



FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

Rédacteurs : Laurent GAUTHIER, Jérémy CROQUESEL

Version du 2020-09-26



FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

§1. INTRODUCTION

§1.1. L'eau est au cœur des besoins d'un habitat sur Mars

- **Usage résidentiel :**
 - Eau de boisson
 - Eau sanitaire
- **Usage agricole :**
 - Agriculture
 - Aquaponie
 - Maintenance de l'écosystème
- **Usage industriel :**
 - Fabrication d'ergols
 - Autres procédés industriels utilisant l'oxygène et l'hydrogène
 - Solvant industriel
- **Recyclage :** le recyclage de l'eau permet de réduire le besoin d'eau en intrant, mais les pertes inévitables rendent nécessaire un approvisionnement continu.



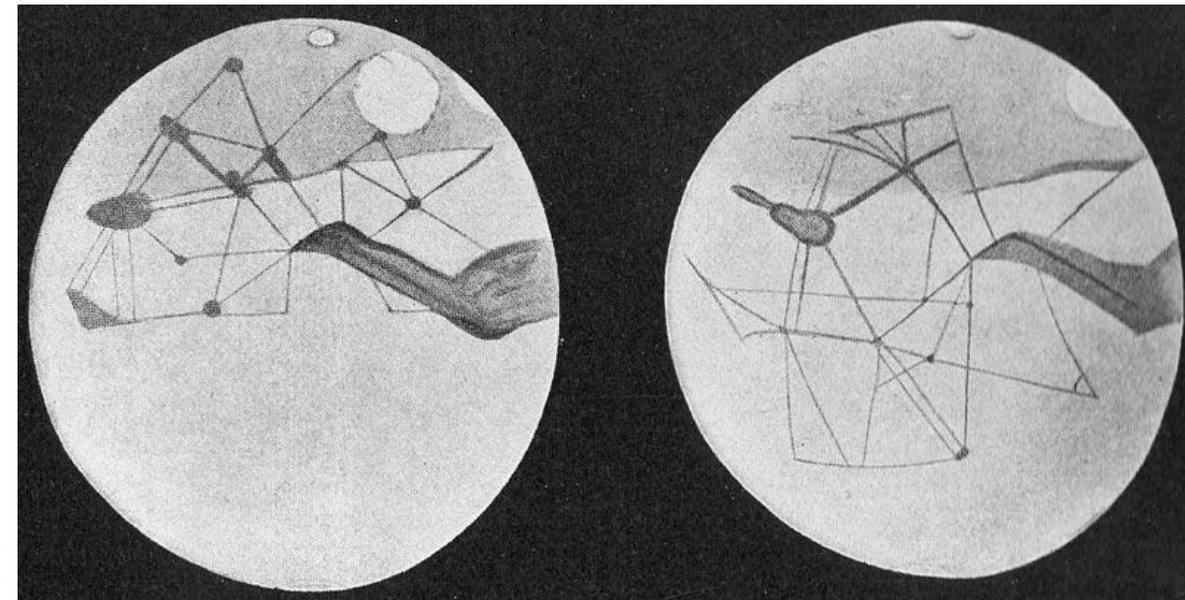
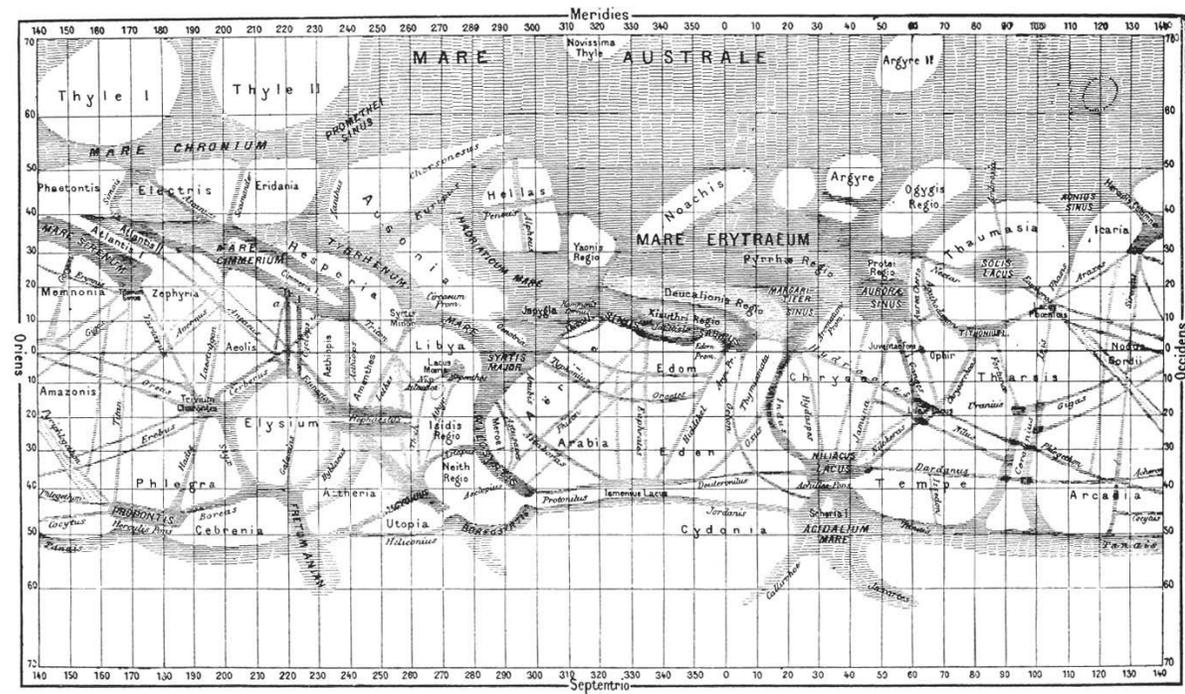
Un habitat prospère sur Mars devra pouvoir compter sur une source massive d'eau, à proximité, et extractible à moindre coût.

§1.2. Malheureusement, il n'y a pas de canaux sur Mars

Lors de l'opposition de 1877, Giovanni Schiaparelli traça de longues lignes droites à la surface de Mars, qu'il nomme du terme *canali*. Lors de l'opposition de 1894, Percival Lowell observe également ces lignes droites, et imagine une civilisation en lutte avec la désertification de son monde et contrainte à ramener vers l'équateur une eau extraite des pôles de la planète. Mais il s'avéra par la suite que ces traits n'étaient que des illusions d'optique.

Domage ! Nous aurions sans doute trouvé plutôt pratique de nous brancher sur ces canaux pour alimenter en eau notre système ISRU.

Nous allons donc devoir trouver autre chose...



§1.3. Les phases de l'eau pure

L'eau pure est susceptible de se retrouver sous trois formes, appelées phases : solide, liquide et gaz. La forme dans laquelle on trouvera cette eau dépendra des conditions de température et de pression.

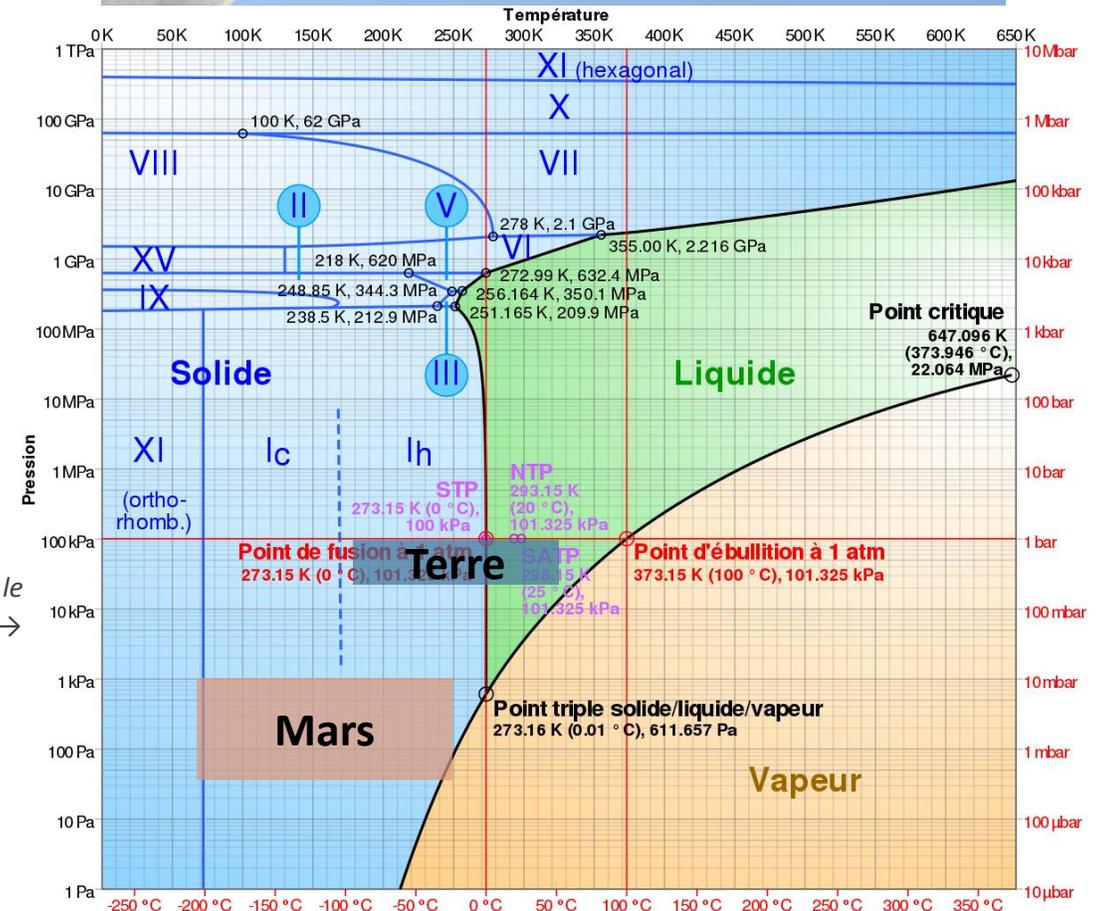
Les conditions de température et de pression à la surface de Mars sont différentes de celles de la Terre :

- **Pression** : 0,6 kPa en moyenne, 1,15 kPa au fond d'*Hellas Planitia*, et 0,03 kPa au sommet d'*Olympus Mons*
[sur Terre : 100 kPa au niveau de la mer, 33 kPa au sommet de l'Himalaya]
- **Température** : moyenne de l'ordre de -60°C. Au niveau du Viking-1 Lander, la température diurne variait entre -89 et -31°C. Les températures extrêmes sont de l'ordre de -145°C en hiver aux pôles et +25°C en été à midi à l'équateur
[sur Terre: moyenne à 15°C et extrêmes entre -90°C et +55°]

Ci contre, on représente le domaine des conditions martiennes sur le diagramme pression-température de l'eau →

On constate que la présence d'eau liquide, si elle n'est pas exclue, restera plus marginale, moins probable que celle d'eau solide (glace) et de vapeur (vapeur d'eau).

© haut: Maarten Roos/LightCurveFilms [\[lien\]](#),
bas : Wikipedia [\[lien\]](#)



§1.4. L'eau chimiquement stabilisée

- **Saumures** : l'addition d'éléments (sels) dans l'eau pure peut étendre le domaine de stabilité de l'eau liquide.
- **Roches hydratées** : certaines roches peuvent stocker une certaine quantité d'eau dans leur structure, entre les grains qui les constituent, voire dans leur structure cristalline.

Sur Mars, ces phénomènes ont bien sûr lieu, étendant d'une part le domaine de l'eau liquide établi pour l'eau pure, ou conduisant à stocker des quantités d'eau non négligeables dans des roches (notamment les argiles).

↓ Dans l'expérience quotidienne, ajouter du sel dans l'eau permet de la faire bouillir à plus haute température, tandis que saler la glace permet de la faire fondre alors que les températures restent négatives.



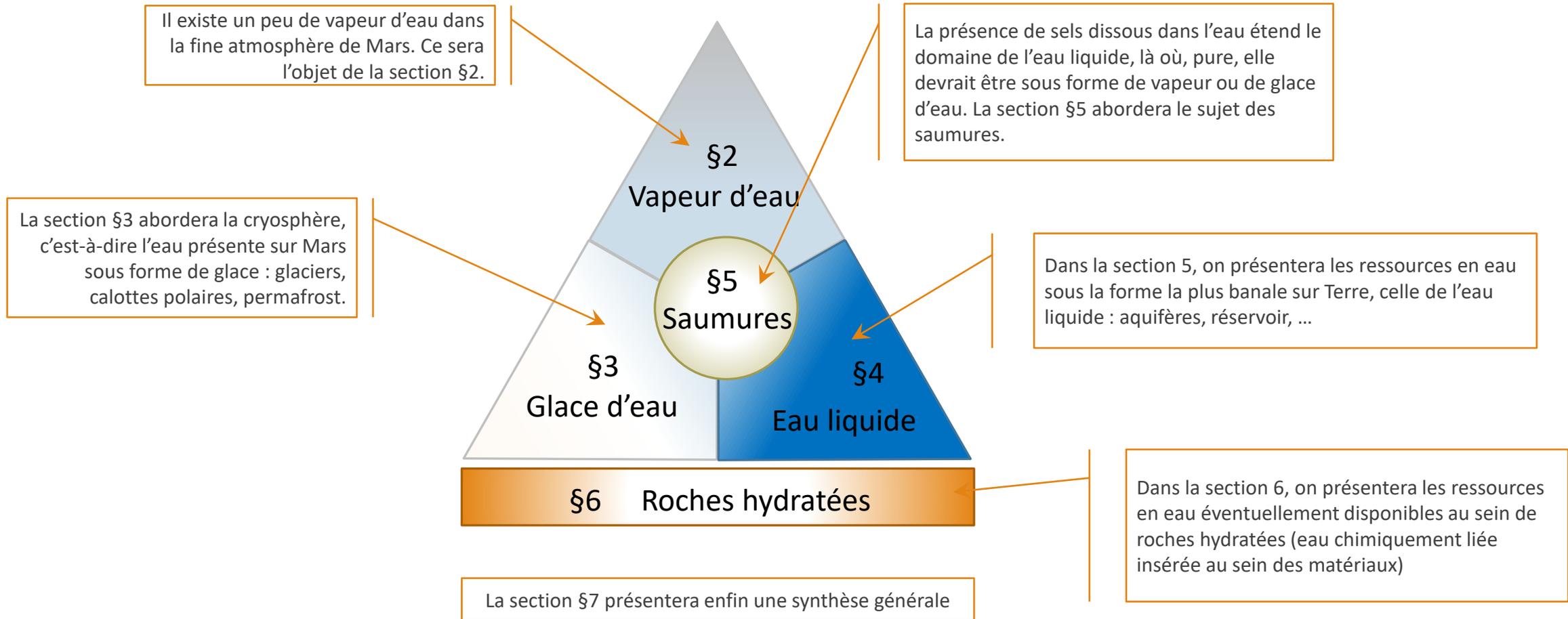
© Household Science Projects [[lien](#)]

↓ Mélanger de l'eau et du sable permet de former une pâte fluide, dont l'eau ne se sépare pas. L'eau est stockée entre les grains du sable.



© Sokka-Suki [[lien](#)]

§1.5. Synthèse





FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

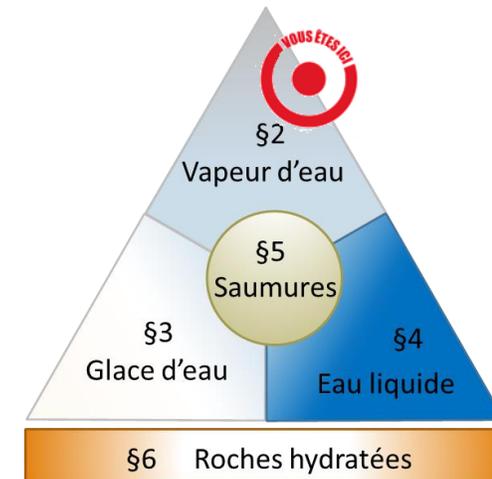
§2. L'EAU DE L'ATMOSPHERE DE MARS

Introduction

La vapeur d'eau est une des trois phases que peut prendre l'eau pure sur Mars. La vapeur d'eau se trouve mélangée aux autres gaz de l'atmosphère de Mars (essentiellement le dioxyde de carbone, mais aussi l'azote et l'argon) ; sur Terre, la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, est appelée « humidité » tout simplement.

L'atmosphère de Mars est très peu épaisse. Au niveau de son altitude 0, la pression vaut moins de 1% de la pression atmosphérique. On ne s'attend donc pas que l'atmosphère contienne une grande quantité de vapeur d'eau. L'atmosphère est toutefois présente partout, elle est donc facilement accessible par tout procédé industriel.

On présente dans ce chapitre les faits marquants parmi les connaissances obtenues à ce jour à propos de l'humidité de l'atmosphère de Mars.



Sommaire

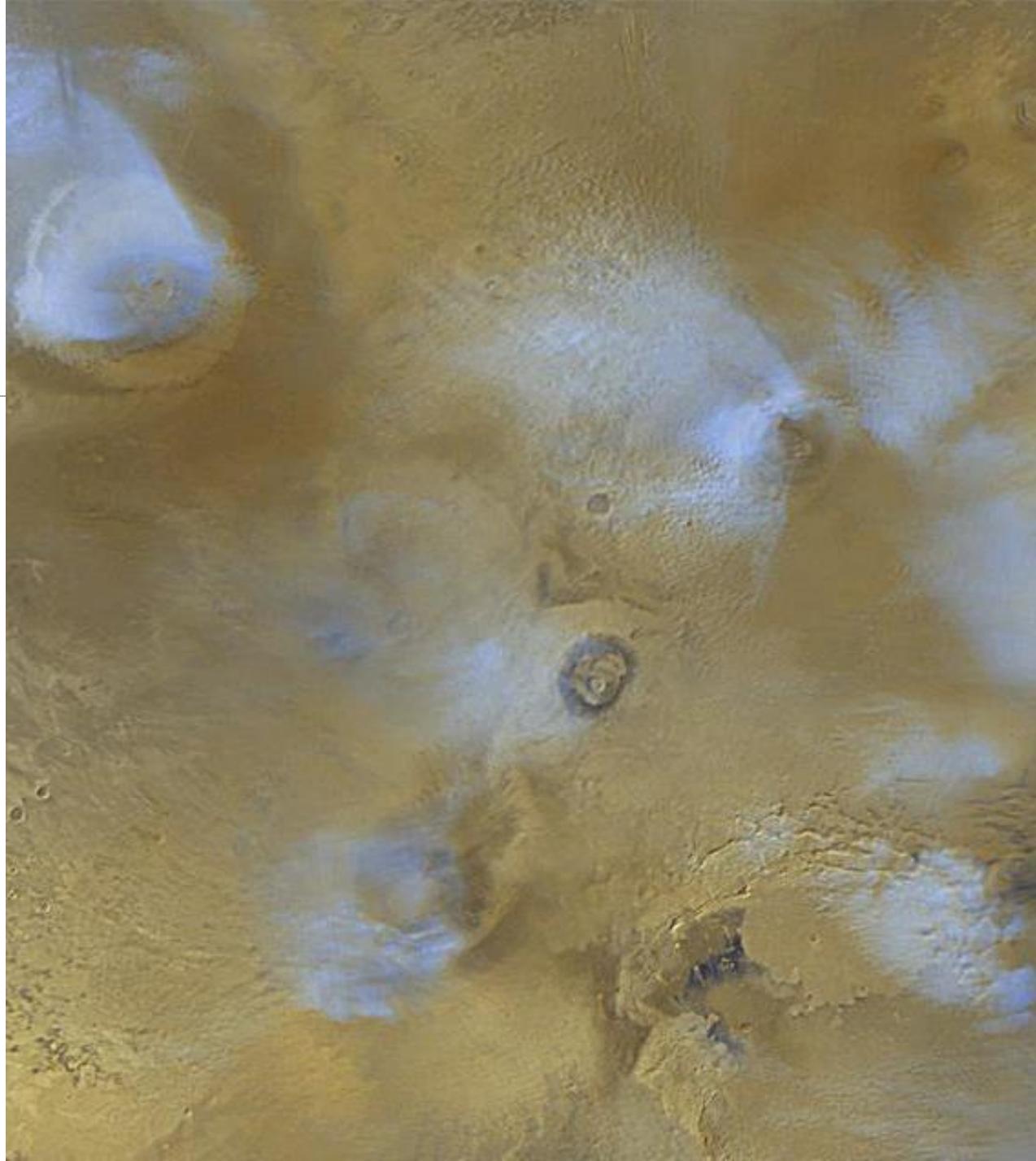
- Introduction
- §2.1. Des nuages d'eau s'accrochent à *Olympus Mons*
- §2.2. Des cirrus défilent au-dessus de la *Green Valley*
- §2.3. Du givre sur *Utopia Planitia*
- §2.4. Variations quotidiennes de l'humidité
- §2.5. Variation spatiales de l'humidité
- §2.6. Variation saisonnière de l'humidité
- Synthèse

§2.1. Des nuages d'eau s'accrochent sur *Olympus Mons*

Des nuages de glace d'eau s'accrochent aux volcans du Dôme de Tharsis. Photographie prise par le 07 juin 2000 par la caméra *Mars Orbiter Camera* (MOC) de la sonde *Mars Global Surveyor* (MGS).

En haut à gauche de l'image, se trouve le célèbre *Olympus Mons*, volcan éteint culminant à environ 22 km au-dessus des plaines environnantes. L'équateur traverse l'image approximativement en son milieu

Les nuages sont fréquents dans cette région au milieu de l'après-midi.



§2.2. Des cirrus défilent au-dessus de Green Valley

Des images de nuages ont également été prises depuis le sol par le *Surface Stereo Imager* de l'atterrisseur *Phoenix*. Ces nuages sont des cirrus, constitués de glace d'eau. Phoenix s'est posé dans une zone très nordique [68.22°N 125.7°W], appelée *Green Valley* par la NASA, située dans la grande plaine *Vastitas Borealis* laquelle embrasse le pôle Nord. Les images des nuages permettent en outre d'analyser la direction des vents.

→

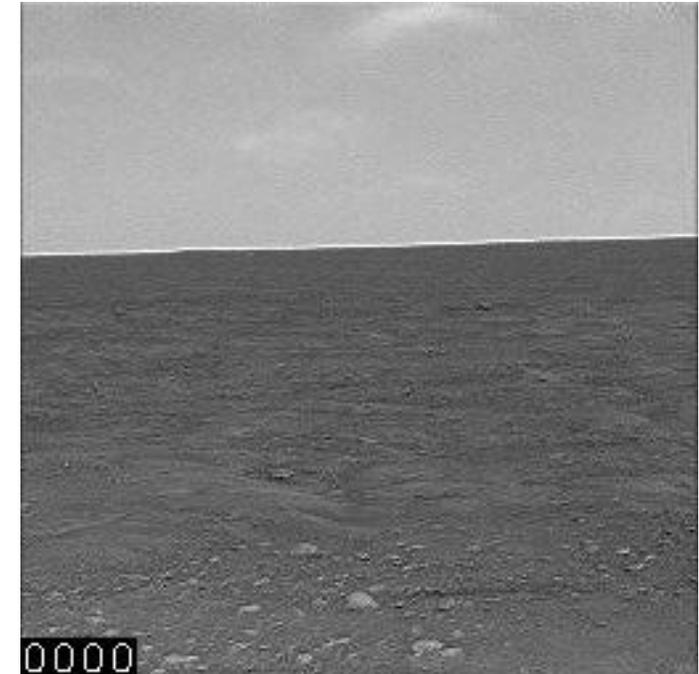
Cette séquence de 10 images a été prise le 29 août 2008 entre 14:52 et 15h53 (heure locale). La vue est orientée légèrement à l'ouest du plein sud, et les nuages défilent vers l'ouest-nord-ouest. La vapeur d'eau provient de la fonte de la calotte glaciaire du pôle nord au cœur de l'été, et la région autour de Phoenix vient de passer son pic d'abondance de vapeur d'eau. Cette eau se retrouve sous forme de nuages, de brouillard et de givre.



© NASA [[lien](#)]

Cette séquence de 32 images a été prise le 18 septembre 2008, en début d'après-midi. La vue montre le nord, et des nuages défilant vers l'est. La durée réelle de la séquence est d'environ 30 min, les chiffres en insert en bas à gauche indiquant le nombre de secondes depuis le début de la séquence.

↓



© haut: NASA [[lien](#)]

§2.3. Du givre sur *Utopia Planitia*

Photographie d'une couche de givre de glace d'eau autour de l'atterrisseur *Viking Lander 2*, posé dans une position nordique [48,269° N, 134,01° E], à environ 200 km à l'ouest du cratère Mie de *Utopia Planitia*. La photo est prise le 18 mai 1979.

La couche de givre persista une centaine de jours. Son épaisseur estimée est de l'ordre de 10 µm.



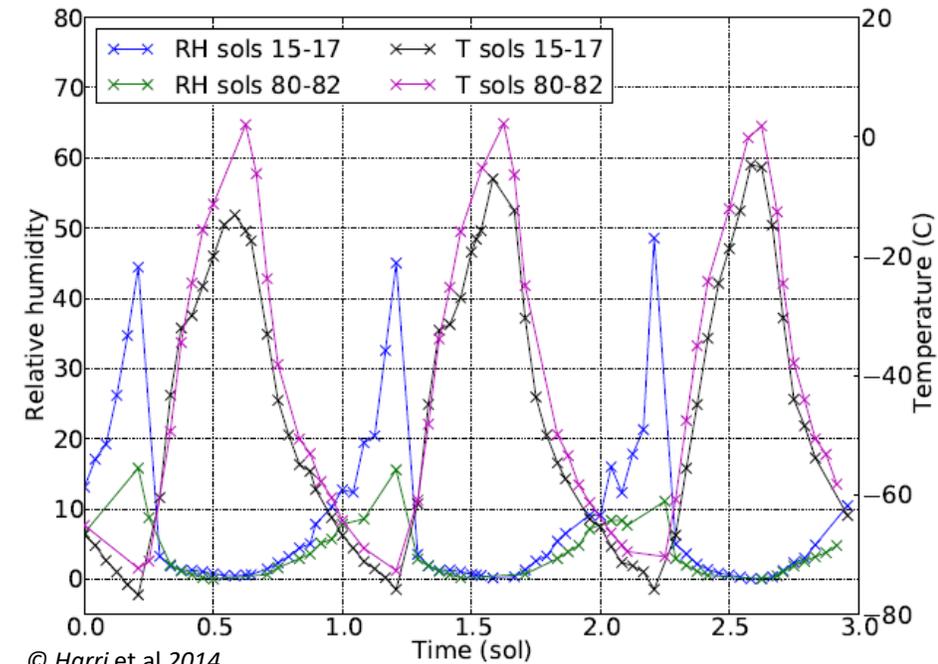
§2.4. Variations quotidiennes de l'humidité

Variation de l'humidité relative et de la température au cours de trois journées sur Mars, lors des sols 15 à 17 et 80 à 82 de la mission du rover Curiosity →

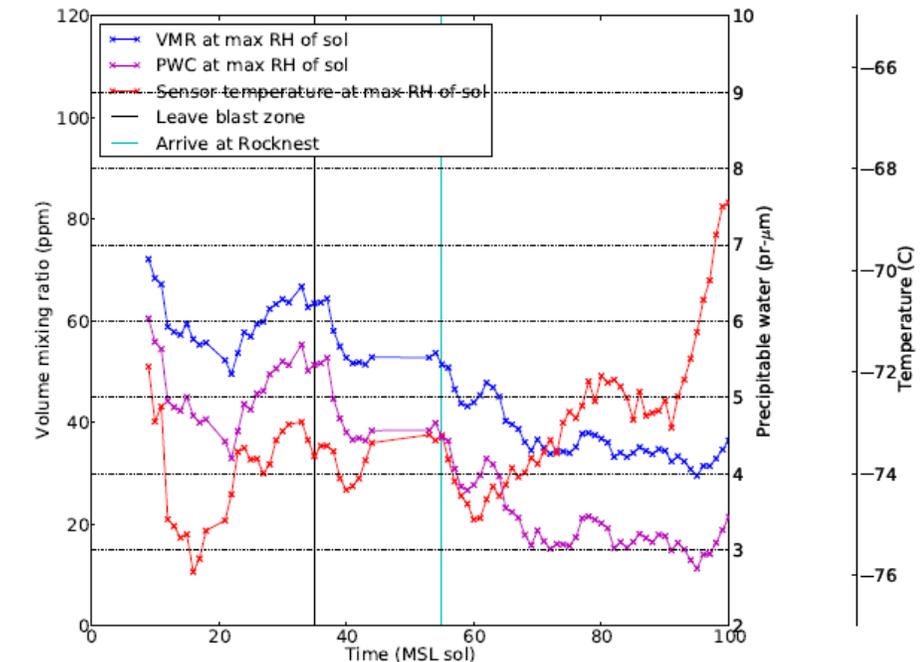
- L'humidité relative de l'atmosphère varie fortement au cours de la journée, la valeur minimale étant obtenue à midi, et la valeur maximale le matin. Cette variation est bien corrélée avec la température.
- Ainsi, le rover Curiosity a mesuré une humidité relative entre 10 et 50% le matin, avec une température de l'ordre -70°C et une humidité relative proche de 0 à midi, alors que la température atteignait 0°C .

Variation de la teneur volumique de vapeur d'eau de l'atmosphère martienne lors des maximaux (le matin) des 100 premiers sols de la mission du rover Curiosity →

- Lors des 100 premiers jours de la mission du rover Curiosity, il a été mesuré une teneur en vapeur d'eau maximale journalière entre 30 ppmv et 75 ppmv (eau). À noter que le rover a été déposé dans le cratère Gale, un cratère de 154 km au sud d'*Elysium Planitia*, dans une position très équatoriale [5.4°S 137.8°E]



© Harri et al 2014

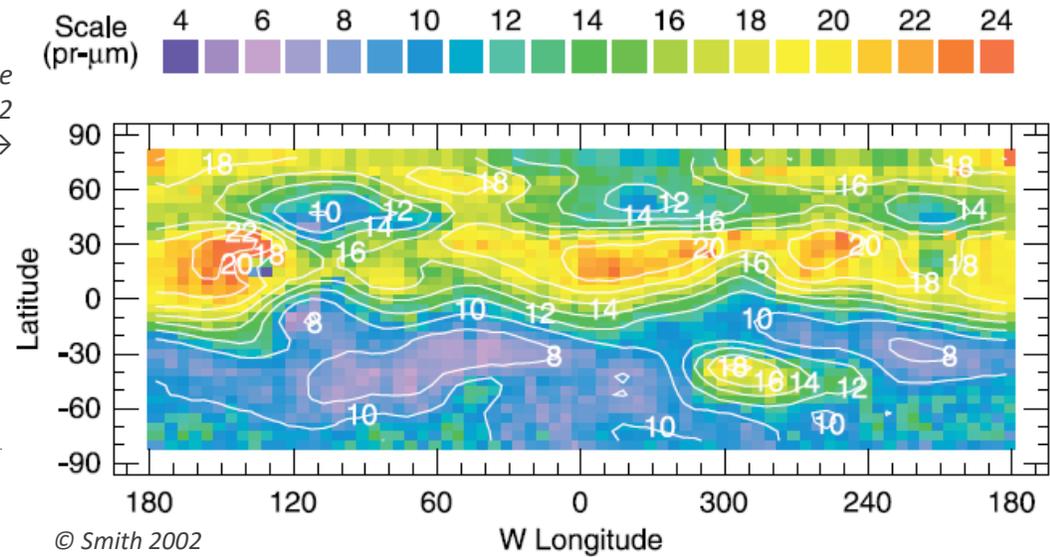


© Harri et al 2014

On représente ici des cartes latitude-longitude, moyennée sur une année martienne, de la quantité d'eau précipitable sur Mars d'après Smith 2002 (instrument MGS-TES) →

§2.5. Variations spatiales de l'humidité

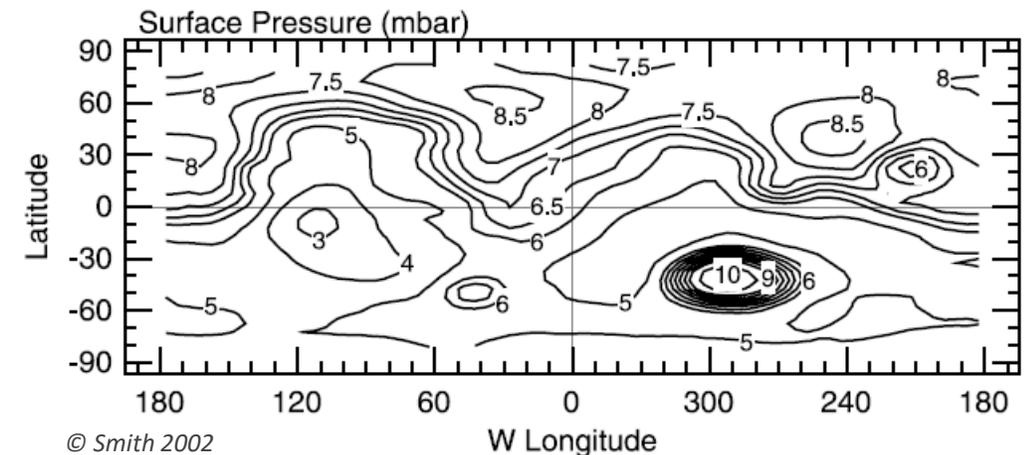
- La quantité de vapeur d'eau dans l'hémisphère Nord est plus importante que dans l'hémisphère Sud. Cette disparité est due au fait que l'altitude est plus faible dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud, conduisant à une pression plus élevée.
- À 30° de latitude Nord, la quantité totale d'eau précipitable moyenne sur l'année est entre 16 et 20 μm . À 30° de latitude Sud, la valeur est plus proche de $\sim 10 \mu\text{m}$.



Explications :

- l'abscisse correspond à la longitude Ouest,
- l'ordonnée est la latitude sur Mars,
- l'échelle de couleur est la quantité totale d'eau dans la colonne d'atmosphère au-dessus d'un point à la latitude considérée, en μm par mètre-carré,
- une correction est apportée pour prendre en compte la topographie.

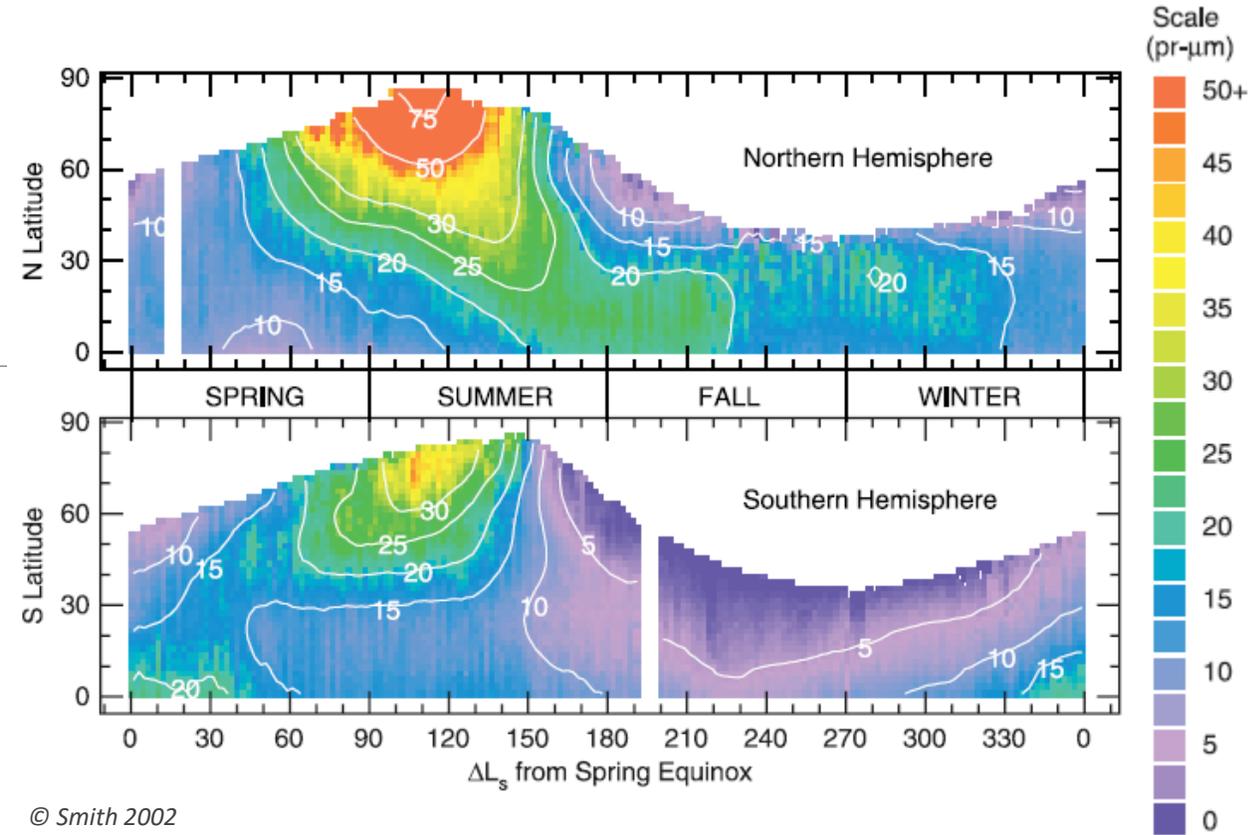
On représente ici des cartes latitude-longitude de la pression à la surface →



§2.6. Variation saisonnière de l'humidité

On représente ici des cartes latitude-temps de la quantité d'eau précipitable sur Mars, d'après Smith 2002 (instrument MGS-TES) →

- La vapeur d'eau est plus abondante dans l'atmosphère vers les pôles (où elle peut atteindre 75 pr- μm en été) qu'à l'équateur (au maximum à 20 pr- μm en hiver). Au niveau des pôles, cette abondance élevée est due à la fonte des calottes glaciaires en été.
- Au cours de l'année, la teneur en vapeur d'eau peut varier d'un facteur deux, maximale en milieu d'été, minimale en fin d'hiver.
- Il existe un pic de vapeur d'eau en été, deux fois plus élevé en abondance de vapeur d'eau dans le Nord (750 pr- μm) par rapport au Sud (30 pr- μm).



© Smith 2002

Explications :

- en haut, il s'agit des résultats pour l'hémisphère Nord et en bas pour l'hémisphère Sud,
- l'abscisse L_s correspond à un repère temporel au cours de l'année martienne. $L_s=104^\circ$ est le 1^{er} Mars 1999 et $L_s = 137^\circ$ est le 28 Mars 2001, recalé à la saison (l'équinoxe de printemps est à $L_s=0^\circ$ pour l'hémisphère Nord et à $L_s=180^\circ$ pour l'hémisphère Sud),
- l'ordonnée est la latitude sur Mars (Nord ou Sud),
- l'échelle de couleur est la quantité totale d'eau dans la colonne d'atmosphère au-dessus d'un point à la latitude considérée, en μm par mètre-carré, moyennés sur tous les points de la latitude considérée.
- Les valeurs sont mesurées uniquement de jour, explicitant la forme de la carte.

Synthèse

- La vapeur d'eau dans l'atmosphère de Mars est à l'état de trace. Sa teneur en vapeur d'eau est de l'ordre de 200 ppm en masse (4,2 mg·m³ @ 6 mbar).
- L'humidité est caractérisée par une variation quotidienne : elle est maximale au petit matin lorsque la température est basse, puis devient nulle un peu après midi lorsque la température se rapproche voire dépasse 0°C.
- L'humidité est caractérisée par une variation saisonnière : elle est minimale à la fin de l'hiver, et est maximale au cours de l'été de l'hémisphère où l'on se trouve. Ce cycle est dû à la fonte et l'englacement de la calotte glaciaire polaire de chaque hémisphère à leurs saisons respectives. Aux latitudes moyennes, cette variation est d'un facteur deux environ.
- L'humidité est caractérisée par une variation spatiale : elle est plus élevée vers les pôles qu'à l'équateur, et elle est significativement plus importante dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud, notamment du fait de la plus faible altitude dans les grandes plaines de l'hémisphère nord, et donc de la plus grande pression atmosphérique qui le caractérise.
- Malgré la faiblesse de l'humidité, la vapeur participe pleinement aux cycles du climat de Mars, avec le cycle du dioxyde de carbone et des poussières, et conduit à des phénomènes visibles : nuages de glace d'eau de haute altitude (cirrus), givre pouvant persister une centaine de jours.



FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

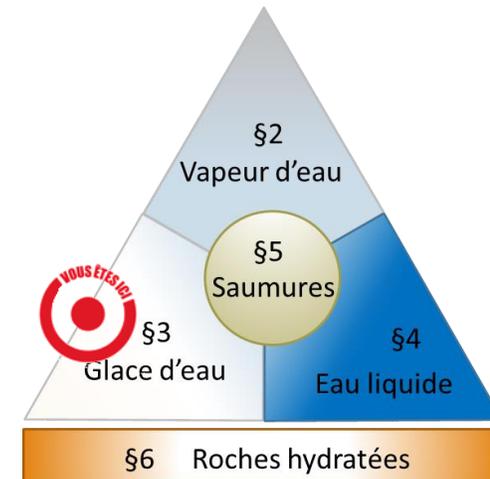
§3. LA GLACE D'EAU SUR MARS

Introduction

La glace d'eau est une des trois phases que peut prendre l'eau sur Mars. Sur Terre, la glace occupe un espace appelé la « cryosphère », et elle s'organise en des formations géologiques variées : calottes polaire, permafrost, neige l'hiver en latitudes moyennes, et glaciers en altitude jusqu'à l'équateur.

La stabilité de la glace dépend au premier ordre de l'ensoleillement, de la température atteinte par son environnement, et *in fine* de la saison à une latitude donnée. La localisation de la glace est donc primordiale pour déterminer son accessibilité par tout procédé industriel.

On présente dans ce chapitre les faits marquants parmi les connaissances obtenues à ce jour à propos de la glace d'eau sur Mars.



Sommaire : les différents types géologiques liés à la glace d'eau

- Introduction
- §3.1. Calotte boréale
- §3.2. Calotte australe
- §3.3. Cratères du pôle nord
- §3.4. Le glacier du cratère Korolev
- §3.5. La glace d'eau sous quelques centimètre de régolithe
- §3.6. Une falaise de glace d'eau
- §3.7. Un cratère probablement formé dans un sol riche en glace
- §3.8. Une carte de l'épaisseur de glace sur Mars
- §3.9. Concentric Crater Fill (CCF)
- §3.10. Lobate Debris Apron (LDA)
- §3.11. Lineated Valley Fill (LVF)
- §3.12. Carte de synthèse de la glace d'eau sur Mars
- Synthèse

→
La calotte boréale d'après des images prises par la sonde Mars Express et générées à l'aide des données d'élévation de l'altimètre laser Mars Orbiter (MOLA) de la mission Mars Global Surveyor de la NASA.

§3.1. La calotte boréale

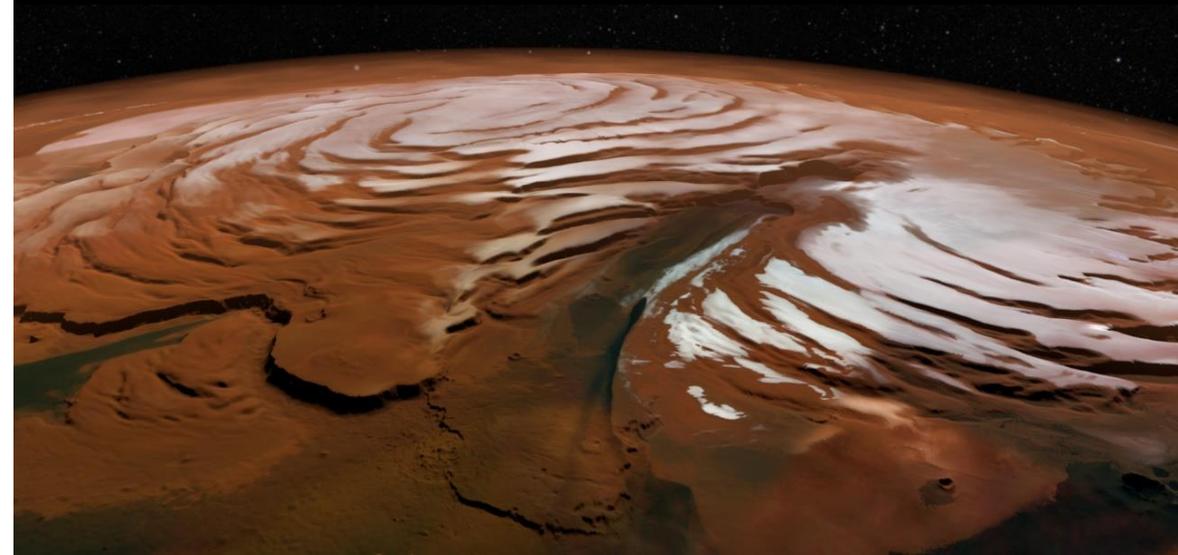
La calotte glaciaire boréale a un diamètre d'environ 1000 km et se compose de nombreuses couches minces de glace mélangées à de la poussière qui s'étendent jusqu'à une profondeur d'environ 2 km sous la calotte. Le volume d'eau contenu dans la calotte est estimée à $1,6 \cdot 10^6$ km³.

Les couches résultent des variations de l'orbite et de la rotation de Mars qui affectent la quantité de lumière solaire reçue aux pôles, et donc la quantité de fusion et de dépôt de matériaux au fil du temps. Pendant ce temps, les vents dominants forts seraient responsables de la formation des creux en spirale.

En hiver, la glace d'eau est recouverte d'une couche de glace sèche (CO₂) d'épaisseur ~1 - 2 m, qui s'évapore en été.

La faille présente dans la calotte glaciaire est un gouffre de 318 km de long et de 2 km de profondeur appelé *Chasma Boreale*.

Cliquer ci-dessous pour regarder une animation 3D de la calotte boréale réalisée grâce à l'instrument MARSIS de la sonde Mars Express



La calotte australe, photographiée par l'instrument Mars Orbiter Camera (MOC) de la sonde Mars Global Surveyor (MGS) le 17 avril 2000.

§3.2. La calotte australe

La calotte australe, située au pôle sud, est composée de centaines de kilomètres carrés de «pergélisol». Le pergélisol est de la glace d'eau, mélangée au sol de Mars gelé ayant une dureté semblable à de la roche solide. La calotte australe a une épaisseur de l'ordre de 3 km et le volume de glace d'eau est estimé à $1,6 \times 10^6 \text{ km}^3$. La glace d'eau est recouverte d'une couche permanente de $\sim 8 \text{ m}$ de glace sèche.

Les données récoltées par le spectromètre OMEGA de la sonde Mars Express montrent que la région polaire sud de Mars peut être divisée en trois parties distinctes :

- La calotte polaire correspondant à un mélange de 85% de glace de dioxyde de carbone et de 15% de glace d'eau.
- Des pentes abruptes appelées «escarpements», faites presque entièrement de glace d'eau, qui tombent de la calotte polaire vers les plaines environnantes.
- Les vastes champs de pergélisol qui s'étendent sur des dizaines de kilomètres loin des escarpements.

La photographie ci-contre est prise pendant l'été austral et les températures seraient au plus haut, la calotte est donc à son minimum d'extension. Malgré cela, il ne fait probablement que -130°C et la glace que Mars Express a observée est une caractéristique permanente de cet endroit. Pendant les mois d'hiver, le dioxyde de carbone de l'atmosphère gèle sur les pôles, ce qui les rend beaucoup plus grands et recouvre une partie de la glace d'eau.





Image prise par la caméra HRSC de la sonde Mars Express dans la région de Vastitas Borealis le 2 février 2005 avec une résolution au sol d'environ 15 mètres/pixel. Les coordonnées approximatives sont 73° de latitude nord et 165° de longitude est

§3.3. Un glacier dans un cratère de Vastitas Borealis

La sonde Mars Express de l'ESA a obtenu cette image d'un cratère d'impact de 35 km de large et d'une profondeur maximale d'environ 2 km dans Vastitas Borealis. La partie circulaire et brillante située au centre du cratère est de la glace d'eau. Elle est présente toute l'année, car les conditions de température et de pression ne favorisent pas la sublimation de la glace d'eau. La photo ayant été prise fin d'été dans l'hémisphère nord martien, il est certain qu'il s'agit bien de glace d'eau et non de glace carbonique car le dioxyde de carbone s'évapore à cette période.

Il existe une différence de hauteur de 200 mètres entre le fond du cratère et la surface de la glace, qui ne peut pas être attribuée uniquement à la glace d'eau. Il est probable qu'un champ de dunes est situé sous cette couche de glace. De légères traces de glace d'eau sont également visibles le long du bord du cratère et sur les parois du cratère. L'absence de glace le long du bord nord-ouest peut venir du fait que cette zone reçoit plus de soleil.

D'autres cratères tel que celui-ci sont présents dans la région boréale de Mars tel que le cratère Korolev.





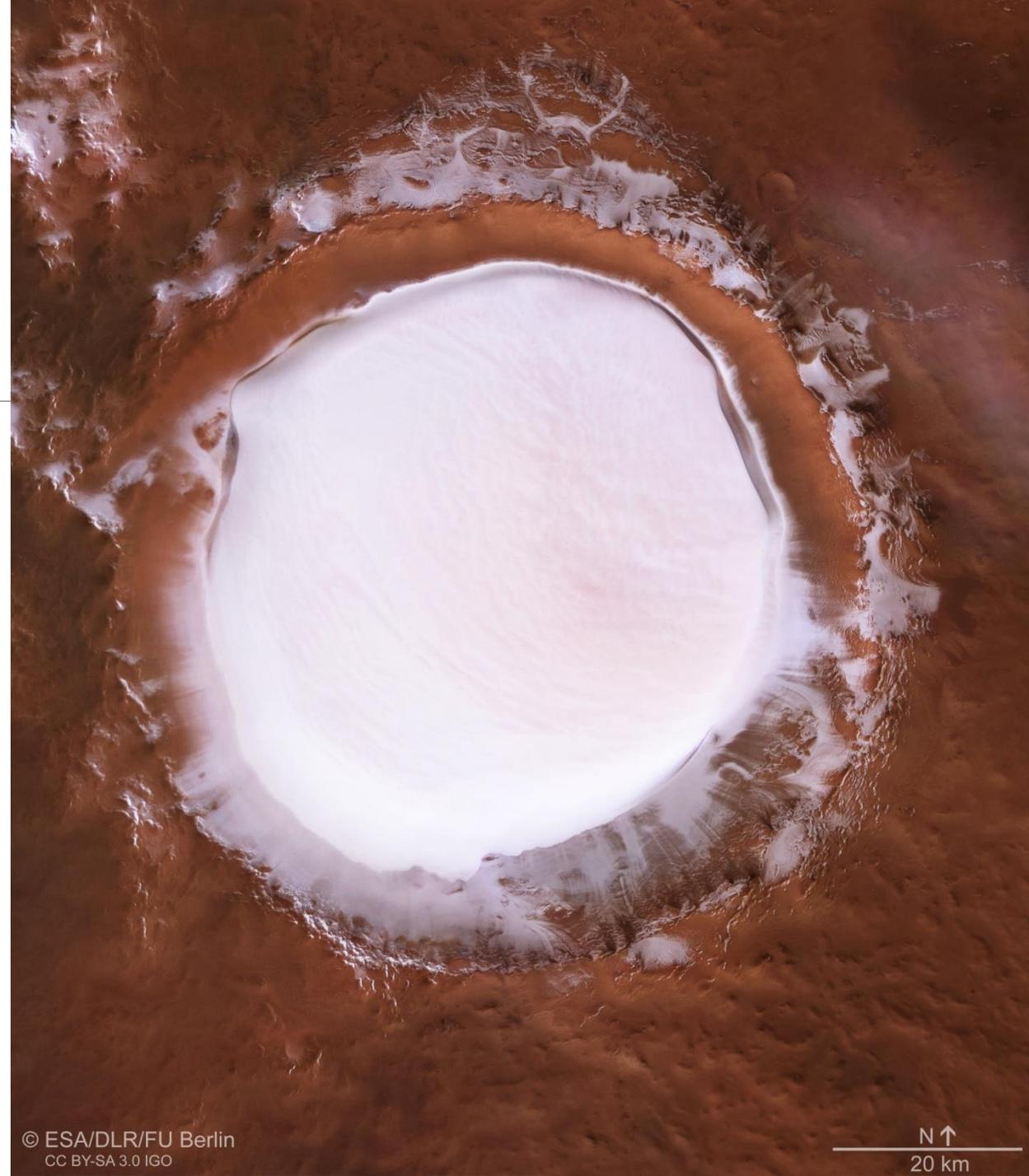
Photographie du cratère Korolev, prise le 4 Avril 2018 par la High Resolution Stereo Camera (HRSC) de la sonde Mars Express.

§3.4. Le glacier du cratère Korolev

Le cratère Korolev se trouve dans les basses terres du nord de Mars, juste au sud d'une grande parcelle de terrain rempli de dunes qui entoure une partie de la calotte polaire nord de la planète (connue sous le nom d'*Olympia Undae*). Ses coordonnées sont les suivantes : 73° de latitude nord et 165° de longitude est.

Le cratère a un diamètre de 82 km. Le glacier qu'il délimite est constitué de glaces permanentes et a une profondeur de 1,8 km pour un volume entre 1400 et 3500 km³.

Le glacier du cratère Korolev est présent tout au long de l'année grâce à un phénomène appelé «piège à froid» : l'atmosphère martienne, constituée essentiellement de dioxyde de carbone, se refroidit au-dessus du cratère et c'est donc un gaz plus froid et plus dense qui reste stationnaire entre les parois du cratère, au contact de la couche de glace, empêchant la sublimation de cette dernière. De plus, cette atmosphère est un mauvais conducteur de chaleur, exacerbant cet effet et gardant le cratère Korolev en permanence glacé.

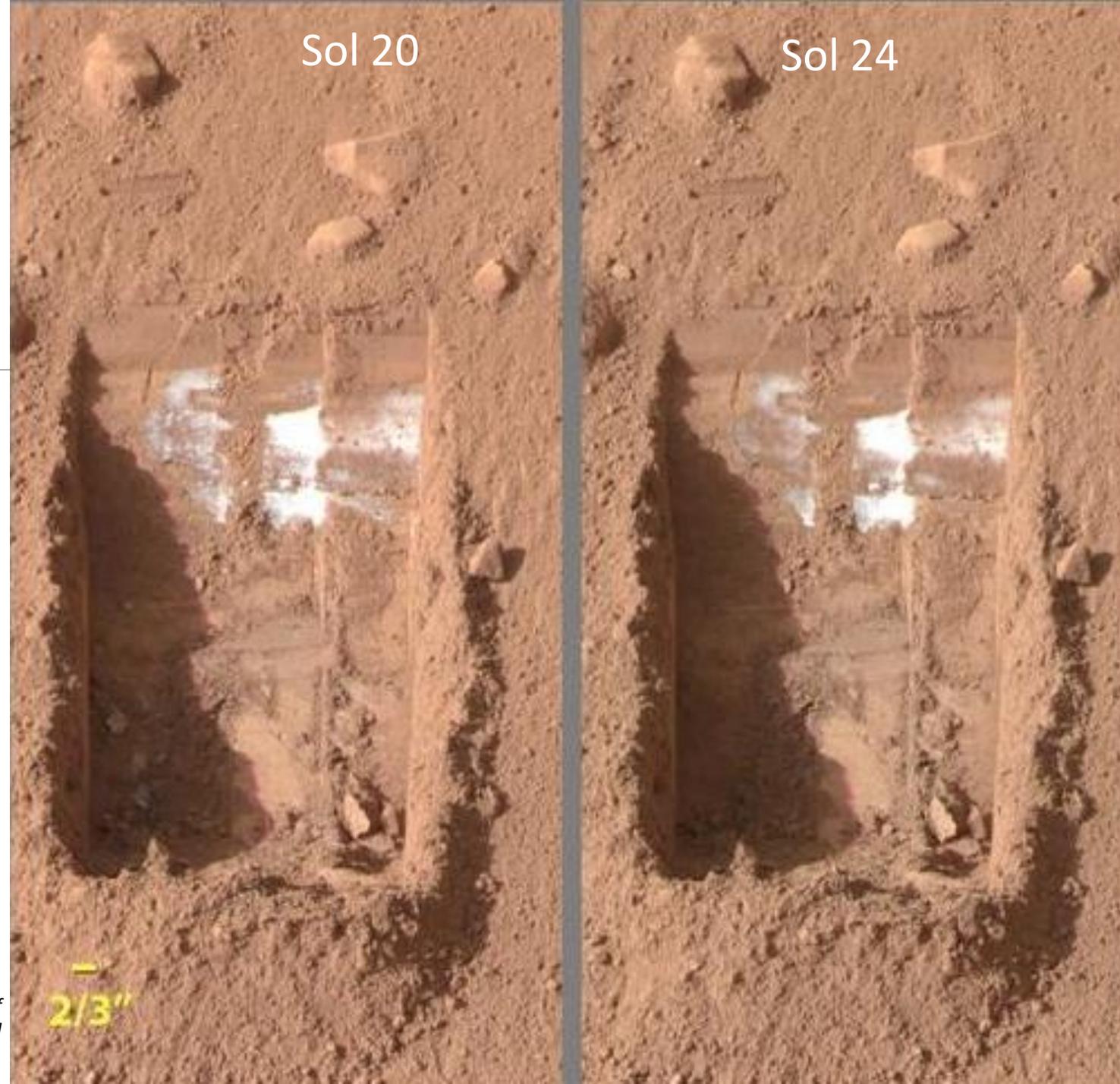


§3.5. La glace d'eau sous quelques centimètres de régolithe

Les 15 et 18 juin 2008, la caméra *Surface Surface Imager* photographie une plaque de glace exhumée par l'atterrisseur Phoenix.

Les mesures réalisées par les sondes Phoenix et Mars Odyssey montrent que de la glace existe bien juste sous la surface de Mars à l'extrême nord et au sud (hautes latitudes). La majeure partie de la glace s'est déposée sous forme de neige lorsque le climat était différent.

L'atterrisseur Phoenix s'est installé à la latitude de 68°N, de sorte que cette découverte abaisse considérablement la gamme d'eau facilement disponible sur Mars.



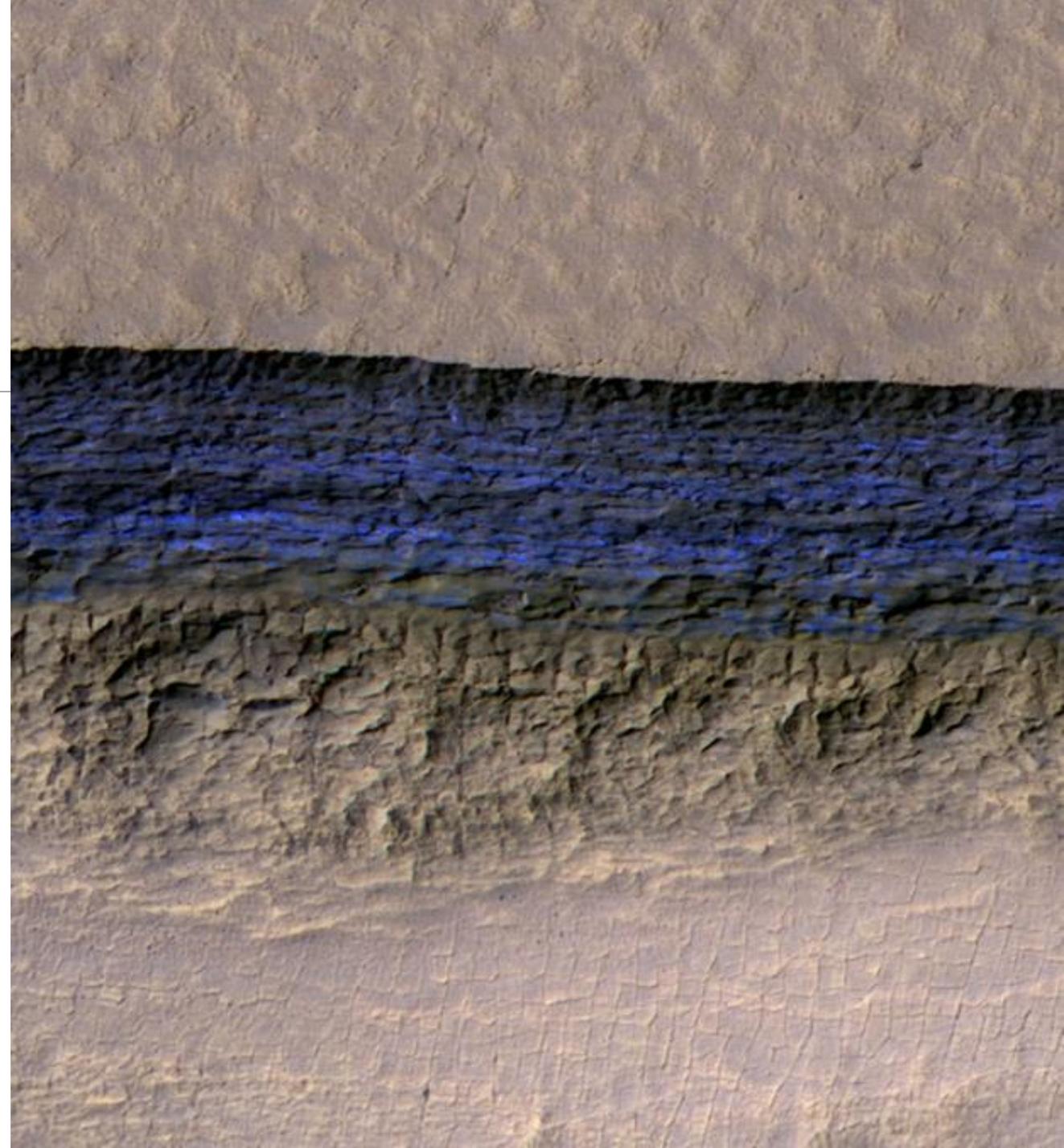


Photographie d'une falaise sur Mars, la glace d'eau y est révélée en bleu en fausses couleurs. La scène mesure environ 300 m de large, et la falaise fait une hauteur de 130 m environ. La pente de la falaise est supérieure à 55°.

§3.6. Une falaise de glace d'eau

En 2018, la NASA révèle les images de falaises au travers desquelles on peut observer d'épaisses couches de glace, surmontées par une couche de régolithe de un ou deux mètres d'épaisseur. Ces sites sont situés dans l'hémisphère nord et dans l'hémisphère sud, à des latitudes entre 55° et 58°.

Ces observations montrent que des couches de glace très épaisses, jusqu'à cent mètres, recouvrent vraisemblablement un tiers de la surface de Mars, et ce sous une épaisseur modeste de poussière.

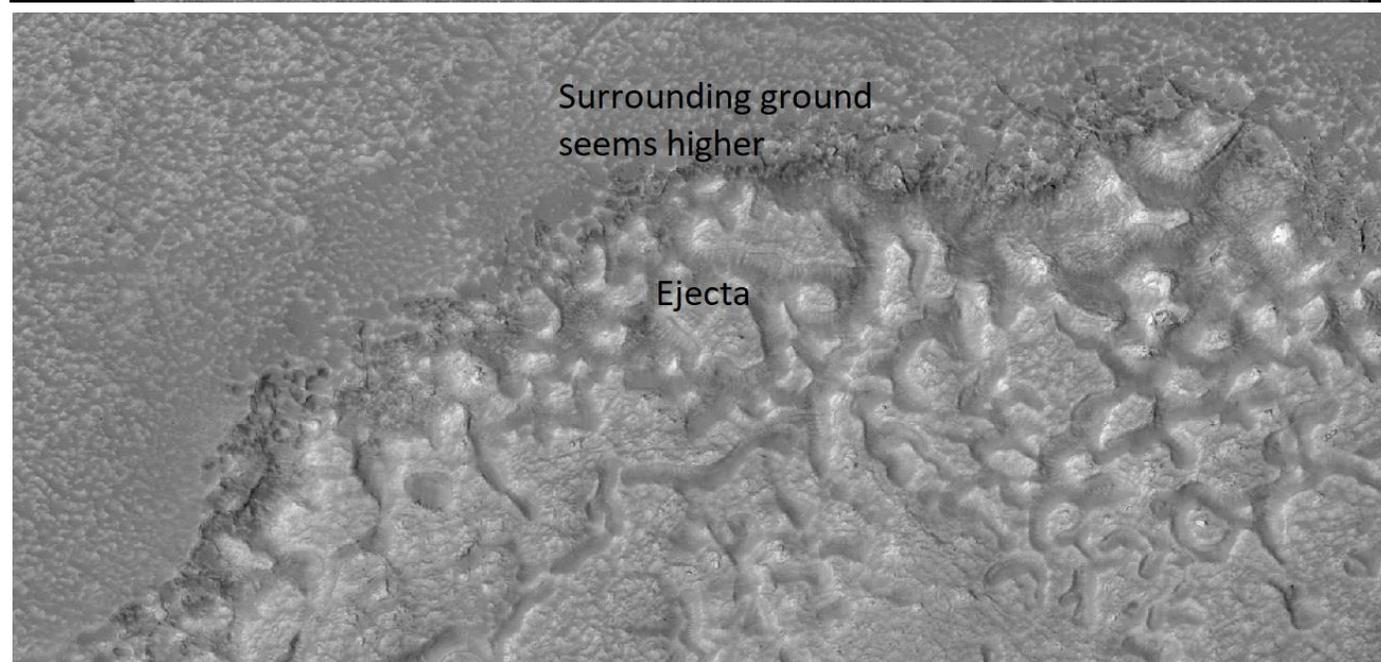


§3.7. Un cratère probablement formé dans un sol riche en glace

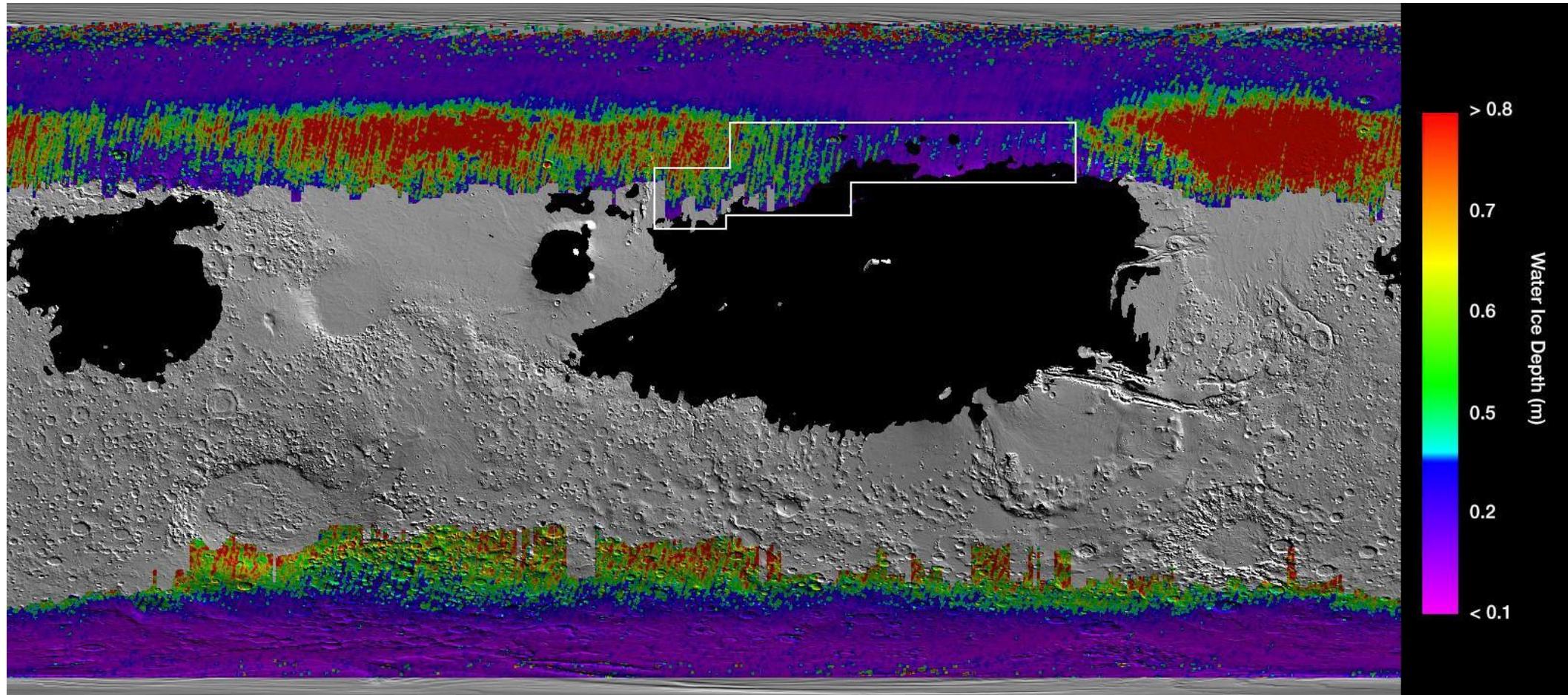
La caméra HiRISE a pris le 22 janvier 2018 cette photographie d'un cratère et de son éjecta dans la région de *Protonilus Mensae*, dans le quadrangle *Ismenius Lacus*, aux coordonnées 44°N, 42°E.

La forme de ce cratère est particulière, et il est vraisemblable qu'elle se produise sur un sol riche en glace. L'éjecta semble plus bas que les environs, et cela pourrait être le résultat de l'évaporation de la glace par l'éjecta chaud, réduisant l'altitude sous l'éjecta.

La présence de glace dans le régolithe, en quantités importantes est ainsi abaissé à des latitudes plus basses encore (~ 45°N).



§3.8. Une carte de l'épaisseur de glace sur Mars



NASA [[lien](#)]

↑ Cette carte utilise la combinaison des analyses réalisées par différentes sondes : Mars Reconnaissance Orbiter (Mars Climate Sounder instrument), Mars Odyssey (Thermal Emission Imaging System) et Mars Global Surveyor. Elle montre, notamment dans l'hémisphère Nord, la présence d'une couche de glace pouvant dépasser 0,8 m.

→
Concentric crater fill, photographié avec la caméra HiRISE de
la sonde MRO dans la région du quadrangle Phaethontis.

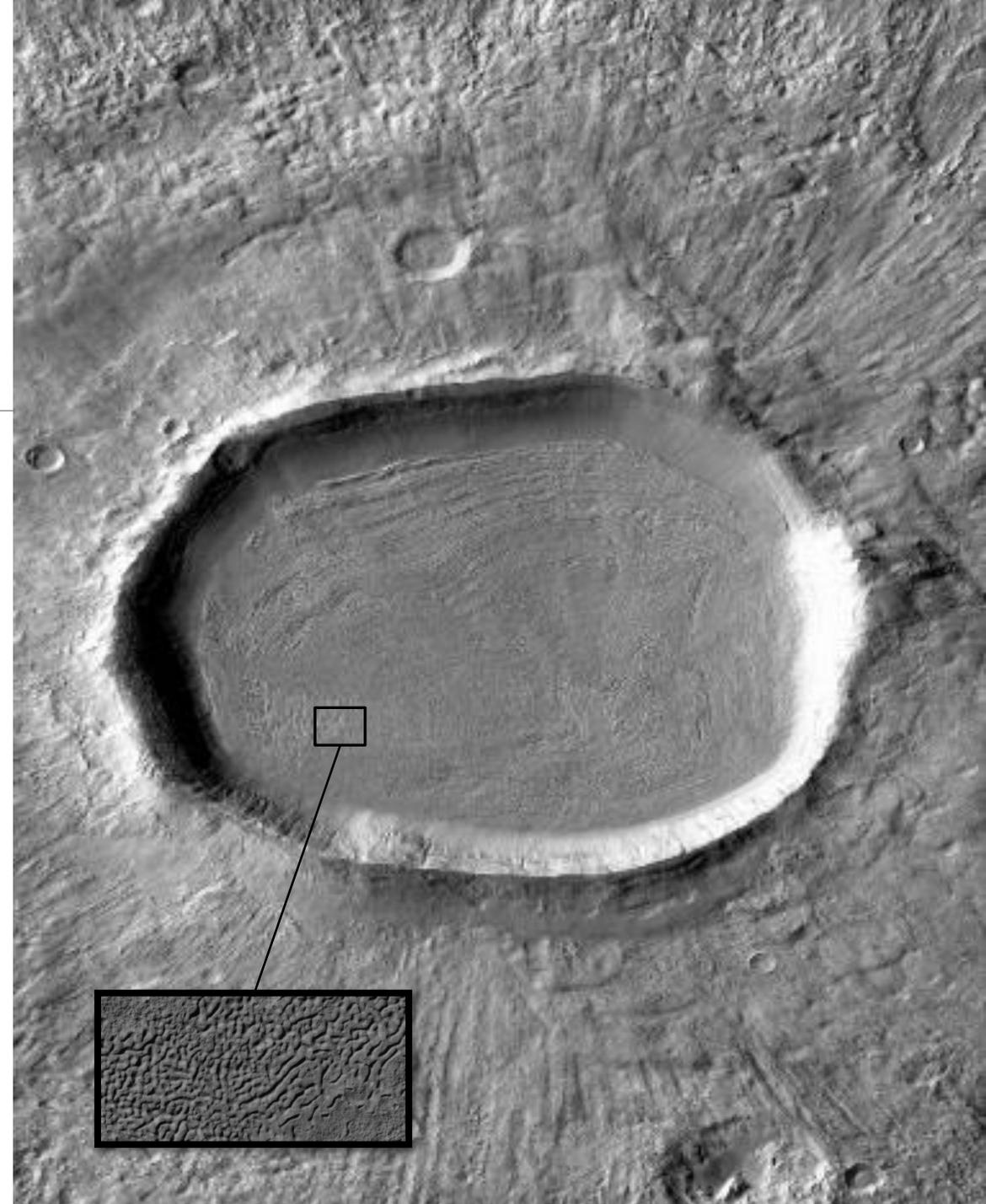
§3.9. Concentric Crater Fill (CCF)

Les CCF sont des cratères, initialement formés par impact, remplis de dépôts formant des lignes concentriques (cf figure ci-contre). Ils sont principalement observés aux latitudes moyennes/élevées sur Mars.

Sur la base d'analyses morphologiques réalisées à partir des images HiRISE notamment, il a été mis en évidence qu'un mécanisme de formation similaire à ceux des glaciers (chute de neige ou de poussière recouverte de glace), associé à un recouvrement par des débris, serait le plus à même d'expliquer les caractéristiques des CCF [Levy et al 2010].

Les analyses profondeur-diamètre des CCF indiquent que dans de nombreux endroits, des centaines de mètres de glace peuvent encore être présents sous les débris de surface. Les CCF seraient donc une source potentielle de glace d'eau sur Mars.

Des images haute résolution prises avec HiRISE révèlent que certaines des surfaces des CCF sont couvertes de motifs étranges ressemblant à un cerveau humain. Ces motifs seraient causés par des fissures en surface (qui accumule de la poussière et des débris) et de la glace se sublimant. Les fissures sont le résultat des contraintes liées à la gravité et au chauffage/refroidissement en fonction des saisons.



→
Ces images montrent les falaises et les détails de LDA. Elles images ont été prises avec la caméra HiRISE de la sonde MRO dans la région du Quadrangle Lacus.

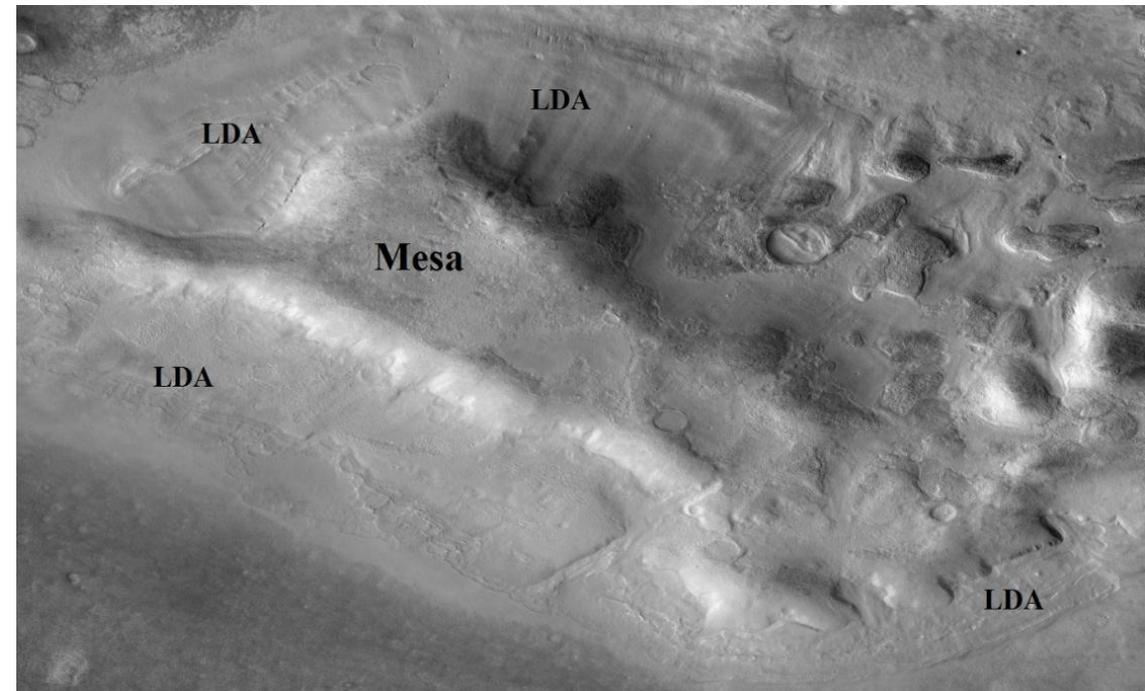
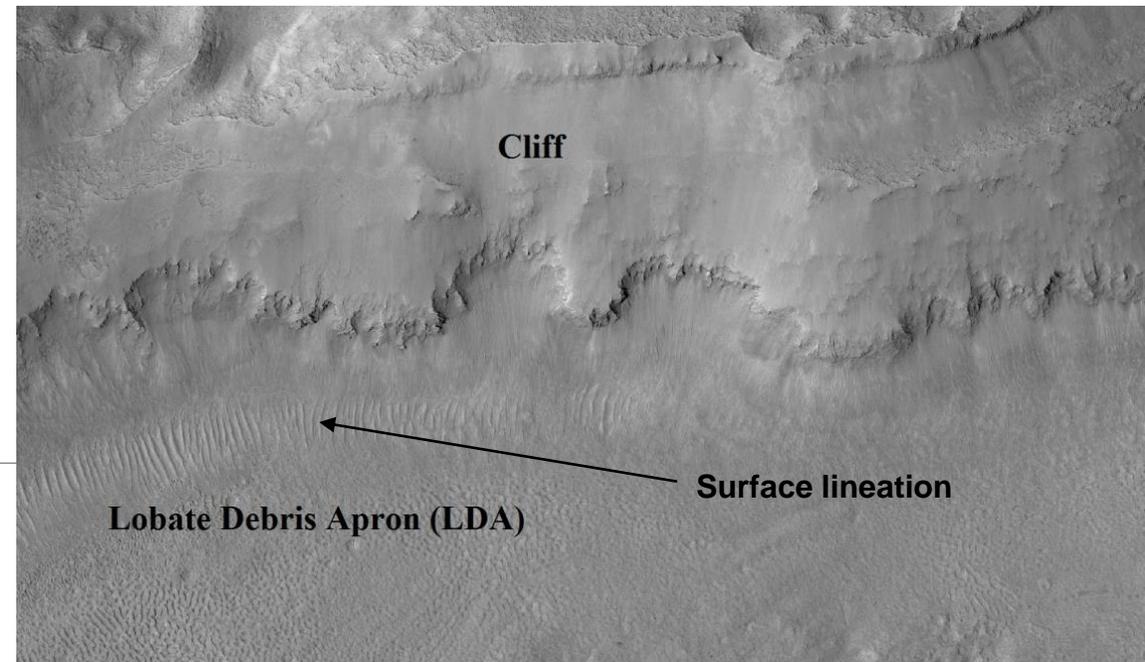
§3.10. Lobate Debris Apron (LDA)

Les LDA sont des formations géologiques provenant de l'amoncellement de débris rocheux sous les falaises. Leur topographie de type convexe forme une pente douce depuis les falaises, ce qui suggère un écoulement des débris loin de la falaise dont ils sont issus. Les LDA peuvent également présenter des « linéations de surface » comme les glaciers rocheux sur Terre.

Les analyses réalisées avec le radar de Mars Reconnaissance Orbiter ont permis de déterminer que de la glace d'eau pure constitue la majeure partie de cette formation géologique.

La découverte de glace d'eau dans les LDA démontre que l'eau se trouve à des latitudes basses, proches de l'équateur. Les futurs colons sur Mars pourraient donc puiser dans ces dépôts de glace, au lieu d'avoir à se déplacer vers des latitudes plus élevées, notamment car il est plus facile de faire atterrir un vaisseau spatial près de l'équateur de Mars

Un autre avantage majeur des LDA par rapport à d'autres sources d'eau sur MARS est la facilité de les détecter et de les cartographier depuis l'orbite.

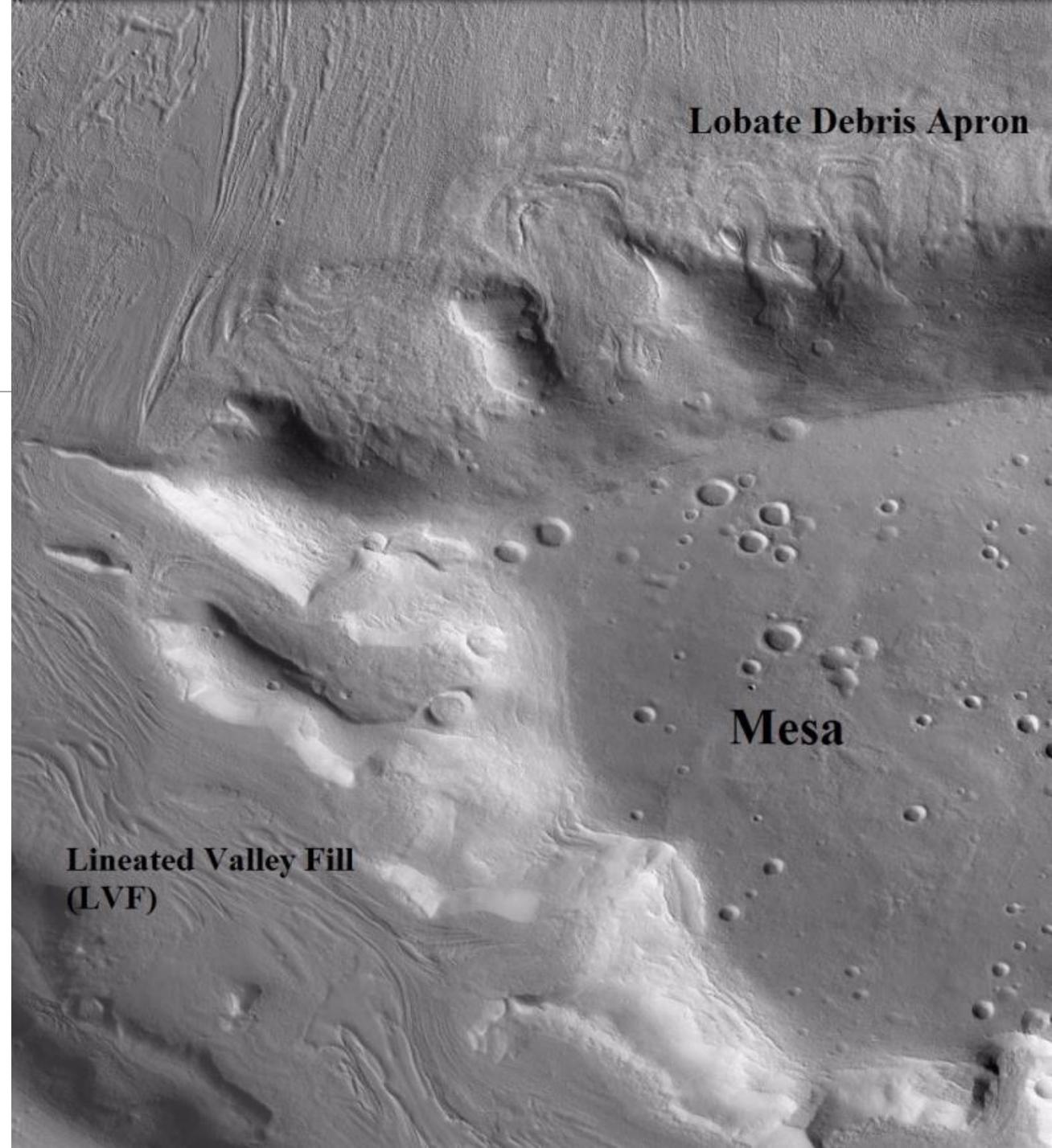


§3.11. *Lineated Valley Fill* (LVF)

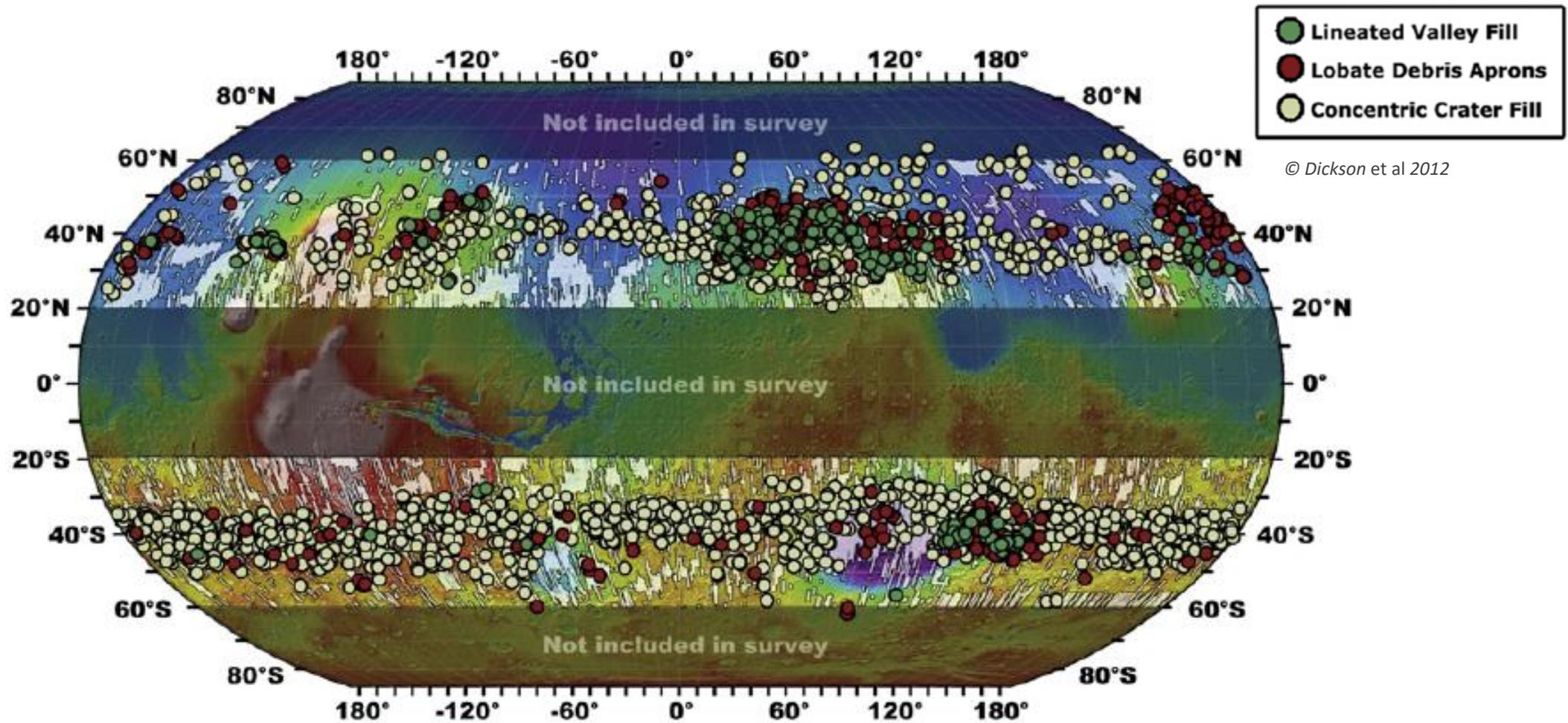
Les LVF (également appelées *lineated floor deposit*), sont des formations géologiques constituées de crêtes et des rainures qui semblent circuler autour des obstacles. Les mesures de la taille de l'ombre des crêtes ont montré que certaines crêtes peuvent atteindre plusieurs mètres de haut.

Les analyses réalisées avec le radar de *Mars Reconnaissance Orbiter* ont également permis de déterminer que de la glace d'eau est probablement présente dans ces formations géologiques sous une fine couche de débris et poussière.

Des photos haute résolution prises avec HiRISE révèlent que certaines des surfaces des LVF sont également couvertes de motifs étranges ressemblant à un cerveau comme pour les CCF et LDA, suggérant que les trois types de formations géologiques seraient liées et que de la glace d'eau serait présente dans les LVF.



§3.12. Carte des écoulements de glace détectés sur Mars



Synthèse

- Des observations **directes** indiquent la présence de quantités massives de glace d'eau sur Mars dans les latitudes élevées.
 - Tout d'abord dans les calottes polaires australes et boréales, pour un volume total de l'ordre de $3,2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ – par comparaison, l'inlandsis du Groënland contient $2,9 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Pendant l'hiver de chaque hémisphère, ces calottes sont recouvertes par une couche de glace de dioxyde de carbone de l'ordre d'un mètre d'épaisseur, qui se sublime ensuite pendant l'été.
 - Dans les régions proches du pôle, approximativement au-delà de 60° de latitude, des observations satellite produisent des images de glaciers occupant le centre de cratères. Ces glaciers peuvent contenir des dizaines de kilomètres-cubes de glace, voire plusieurs milliers dans le cas du cratère Korolev.
 - À partir de 45° de latitude, des observations satellite et *in-situ* (atterrisseur Phoenix) montrent la présence d'une couche de glace sous le régolithe. Cette couche couvre peut-être sur un tiers de la surface de la planète, et peut atteindre une épaisseur d'une centaine de mètres.
- Des observations **indirectes** montrent également que des quantités importantes de glace sont à l'origine de formations géologiques particulières, dans des régions de latitude plus faible, et plus tempérées.
 - Entre 20° et 60° de latitude, des centaines d'observations induisent la présence de glace sous une couche de régolithe, observations corroborées par des mesures satellite. Ces formations sont de types divers : *Concentric Crater Fill* (CCF), *Lobate Debris Apron* (LDA), *Lineated Valley Fill* (LVF).
- **Ainsi, jusqu'à des latitudes basses, il est ainsi vraisemblable de pouvoir trouver sur Mars de grandes quantités d'eau sous forme de glace.**



FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

§4. LES AQUIFÈRES SUR MARS

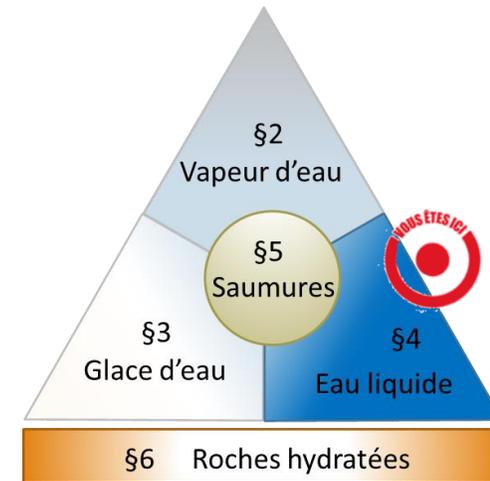
Introduction

Nous l'avons vu en introduction, les conditions de température et de pression à la surface de Mars rendent rares les circonstances dans lesquelles l'eau liquide y est stable. Cette rareté de l'eau liquide en surface est la différence principale l'eau par rapport à la Terre, où la forme la plus courante sous laquelle l'eau est rencontrée est l'état liquide, sous forme de pluie, de rivières, de mers et d'océans. La plus grande partie des techniques industrielles d'extraction de l'eau devront donc être adaptées.

Ces propos peuvent toutefois être nuancés par le fait qu'il reste toutefois possible que l'eau se trouve à l'état liquide dans le sous-sol de Mars, sous la forme d'aquifères. En ce cas, l'exploitation de gisements se rapprocherait de l'extraction de l'eau des nappes phréatiques.

Que ce soit sous la forme de lieux spécifiques d'existence d'eau liquide en surface ou d'aquifères, la localisation de l'eau liquide sera donc primordiale pour déterminer son accessibilité par tout procédé industriel, et donc sa viabilité en tant que ressource.

On présente dans ce chapitre les faits marquants parmi les connaissances obtenues à ce jour à propos de l'eau liquide sur Mars.



Sommaire

- Introduction
- §4.1. Les traces d'eau fossiles
- §4.2. Le lac subglaciaire au pôle sud
- §4.3. Les données radar tendent à exclure la présence d'aquifère
- Synthèse

§4.1. Les traces d'eau fossiles

Il faut préciser un point. Nous l'avons dit, de nos jours, l'eau sous forme liquide ne peut plus exister de façon permanente à la surface de Mars car la pression atmosphérique et la température sont trop faibles.

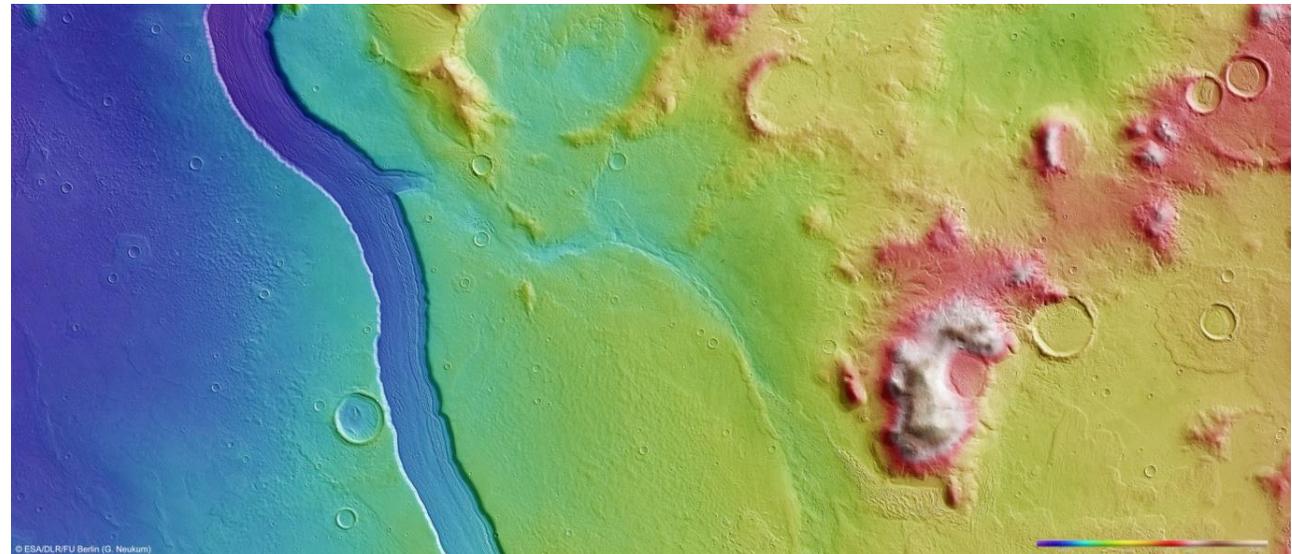
Toutefois, à une époque très reculée, que l'étude des cratères d'impact place autour de quatre milliards d'années, l'atmosphère de Mars était probablement similaire à celle de la Terre et permettait l'existence d'eau liquide en grandes quantités. Les sondes martiennes ont ainsi révélé des formations créées par des rivières, des deltas et des lacs il y a des milliards d'années, et peut-être même les traces d'un ancien océan dans

l'hémisphère Nord.

Ces traces se rapportent toutefois à l'eau fossile, laquelle n'est plus exploitable directement, c'est-à-dire autrement que par les formations géologiques et les roches altérées (notamment hydratées) qu'elles auraient générées.

On se concentre dans cette section sur l'eau liquide présente de nos jours sur Mars.

→
Vue topographique dans Hellas Planitia créée à partir d'observations par l'instrument HRSC de la sonde européenne Mars Express. L'échelle des couleurs fait bien apparaître le contraste entre les zones basses en bleu à gauche et la région plus élevée de Promethei Terra à droite. On aperçoit ainsi clairement un chenal appelé Reull Vallis qui dans cette zone atteint une largeur de sept kilomètres et une profondeur de 300 mètres. En tout, Reull Vallis s'étend sur plus de 1500 kilomètres sur Mars et est probablement le fruit de l'écoulement d'une rivière il y a des milliards d'années



©ESA [[lien](#)]

© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

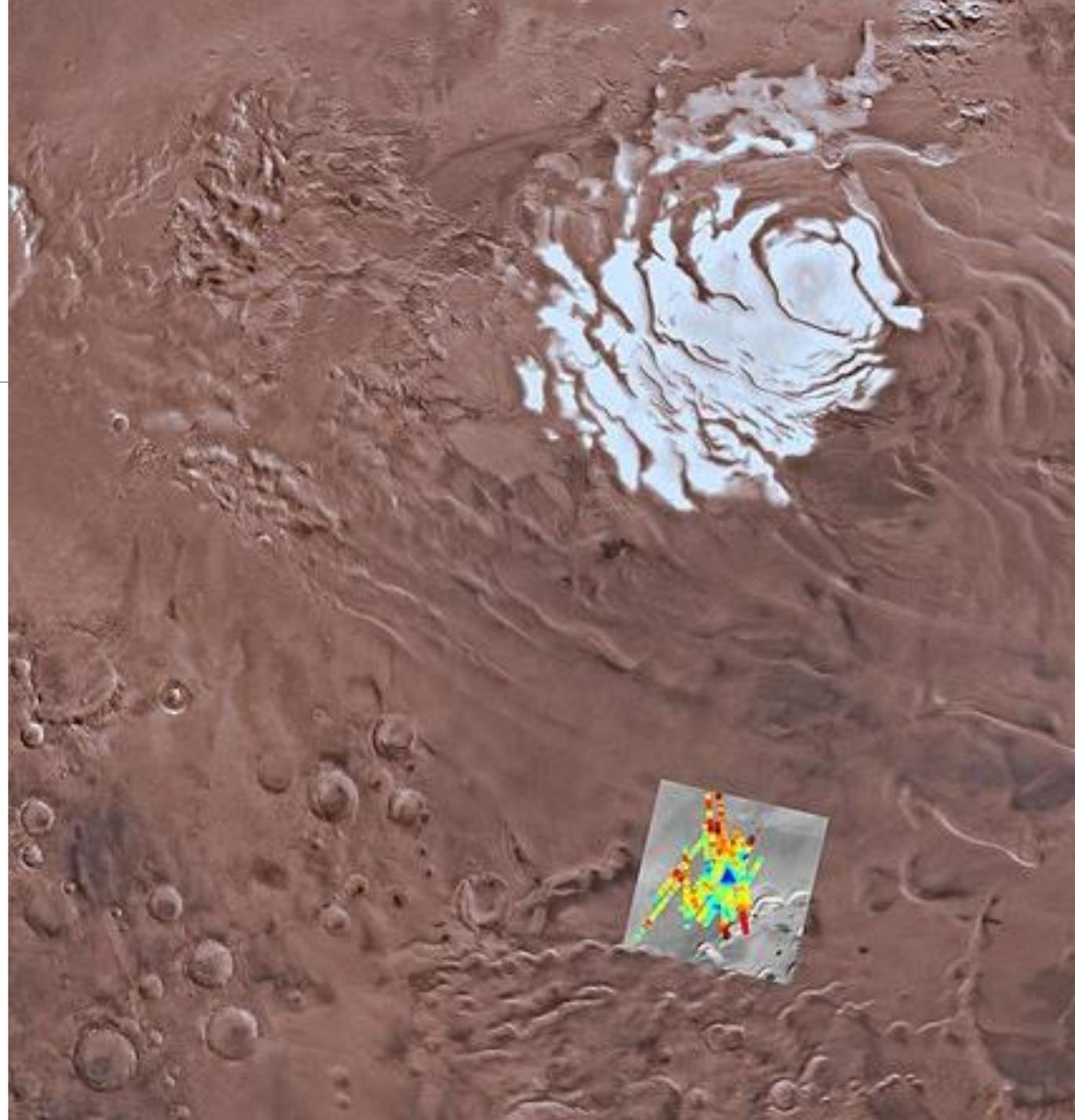
§4.2. Le lac subglaciaire du pôle sud

Les données du radar MARSIS de la sonde européenne *Mars Express* collectées entre mai 2012 et décembre 2015 ont montré qu'il existait un lac subglaciaire au pôle sud de Mars. Ce lac, situé sous une couche de 1,5 km de glace, s'étend sur 20 km horizontalement. Il est centré sur les coordonnées 193°E, 81°S, dans une zone plate entourée de terres plus élevées, à l'exception d'une dépression sur son flanc est.

La température en ce lieu est estimée à -68 °C et l'eau resterait liquide du fait de l'effet antigel de perchlorates de magnésium et de calcium ; il n'est pas exclu qu'une activité géologique qui ne soit pas trop ancienne ait conduit à liquéfier cette eau.

Ce lac subglaciaire n'est pas sans rappeler, sur Terre, le lac Vostok, sous l'inlandsis de l'Antarctique.

© USGS Astrogeology Science Center,
Arizona State University, INAF [\[lien\]](#)



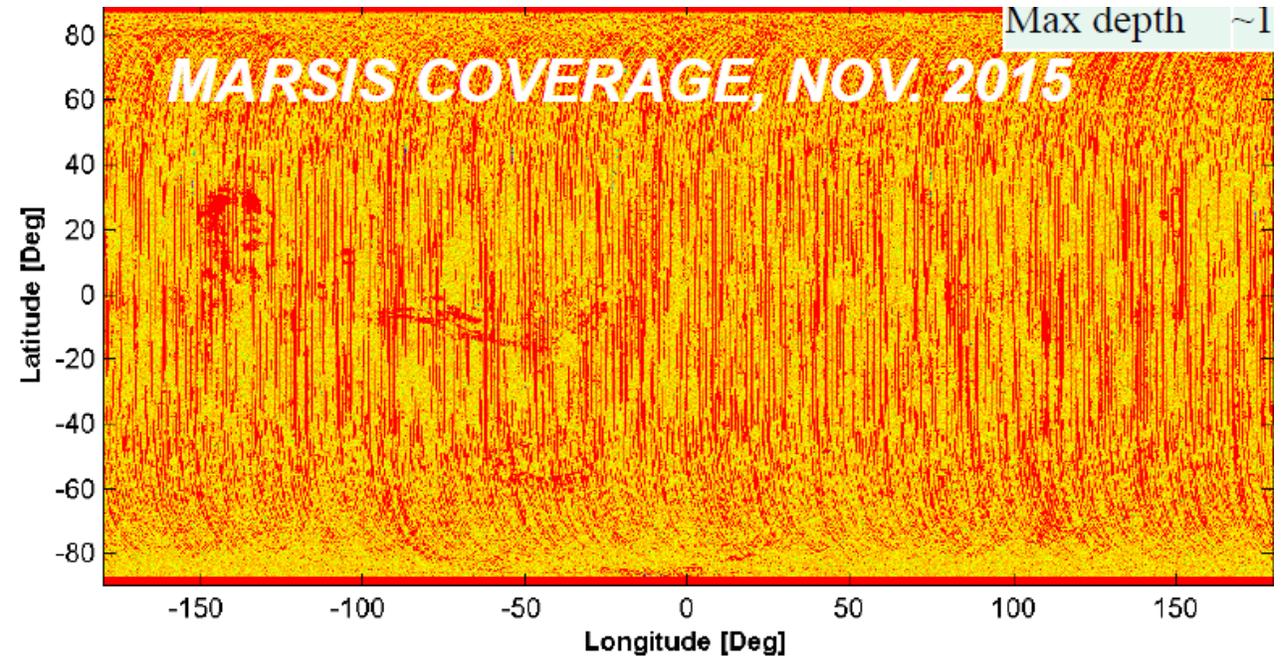
§4.3. Les données radar tendent à exclure la présence d'aquifères

- Les aquifères sont détectables par des technologies radar ; deux instruments de ce type ont analysé Mars, les radars MARSIS et SHARAD.
- Les caractéristiques de ces radars sont les suivantes :

Instrument	MARSIS	SHARAD
Sigle	Mars <u>A</u> dvanced <u>R</u> adar for <u>S</u> ubsurface and <u>I</u> onosphere <u>S</u> ounding	Mars <u>S</u> hallow <u>R</u> adar sounder
Type	Radar	Radar
Sonde	Mars Express	Mars Reconnaissance Orbiter
Résolution spatiale	10 km	0,5 km
Résolution profondeur :	~ 100 m	~ 10 m
Profondeur maximale	~ 1 km	0,3 km
Taux de couverture	~ 69% ^a	~ 31% ^a

^a : à avril 2016, référence. : Abbud-Madrid 2016.

Les investigations menées jusqu'à maintenant tendent à exclure la présence de larges aquifères, au moins jusqu'à 200 ou 300 m de profondeur.



↑ Couverture de Mars par le radar MARSIS de la sonde Mars Express : les pixels jaunes indiquent les points où le radar a prouvé l'absence d'aquifère, tandis que les points rouges les zones non investiguées, ou dont la qualité de la mesure ne permet pas de conclure.

Référence : Abbud-Madrid 2016

Synthèse

- Les aquifères peuvent être détectés depuis l'orbite par des radars, comme ceux des sondes *Mars Express* (radar MARSIS) et *Mars Reconnaissance Orbiter* (radar SHARAD).
- Les investigations menées jusqu'à présent :
 - Tendent à exclure la présence d'aquifères sous la surface jusqu'à ~ 300 m de profondeur,
 - À l'exception d'un possible lac subglaciaire proche de la calotte australe (latitude : 86°S)
- **Les aquifères contenant de l'eau liquide ne sont vraisemblablement pas, à ce jour, une source d'eau sur Mars pertinente pour l'ISRU.**
 - C'est en particulier la conclusion de Abbud-Madrid 2016.



FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

§5. LES SAUMURES DE MARS

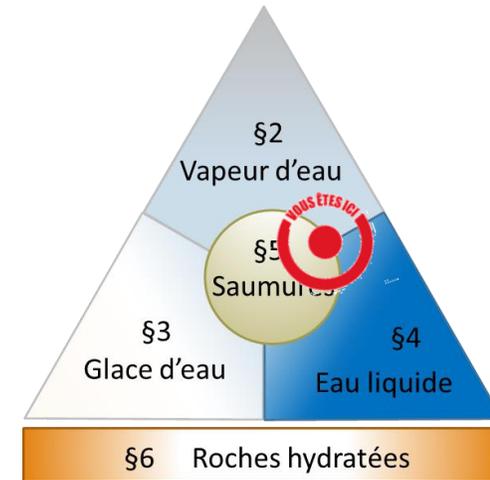
Introduction

La présence de sel dissous dans l'eau étend le domaine de température et de pression dans lequel l'eau liquide, alors sous forme de saumure, peut exister à la surface de Mars.

Des phénomènes géologiques peuvent conduire à de fortes concentrations en sel dans l'eau sur Mars, tout comme sur Terre avec, par exemple des lagunes ou les lacs salés, certains de très grande taille. Il est donc envisageable de trouver des lieux où des saumures sont stables à la surface de Mars.

La localisation de ces saumures sera donc primordiale pour déterminer son accessibilité par tout procédé industriel, et donc sa viabilité en tant que ressource.

On présente dans ce chapitre les faits marquants parmi les connaissances obtenues à ce jour à propos des saumures sur Mars.



Les **saumures** (en anglais brines) sont une solution aqueuse d'un sel, à saturation ou de forte concentration.

Sommaire

- Introduction
- §5.1. Écoulements saisonniers dans le cratère Newton
- §5.2. Écoulements saisonniers dans le cratère Horowitz
- §5.3. Écoulements saisonniers dans le cratère Palikir
- §5.4. Carte des Recurring Slope Lineae identifiés sur Mars
- §5.5. Recherches au sujet de la composition des saumures
- Synthèse

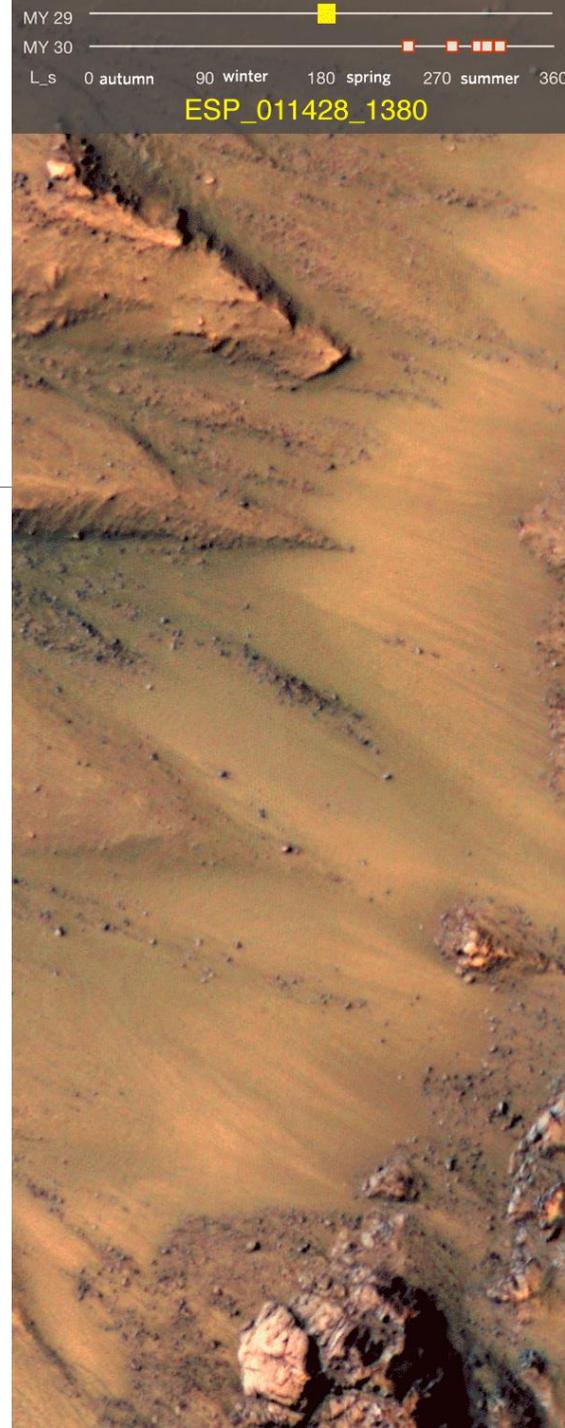
§5.1. Écoulements saisonniers dans le cratère Newton

La caméra HiRISE de *Mars Reconnaissance Orbiter* prend plusieurs images de la bordure du cratère Newton, entre le début du printemps et la fin de l'été de l'année suivante (la première image est prise en 2009). Le cratère Newton est situé aux coordonnées suivantes : 41,6°S 202,3°E.

L'image montre des lignes sombres appelées les *Recurring Slope Lineae* (RSL), étroites (jusqu'à quelques mètres de large), et situées sur les pentes prononcées (25 à 40°), sur les faces côté équateur. Ces lignes se forment lors des saisons chaudes et disparaissent lors des saisons froide ; lors des épisodes chauds, la température atteint des valeurs situées entre -25°C à +20°C.

On peut expliquer ces lignes sombres en considérant que ce sont des écoulements de saumures.

© NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona [[lien](#)]

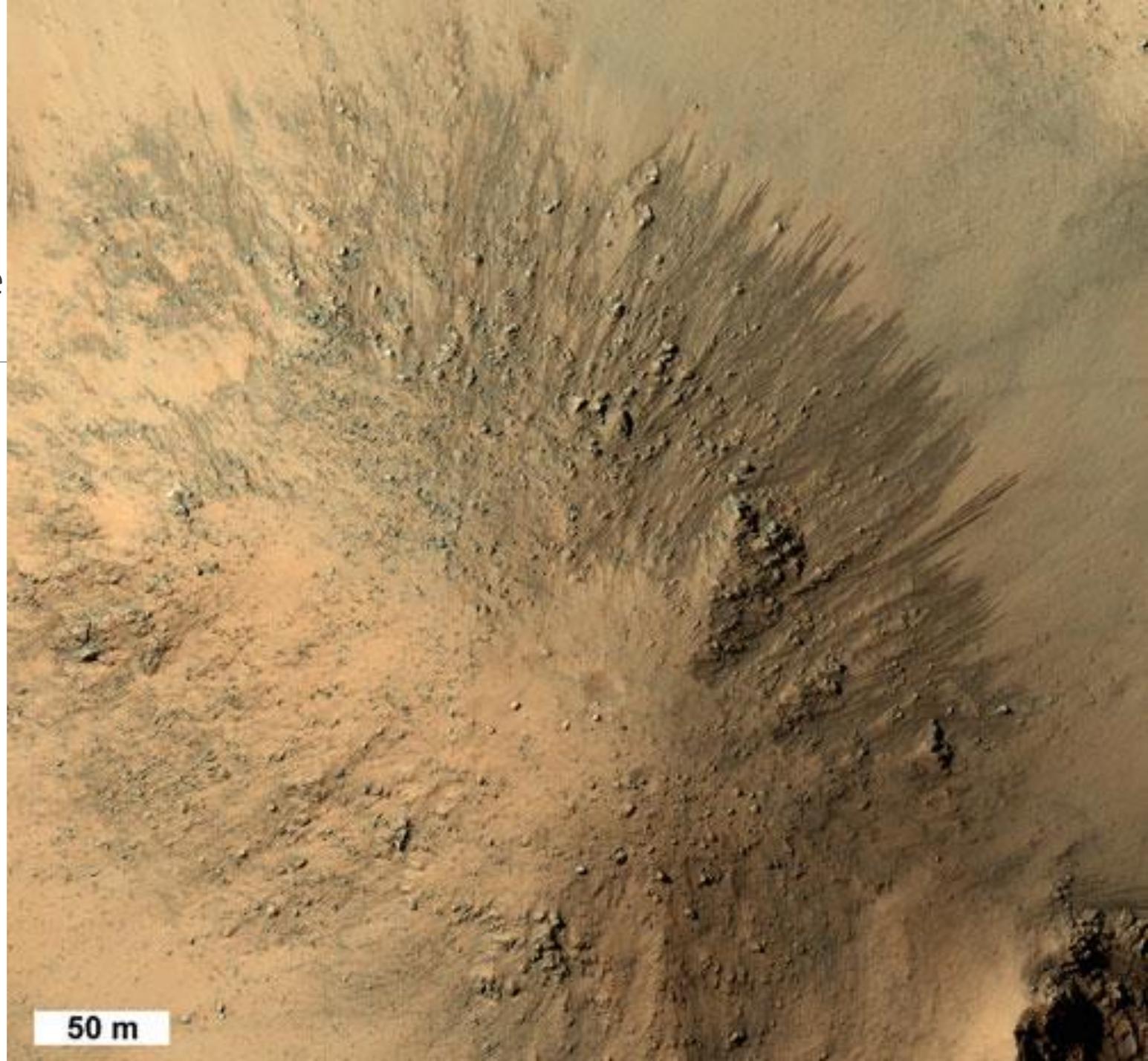


§5.2. Écoulements saisonniers dans le cratère Horowitz

La caméra HiRISE de *Mars Reconnaissance Orbiter* prend plusieurs images de la bordure du cratère Horowitz, pendant l'été. Le cratère Horowitz est situé aux coordonnées suivantes : 32°S, 140.8°E

De même, on observe des lignes sombres, qui peuvent être des écoulements de saumures.

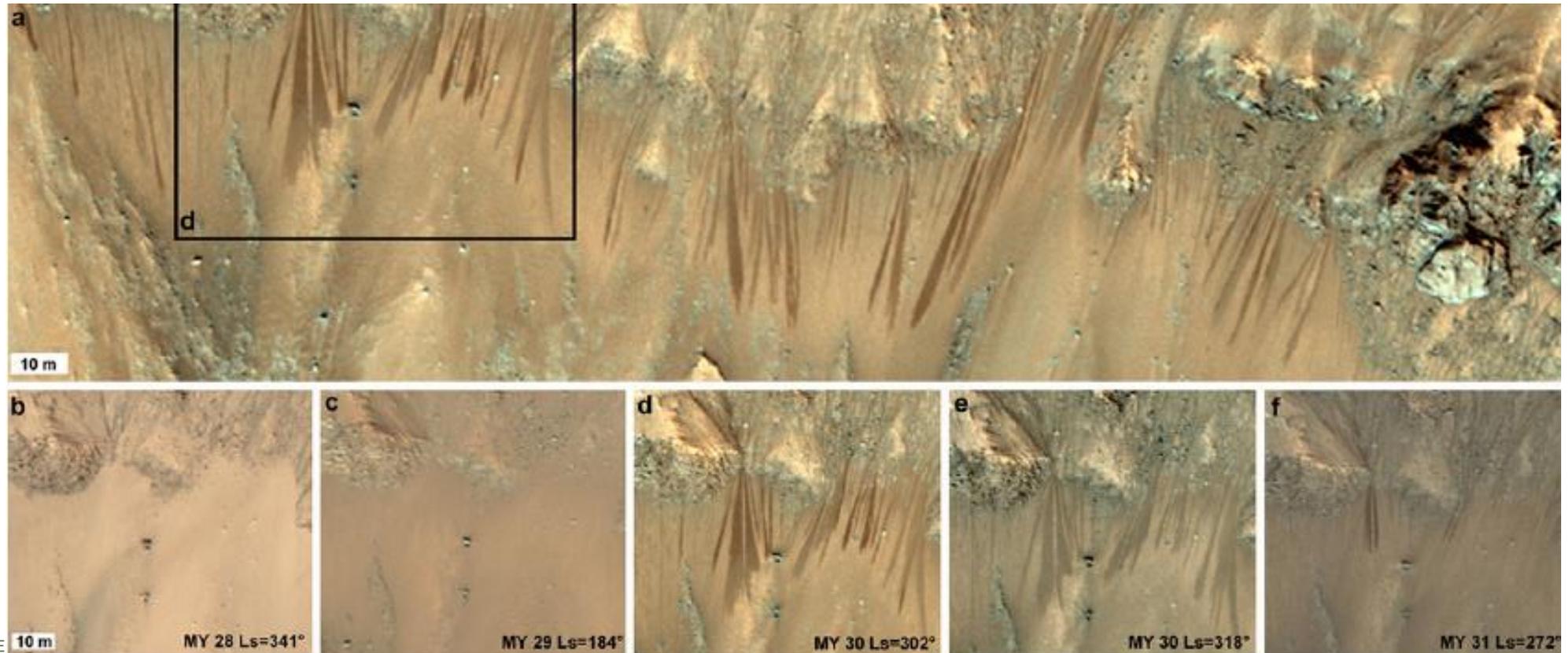
© NASA/JPL-Caltech/Univ. of
Arizona, cf Runyon et Ojha 2014



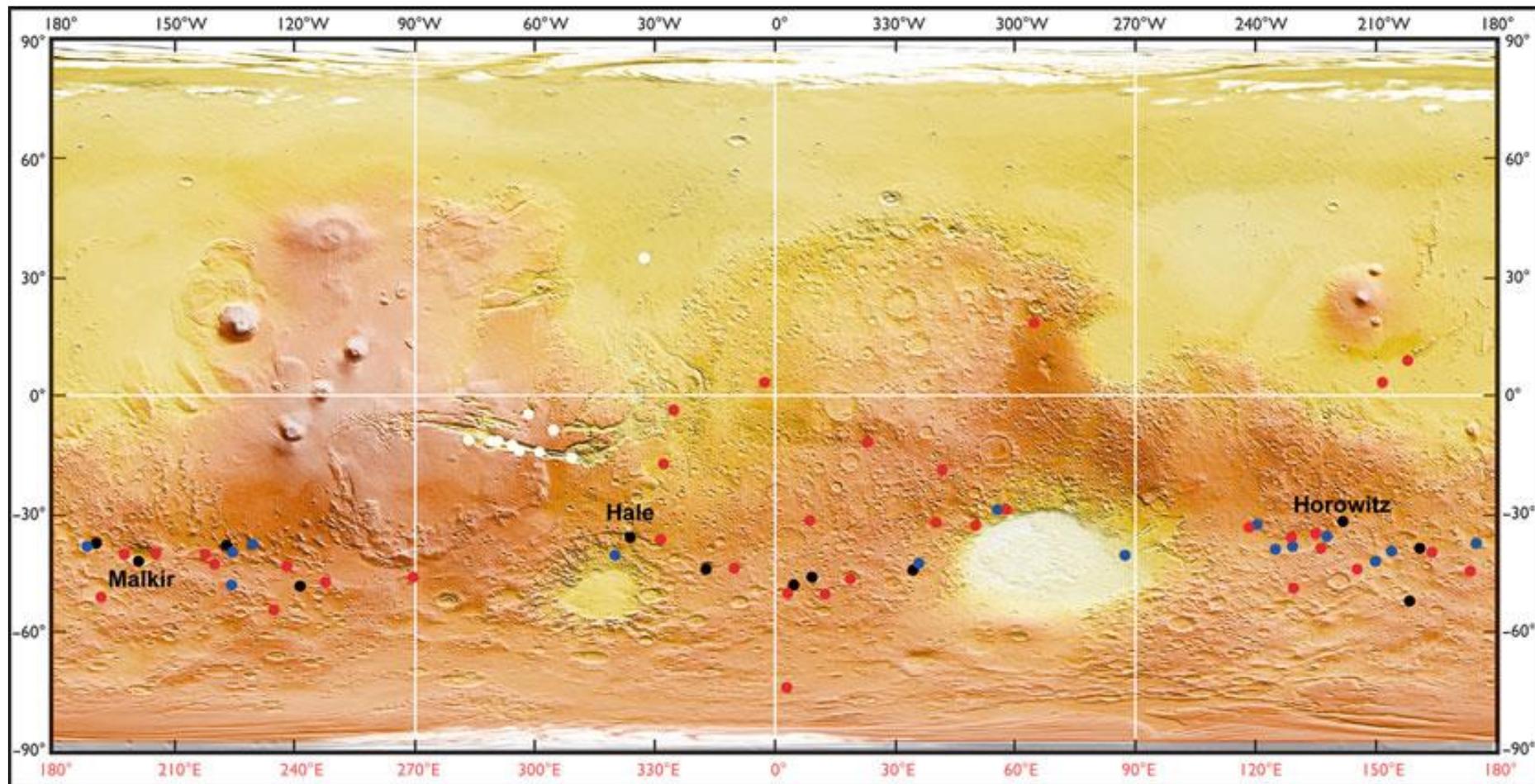
§5.3. Écoulements saisonniers dans le cratère Palikir

La caméra HiRISE de *Mars Reconnaissance Orbiter* prend plusieurs images de la bordure du cratère Palikir à différentes saisons. Le cratère Horowitz est situé aux coordonnées suivantes : 41.6°S 202.3°E.

De même, on observe des lignes sombres, qui peuvent être des écoulements de saumures.



§5.4. Carte des *Recurring Slope Lineae* identifiés sur Mars



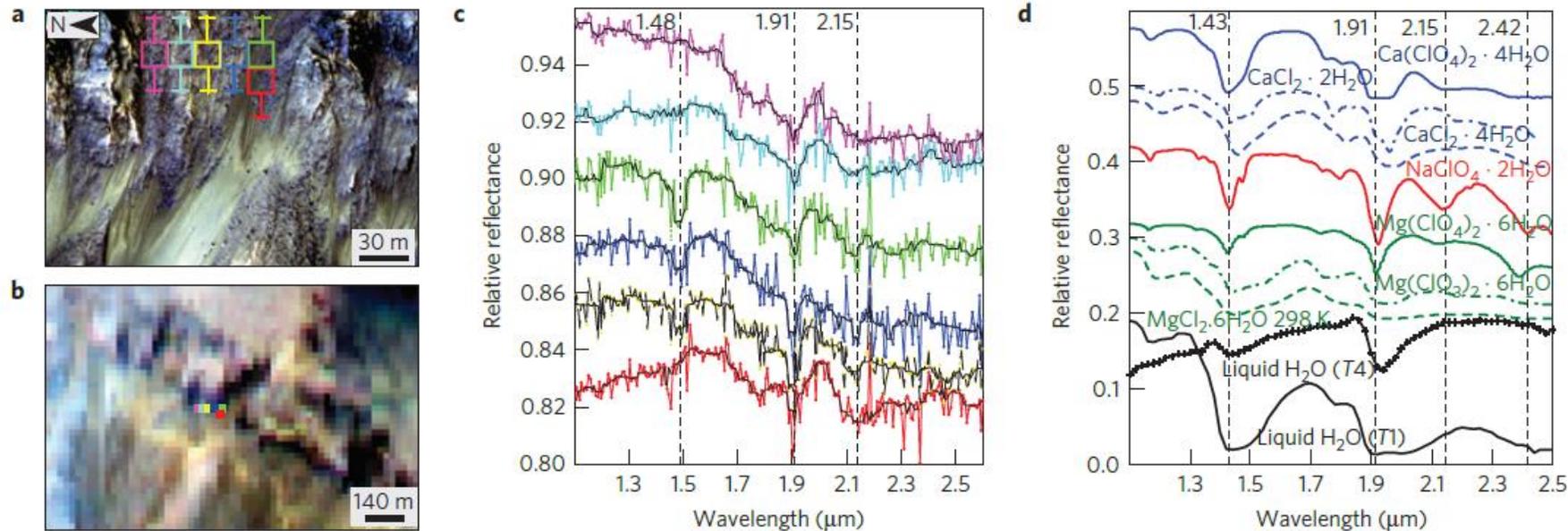
← noir / blanc : RSL confirmés,
bleu : RSL partiellement
confirmés, rouge : RSL
candidats.

© Runyon et Ojha 2014

§5.5. Recherches au sujet de la composition des saumures

- Dans l'hypothèse que les *Recurring Slope Lineae* (RSL) sont des écoulements de saumures, il faut alors déterminer quelle est leur composition. Plusieurs hypothèses sont formulées concernant le sel dissous dans l'eau, et elles sont explorées par la recherche de sels hydratés.
- Les investigations indiquent que les sels pourraient être les suivants [Mitchell et Christensen 2015, Ojha *et al* 2015] : Sulfate ferrique $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, Chlorure de calcium CaCl_2 , Perchlorate de magnésium $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$, Perchlorate de chlore-magnésium $\text{MgCl}_2(\text{H}_2\text{O})_x$, Perchlorate de sodium NaClO_4 .

↓ RSL et Détection spectrale sur la bordure du cratère Palikir. a : image HiRISE, b : image CRISM, c : spectre des régions d'intérêts. Les couleurs sont cohérentes entre a, b et c. d : spectre de laboratoire de divers sels.



Synthèse

- L'imagerie par satellite répétée pour des mêmes lieux à des saisons différentes permet de révéler la formation d'écoulements saisonniers. Ce fut le cas en particulier par *Mars Reconnaissance Orbiter* (caméra HiRISE).
- Les observations montrent que plusieurs occurrences de lignes sombre, le long de pentes, et s'étendant lors des saisons chaudes, et disparaissant lors des saisons froides. Ces phénomènes géologiques ont été appelées des *Recurring Slope Lineae* (RSL). Ils peuvent être expliqués par plusieurs hypothèses, et en celle d'écoulements de saumures.
- la plupart des RSL ont été trouvés dans les latitudes moyennes de l'hémisphère sud de Mars, entre 32°S et 52°S, sur des pentes prononcées (~ 30°) faisant face à l'équateur, et lorsque la température atteint -20 à +20°C en été au moment le plus chaud de la journée. Des RSL ont été trouvés dans l'hémisphère nord dans la région de Cerberus Fossae (10°N 158°E)
- Les RSL peuvent être expliquées comme des écoulements de saumures, au sein desquels l'eau est stabilisée par des sels. C'est une hypothèse parmi d'autres, et les recherches sont encore en cours pour déterminer la composition de ces saumures hypothétiques.
- **Les saumures restent aujourd'hui une source d'eau sur Mars assez spéculative pour l'ISRU.**
 - C'est en particulier la conclusion de Abud-Madrid 2016.



FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

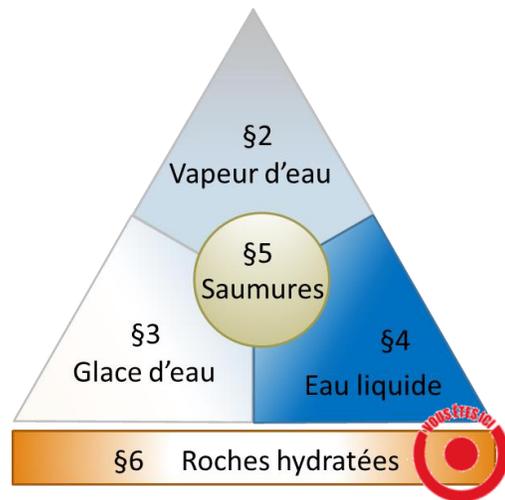
Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

§6. L'EAU CHIMIQUEMENT LIÉE

Introduction

De nombreux minéraux sont susceptibles d'être hydratés, c'est-à-dire de retenir des molécules d'eau à l'intérieur de leur structure. Ces minéraux sont formés par dégradation d'une roche par de l'eau. L'eau ayant vraisemblablement évolué à la surface de Mars il y a plusieurs milliards d'années, la présence de minéraux hydratés est vraisemblable.

Ces molécules d'eau peuvent être extraites du minéral, *par exemple* par un traitement thermique à plus ou moins haute température. La nature et la localisation de ces minéraux sont primordiales pour déterminer la viabilité des roches hydratées en tant que ressource d'eau sur Mars.



En haut : [\[lien\]](#)
 En bas : Flickr [\[lien\]](#)

→

L'exemple le plus banal sur Terre de la capacité de rétention d'eau, c'est celui d'une terre argileuse humide. Cette petite flaque d'eau au fond de l'empreint de pas indique bien l'eau extraite (mécaniquement) à partir de l'argile.

L'argile sec n'a quant à lui plus du tout le même aspect ou la même consistance ↓



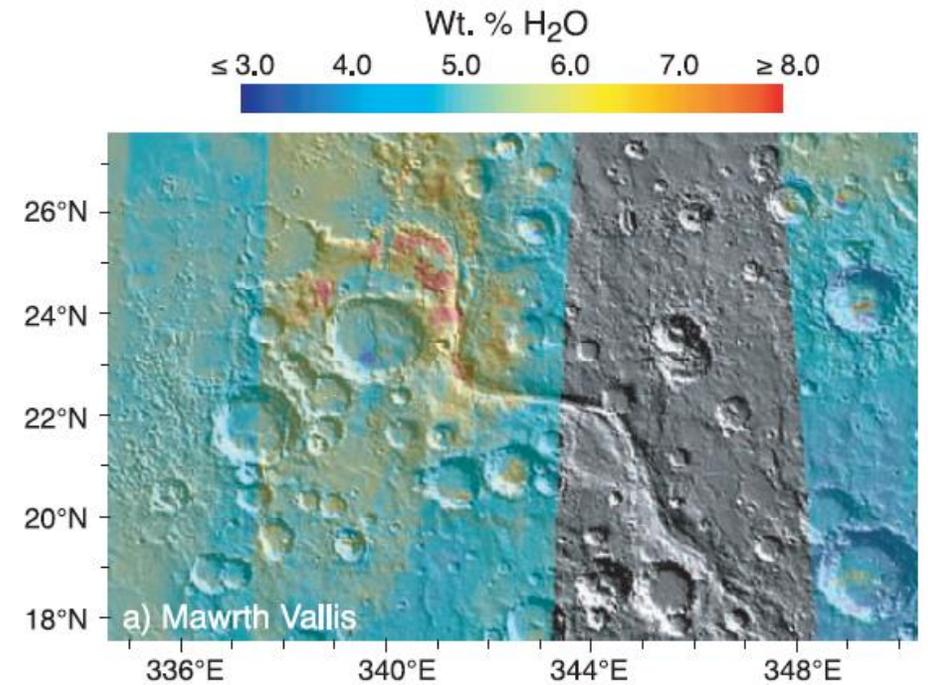
Sommaire

- Introduction
- §6.1. Phyllosilicates dans Marwth Vallis
- §6.2. Phyllosilicates près de Nili Fossae
- §6.3. Sulfates dans Valles Marineris
- §6.4. De l'eau dans le régolithe analysé par Curiosity
- §6.5. Une carte des minéraux hydratés
- §6.6. Les minéraux hydratés sur Mars
- Synthèse

§6.1. Phyllosilicates dans *Marwth Vallis*

La *Marwth Vallis* est une ancienne vallée fluviale, une des plus grandes de Mars. Elle est centrée sur 22.5°N, 343°E. Elle a une longueur de 600 km et une profondeur jusqu'à 2 km.

D'après Milien *et al* 2007, l'instrument OMEGA de la sonde *Mars Express* a permis la détection de phyllosilicates hydratés contenant jusqu'à 8 m% d'eau, soit jusqu'à 4 m% de plus que les roches environnantes.



© Miliken et al 2007

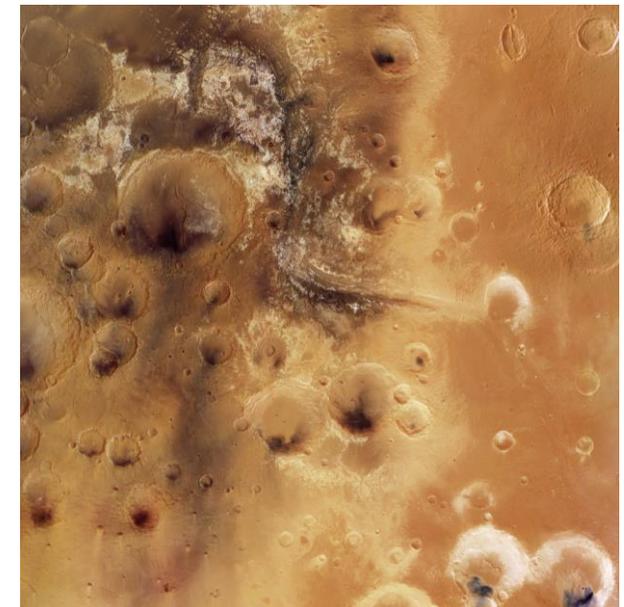
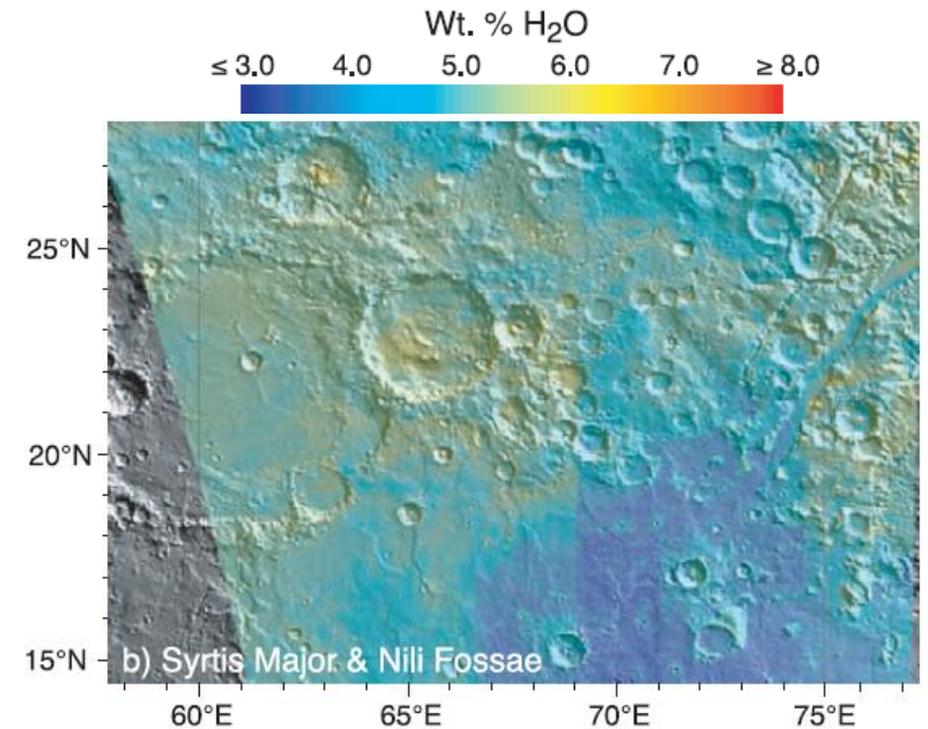


Image prise par Mars Express © ESA/DLR/FU Berlin [[lien](#)]

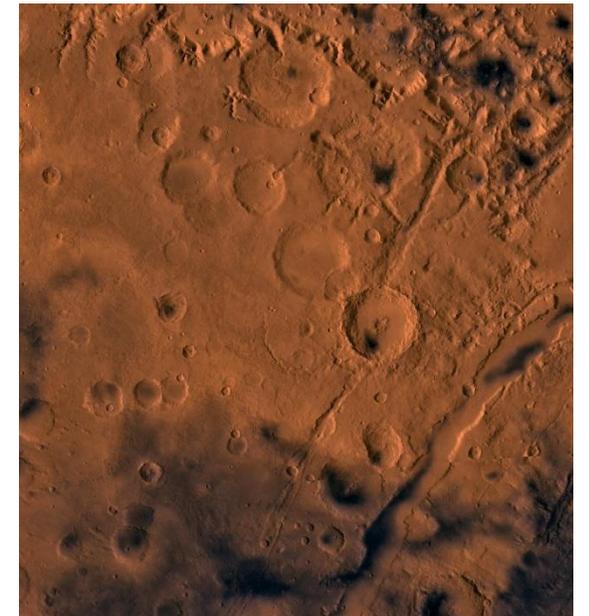
§6.2. Phyllosilicates près de *Nili Fossae*

Nili Fossae est un système de failles dans le quadrangle de *Syrtis Major*, en bordure nord-ouest du bassin d'impact d'*Isidis Planitia*. Il est centré par 22,6° N et 76,8° E et s'étend sur plus de 650 km.

D'après Miliken *et al* 2007, l'instrument OMEGA de la sonde *Mars Express* a permis la détection de phyllosilicates hydratés contenant jusqu'à ~ 6 m% d'eau, soit jusqu'à 4 m% de plus que les roches environnantes.



© Miliken et al 2007



En rouge : kieserite (sulfate de magnésium monohydraté), en vert : sulfate polyhydraté © Grendin et al 2005

§6.3. Sulfates dans *Valles Marineris*

Valles Marineris est un célèbre ensemble de vastes canyons qui barre la planète à proximité de l'équateur de Mars, à l'Est des volcans de Tharsis. Il s'étend sur 3 770 km, à un dénivelé voisin de 10 km et une largeur pouvant atteindre 600 km ; c'est le plus vaste ensemble de canyons du système solaire.

D'après Grendin *et al* 2007, l'instrument OMEGA de la sonde *Mars Express* a permis la détection de sulfates de magnésium, à différents niveaux d'hydratation. Les sulfates de magnésium contiennent plus de 10 m% d'eau.

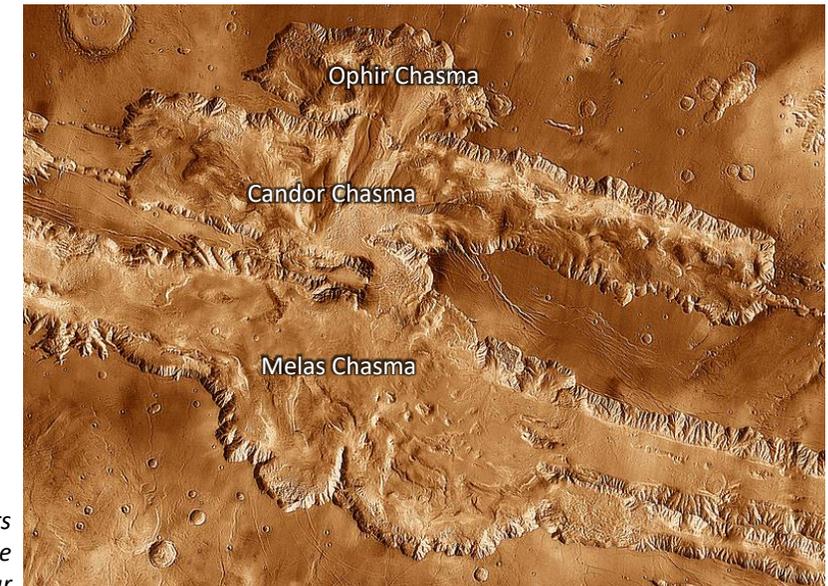
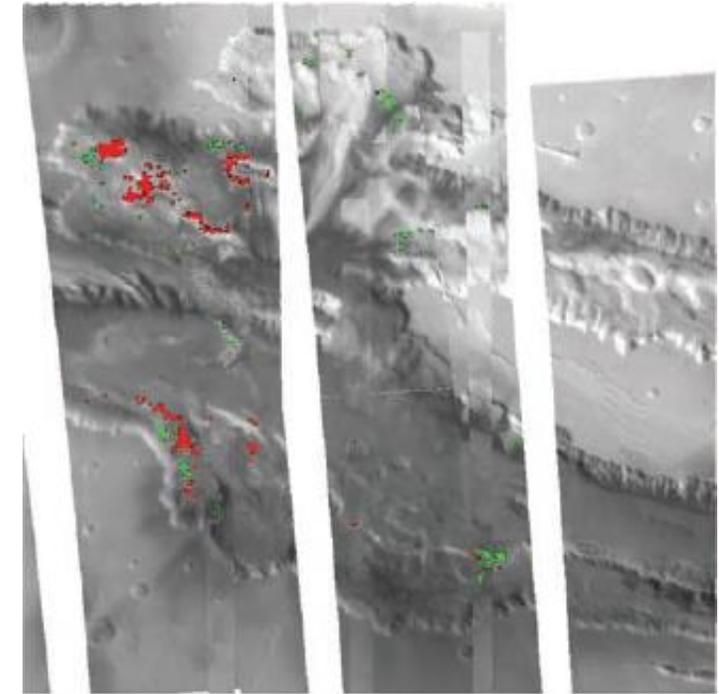


Image composite de l'instrument THEMIS sur Mars Odyssey © NASA / JPL-Caltech / Arizona State University [[lien](#)], annotations de l'auteur

§6.4. De l'eau dans le régolithe analysé par Curiosity

Lors de son parcours dans le cratère Gale, Curiosity a pris plusieurs échantillons de poudre de régolithe, dans un petit banc de sable formé par le vent.

D'après Lashin *et al* 2013, la quantité d'eau trouvée est entre 1,6 et 2,4 m%, pour des mesures au cours desquelles l'échantillon est chauffé jusqu'à 800°C.

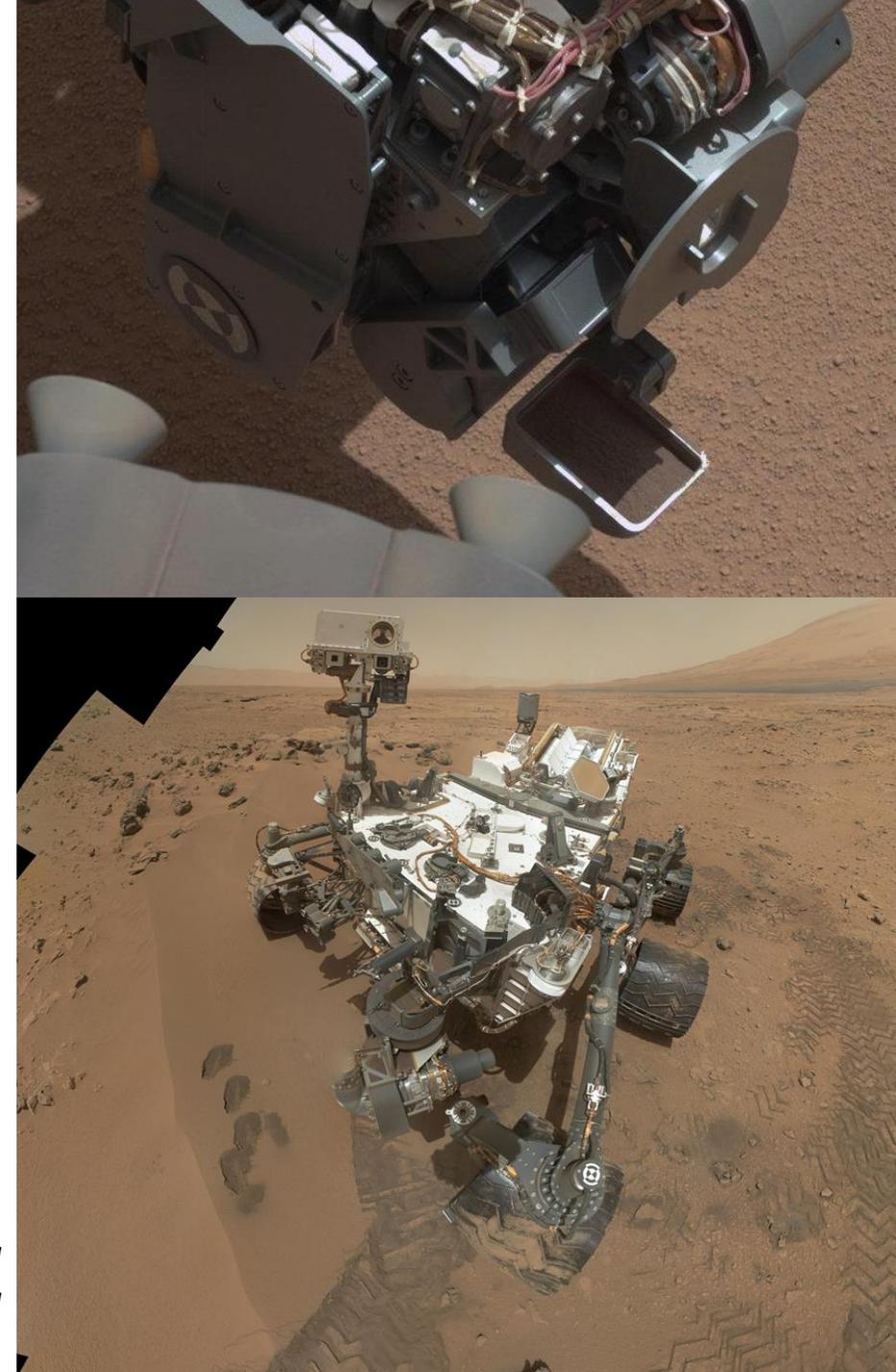
→

À l'aide d'une petite pelle, Curiosity a réalisé plusieurs échantillons du sable situé près des rochers dits Rocknest

En bas à gauche, on voit la trace des petites pelletées de sable.

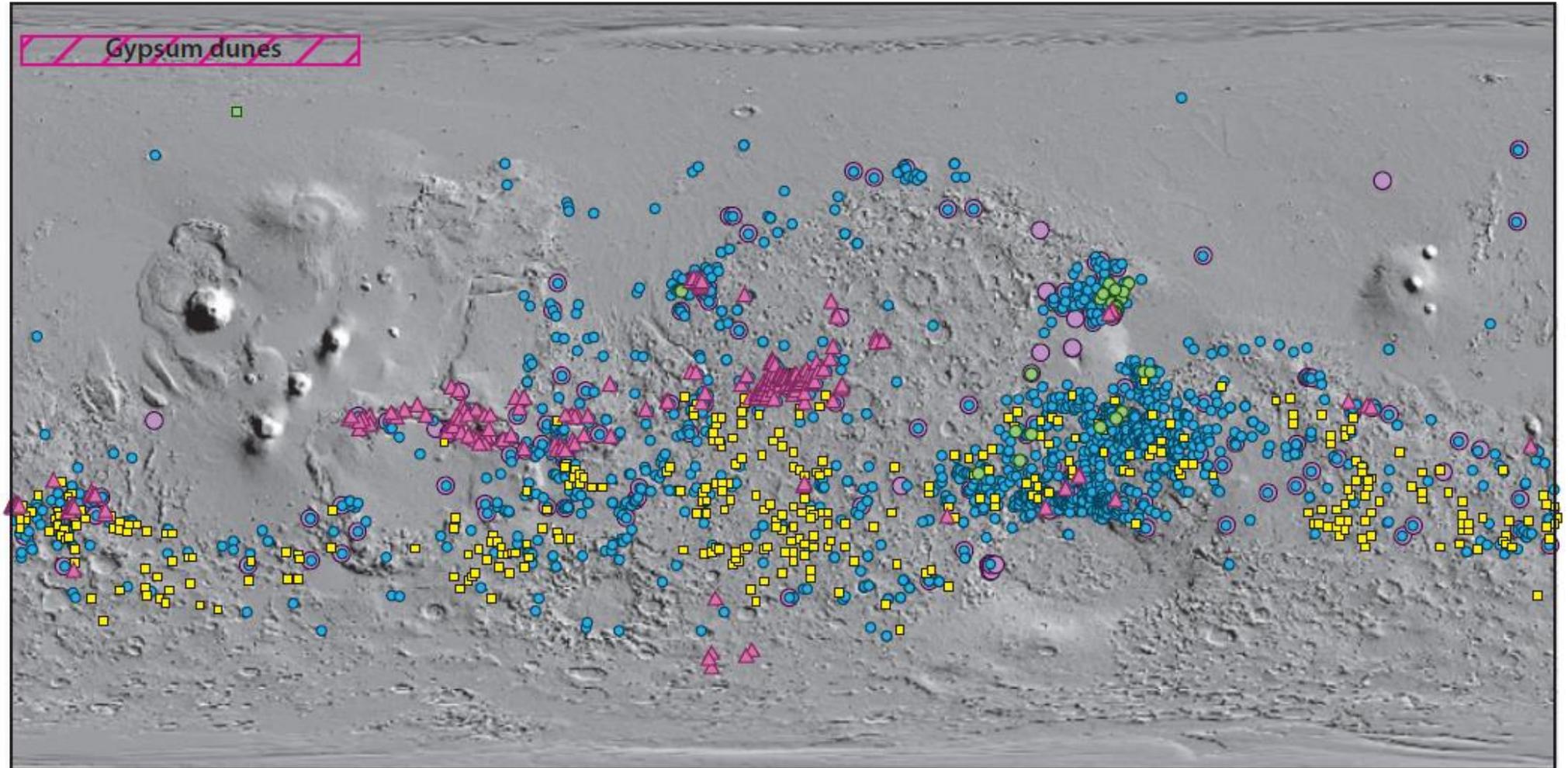
Haut : NASA [[lien](#)]

Bas : © NASA, JPL-Caltech, MSSS, MAHLI [[lien](#)]



§6.5. Une carte de synthèse des minéraux hydratés

© Ehlmann et al 2014



● Phyllosilicates

● Silica

■ Chlorides

● Carbonates

▲ Sulfates

§6.6. Les minéraux hydratés sur Mars

- D'après Abbud-Madrid 2016, les minéraux les plus intéressants pour extraire de l'eau sont les suivants : Phyllosilicates (*ie* argiles), principalement composé de smectites, Sulfates, principalement composé de gypse et régolithe typique.
- D'autres minéraux sont moins jugés dignes d'intérêt : Silice, Chlorures, Carbonates.
- Ces minéraux sont eux-mêmes constitués d'espèces minérales élémentaires. La quantité d'eau récupérable est variable selon l'espèce minérale, mais également les conditions d'extraction (principalement la température). Abbud-Madrid 2016 envisagent 4 m% d'eau en moyenne, pouvant monter à 10 m%, ainsi que 1,5 m% pour le régolithe typique.

On présente dans la suite quelques informations de base sur les minéraux suivants :

- Sulfates de calcium hydratés (Bassanite, Gypse) : §6.7.
- Silicate d'aluminium hydraté (Allophane) : §6.8.
- Akaganéite : §6.9.
- Smectite : §6.10.

Les **silicates** constituent un large groupe de minéraux constitués d'une part de silice SiO₂ et d'autre part d'oxyde métalliques (oxydes de d'aluminium, magnésium, fer, calcium, potassium, sodium, ...). Une grande part d'entre eux peuvent retenir de l'eau dans leur structure cristalline. Sur Mars, des missions orbitales ou au sol ont détectés de nombreux silicates, dont une grande variété de **phyllosilicates**, c'est-à-dire des silicates dont la structure cristalline forme des feuillets.

Libellé	Sulfate hydraté	Argile	Régolithe typique ^a
Glace d'eau	-	-	-
Gypse	40 %	-	-
Bassanite	-	3,0 %	3,0 %
Allophane	3,0 %	3,0 %	3,0 %
Akaganéite	3,0 %	3,0 %	3,0 %
Smectite	3,0 %	40 %	3,0 %
Verre basaltique	-	-	23,5 %

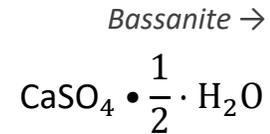
^a : basé sur la composition de cratère Gale. Source : Abbud-Madrid 2016.

Minéral	Quantité d'eau récupérable	Conditions d'extraction
Gypse	~20 m%	à 100-150°C
Bassanite	~6 m%	à 150°C
Allophane	~20 m%	à 90°C
Akaganéite	~12 m%	à 250°C
Smectite	~4 m%	à 300°C
Verre basaltique	~1 m%	à >500°C

Référence : Abbud-Madrid 2016

§6.7. Sulfates de calcium hydratés (Bassanite, Gypse)

- Le sulfate de calcium CaSO_4 peut renfermer de grandes quantités d'eau. Selon le nombre de molécules d'eau, il formera du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), de la bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) ou du sulfate de calcium anhydre (sans eau).
- Dans l'expérience quotidienne, il s'agit tout simplement du plâtre.
- Sur Terre, le gypse est une des principales roches sédimentaires, et se formerait lors de l'évaporation de lagunes. Sur Mars, le gypse constituerait de l'ordre de 40% du prototype de sulfates hydratés tandis que la bassanite constituerait 3% de celui des argiles et 3% de celui du régolithe typique [Abbud-Madrid 2016].
- L'eau peut-être extraite de ces minéraux dans les conditions suivantes [Abbud-Madrid 2016] :
 - Gypse : $\sim 20 \text{ m\%}$ à $100\text{-}150 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Bassanite : $\sim 6 \text{ m\%}$ à 150°C



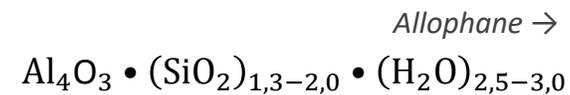
Wikipédia [[lien](#)]



Wikipédia [[lien](#)]

§6.8. Silicate d'aluminium hydraté (Allophane)

- L'allophane est un phyllosilicate, composé de silicate d'aluminium hydraté, mal cristallisé, de formule idéale $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SiO}_2)_{1,3-2,0} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{2,5-3,0}$.
- Sur Terre, on trouve de l'allophane dans les marnes, ou comme produit d'altération hydrothermale des cendres volcaniques et des roches ignées. Sur Mars, l'allophane constituerait de l'ordre de 3% des prototypes des sulfates hydratés, des argiles ou du régolithe typique [Abbud-Madrid 2016].
- L'eau peut-être extraite de ce minéral dans les conditions suivantes [Abbud-Madrid 2016] :
 - ~ 20 m% à 90 °C



Wikipédia [[lien](#)]

§6.9. Akaganéite

- L'akaganéite est un minéral constitué de la phase β de l'oxyhydroxyde de fer (III), de formule $\beta\text{-FeO(OH)}$.
 - Généralement du chlore (ou du fluor) est présent dans la structure cristalline en substitution de l'ion hydroxyde HO^- ; la formule s'écrit alors $\beta\text{-Fe}_6\text{O}_5(\text{OH})_7\text{Cl}$.
 - En outre, du nickel peut se trouver en substitution du fer, à l'état de trace. La formule de l'akaganéite est alors $(\text{Fe}^{3+}, \text{Ni}^{2+})_8(\text{OH}, \text{O})_{16}\text{Cl}_{1.25}$.
- Sur Terre, l'akaganéite est formée par l'attaque de la pyrrhotite par des solutions sulfatées ou par la corrosion de certaines météorites. L'akaganéite est présente dans certaines roches lunaires. Sur Mars, l'allophane constituerait de l'ordre de 3% des prototypes des sulfates hydratés, des argiles ou du régolithe typique [Abbud-Madrid 2016].
- L'eau peut-être extraite de ce minéral dans les conditions suivantes [Abbud-Madrid 2016] :
 - $\sim 12 \text{ m\%}$ à $250 \text{ }^\circ\text{C}$

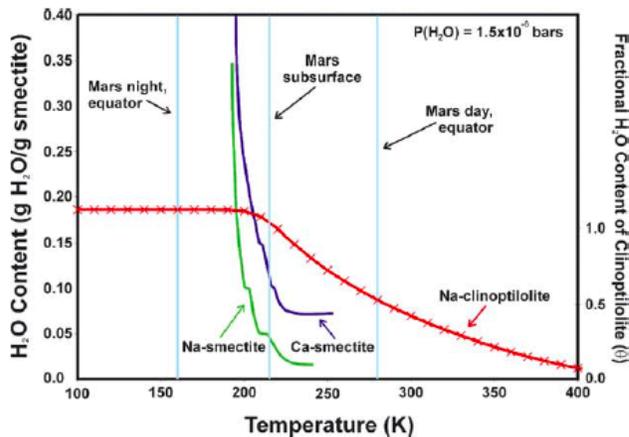
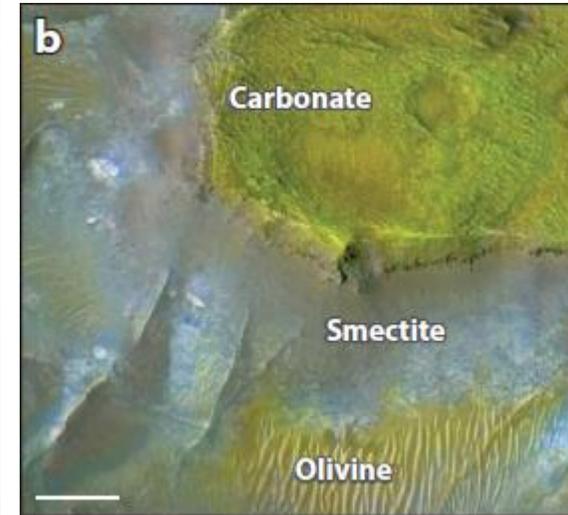
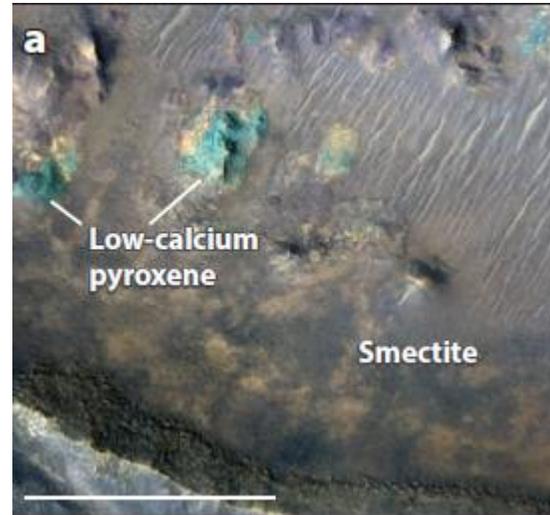
Akaganéite \rightarrow
 $\beta - \text{Fe}_6\text{O}_5(\text{OH})_7\text{Cl}$



Wikipédia [[lien](#)]

§6.10. Smectites

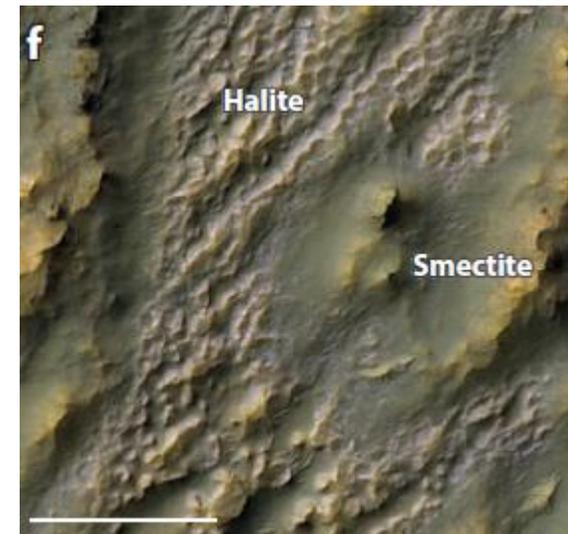
- Une smectite est un large groupe de minéraux appartenant au phyllosilicates, présentant une grande variété de compositions. Il est possible de distinguer :
 - d'une part la composition des smectites par rapport aux éléments magnésium Mg, aluminium Al et fer Fe,
 - d'autre part leur composition par rapport aux éléments calcium Ca et sodium Na.
- Sur Mars, les smectites constitueraient de l'ordre de 40% du prototype de l'argile hydratée et 3% de celui des sulfates hydratés et du régolithe typique [Abbud-Madrid 2016].
- L'eau peut-être extraite de ce minéral dans les conditions suivantes [Abbud-Madrid 2016] :
 - ~ 4 m% à 300 °C



← Eau relâchée par les smectites en fonction de la température du traitement thermique.

© Abbud-Madrid 2016

Détections de smectites sur Mars par les instruments HiRISE et CRISM de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. La barre d'échelle représente 200 m



Synthèse

- Les instruments de sondes orbitales (*Mars Express*, *Mars Reconnaissance Orbiter*) ainsi que ceux de rover au sol (*Curiosity*) ont permis de montrer l'existence sur Mars de roches hydratées, c'est-à-dire contenant une certaine masse d'eau dans leur structure.
- Ces roches hydratées sont de diverses natures, sulfates (*eg* bassanite, gypse), une grande variété de silicates, et notamment de phyllosilicates, susceptibles de contenir de l'eau en quantité significative. L'eau contenue peut dépasser 10 m%, pour une valeur moyenne peut-être de l'ordre de 4 m%. Le simple régolithe lui-même, accessible par exemple dans des dunes éoliennes, peut contenir de l'eau chimiquement liée, avec une teneur faible, de l'ordre de 1,5 m%.
- Cette eau peut être extraite par chauffage, notamment.
- De nombreuses observations ont montré la présence de ces roches hydratées aux latitudes basses, et même à l'équateur.
- **Les roches hydratées pourraient donc constituer une source d'eau sur Mars pertinente pour l'ISRU dans les localisations proches de l'équateur, et bien ensoleillées.**
 - C'est en particulier la conclusion de Abbud-Madrid 2016.



FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

§7. SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Synthèse générale

- Les conditions de température et de pression à la surface rendent improbable ou rare les manifestations d'eau liquide en surface. C'est ce que montrent les observations depuis de nombreuses décennies : Mars est une planète sèche, sans océan, lac, rivière ou pluie. Par ailleurs, le peuplement de Mars nécessiterait une source massive d'eau pour exister, afin de fabriquer des ergols, permettre sa croissance et compenser les inévitables pertes des systèmes de recyclage.
- À défaut de sources d'eau aussi évidentes que sur Terre, il est donc nécessaire d'étudier en détail quelles sont les ressources en eau de Mars, en large part peu visibles.
- L'atmosphère de Mars est très fine, et son contenu en vapeur d'eau est en conséquence très faible. Elle a l'avantage d'être accessible partout.
- Mars dispose de grands volumes de glace d'eau (cryosphère). Pour les latitudes élevées, cette glace se trouve dans les calottes polaires australe et boréale, dans le permafrost, et vraisemblablement sous la forme d'une épaisse couche de glace mélangée au régolithe, et probablement jusqu'à des latitudes moyennes. À ces latitudes toutefois l'éclairement solaire est plus faible, et il fait plus froid.
- Aux latitudes plus basses, où l'ensoleillement est plus fort, la température peut dépasser en été 0°C. Les observations montrent qu'il existe très certainement de rares glaciers jusqu'aux latitudes très basses, protégés du soleil par des couches de régolithe. Par ailleurs, les observations démontrent la présence de roches hydratées dont l'eau pourrait être extraite par traitement thermique ; le régolithe lui-même contient de faibles quantités d'eau.
- Les saumures constituent une source d'eau spéculative, dans les pentes, mais dont la composition en eau reste à démontrer.
- Les observations tendent à exclure la présence d'aquifères d'eau liquide.
- **Les sources d'eau les plus vraisemblables sont :**
 - **la glace d'eau mélangée au régolithe en sous-sol pour les latitudes élevées (> ~40°), notamment dans l'hémisphère nord, mais caractérisées par un ensoleillement faible et des températures basses,**
 - **les roches hydratées, voire d'éventuels glaciers, pour les localisations de plus basse latitude, proches de l'équateur, vraisemblablement moins riches en eau, mais dans des régions plus ensoleillées, aux températures plus clémentes.**
- C'est en particulier la conclusion de Abbud-Madrid 2016.



FEDERATION
Open Space Makers



Manuel MarsProof

Chapitre 1 – Ressources en Eau sur Mars

§8. ANNEXES

§8.1. Glossaire

Abréviations

CCF: Concentric Crater Fill

LDA: Lobate Debris Aprons

LVF : Lineated Valley Fill

m% : pourcentage en masse

MARSIS : Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding

MOC : Mars Orbiter Camera

MRO : Mars Reconnnaissance Orbiter

MGS : Mars Global Surveyor

ppmm : parties par million en masse

RSL : Recuring Slope Lineae

SHARAD :

§8.2. Références

NASA

- Abbud-Madrid *et al* 2016, *Mars Water In-Situ Resource Utilization (ISRU) Planning (M-WIP) Study*
- Hoffman *et al* 2016, *Mining Water on Mars - An Assessment of ISRU options for future Human Missions*

Littérature ouverte

- Christensen 2005, *Water in the Poles and Permafrost Regions of Mars*,
- Dickson *et al* 2012, *Patterns of accumulation and flow of ice in the mid-latitudes of Mars during the Amazonian*, Icarus (2012)
- Ehlmann *et Edwards* 2015, *Mineralogy of the Martian Surface*
- Jakosky *et Farmer* 1982, *The seasonal and global behavior of water vapor in the Mars atmosphere: Complete global results of the Viking Atmospheric Water Detector Experiment* [[abstract](#)]
- Levy *et al* 2010, *Concentric crater fill in the northern mid-latitudes of Mars: Formation processes and relationships to similar landforms of glacial origin*, Icarus 209 (2010) 390–404.
- Mitchel *et Christensen* 2015, *Recurring Slope Lineae and the Presence of Chlorides in the Southern Hemisphere of Mars*
- Ojha *et al* 2015, *Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars*
- Runyon *et Ojha* 2014, *Recurring Slope Lineae*
- Smith 2002, *The annual cycle of water vapor on Mars as observed by the Thermal Emission Spectrometer*

Mars Society, Association Planète Mars (APM)

- Heidmann 2008, *Une colonie martienne - Essai d'analyse technique*

Open source

- Wikipédia, fra. : *Eau sur Mars* [lien], eng. : *Water on Mars* [lien]

Projets étudiants

- INSA 2011 (Projet étudiant), *Étude des moyens de création d'ergol dans l'espace ou sur Mars*
- IPSA 2017 (projet étudiant pour l'APM), *Conception et dimensionnement des moyens de production d'eau à partir du sol martien*