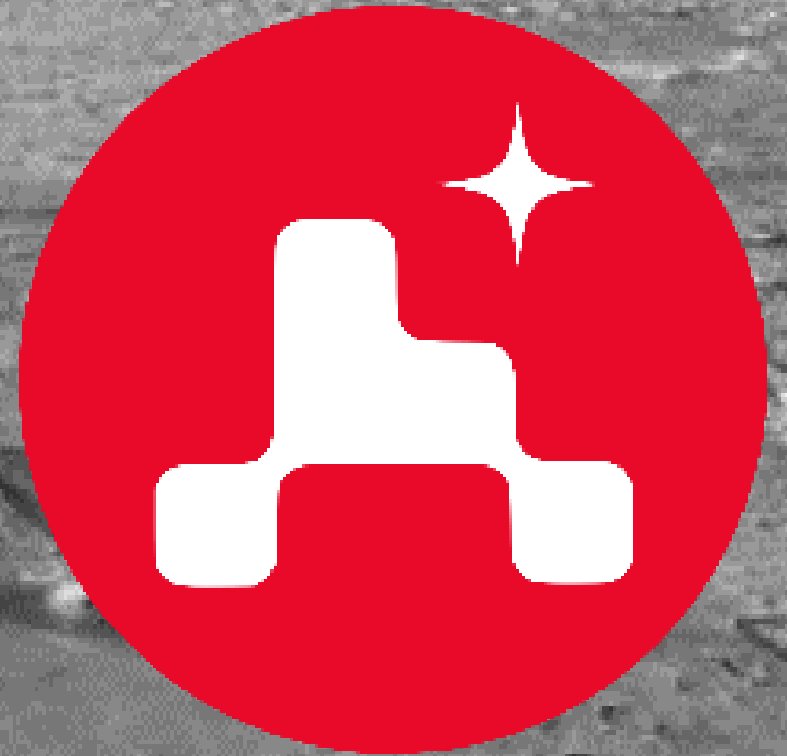


Mars de retour dans le Berry

L'exploration de Mars avec Perseverance



Contexte

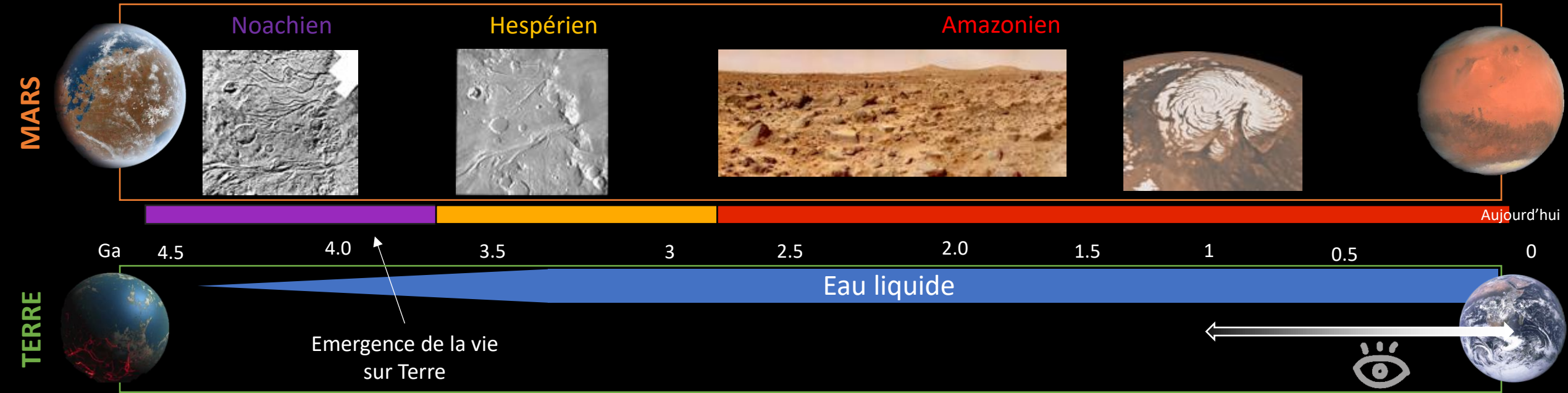
> 3.6 Ga - Noachien

2.8 – 3.6 Ga - Hespérien

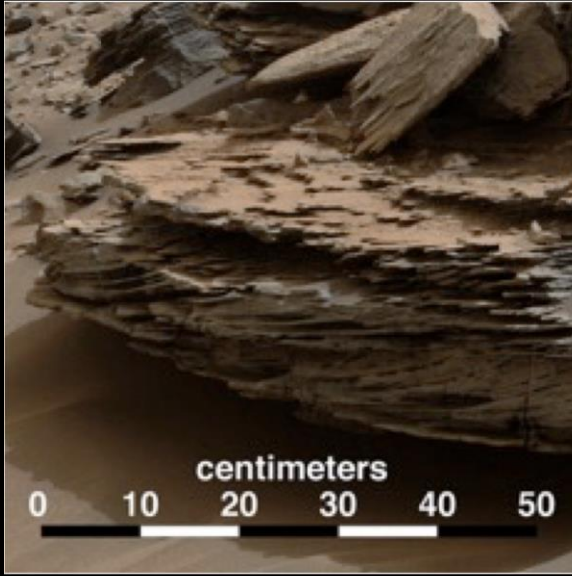
< 2.8 Ga - Amazonien



- 80 % de la surface est très ancienne > 2.8 Ga (2 % sur Terre)
- Changement climatique martien --> disparition de l'eau liquide
- Est-ce que la vie a pu émerger sur Mars également ?

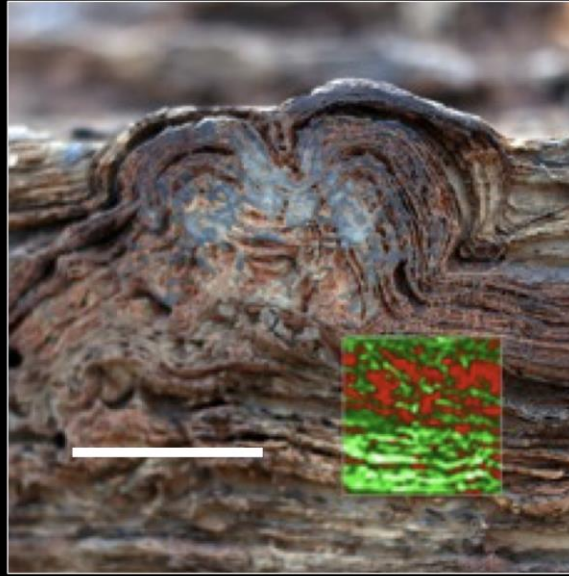


Objectifs de la mission Mars2020 avec Perseverance



Exploration géologique

- Explorer environnement ancien
- Processus de formation, et d'altération



Habitabilité passée Et Biosignatures

- Évaluer l'habitabilité passée
- Rechercher des traces de vie passées



Echantillonnage

- Collecter 38 échantillons
- Documenter leur contexte géologique



Environnement moderne

- Température, humidité, vent, poussière, radiations
- Conversion CO₂ -> O₂

La recherche de traces de vie

Que cherche-t-on ? → Biosignatures

Molécules
organiques

Contient du C
Liaison C-H

Isotopes

Fractionnement
isotopique

Bio-minéraux

Minéraux formés
via des processus
biologiques

Signatures
chimiques

CHNOPS
Etat d'oxydation

Structures
microscopiques

Fossiles
microscopiques
(cellules)

Structures
macroscopiques

Structures
géologiques
formées par la vie
(stromatolithes)

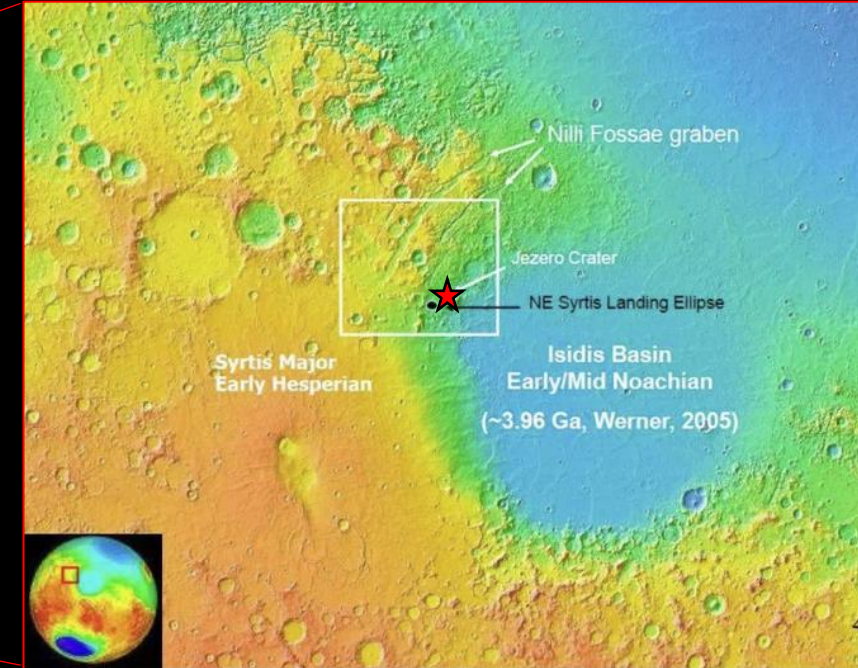
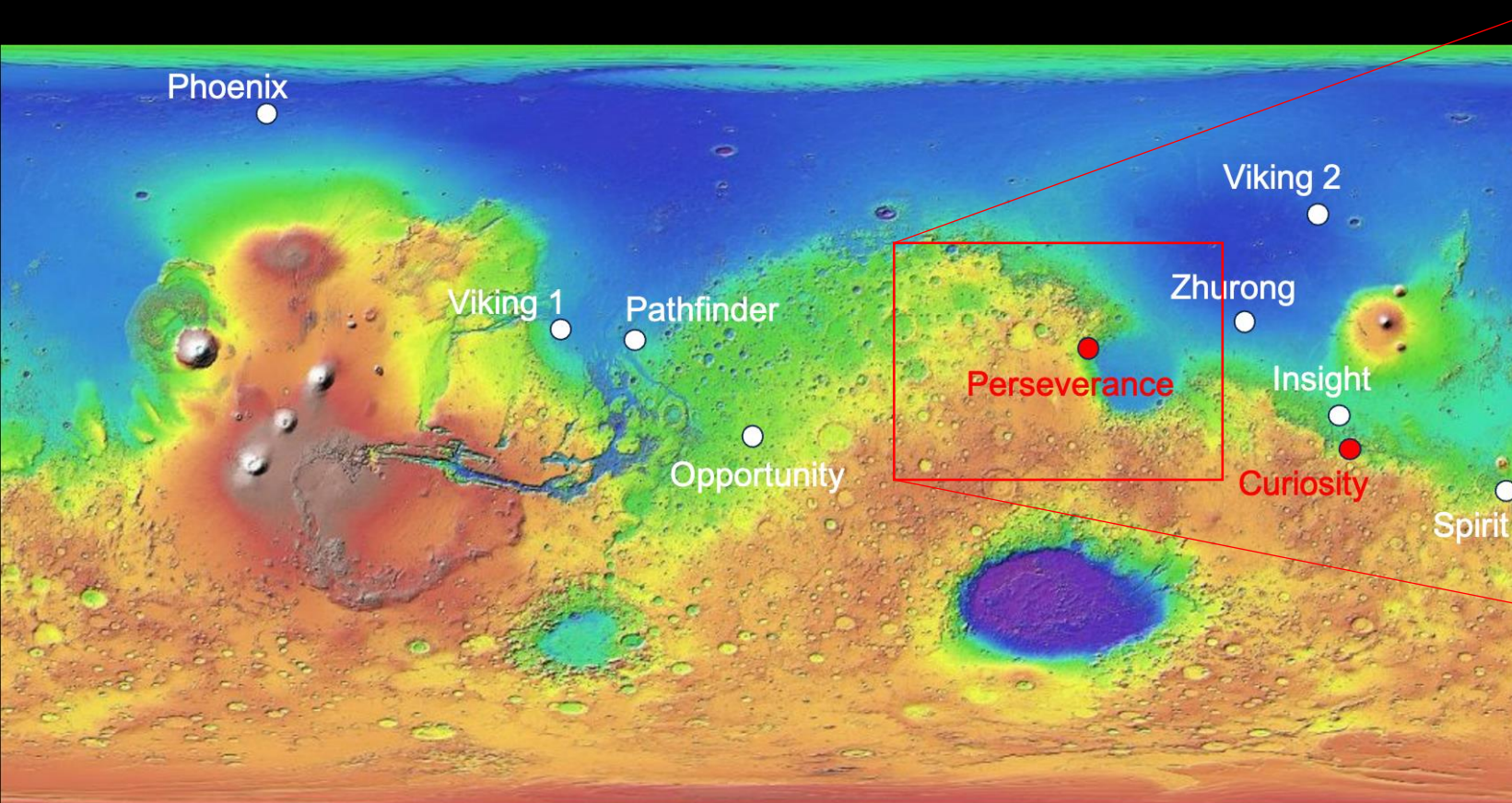
Spectroscopie de Masse

Minéralogie

Chimie

Imagerie

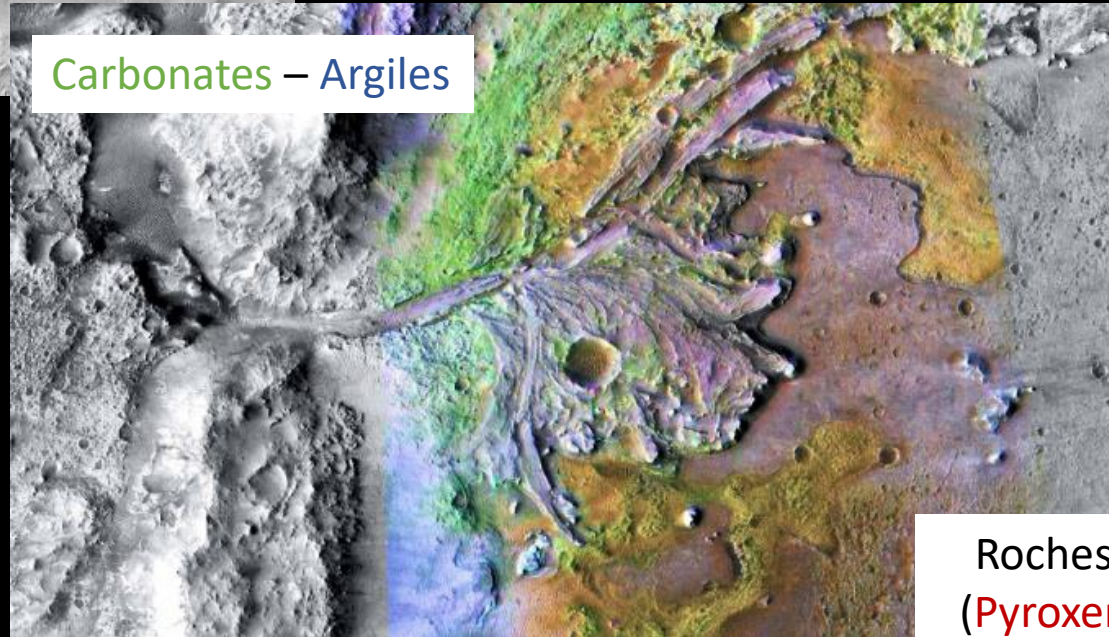
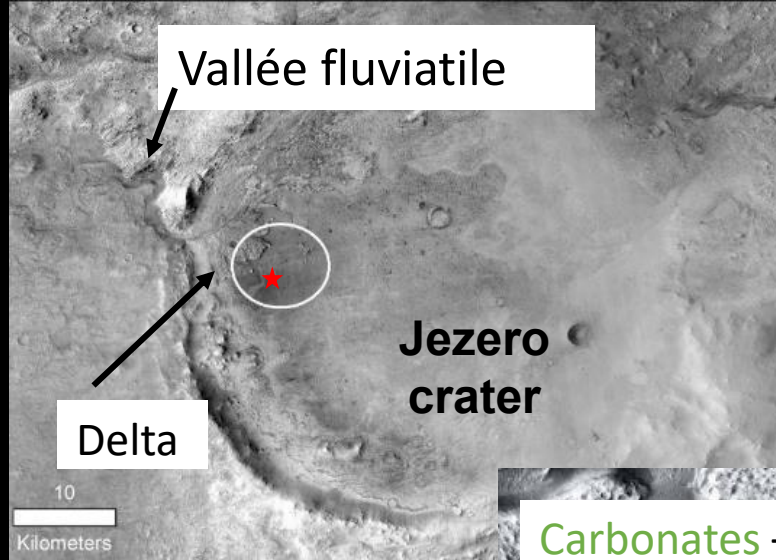
Site d'atterrissage: cratère Jezero



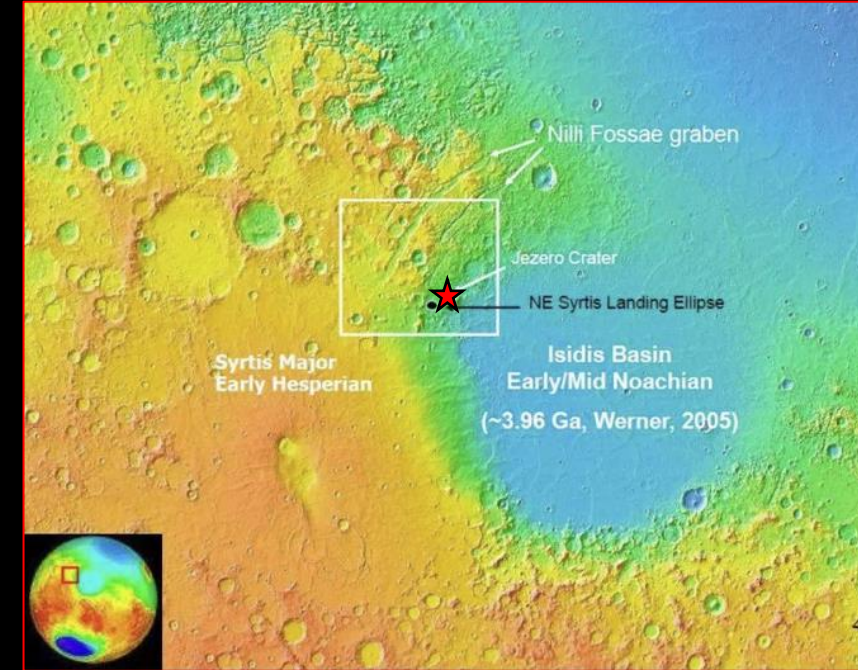
Carte altimétrique - NASA/GSFC/

Atterrissage le 18 février 2021

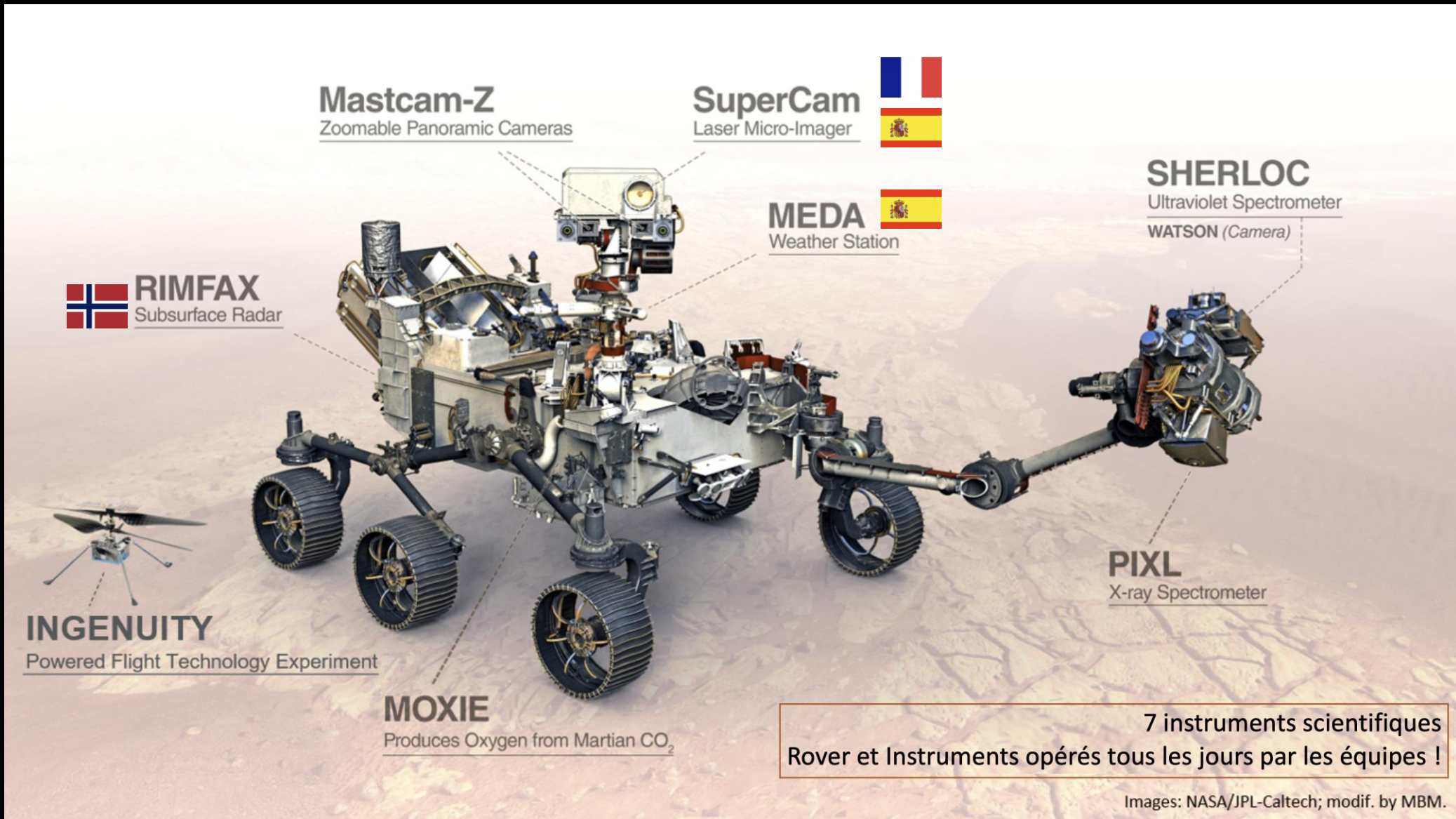
Site d'atterrissage: cratère Jezero



Roches mafiques
(Pyroxene, olivine)



Perseverance



Perseverance / Ingenuity

1^{er} vol motorisé extraterrestre



LD_heli_82
Sol 0082
d>62460 mm
Natural Colors
Fusion Stitch

LRVIM

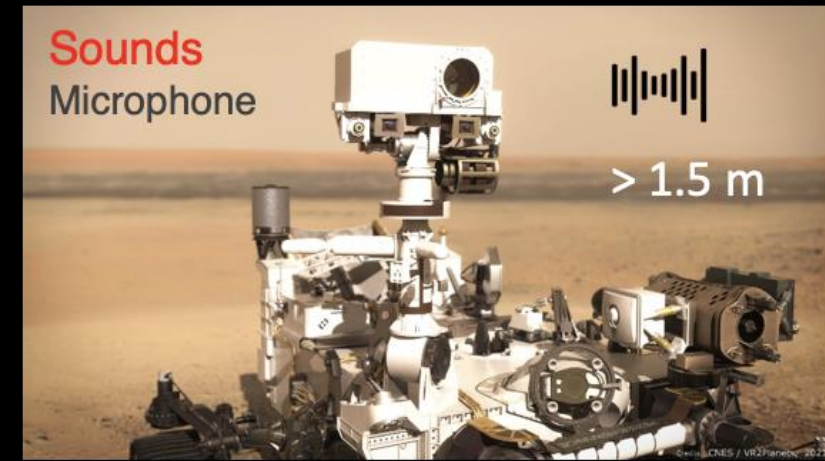
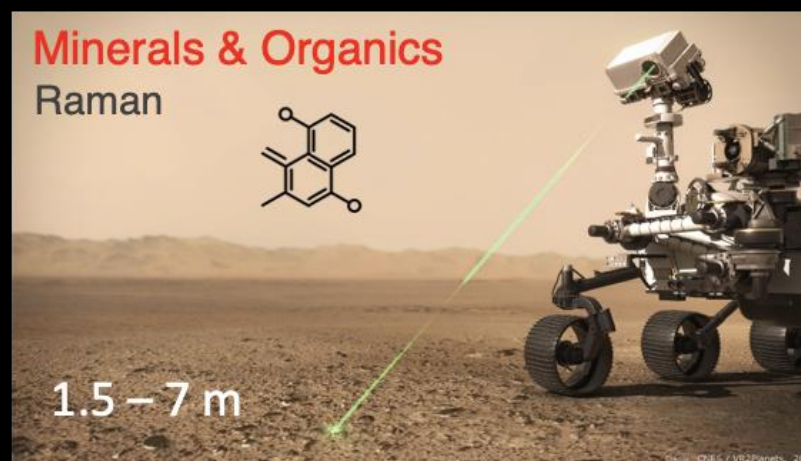
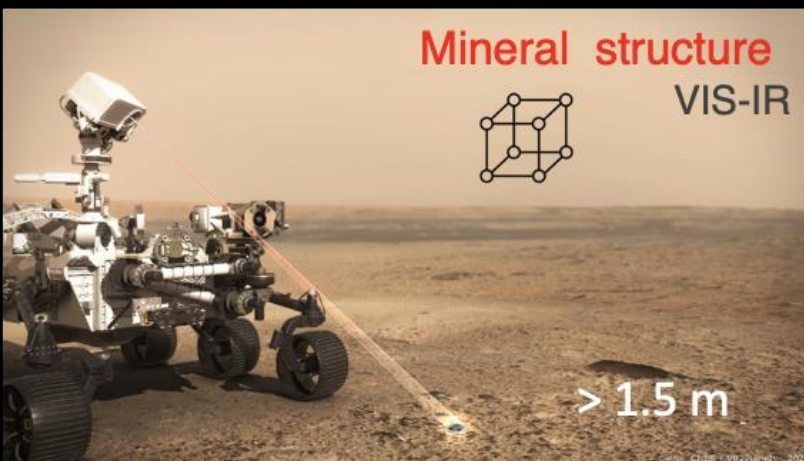
- Démonstrateur – Objectif: 5 vols
→ 72 vols effectués
- ~17 Km parcourus – record 700 m en 1 vol

Précurseur de Mars Chopper
(future mission d'exploration dans des zones
inaccessibles ou plus grandes)

Image prise par SuperCam à ~60m



- Roches et sols
- Atmosphère



Objectifs

- ✓ Caractériser l'habitabilité
- ✓ Rechercher des traces de vie

Collecte d'échantillons

- ✓ Trouver les échantillons les + pertinents
- ✓ Caractériser leur env. géologique

14 laboratoires impliqués (IRAP, LIRA, LATMOS, IAS, IMPMC, Georessources, LGL, IPAG, IsTerre, LAB, CELIA, LPG, ISAE, IMFT + CNES)
+ de 20 industriels

La traverse



- 1636 sols à la surface
- Statut du rover
 - 39.5 Km parcourus
 - Statut nominal

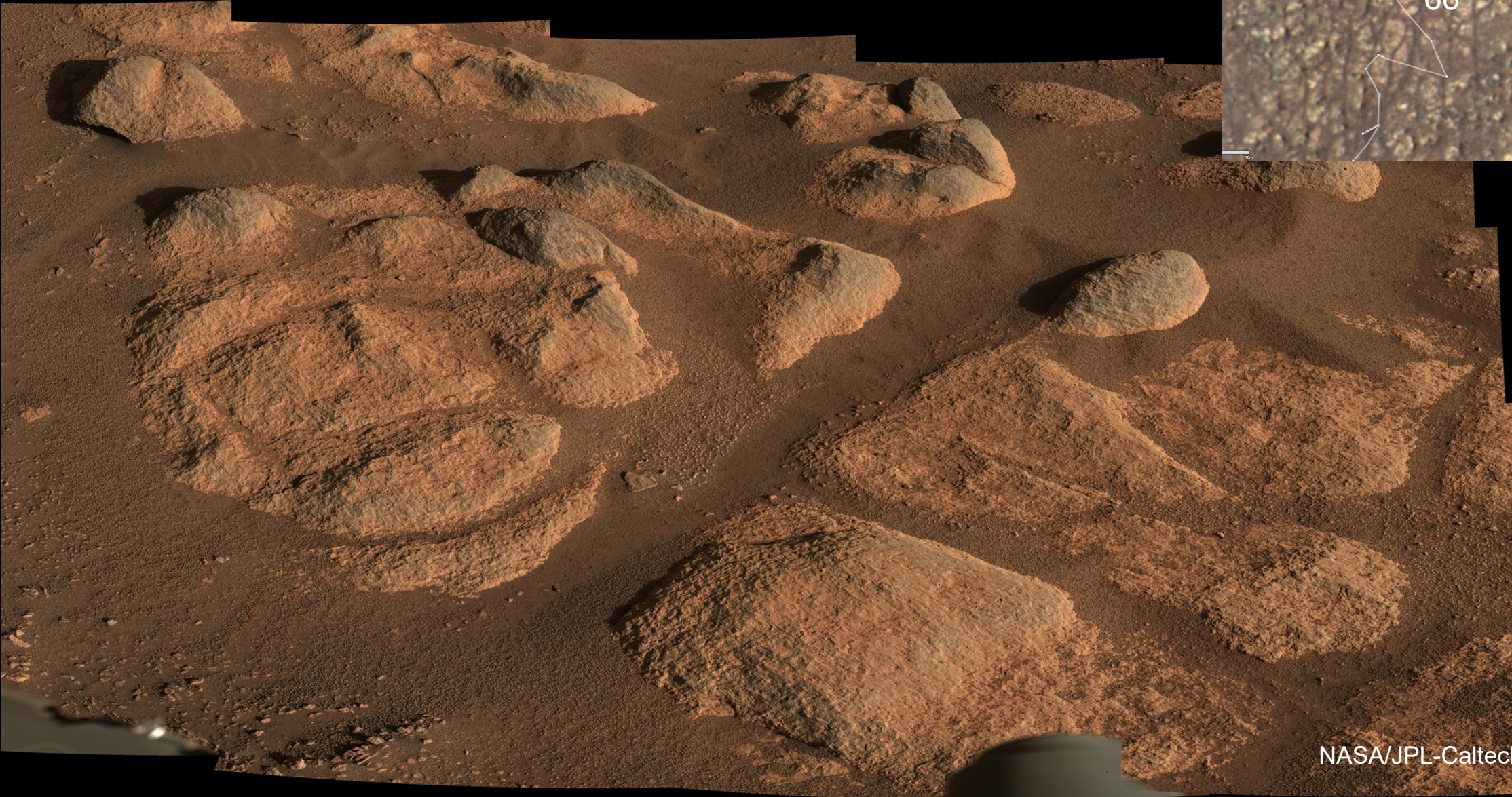
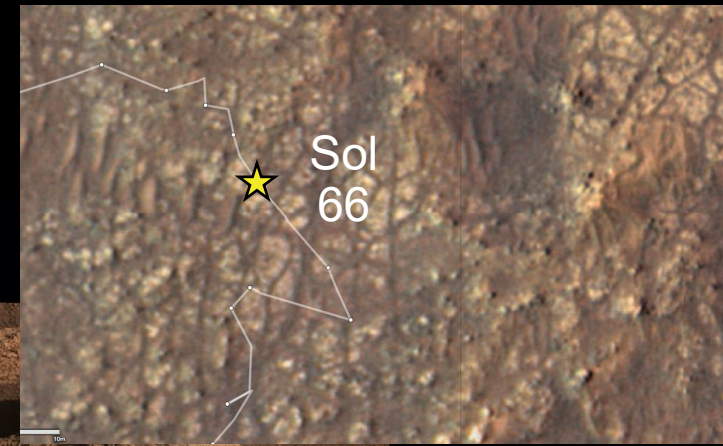
The Jezero Crater Floor

NASA/JPL-Caltech/ASU/MSS



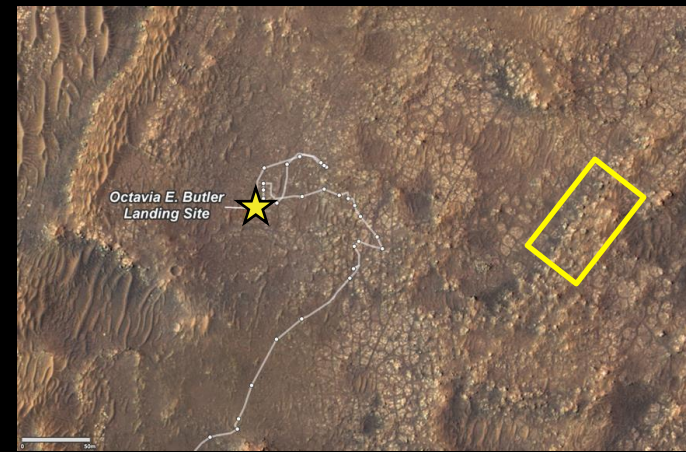
- These rocks can teach us about the crater's history pre-delta
- We want to understand if the lake in Jezero was a single event, or if there were a series of lakes followed by dry periods

Naat'áanii member: Polygons



Ch'al member: Roches massives en relief

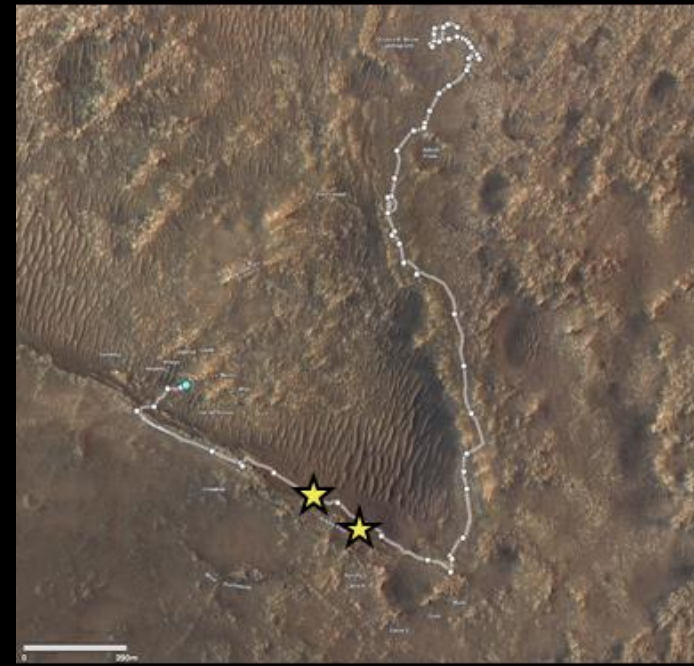
NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS



Layered Rocks of Artuby Ridge

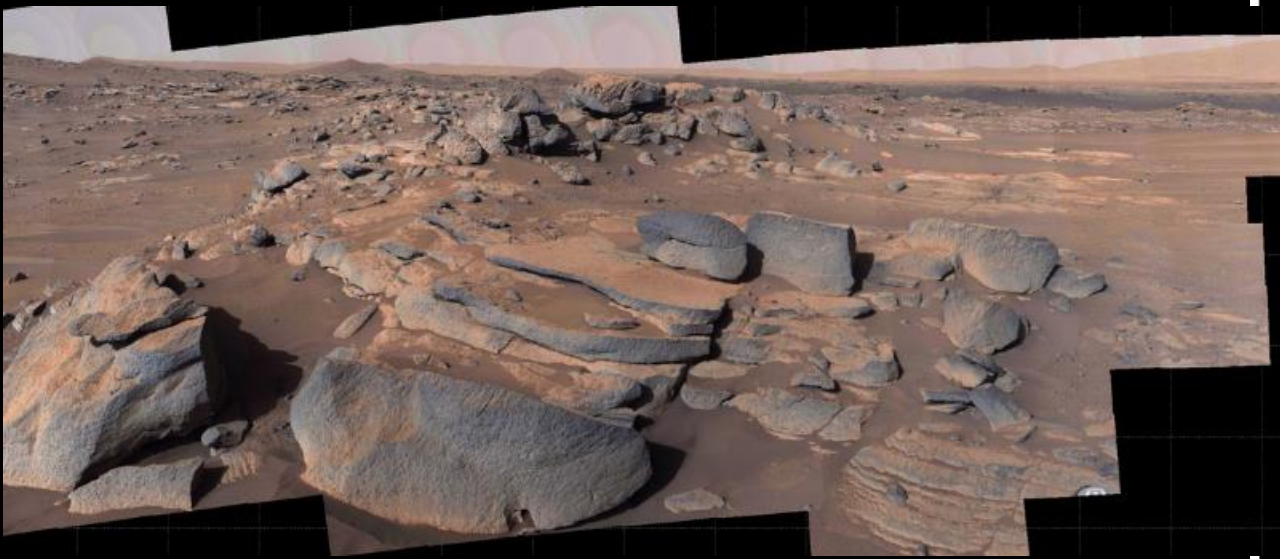


Navcam
Sol 175
Artuby "116"
NASA/JPL-Caltech

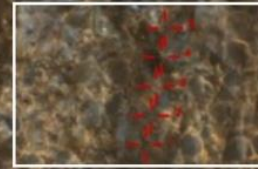
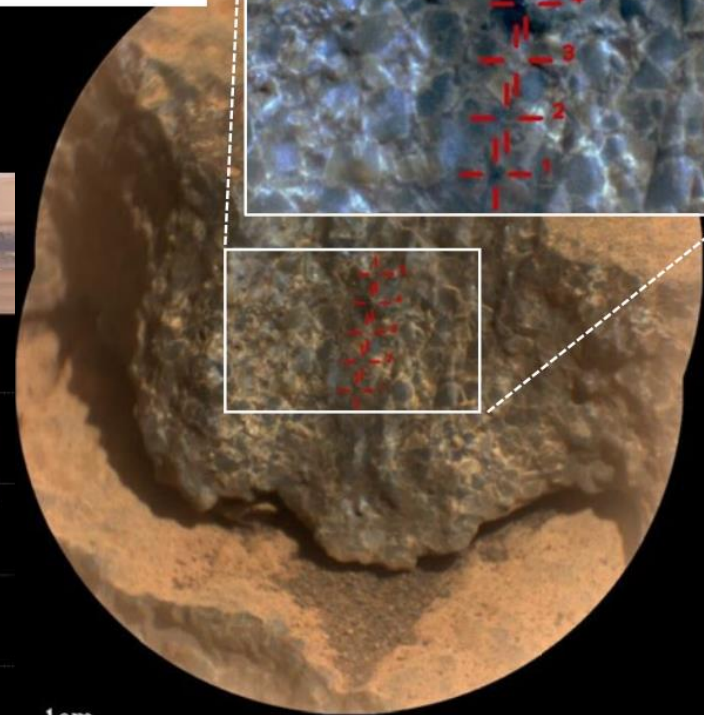


Mastcam-Z
Sol 173
Artuby
NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS

Seitah



a Cine
D=2.33 m



Mastcam-Z (from 10 m away)

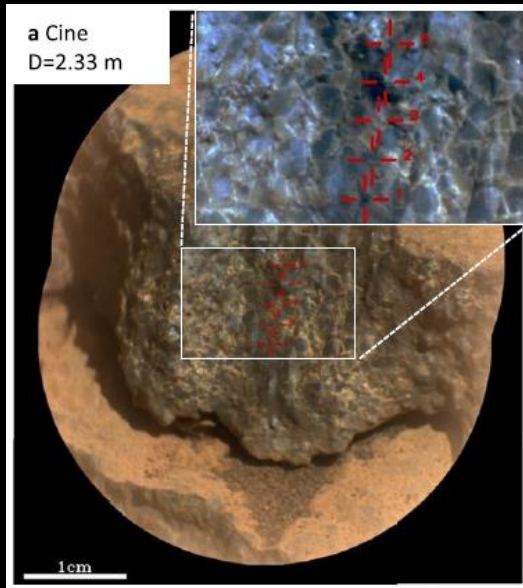
Contexte Géologique – fond du cratère

- Màaz:

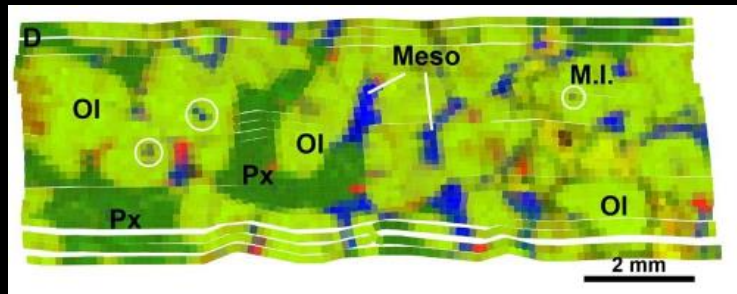
- Coulées de lave successives
- Relativement peu altérées mais diverses phases secondaires
- Altération à faible température, après mise en place des coulées

- Seítah:

- Cumulat riche en olivine

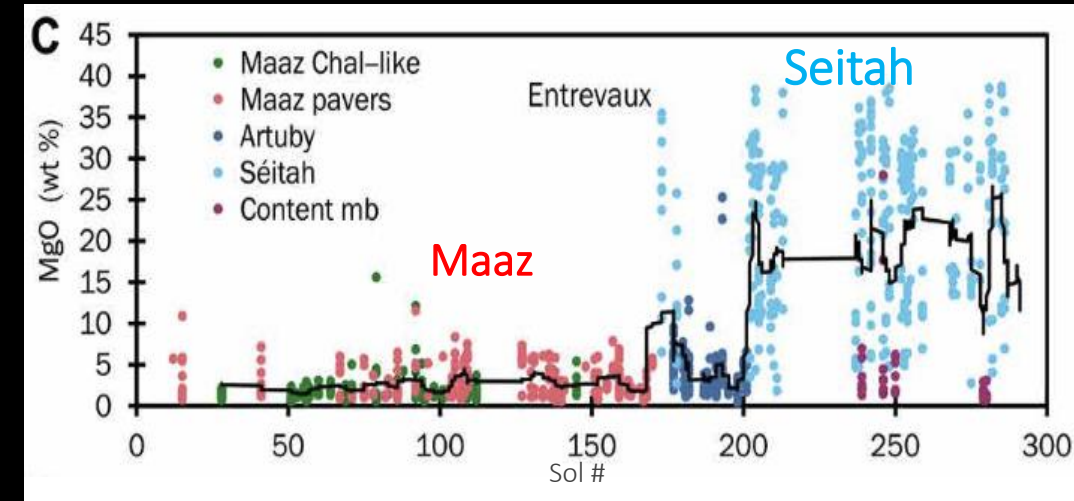


PIXL X-Ray Fluorescence map



Poikilitic texture with pyroxene grain that encloses olivine grains

Liu et al., 2022

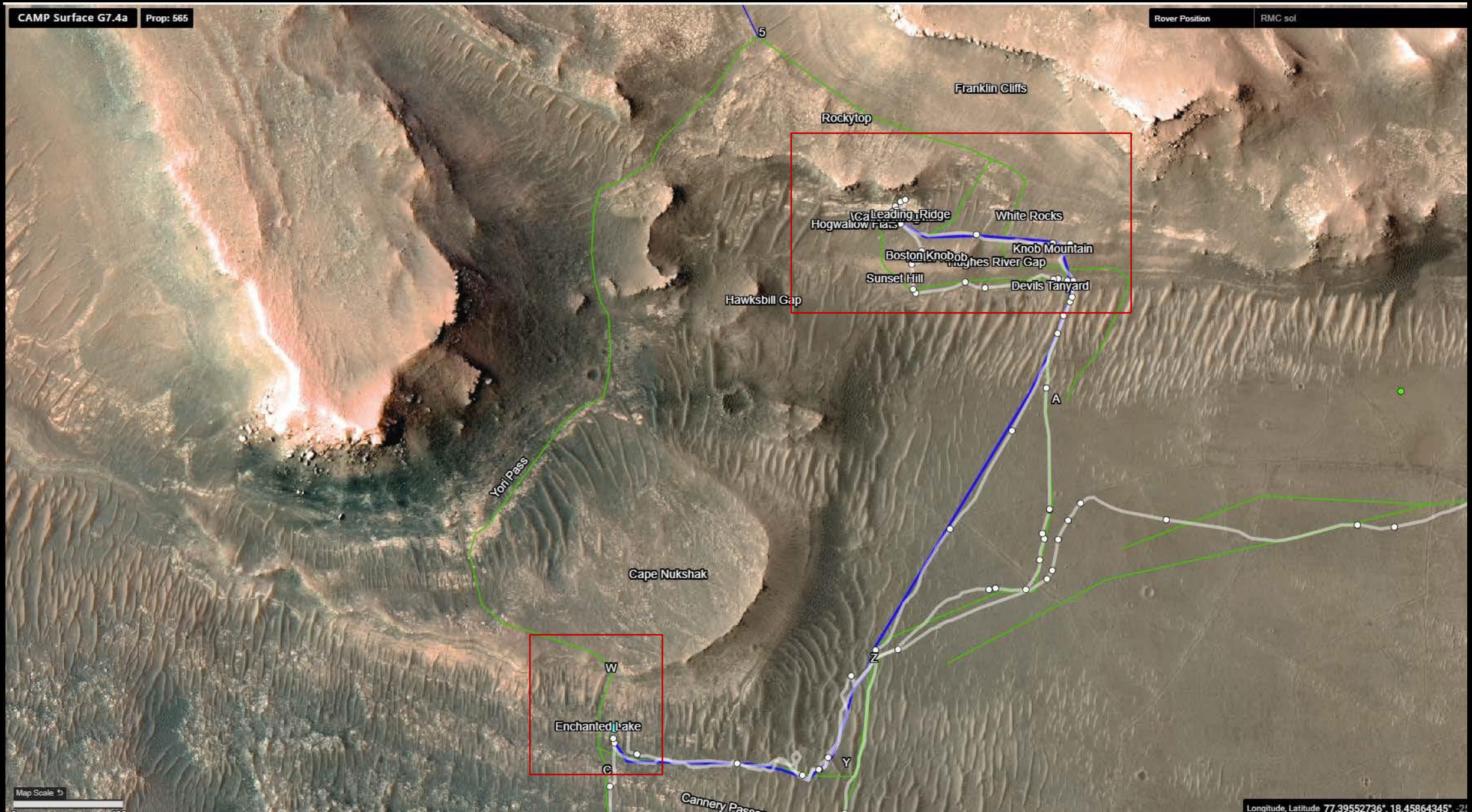


Wiens et al., 2022

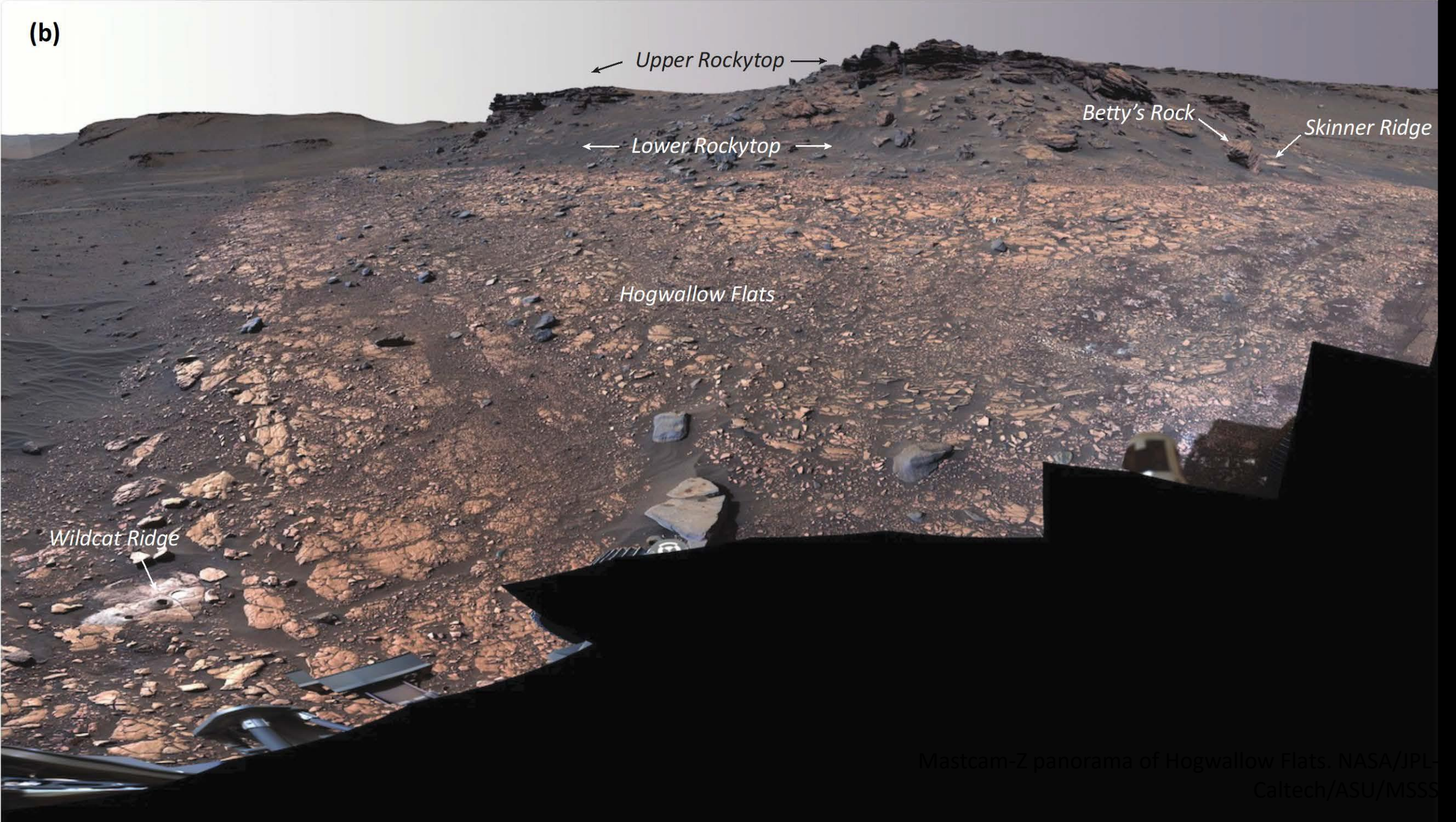
Delta Front Campaign



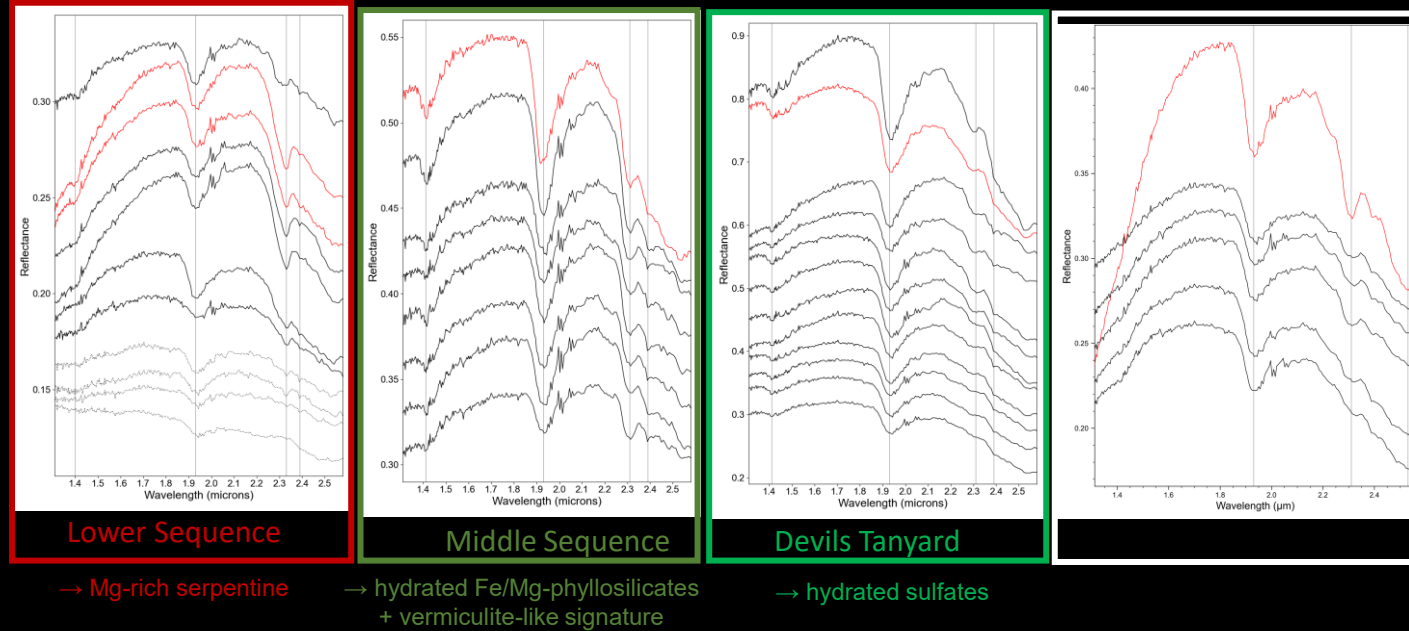
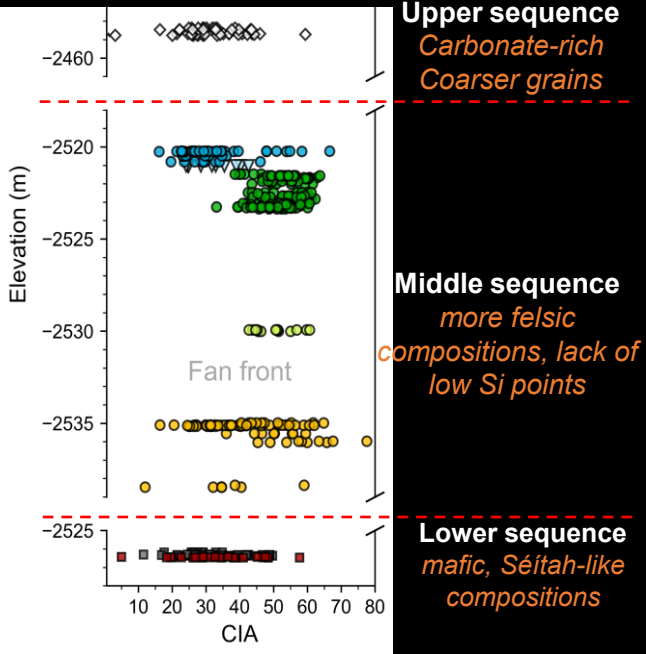
- Collecter des échantillons relativement grossiers qui illustreraient la provenance des dépôts
- Collecter des échantillons très fins (type silts), qui ont potentiellement un fort potentiel pour la préservation de biosignatures.



(b)



Résumés des minéralogies observées au delta front



Dehouck et al., in prep

=> beaucoup de phases secondaires, et beaucoup de diversité !

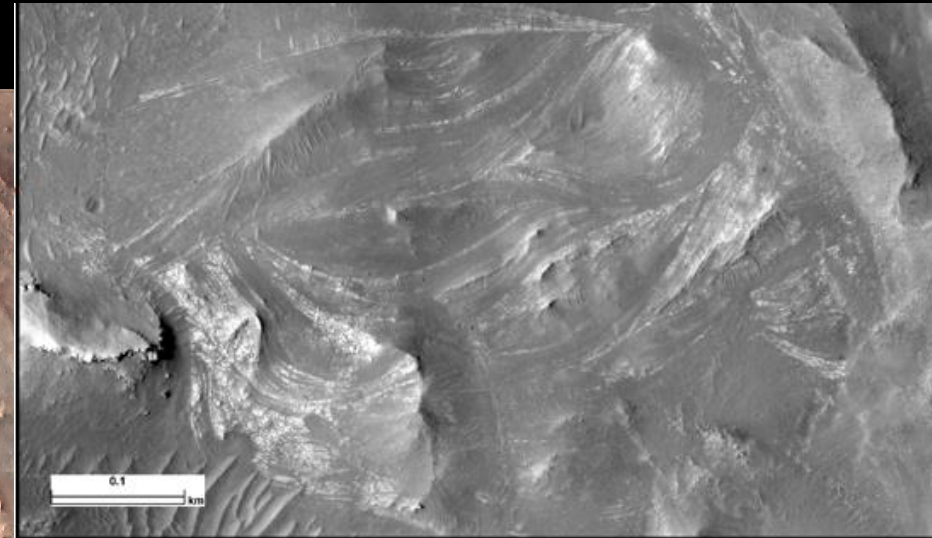
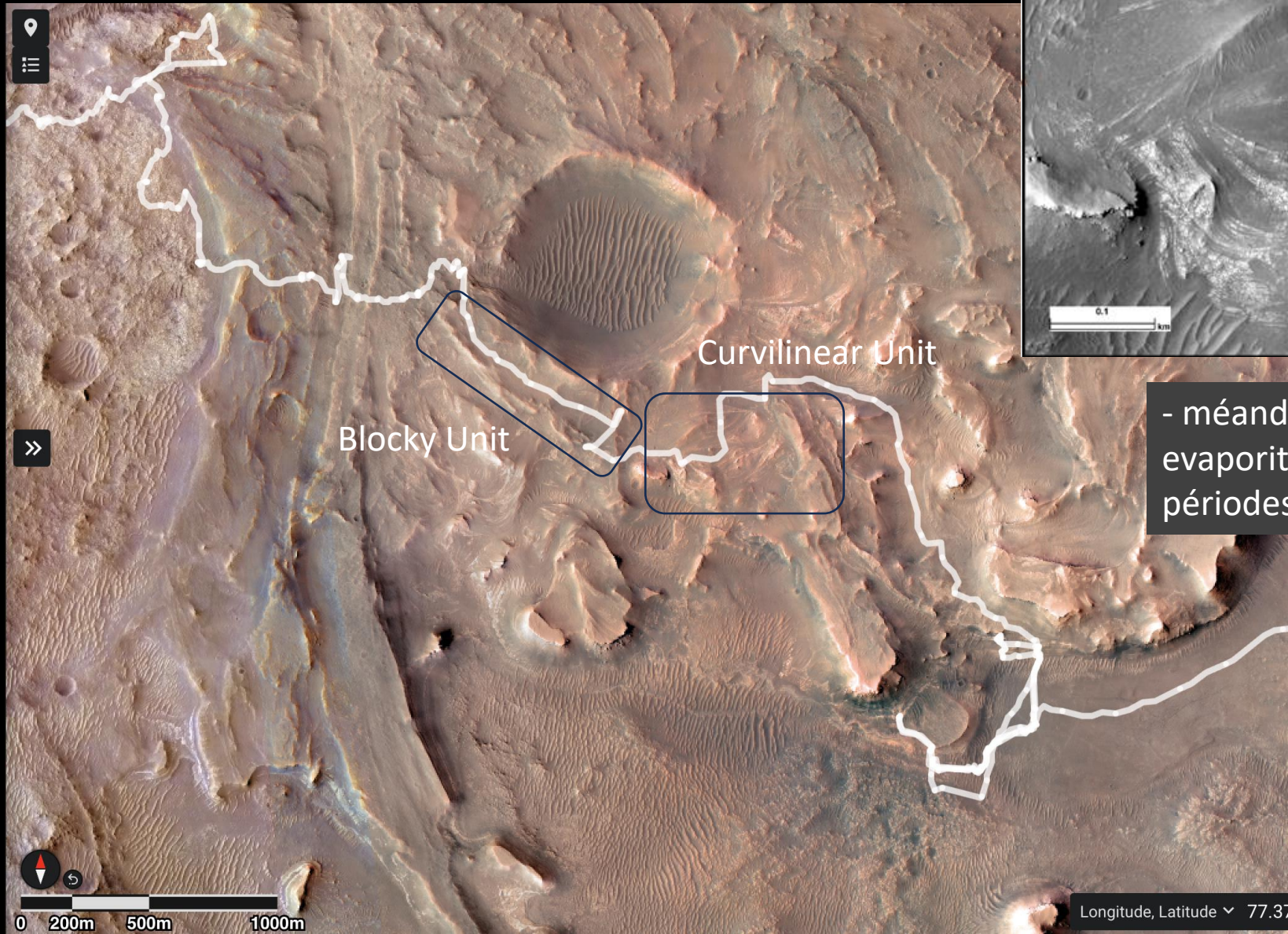
- Vermiculite/smectites => faible température
- Mg-serpentine => hydrothermalisme
- Sulfates hydratés => env. évaporitique
- Carbonates => détritique ou diagénétique ?

=> Différents paléoenvironnements échantillonnés par le rover

Delta Top Campaign

- Quels sont les paléo-environnements représentés sur le delta ?
- Quels sont les processus d'altération ayant eu lieu ? Quels processus diagénétiques ?
- Quelle est la relation (timing et strati) du delta avec les autres unités ?
- Quelle est la relation (timing et strati) entre les unités du delta ?
- Quelle est la provenance des sédiments du delta ? Peut-on contraindre leur âge ?
-
- Quel était le climat régional pendant la formation du delta ?
- Y'a-t-il des évidences de biosignatures dans le delta ?





- méandres ? Ou lacustre, évaporitique entre différentes périodes d'activité ?

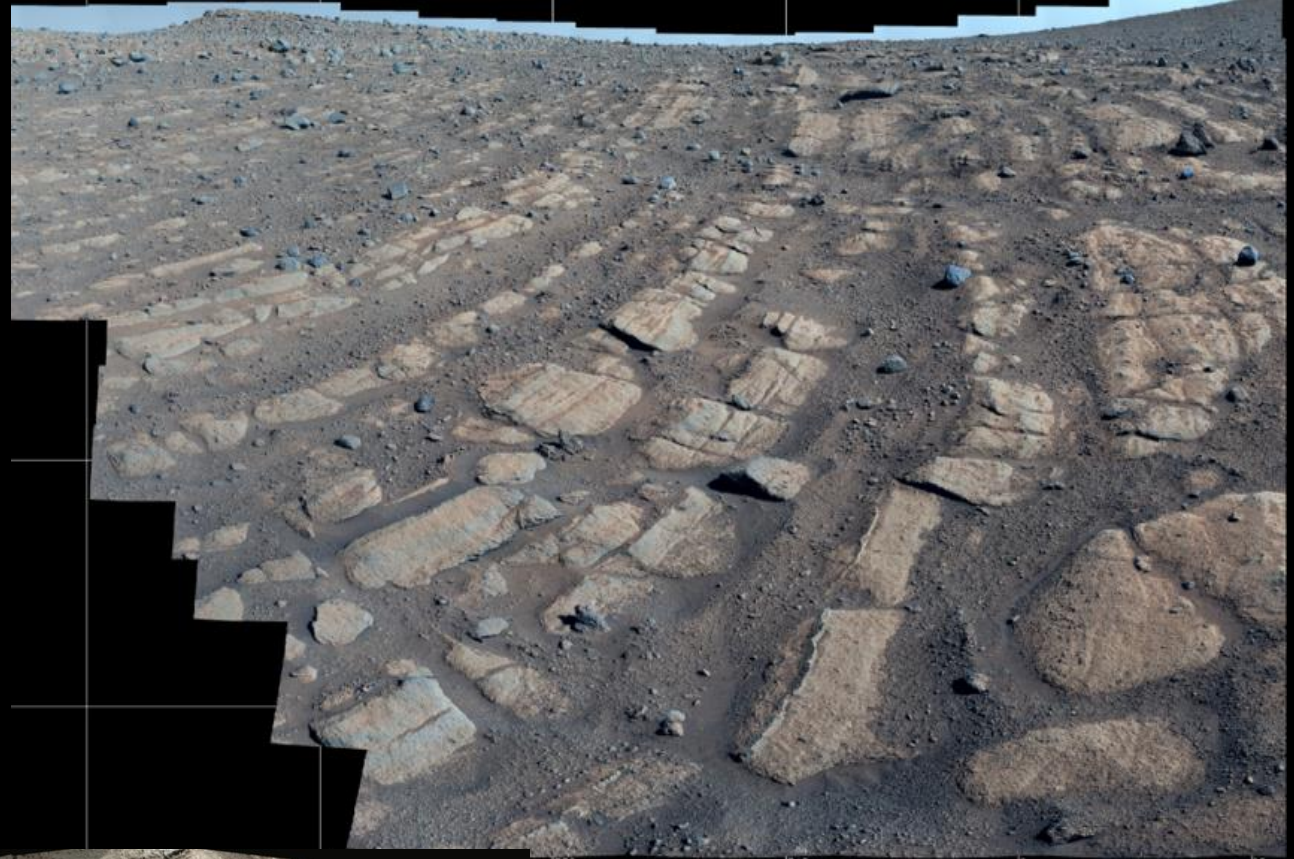
M2020-749-22 *Melyn* => *Curvilinear Unit*

Caractéristiques

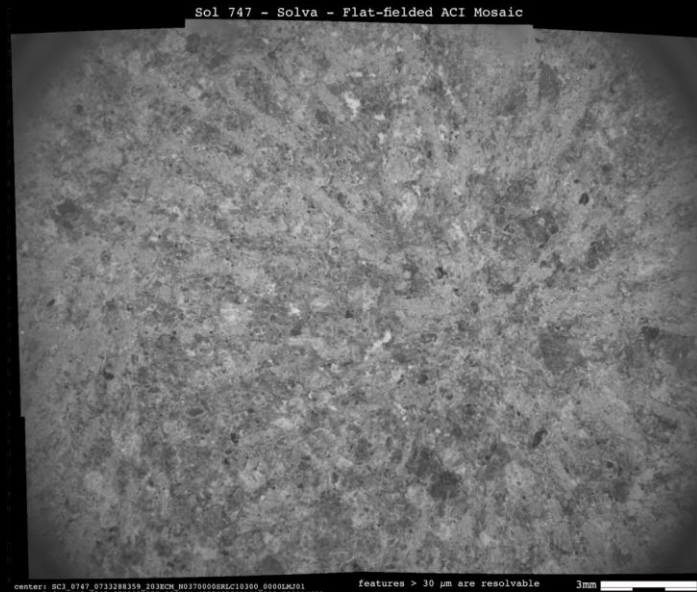
- Grès
- Minéraux primaires
- Minéraux d'altération, carbonates de Fer, sulfates, argiles

=> Dépôts de rivière lors de l'entrée dans le cratère

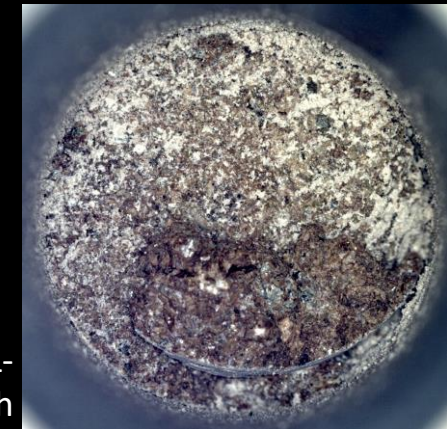
=> Accès à des échantillons en dehors de Jezero



Mastcam-Z images. NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS



WATSON ACI mosaic of *Solva* abrasion. NASA/JPL-Caltech



CacheCam image. NASA/JPL-Caltech

Caractéristiques:

- Conglomérat fluviatile



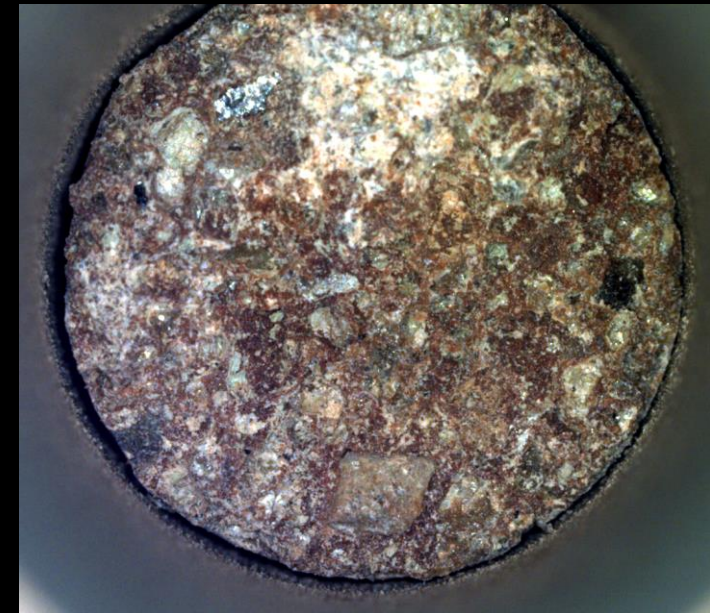
Mastcam-Z image. NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS



NavCam image. NASA/JPL-Caltech



WATSON image of *Ouzel Falls* abrasion. NASA/JPL-Caltech

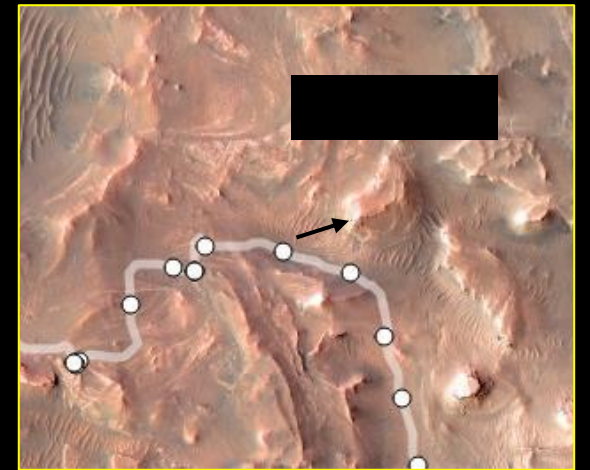


CacheCam image. NASA/JPL-Caltech

Delta top: Pinestand

Steeply dipping layers up to 22 m thick for the thickest
=> More foresets on the top of the fan – Higher lake level

Transition at >-2449 m



Accumulation of dipping beds in downlap sequences

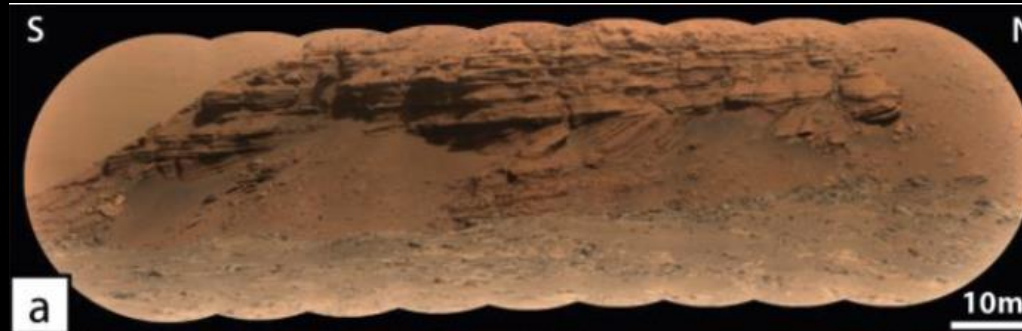
Delta Remnant “Kodiak”

- Inclined and horizontal layering is consistent with that of a river delta
- Indicates that the Jezero Delta once covered a larger spatial area

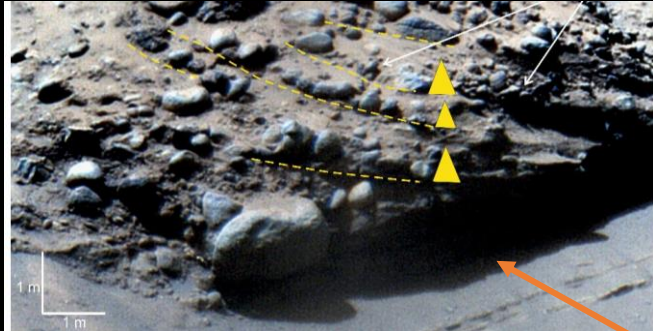


Contexte Géologique - delta

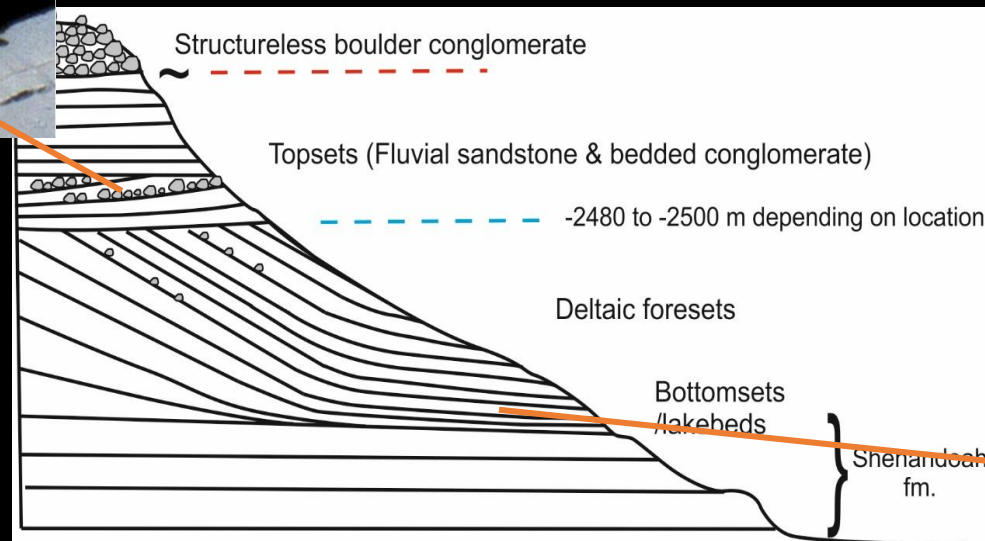
- Similarité avec les deltas terrestres bien documentés



Mangold et al., 2021; Caravaca et al., 2022

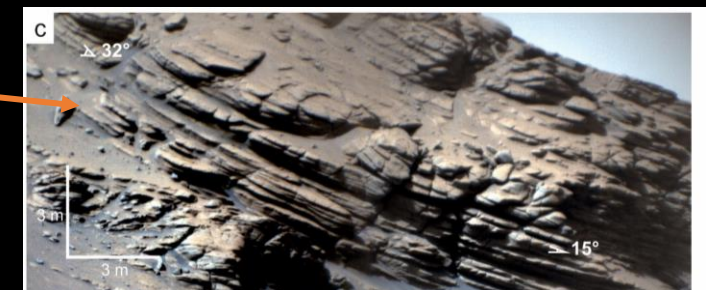


- Partie inférieure: dépôts lacustres
- Partie supérieure: dépôts fluviaux
- Apports fluviaux très variables

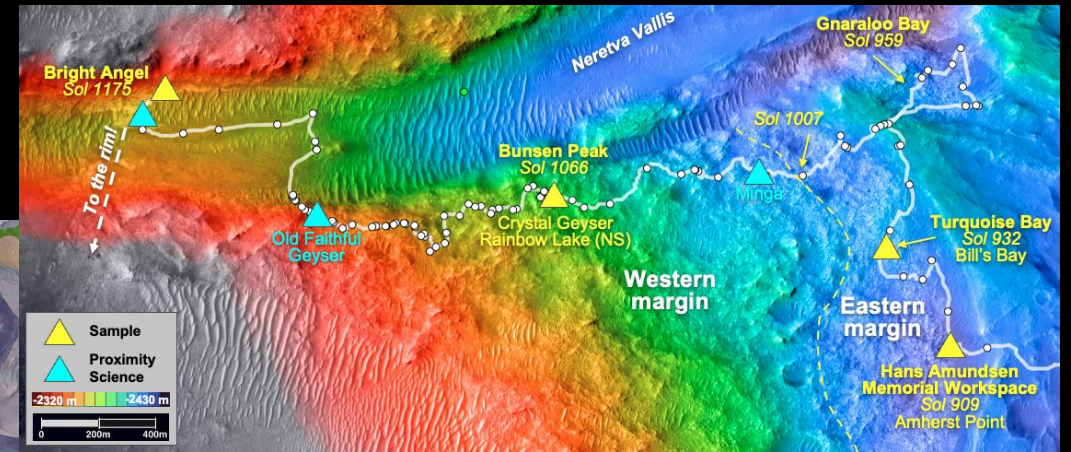


- Forte diversité minéralogique au pied du delta

Mangold et al., 2022

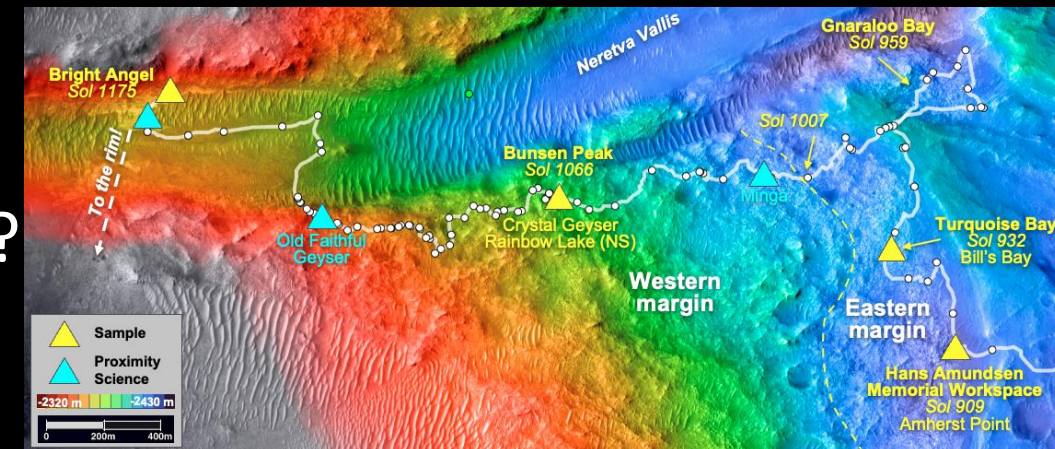


Margin Unit !



Margin Unit !

- Déterminer les processus de mise en place de ces terrains (lacustrines, fluvial, ignée?)
- Déterminer les processus d'altération, et les épisodes diagénétiques
 - Les carbonates: ciment, évaporites, détritiques, hydrothermaux ?
- Quelle est la relation stratigraphique de la margin unit par rapport au crater rim, le delta top, ou encore Séitah ?
- Y'a-t-il des potentielles biosignatures ?
- Timing relatif entre la margin unit et le lac ?

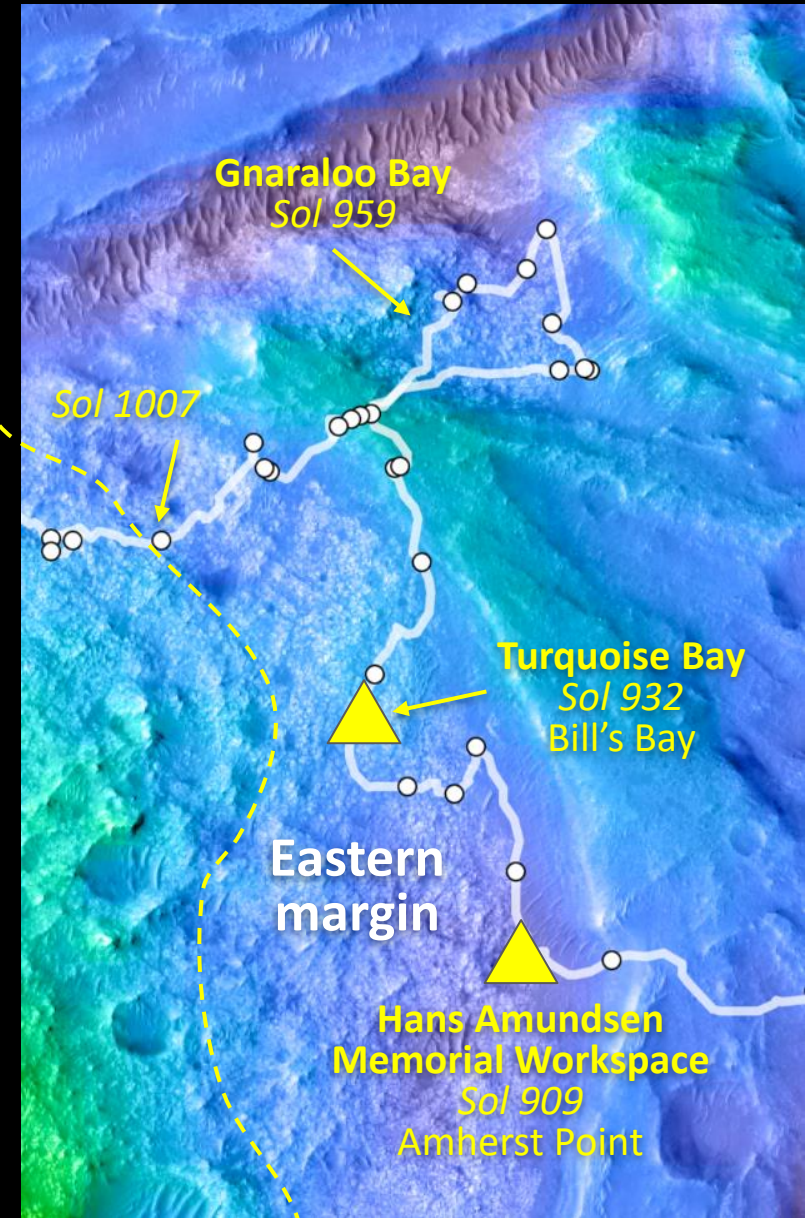


Eastern Margin



Mostly rounded to sub-rounded grains

Bill's Bay Abrasion
WTSN 7cm white LED illuminated



The long trek west

Thicker layers

Greater apparent angularity between grains

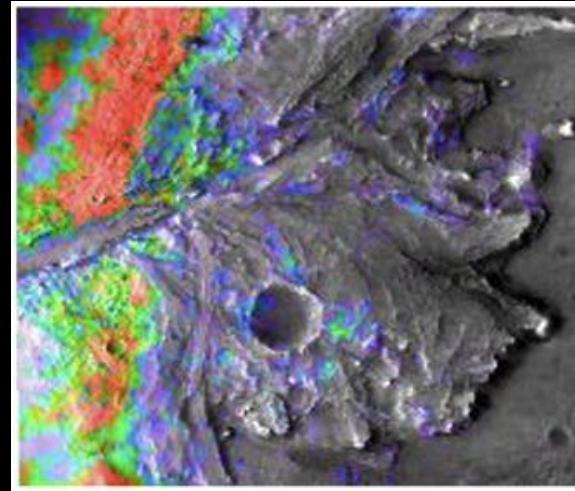
2 mm

 Crystal Geyser Abrasion
WTSN 7cm white LED illuminated



Contexte Géologique – margin unit

- Confirmation de la présence de carbonates
- Roches à grains relativement grossiers
 - Carbonates omniprésents
 - Intimement mélangés aux minéraux primaires et à la silice



Horgan et al., 2020



- Formation des carbonates: altération des roches volcaniques

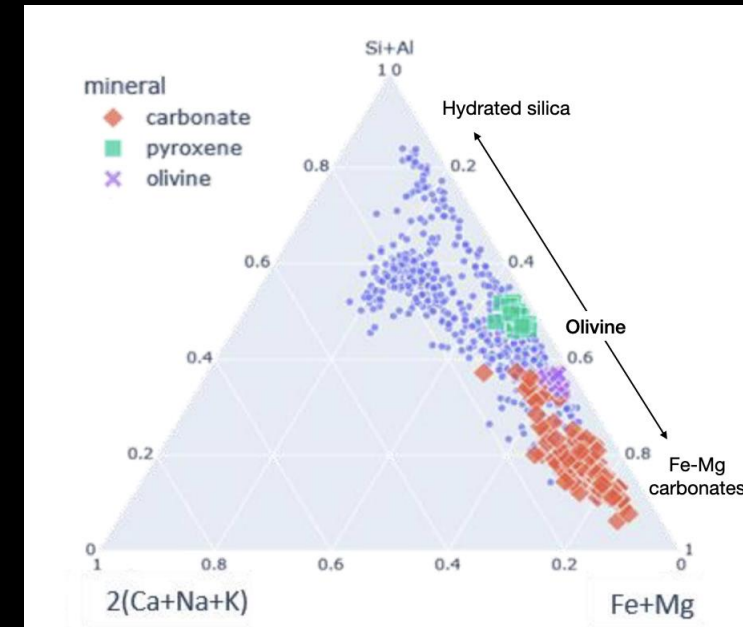
=> Carbonates

=> Silice hydratée

=> *Assemblage minéral similaire au fond du cratère*

=> *Origine magmatique ou sédimentaire ?*

Structure encore très énigmatique

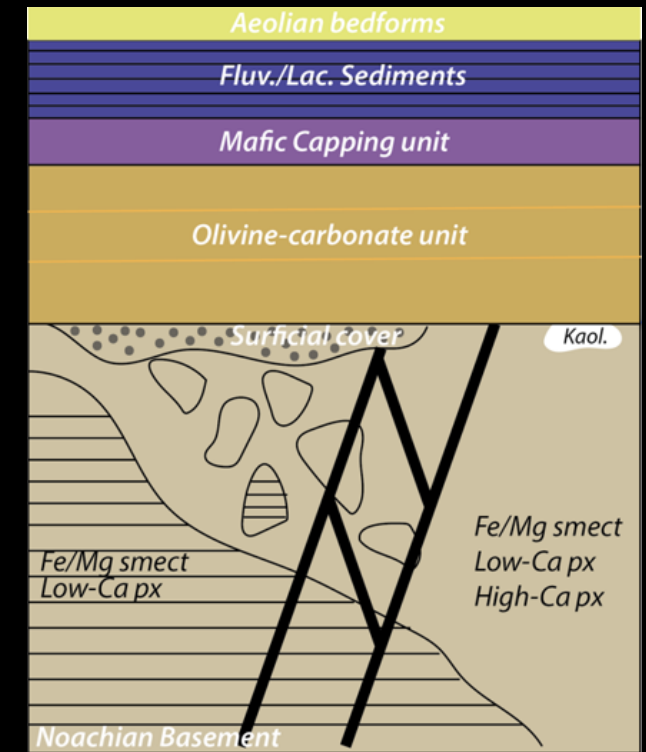


Clavé et al., Mars10th

Contexte Géologique – bord du cratère

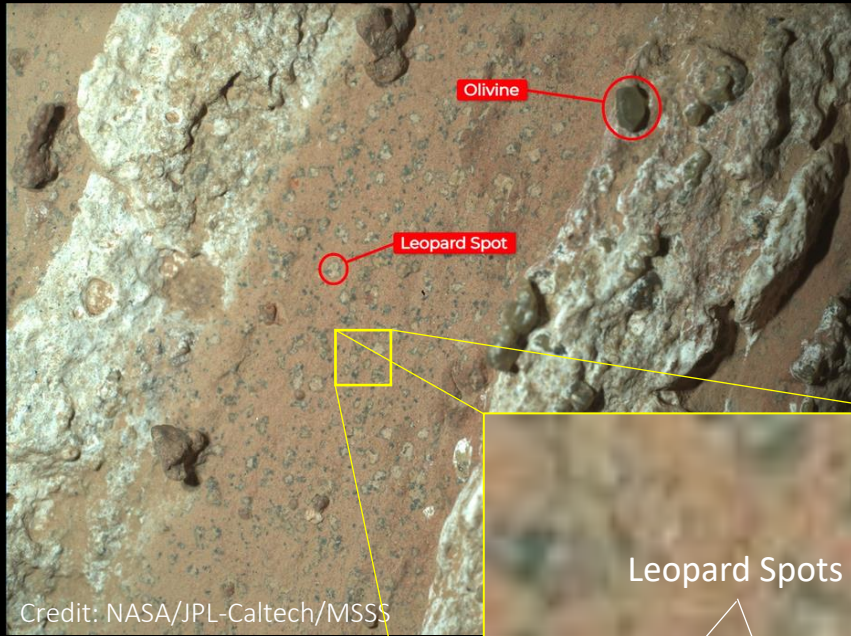
- Terrains du Noachien (>3.6 Ga) - pour la 1^{ère} fois *in situ*
- Evolution planétaire (formation de la croûte, processus ignés, ..)
- Habitabilité passée et biosignatures (hydrothermalisme, ..)
- Datation des terrains (roches magmatiques, ..)
- Processus sédimentaires les plus anciens (climat ancien, paléo-environnements, ..)
- Effets des impacts à l'échelle d'Isidis (impact-melt, ..)
- Socle Noachien
 - Matériel pre-Jezero divers
 - Matériel pre-Isidis: Mega-brèches très diverses
- Unités régionales accessibles
 - **Unité riche en olivine (et carbonates)**
 - **Unité riche en minéraux primaires**

=> Lien avec les unités volcaniques globales
=> Lien avec les unités du fond du cratère

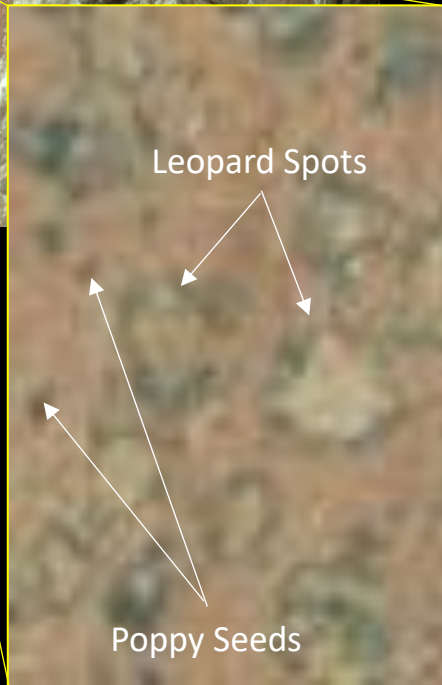


Scheller et al., 2020

Potentielles Biosignatures / Habitabilité passée



Credit: NASA/JPL-Caltech



Hurowitz et al., 2025

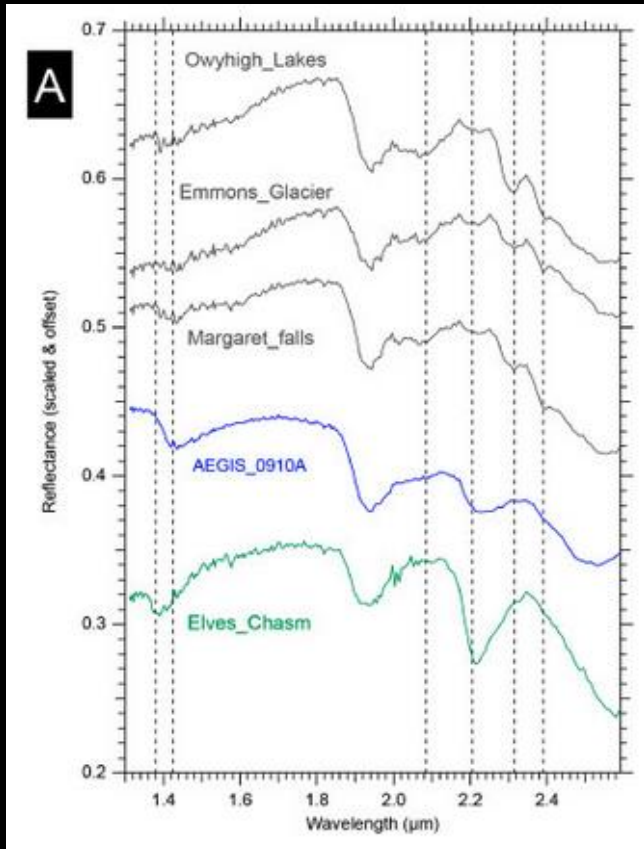
- Sédiment à matrice très fine dans Neretva Vallis
- Poppy Seeds: grains sombres de 100-200 microns
- Leopard Spots: zones claires avec bordure + sombre
- Signatures possiblement organiques d'après SHERLOC
- Poppy Seeds et bordures de Leopard Spots sont enrichies en Fe^{2+} et P.
- Le coeur des Leopard Spots sont enrichis en Fe^{3+} , Ni et S.

=> Phénomènes d'oxydo-réduction, pouvant être sources d'énergie pour la matière organique

Potentielles Biosignatures et habitabilité passée

- Détection de différentes roches dominées par de la silice, +/- cristallisées
- 1^{ère} détection non ambiguë de Quartz à la surface de Mars
- Précipitations à partir du même système hydrothermal, à différentes profondeurs

=> fort potentiel astrobiologique
(silice hydratée préserve les organiques)



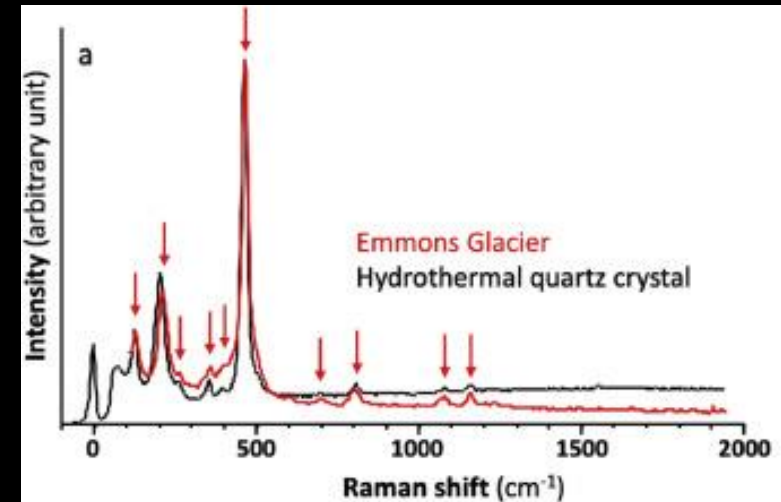
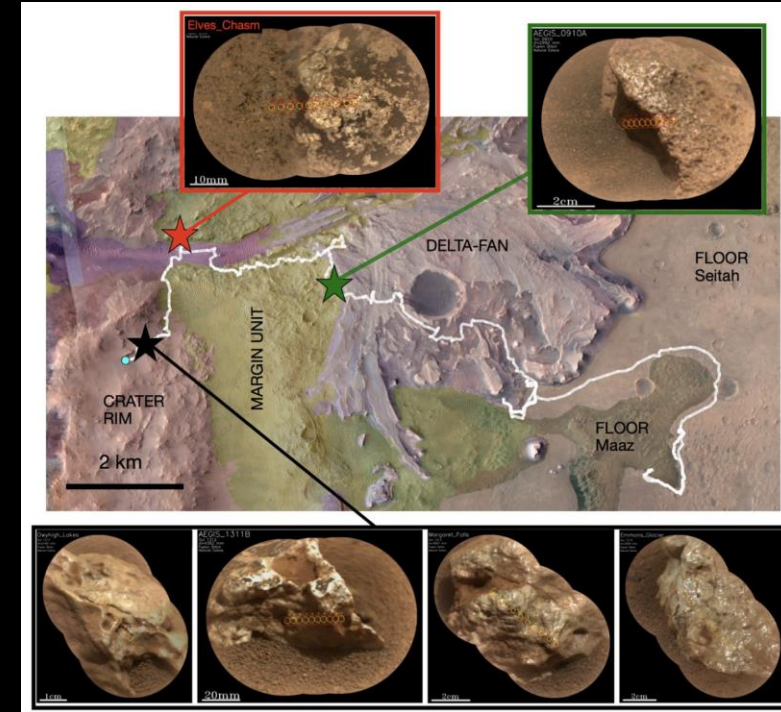
Emmons_Glacier

Sol 1315
d=3350 mm
Fusion Stitch
Natural Colors



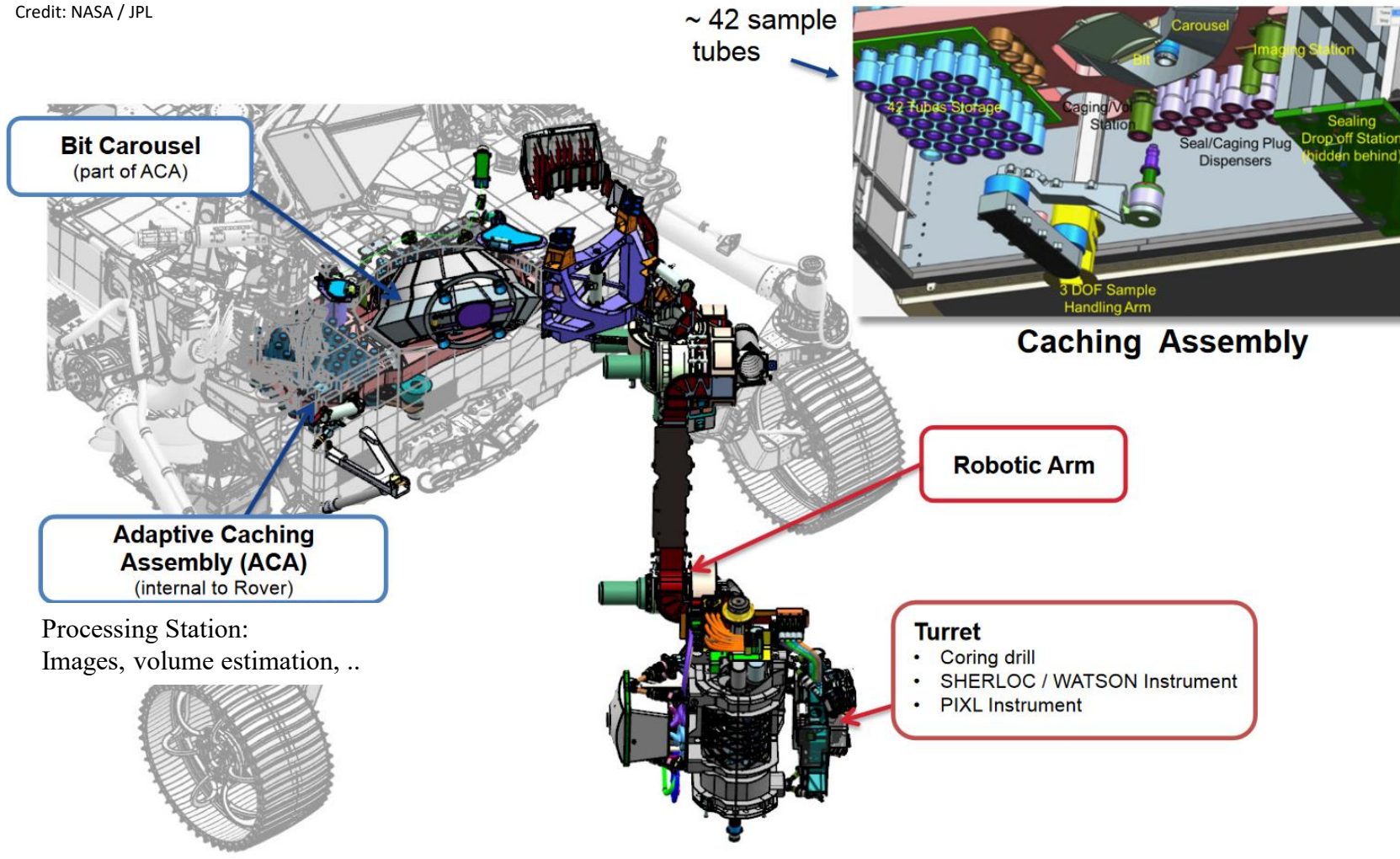
2cm

Beck et al., 2025



Echantillonnage

Credit: NASA / JPL



⇒ 3 robots in the rover:

- arm,
- bit carousel
- processing station

⇒ Total of 42/43 tubes:

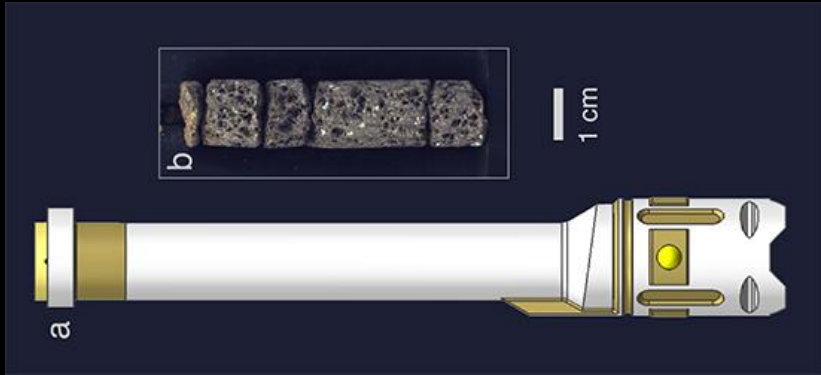
- 38 of rocks and soils
- 5 for witness

⇒ Around 20 tubes should be back to Earth

⇒ Each tube is around 57 gr, 15cm long, 13mm diameter

Echantillonnage

- Système de bras complexe



NASA/JPL-Caltech

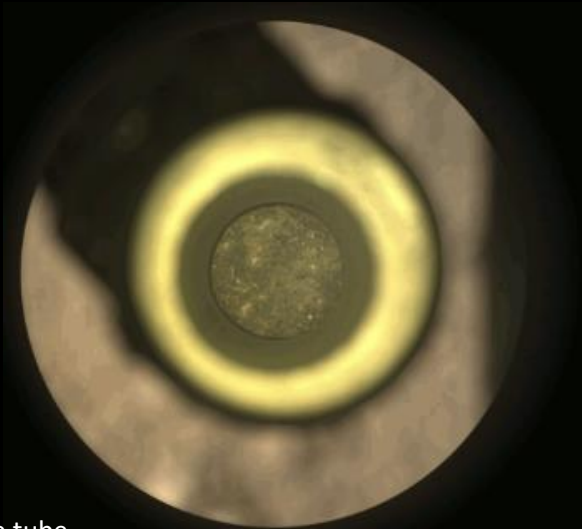


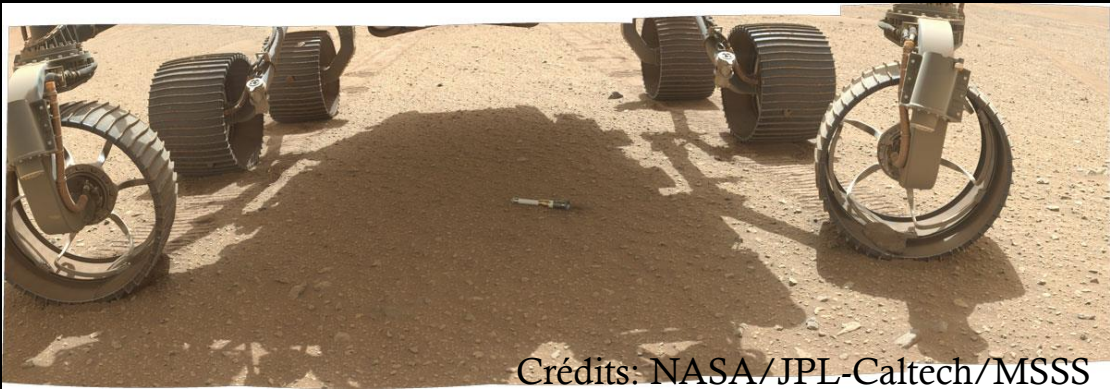
Image de l'échantillon dans le tube

Echantillonnage

Dépôt du Backup à Three Forks:

=> 21 Decembre 2022 (Sol 653) – 31 Janvier 2023 (sol 696)

=> 10 Tubes



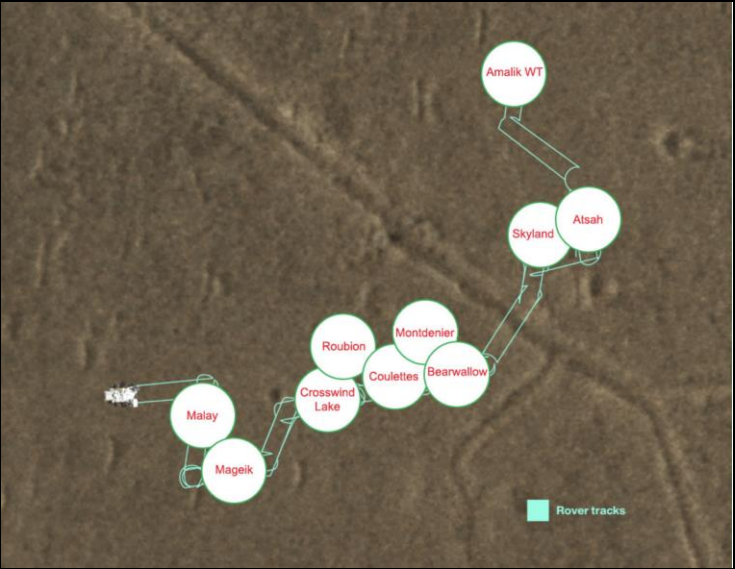
Crédits: NASA/JPL-Caltech/MSSS



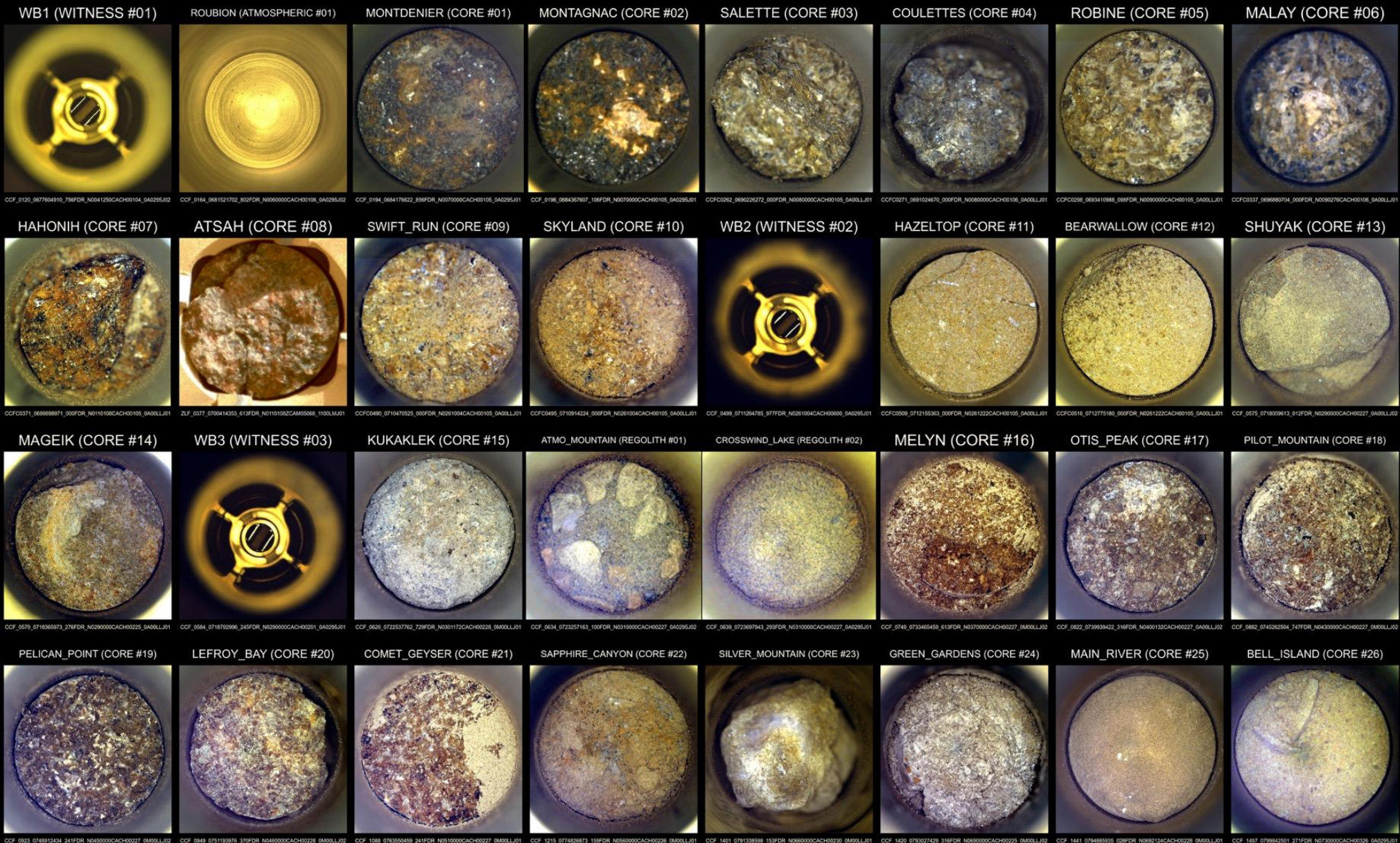
<u>Three Forks</u>	<u>Description</u>	<u>Campaign</u>
<u>Roubion</u>	Atmosphere	Crater floor
<u>Montdenier</u>	Igneous: basalt	Crater floor - Maaaz
<u>Coulettes</u>	Igneous: olivine cumulate	Crater floor - Séltah
<u>Malay</u>	Igneous: olivine cumulate	Crater floor - Séltah
<u>Atsah</u>	Igneous: basalt	Crater floor - Maaaz
<u>Skyland</u>	Sedimentary: Fine to medium-grained sandstone	Delta Front
<u>Bearwallow</u>	Sedimentary: Fine-grained sulfate bearing	Delta Front
<u>Mageik</u>	Sedimentary: olivine-bearing coarse mudstone	Delta Front
<u>Crosswind Lake</u>	Regolith	Delta Front

+ 1 witness

Diversité des échantillons



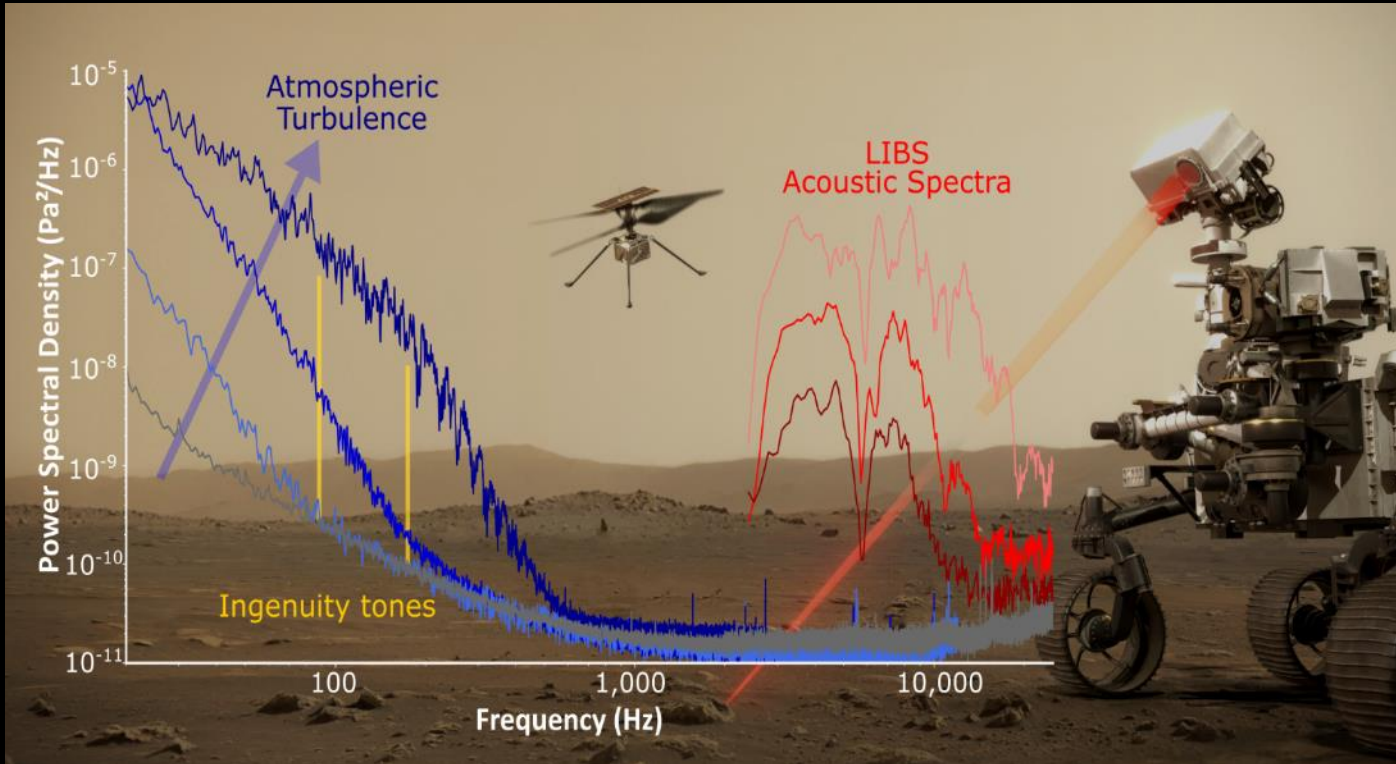
Echantillonnage – photo de famille



Diversité des échantillons

- A bord:
 - 19 tubes de roche
 - 1 régolithe
 - 2 témoins
 - 7 tubes et 2 témoins vides

Environnement



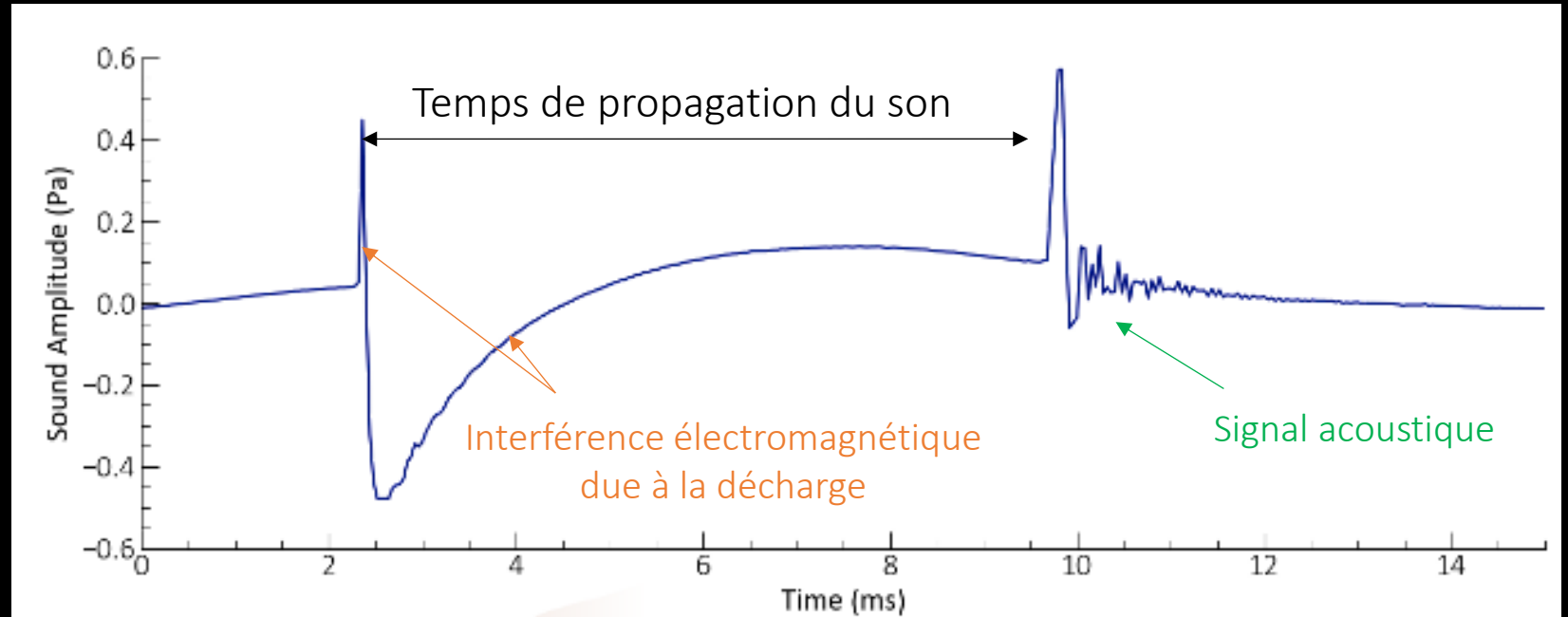
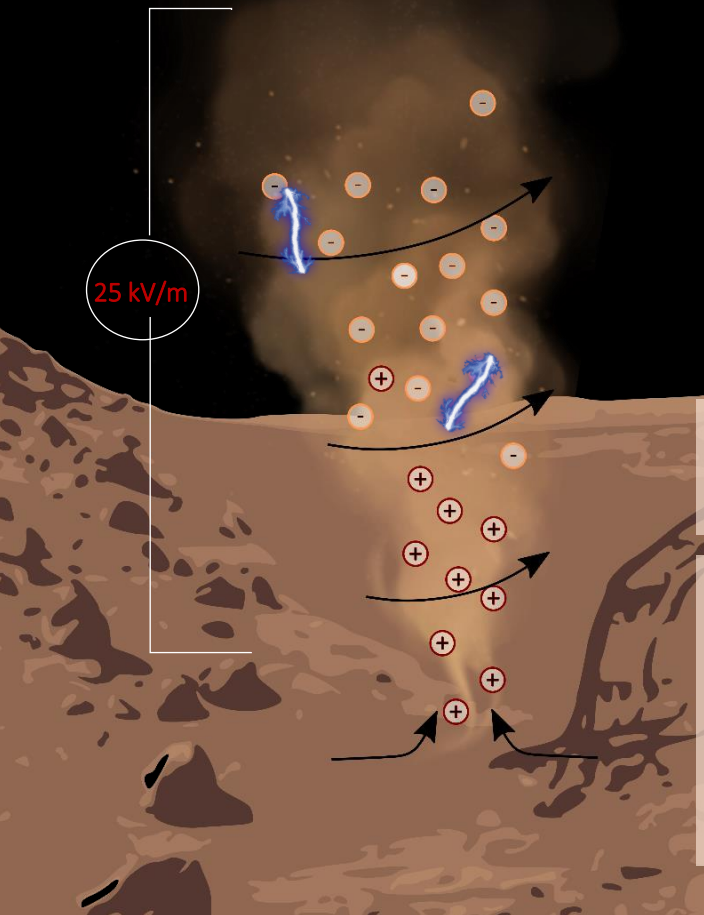
Maurice et al., 2022

- 1^{eres} analyses du régime dissipatif proche de la surface
- Vitesse du son variable selon la fréquence :
~250 m/s > 240 Hz, ~240 m/s < 240 Hz.

➔ Découverte de l'environnement sonore martien par le microphone de SuperCam, grâce au LIBS et les vols d'Ingenuity

Environnement

Enregistrement d'un dust devil passant sur le rover

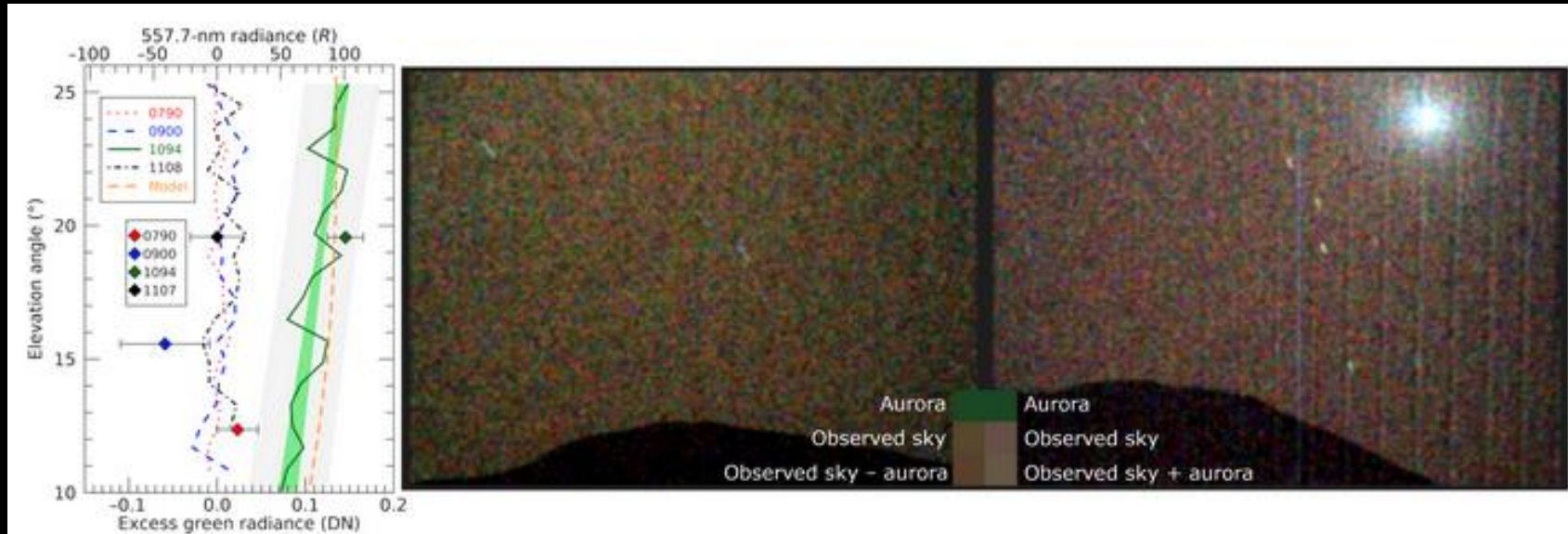
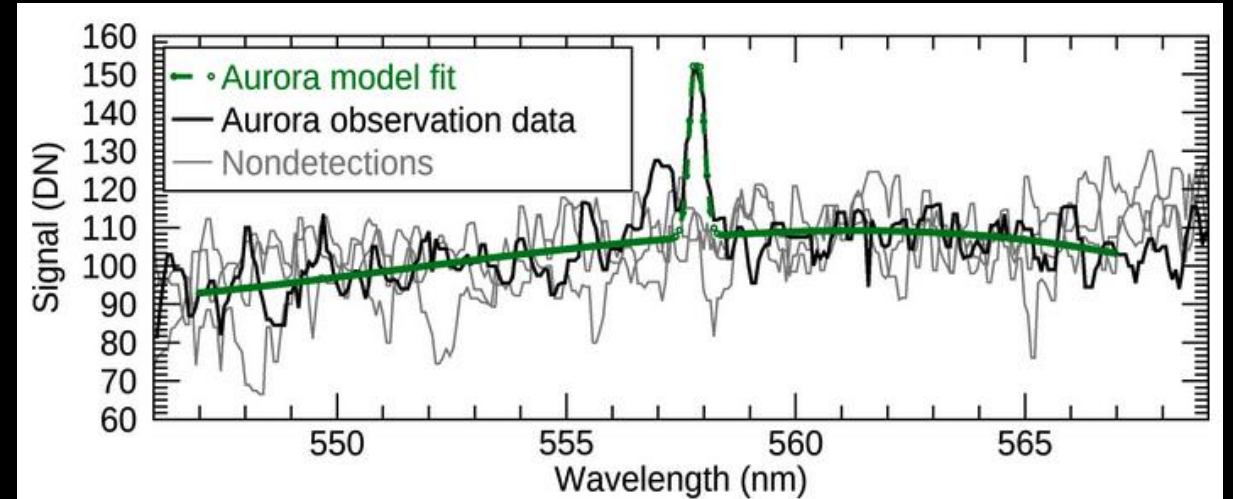


- ✓ Premières détections de décharges électriques qui prouvent l'existence de champs électriques sur Mars dans les dust devils et les tempêtes de poussières.
- ✓ Longtemps suspectées, jamais mises en évidence.
- ✓ Implications majeures pour la chimie de la surface et de l'atmosphère:
 - ✓ Production d'oxidants puissants (H_2O_2)
 - ✓ Destruction des organiques à la surface
 - ✓ Accélération de la destruction du méthane atmosphérique

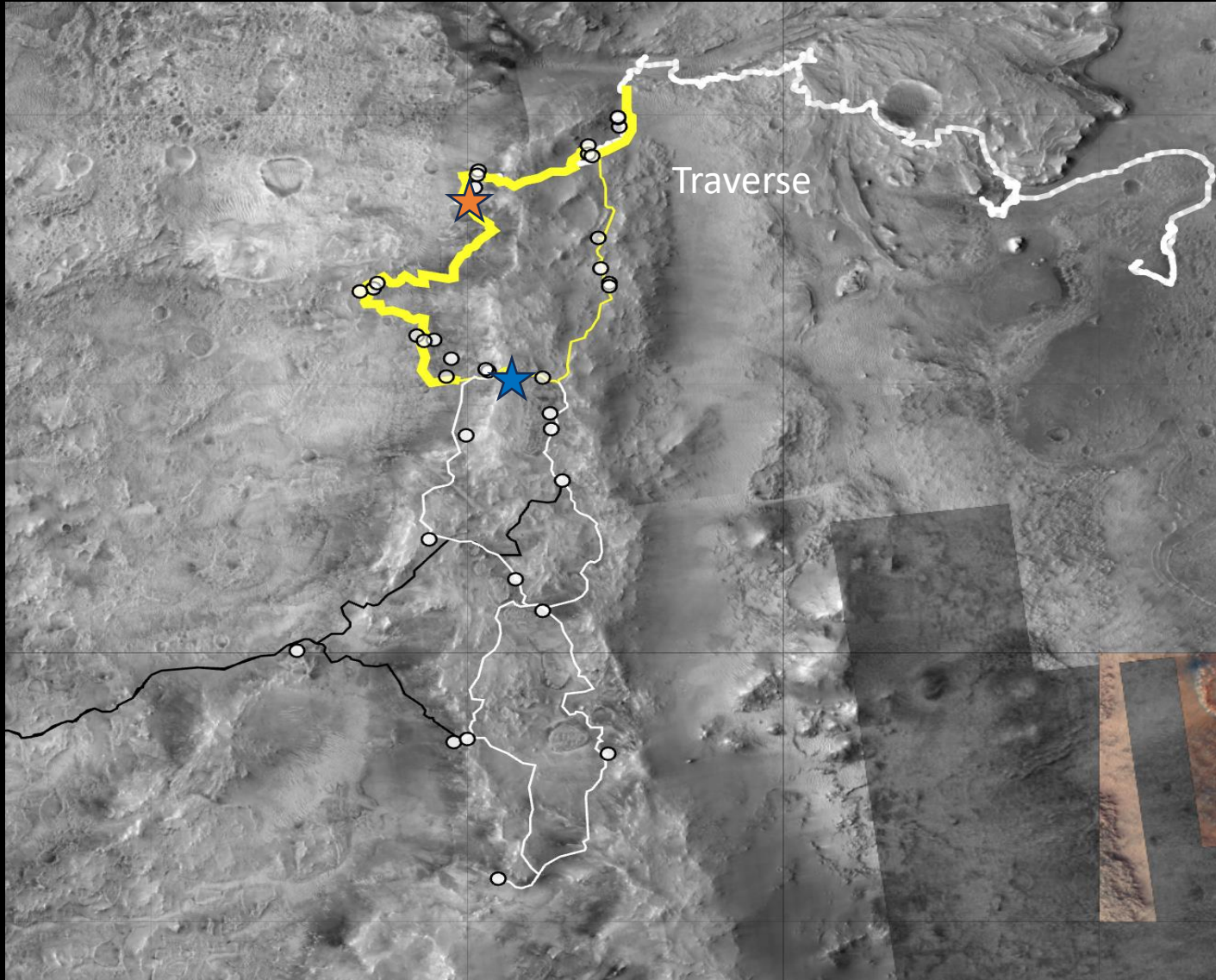
Environnement

- 1^{ère} aurore diffuse observée in-situ dans le visible
- Belle collaboration entre MastCam-Z et SuperCam
- Démontre l'existence de telles aurores sur Mars

=> Prédiction des aurores grâce à la météo de l'espace
=> Etude de l'atmosphère (composition, pression) via différentes longueurs d'onde

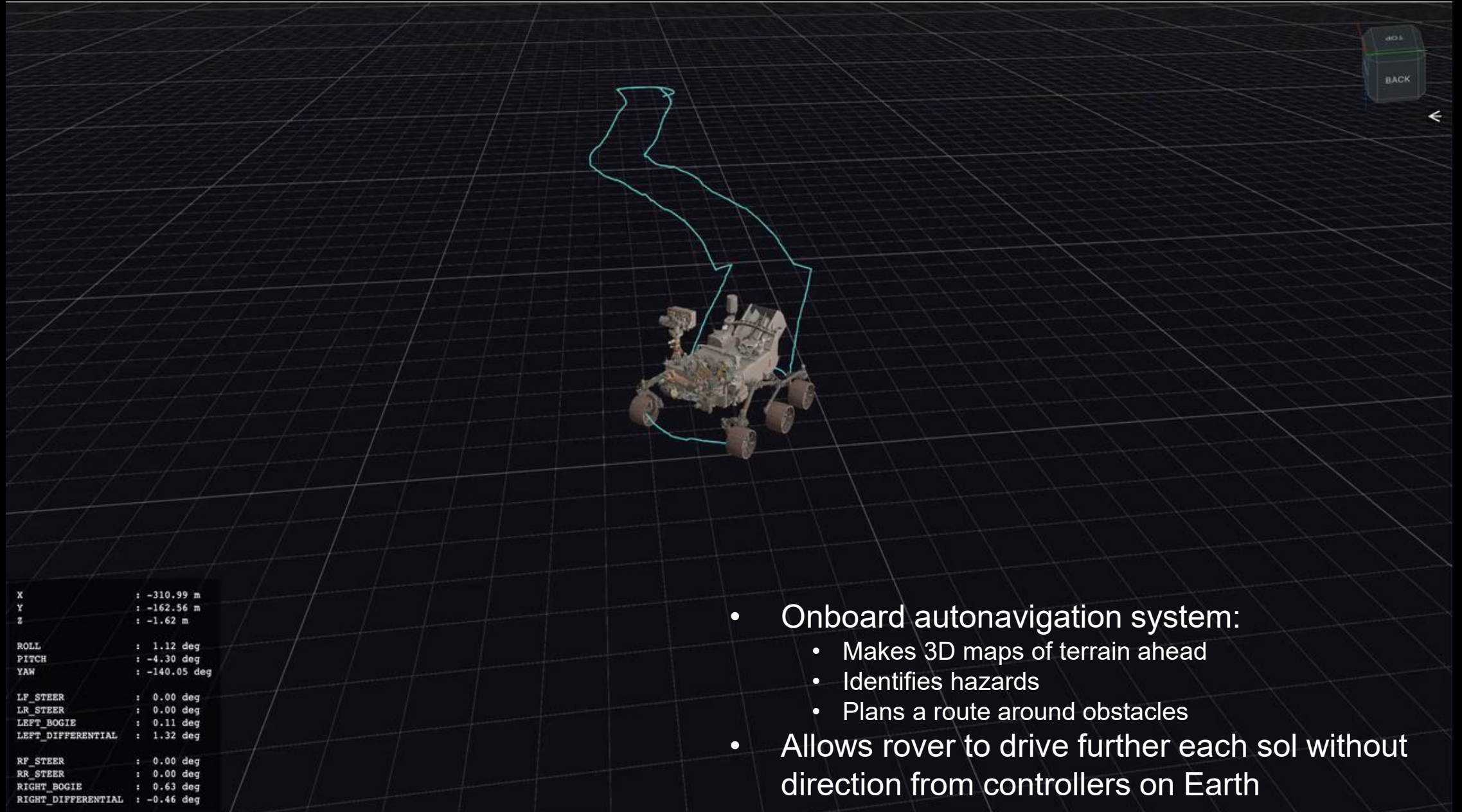


La suite...



- Exploration du bord du cratère continue
Ce n'est que le début !

Autonav: Conduite en pensant



- Onboard autonavigation system:
 - Makes 3D maps of terrain ahead
 - Identifies hazards
 - Plans a route around obstacles
- Allows rover to drive further each sol without direction from controllers on Earth



001/302 SOL 1540 SCLK 0803647638 LMST 10:59

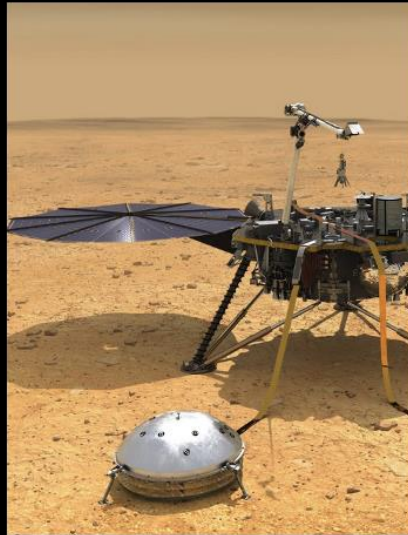
A Toulouse, sur Terre...

Curiosity



ChemCam
SAM-GC

Insight



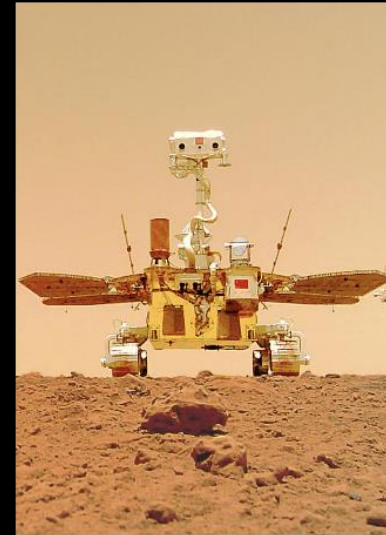
SEIS

Perseverance



SuperCam

Zhurong



MarsCoDE

(ExoMars)



RLS
Micromega
MOMA
Clupi
Wisdom

Daily ops from:



... cnes ...

Opérations martiennes

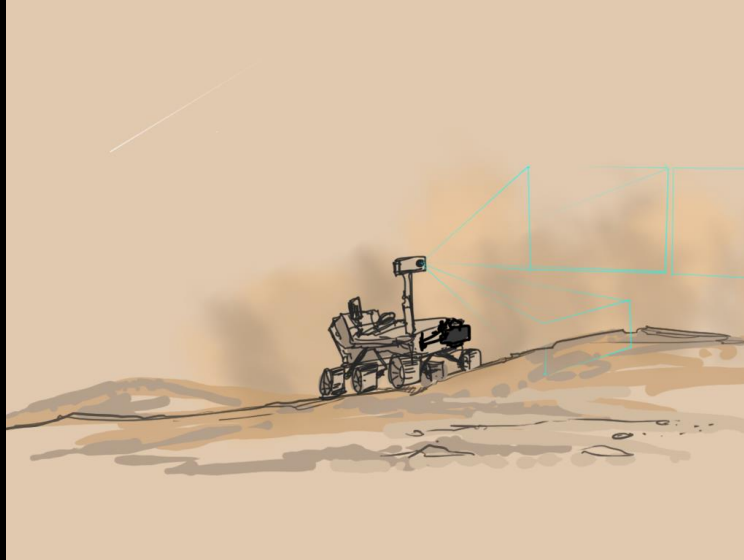
- Il faut ~15-20 min pour recevoir les données du rover et pour les envoyer
=> on ne peut pas travailler en direct !

Opérations martiennes

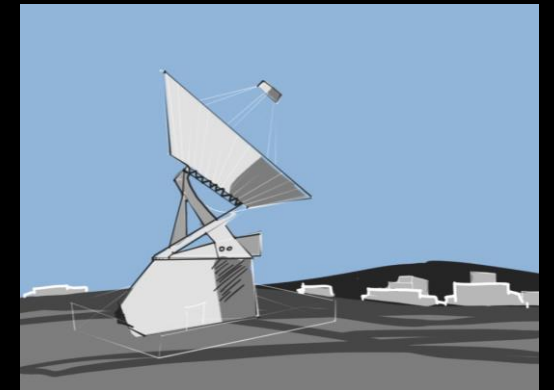
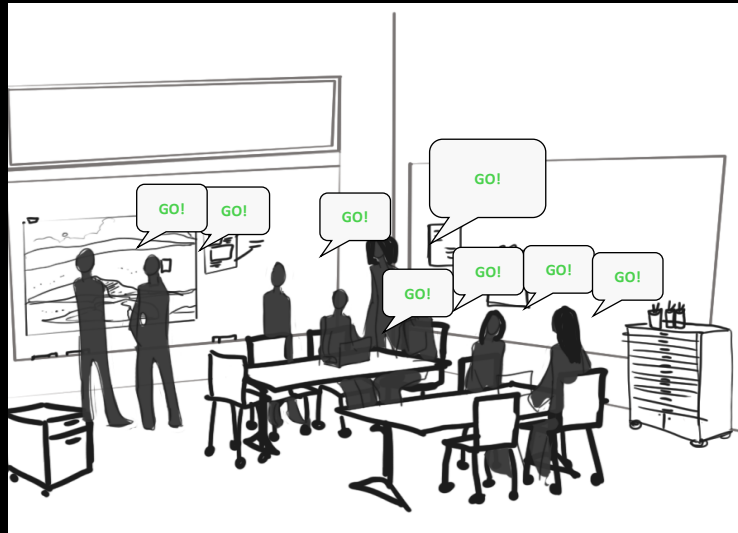
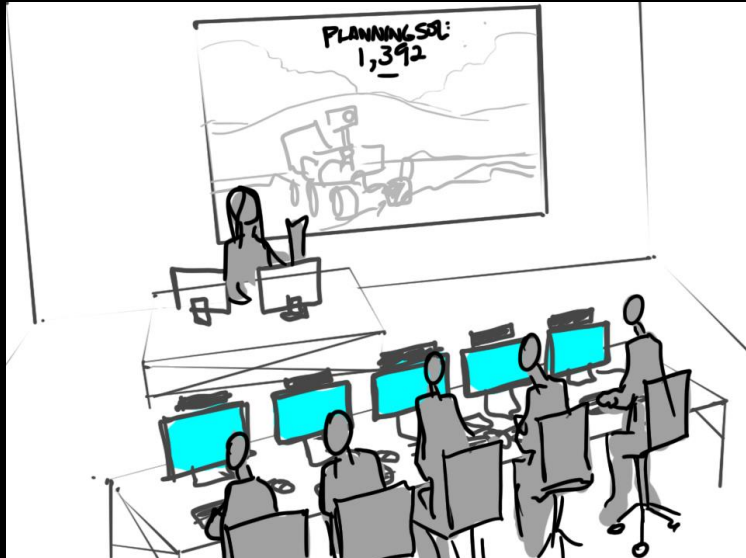
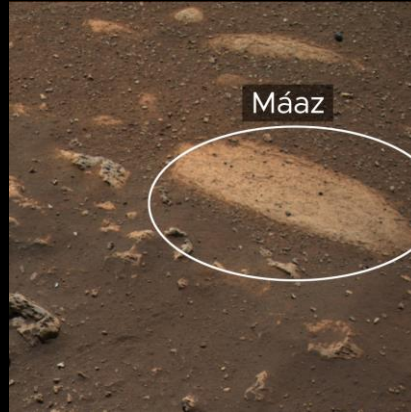
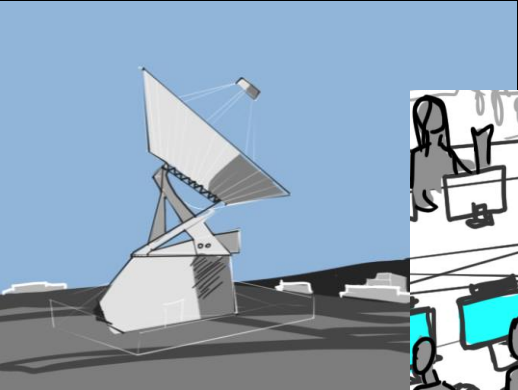
- Il faut ~15-20 min pour recevoir les données du rover et pour les envoyer
=> on ne peut pas travailler en direct !



Opérations martiennes



Opérations martiennes



SuperCam Operations

JPL, mission center



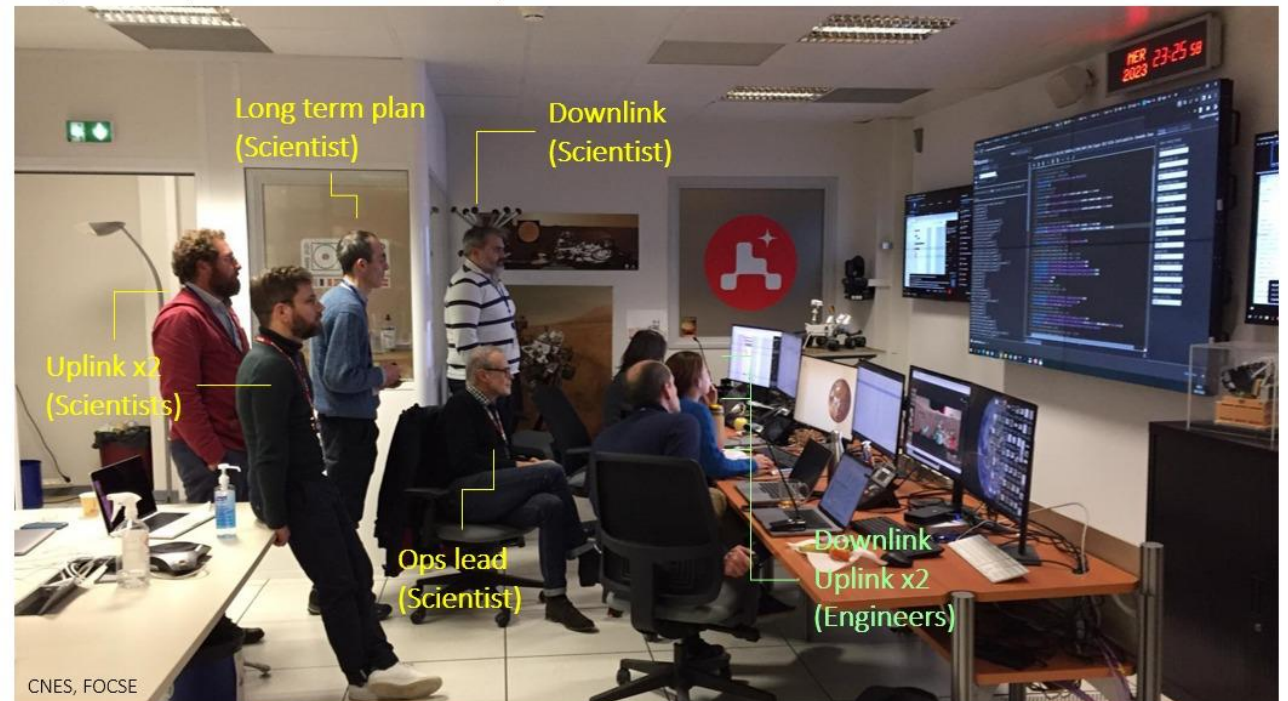
CNES, science ops center



7 jours Los Alamos, USA
7 jours Toulouse, France

3 ingénieurs
4 scientifiques

SuperCam sequences validation – Jan. 18, 2023 – Perseverance Sol 681



MERCI ☺

1975

VIKING (2)

1996

SOJOURNER

2003

SPIRIT AND
OPPORTUNITY

2007

PHOENIX

2011

CURIOSITY

2018

INSIGHT

2020

MARS 2020
PERSEVERANCE

1975

VIKING

1964-73

MARINER (4)

1996

MARS GLOBAL
SURVEYOR

2001

MARS ODYSSEY

2005

MARS
RECONNAISSANCE
ORBITER

2013

MAVEN

2026

ICE MAPPER

Mars Sample Return ?