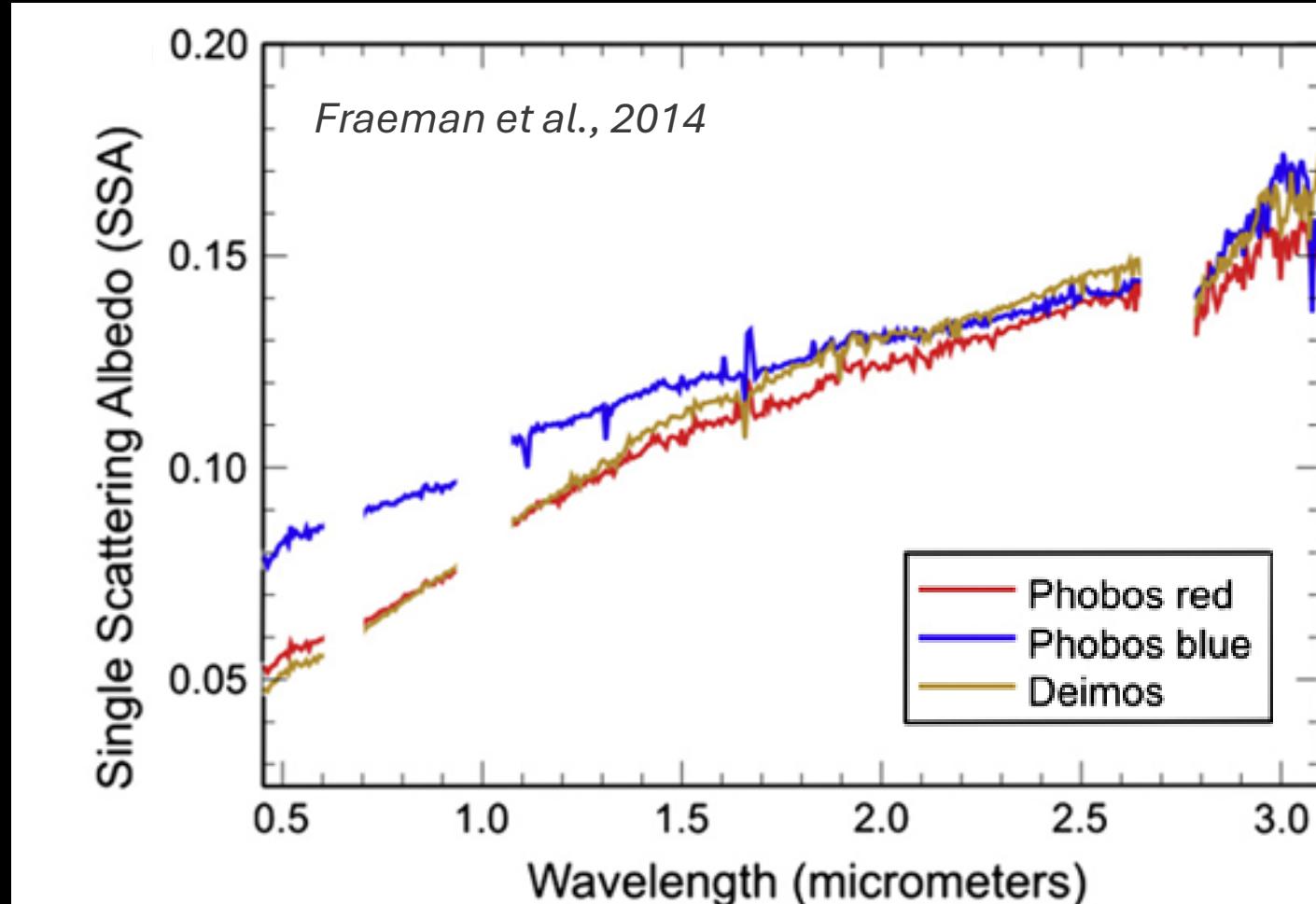


Bandes d'absorption:

- Minéraux hydratés : 1,9  $\mu\text{m}$  et 2,7  $\mu\text{m}$
- Carbonates : ~3,3  $\mu\text{m}$
- Organiques : ~3,4  $\mu\text{m}$



# 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

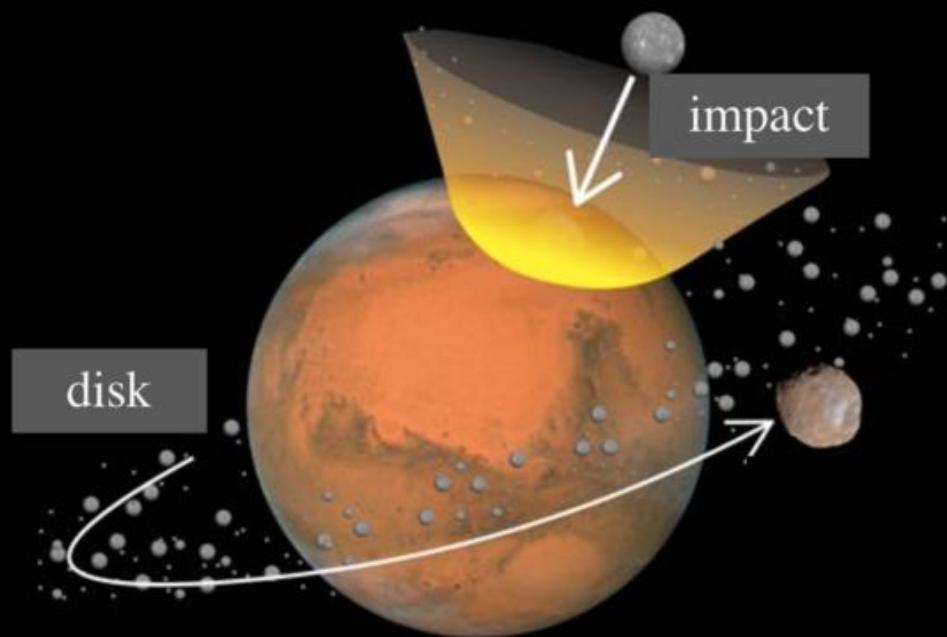
# Résumé sur les lunes

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

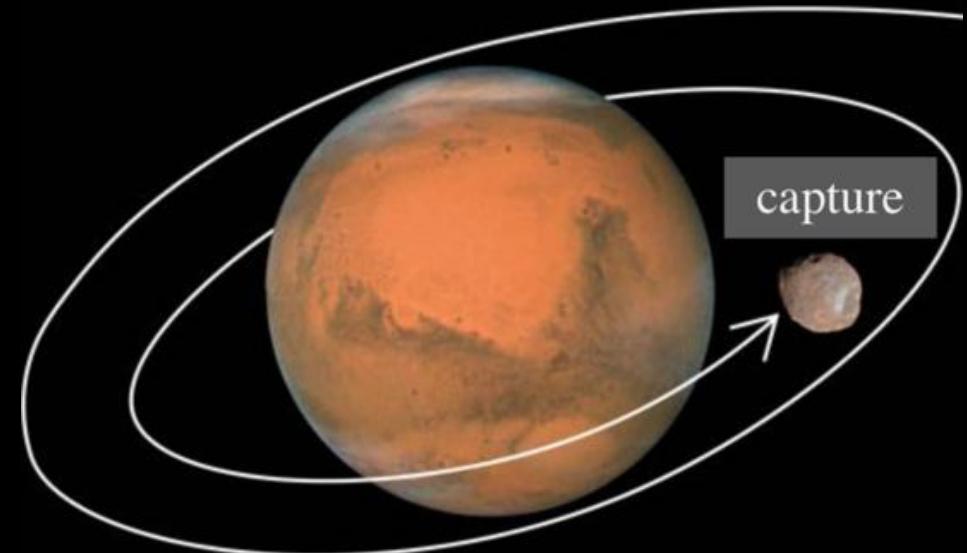
Incertitudes sur leur composition → quelle est leur origine ?

# Incertitudes sur l'origine des lunes

# Les hypothèses de formation

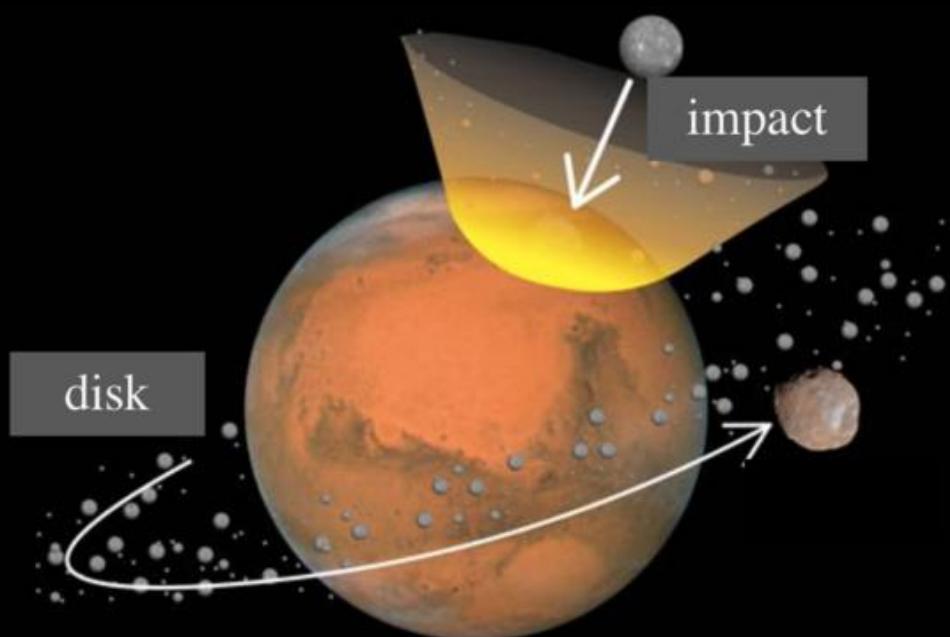


Collision entre un impacteur et Mars



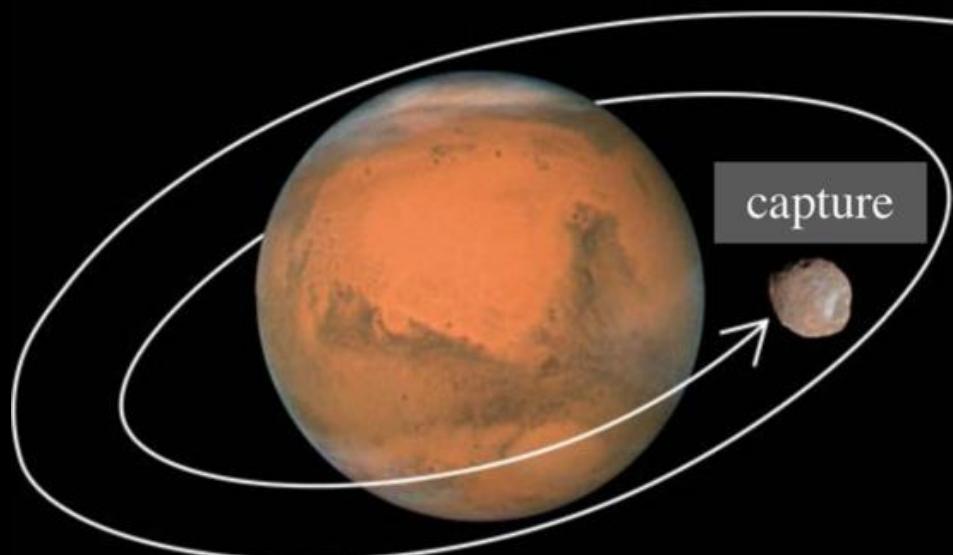
Capture d'astéroïdes

# Hypothèse d'un impact

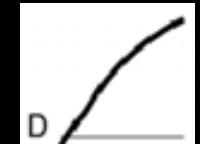


- Excentricité et inclinaison faibles : impact géant, similaire à ce qui est arrivé à la Terre pour former la Lune
- Composition potentielle : mélange entre composition martienne et de l'impacteur
- Mais pas cohérent avec caractéristiques spectrales ( $\Rightarrow$  altération spatiale ?)

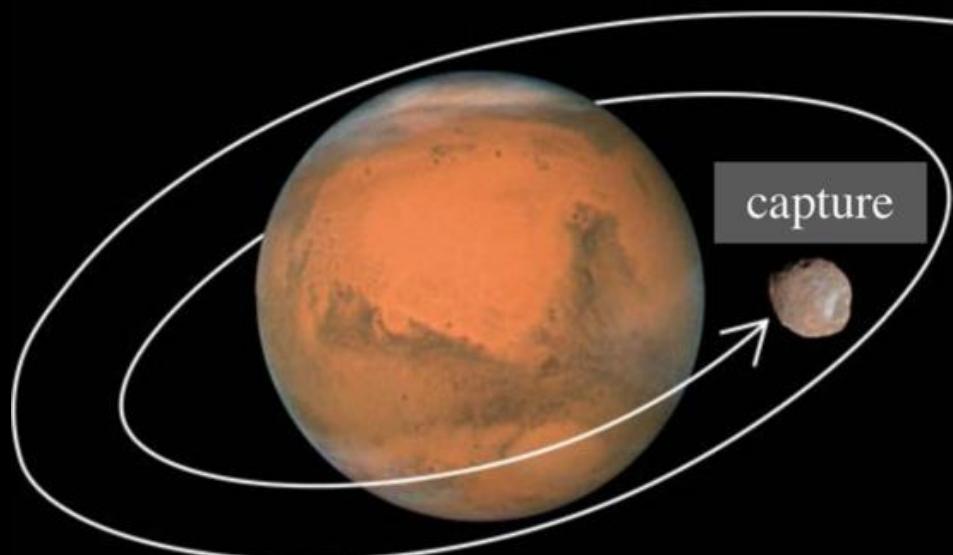
# Hypothèse d'une capture

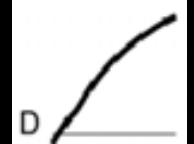


- La forme des lunes et leur spectre sont similaires à ce qu'on observe pour des astéroïdes (chez le groupe Hilda ou des troyens)
- Composition potentielle : astéroïde primitif
- Mais n'explique pas l'orbite actuelle



# Hypothèse d'une capture



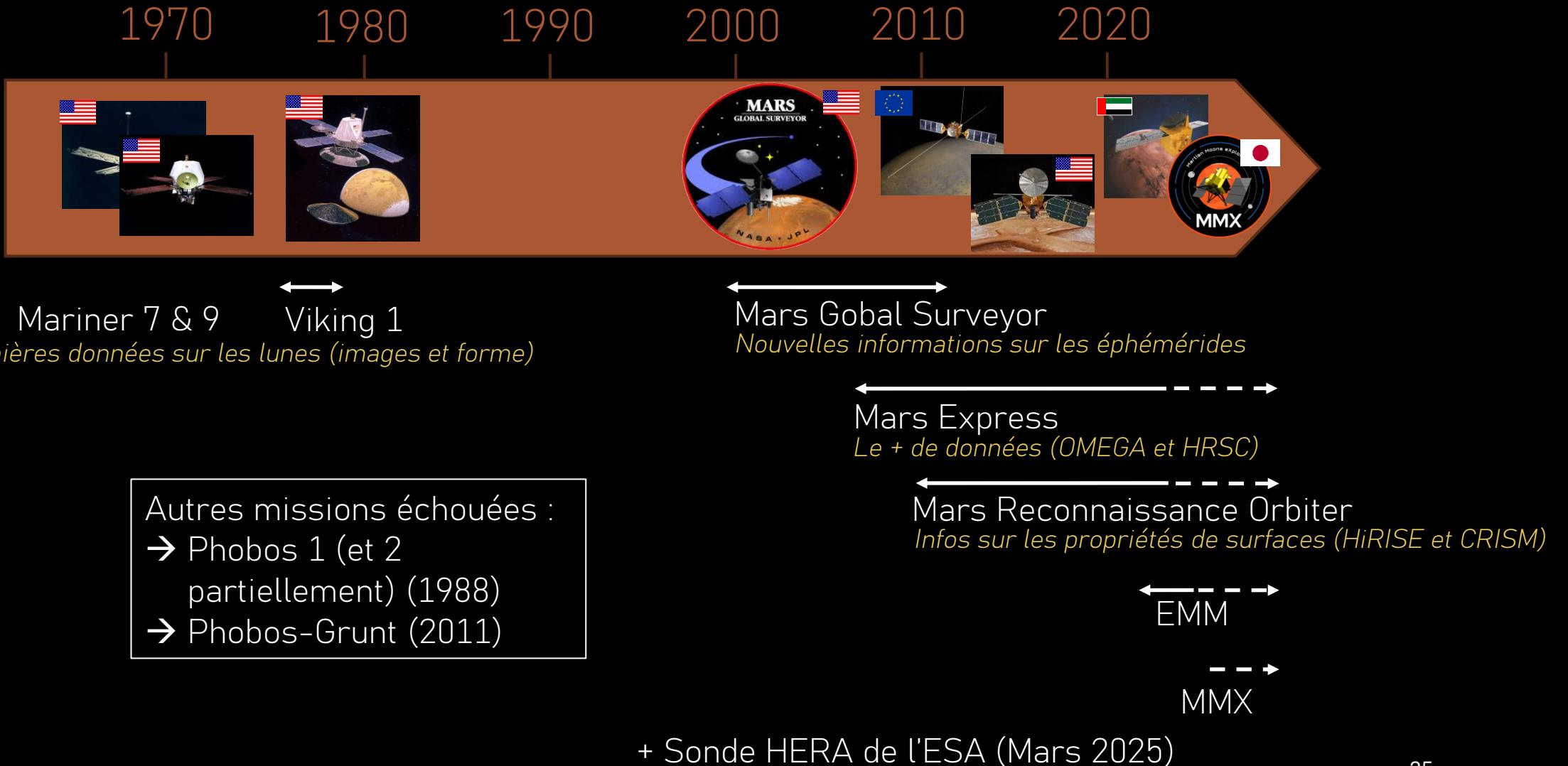
- La forme des lunes et leur spectre sont similaires à ce qu'on observe pour des astéroïdes (chez le groupe Hilda ou des troyens)
- Composition potentielle : astéroïde primitif 
- Mais n'explique pas l'orbite actuelle

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



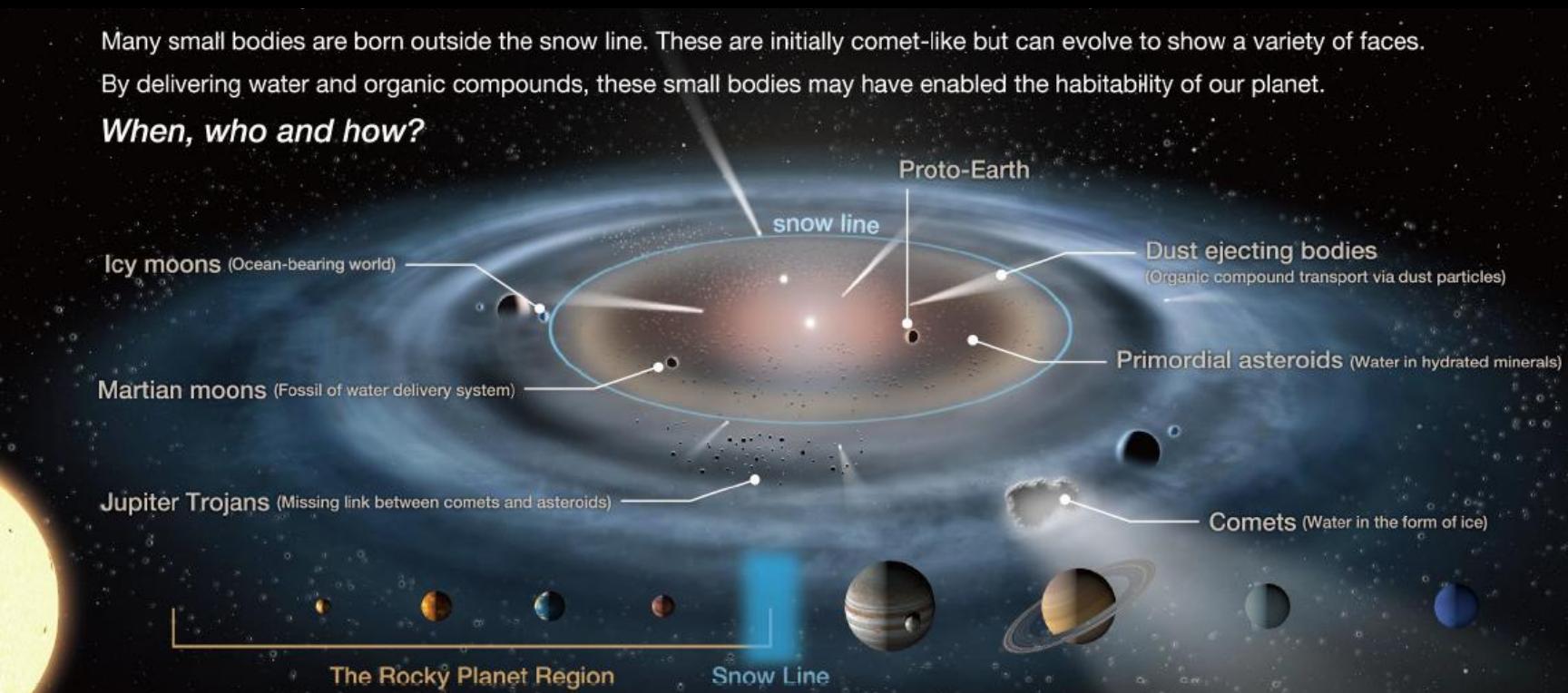
# Missions de retour d'échantillons vers les petits corps



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



# 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)

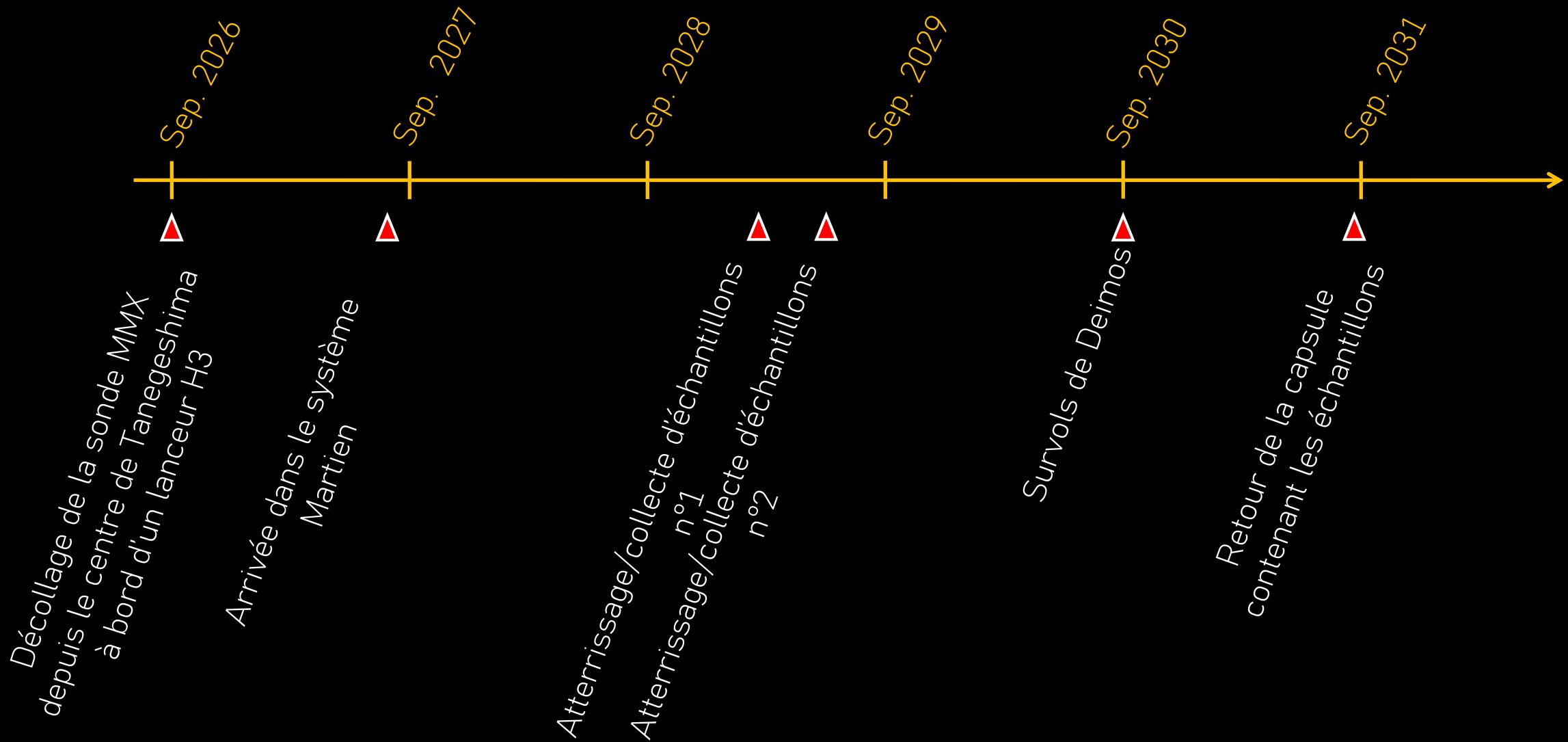
Environ 10 ans après le début de sa planification, la mission peut être lancée !

# 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 cette 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 cette environnement spécifique ?

- ❖ Révéler les processus évolutifs dans le système martien

# La sonde MMX

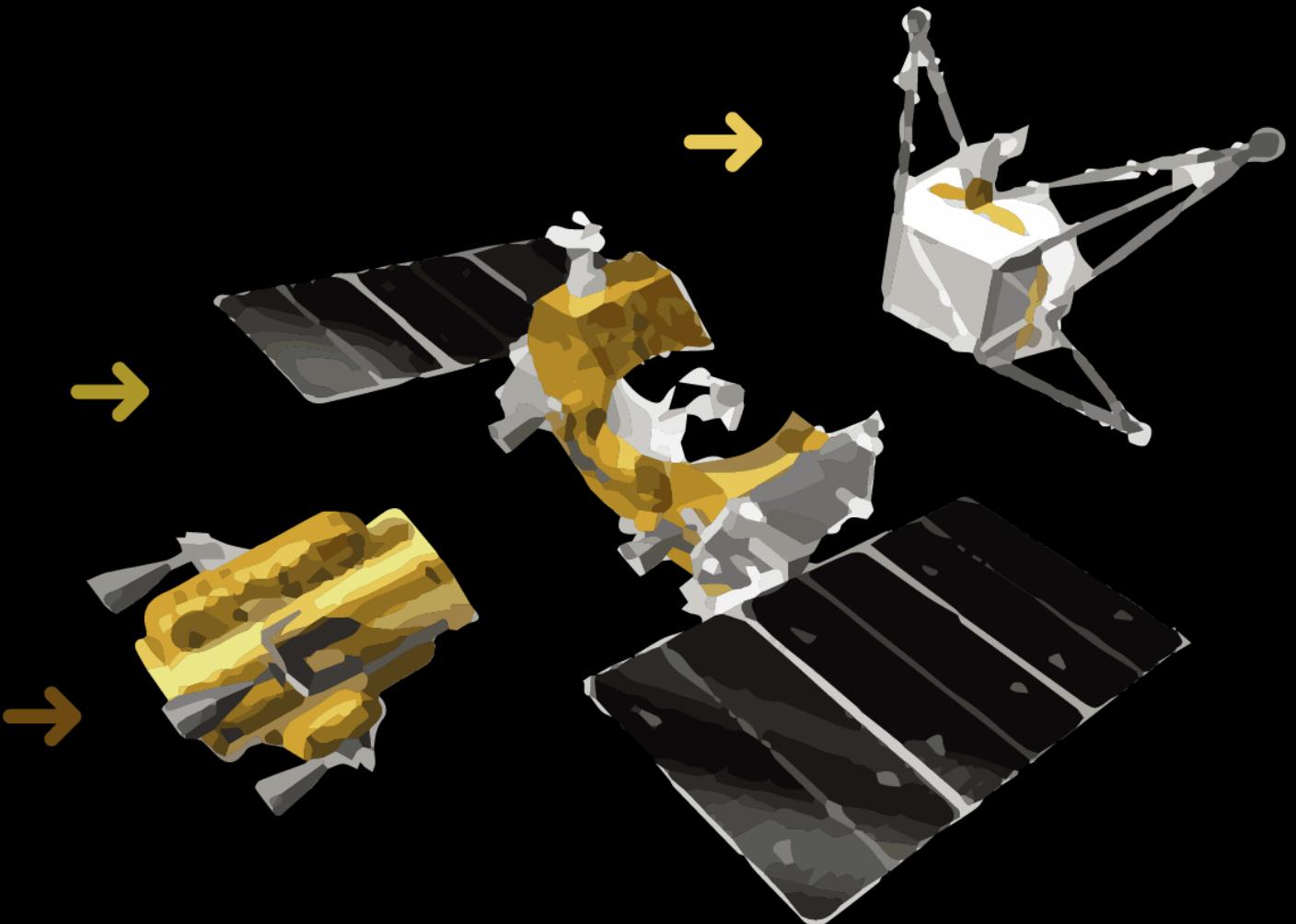
Module d'exploration

Module de retour

1100 kg

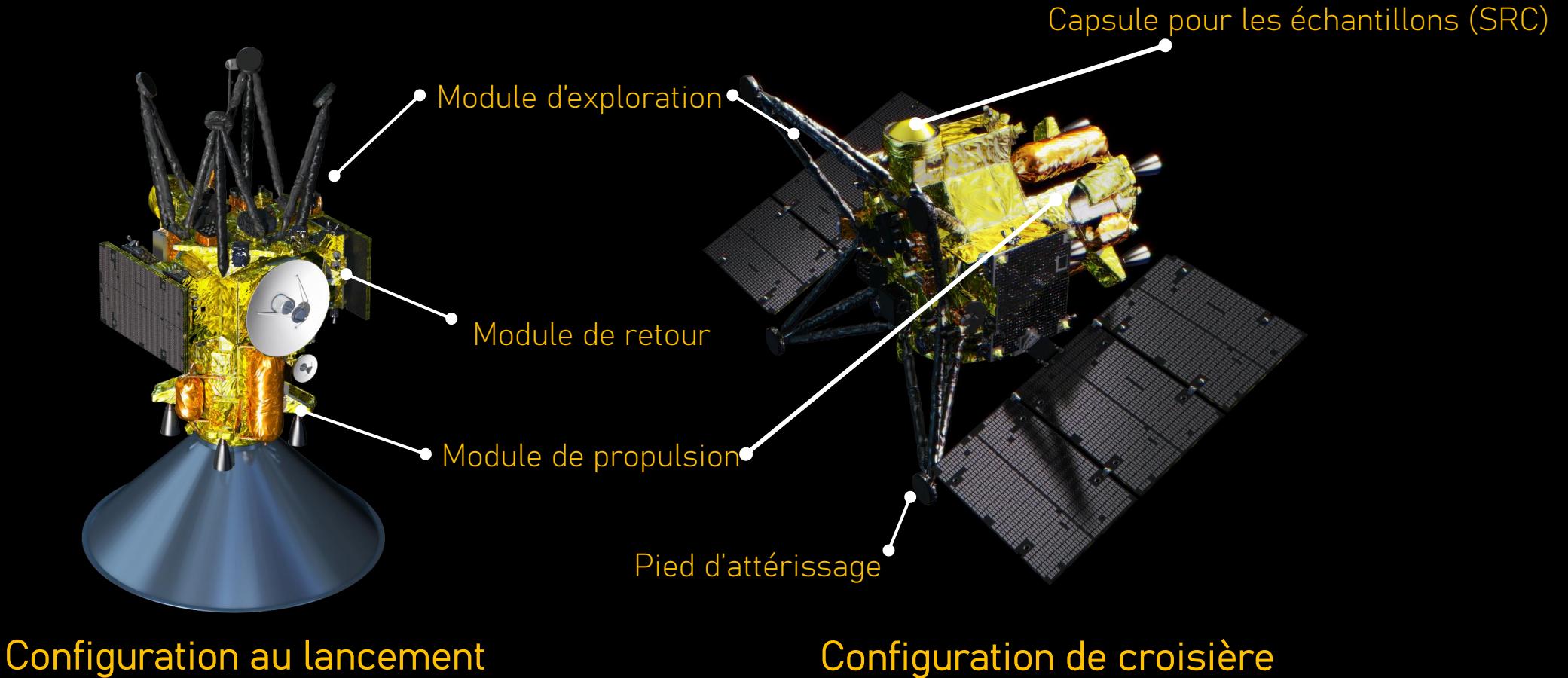
Module de propulsion

1750 kg



Au lancement, la sonde pèse 4200 kg

# La sonde MMX



# Les instruments à bord de MMX

13 instruments:

- TENGOO: 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



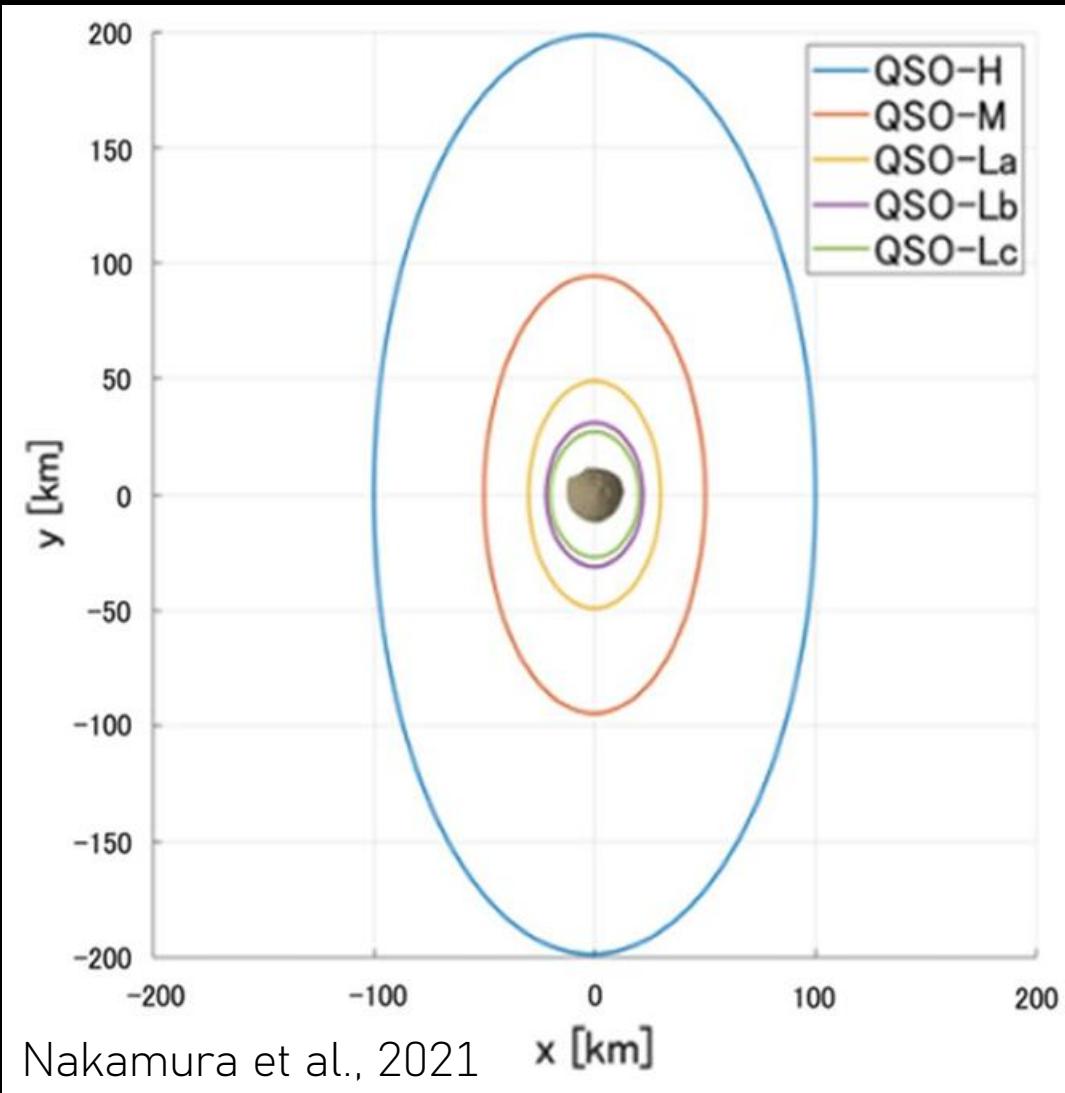
Collaboration internationale :  
JAXA, NASA, ESA, CNES, DLR



→ apport de l'expertise de chaque agence

# La sonde MMX

La sonde se mettra en orbite quasi-satellite 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'atterrissement (MIRS, OROCHI, TENGOO) ; comprendre les processus de modification de surface (MEGANE)
- + Déimos observé en survol

# Les instruments à bord de MMX

13 instruments:

- TENGOO: 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

# Les instruments IDEFIX 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
  - ➔ « Eclareur » pour les sites d'atterrissement

# L'instrument MIRS

## Le spectro-imageur

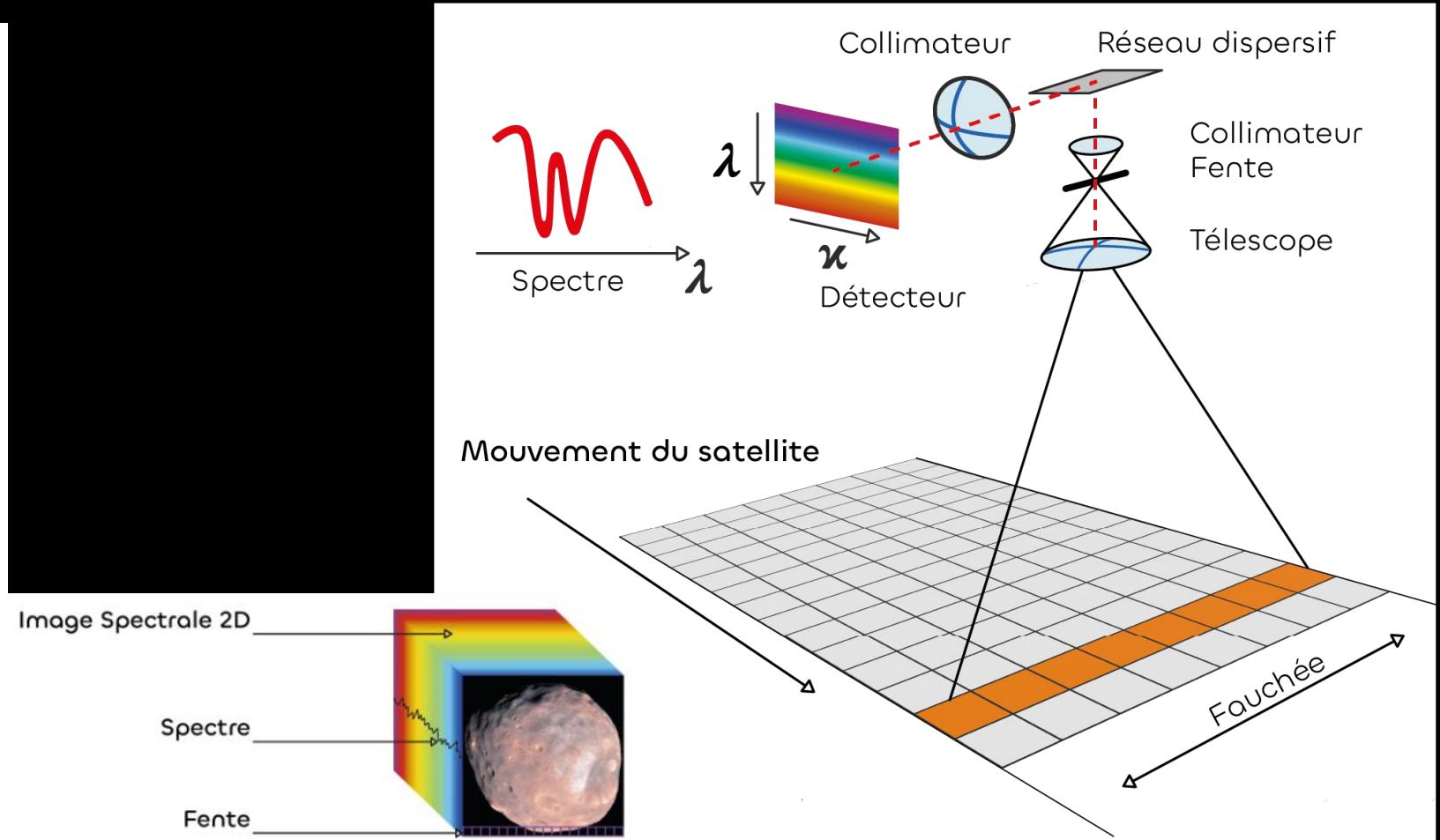
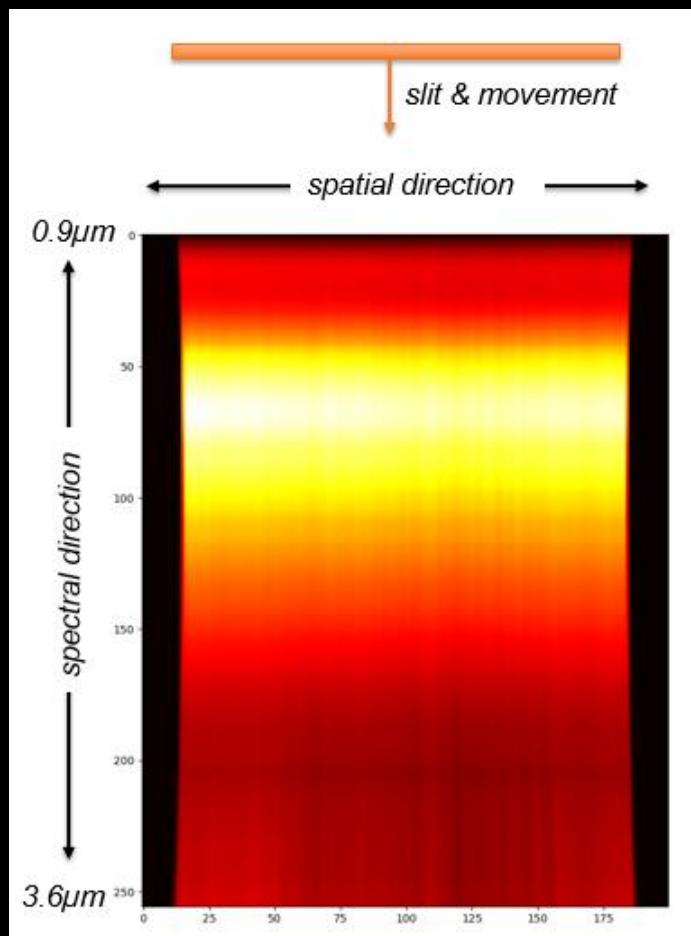
# Les laboratoires concernés par MIRS

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

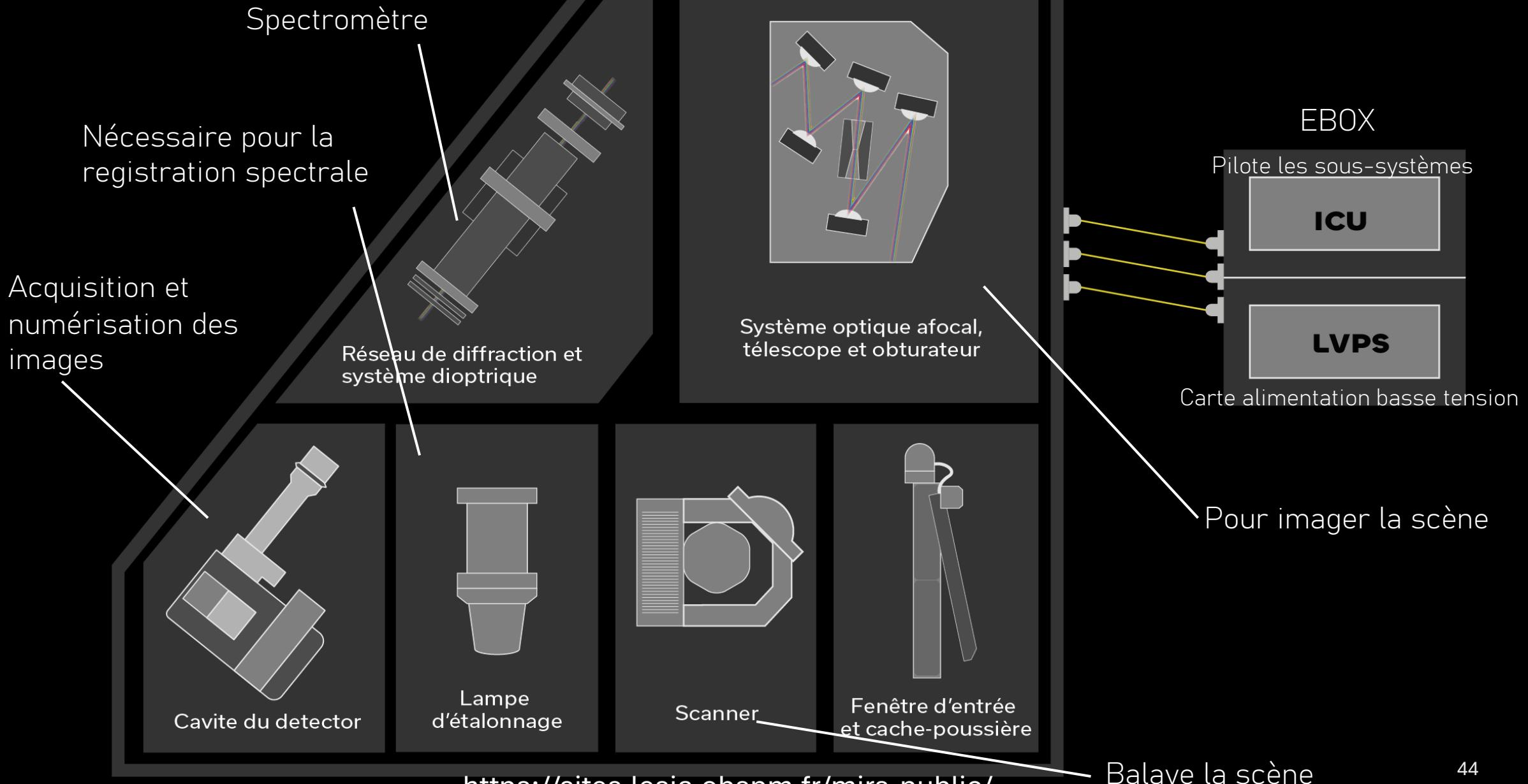


# Concept

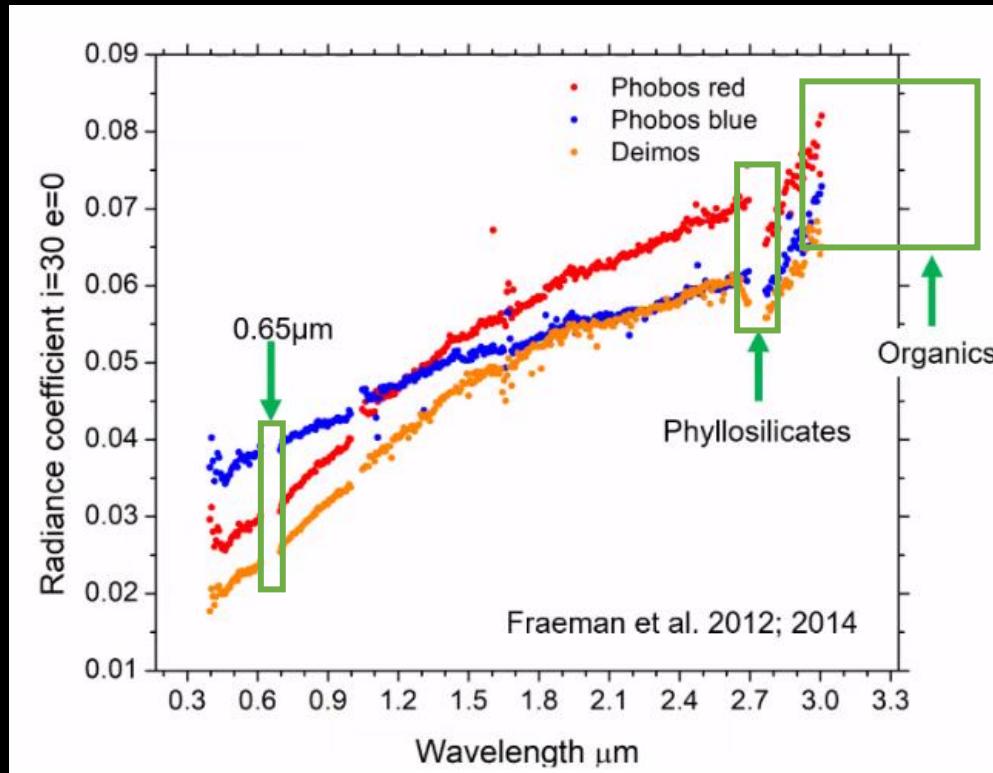
- Spectro-imageur infrarouge
- « Push-broom scanner »
- Domaine spectral: 0.9 – 3.6  $\mu\text{m}$  résolution 20 m/px)
- Acquisition de données des lunes et de l'atmosphère de Mars



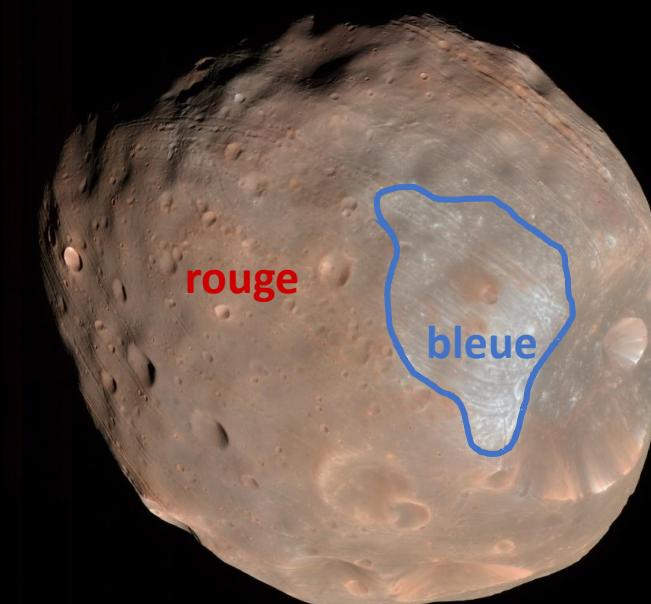
# Modèle de vol



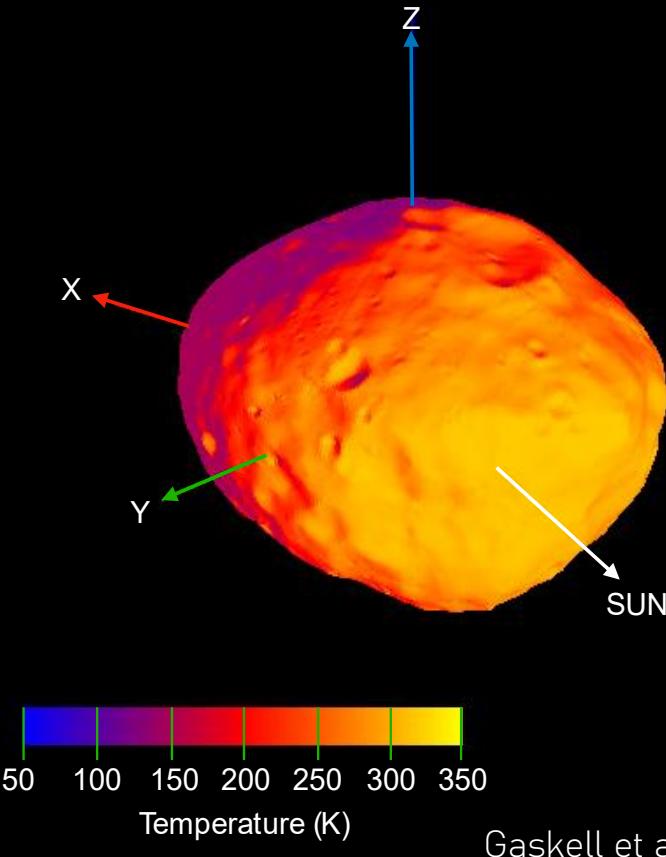
# Objectif de l'instrument – sur les lunes



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



# Objectif de l'instrument – sur les lunes



Gaskell et al., 2011

- 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

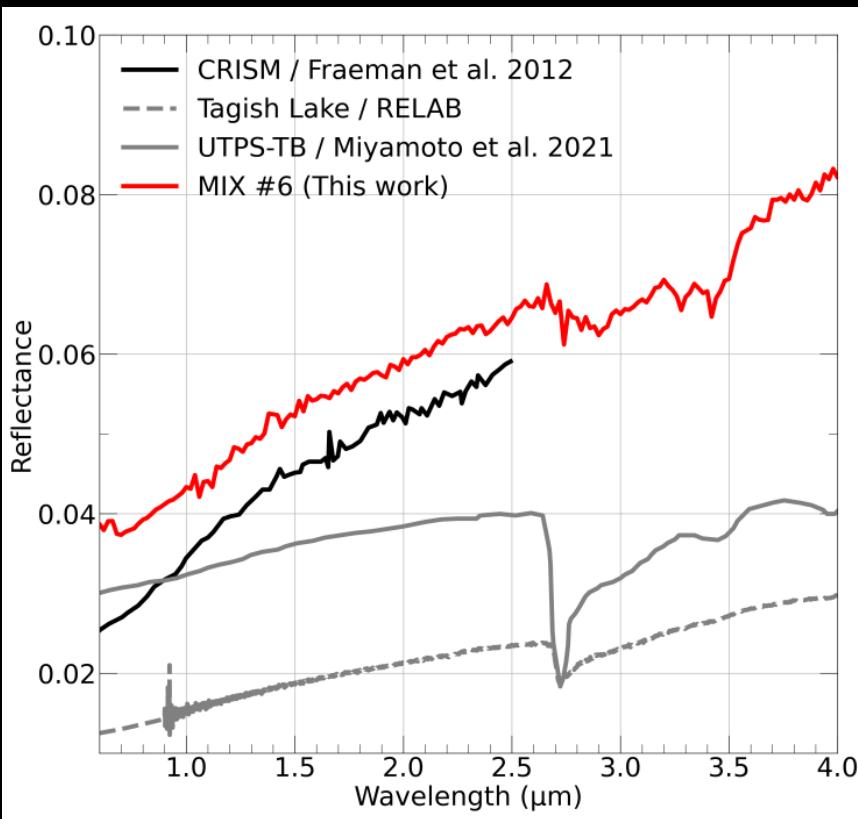


# Préparer la mission

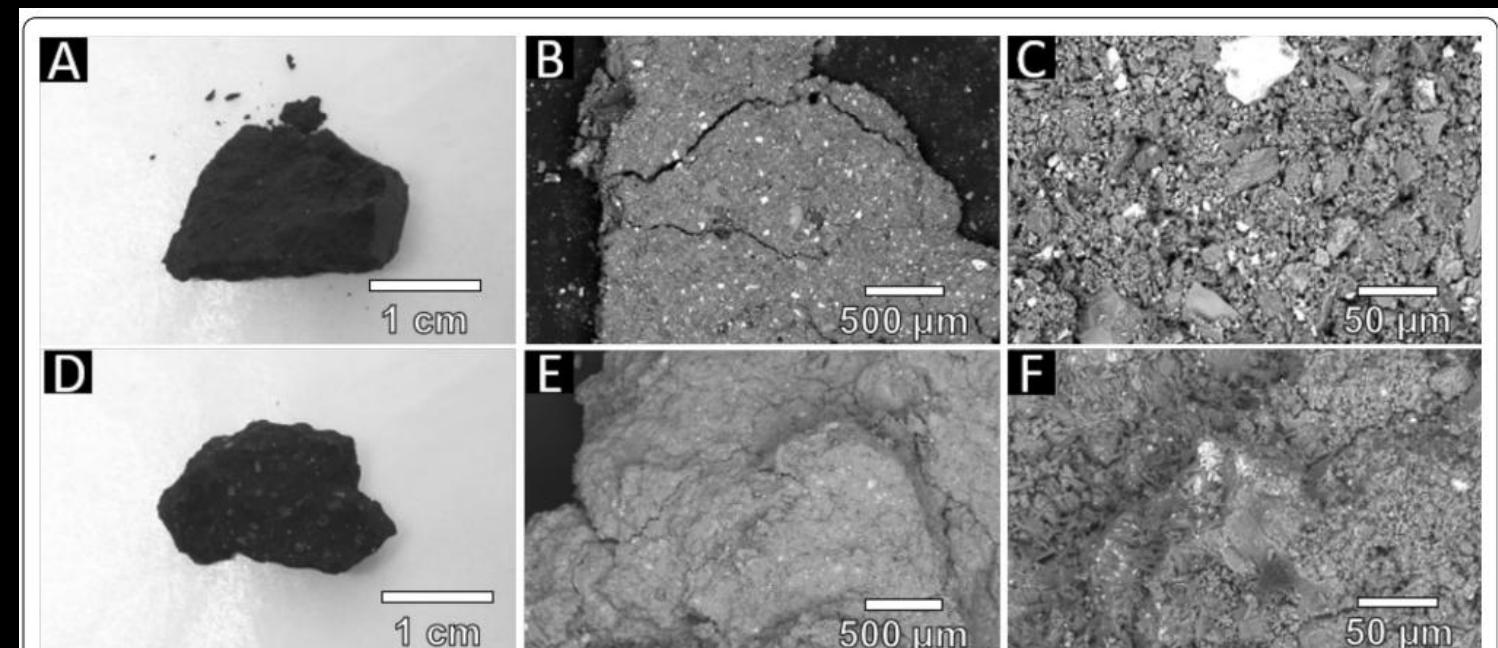


# En préparation à la mission – Laboratoire

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



Wargnier et al., 2023



**Fig. 5** Optical and backscattered electron images of UTPS-TB (**A–C**) simulant and Tagish Lake meteorite (**D–F**). UTPS-TB simulate petrographical signature: phenocrysts of silicate and opaque minerals are embedded in a loosely jammed fine grained (<20  $\mu\text{m}$ ) serpentine matrix. UTPS-TB simulates mineral abundance and visible and near-infrared reflectance of Tagish Lake meteorite

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 :

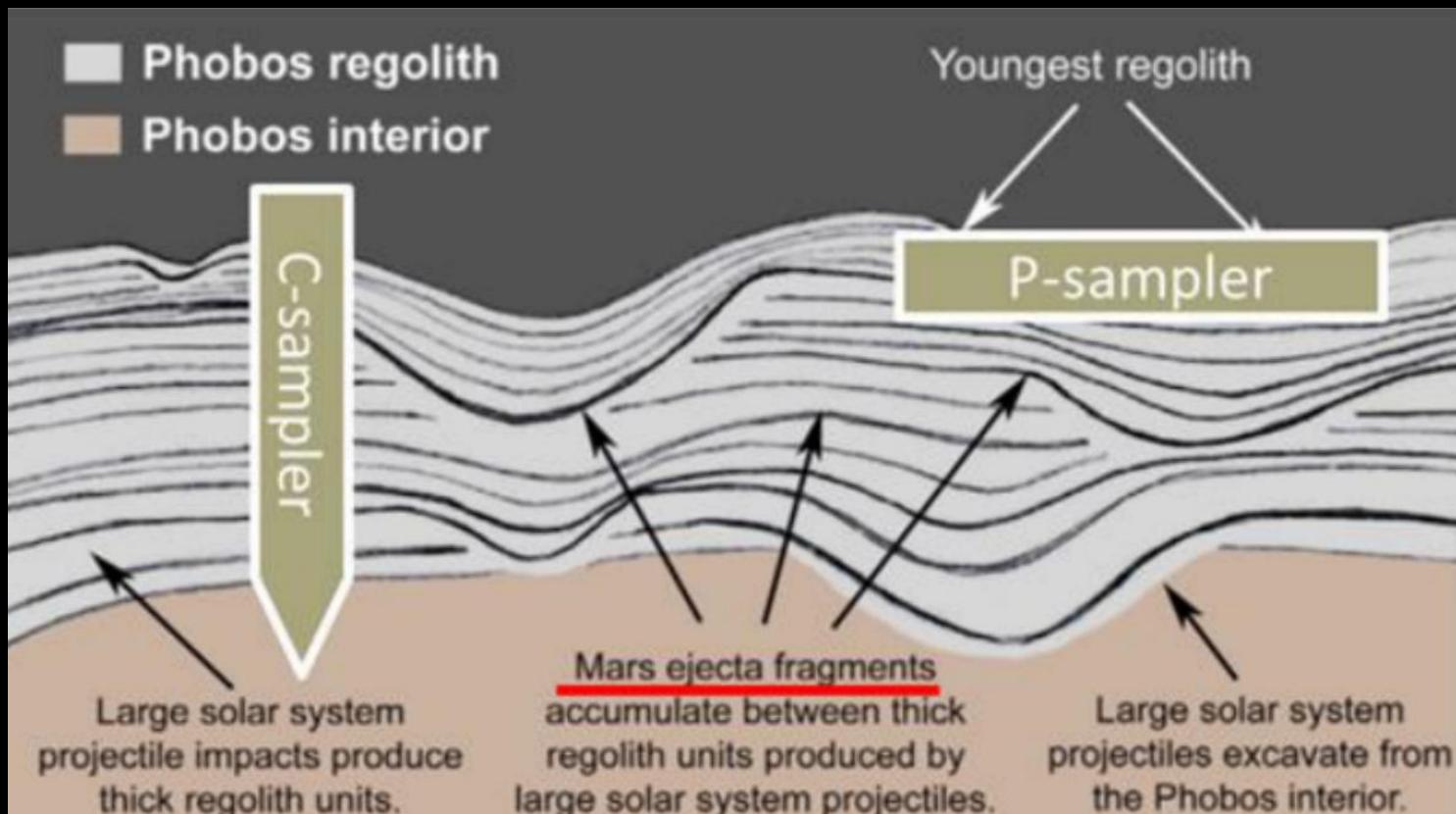
- La taille des grains
- La composition
- La géométrie d'observation

# 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)

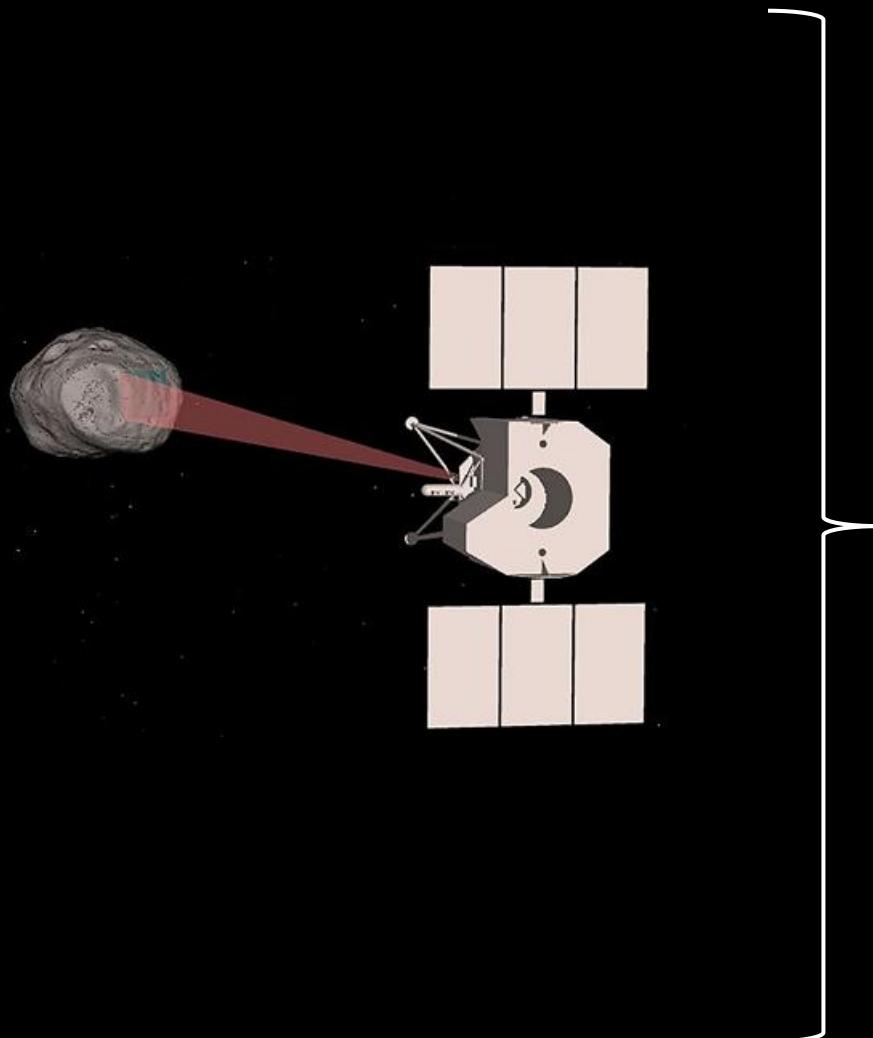


Credits : JAXA

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, JM. 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 TH. 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>