

Bulletin

97

Avril 2024

# Bulletin APM

## Numéro spécial Insight

### Sommaire

Editorial P. 2

Mission SEIS-Insight P. 3

Vie de l'association. P. 14





Bulletin n°97, avril 2024.

Numéro Spécial dédié à la mission Insight

Images de la page de couverture :

- Planète Mars, image NASA.
- Curiosity Landing with the Crane, image NASA.
- Mars Desert Research Station en Utah, image Alain Souchier, APM.

Association Planète Mars : <https://planete-mars.com/>

Editeur du bulletin : Jean-Marc Salotti

## SOMMAIRE

Editorial.....	2
Mission SEIS-INSIGHT .....	3
Vie de l'Association, janvier à mars 2024 .....	14



# Editorial

*Par Jean-Marc Salotti,*

## Simulations en terrain analogue

La Mars Society a lancé un nouveau journal intitulé « Journal of Space Analog Research ». Il sera consacré à la publication de résultats scientifiques dans le domaine des simulations sur des terrains analogues à la surface martienne, comme par exemples celles qui se sont déroulées à la base FMARS (Flashline Mars Artic Research Station) sur l'île de Devon dans le nord canadien et à MDRS (Mars Desert Research Station) dans le désert de l'Utah. N'oublions pas également celles qui ont été organisées par l'association autrichienne OEWF dans différentes zones, comme à Rio Tinto en Espagne, ou encore au Maroc, les simulations à Hawaï, etc. etc. Les études sur le sujet ont finalement été très nombreuses, et on peut y rattacher également des tests de robot ou de rover par la NASA ou l'ESA dans des microenvironnements analogues, c'est-à-dire des terrains aménagés de quelques centaines de mètres carrés. Souvenons-nous par exemple de l'ensablement de Spirit sur Mars il y a quelques années et des tests effectués par la NASA en bac à sable pour déterminer la meilleure procédure de sortie de la zone sableuse. A n'en pas douter, les environnements analogues offrent un cadre expérimental très riche permettant de tester les systèmes, les interfaces, les procédures et les organisations afin de se préparer au mieux aux futures missions martiennes.

Je ne peux terminer cet éditorial sans une pensée pour Alain Souchier, qui avait beaucoup travaillé sur les missions analogues, notamment avec son fameux véhicule de reconnaissance de parois. APM a toujours été très active dans ce domaine, poursuivons ces efforts tous ensemble !

On to Mars !

Jean-Marc Salotti



# Mission SEIS-INSIGHT

## Etude du sous-sol martien

Par Yves Tichené, APM

### Introduction

La mission INSIGHT, réalisée conjointement par la NASA et l'ESA, a été consacrée à l'étude de la structure interne de Mars. Elle a été lancée en 2018 et s'est terminée en 2022. Voici un résumé des principaux résultats scientifiques de la mission.

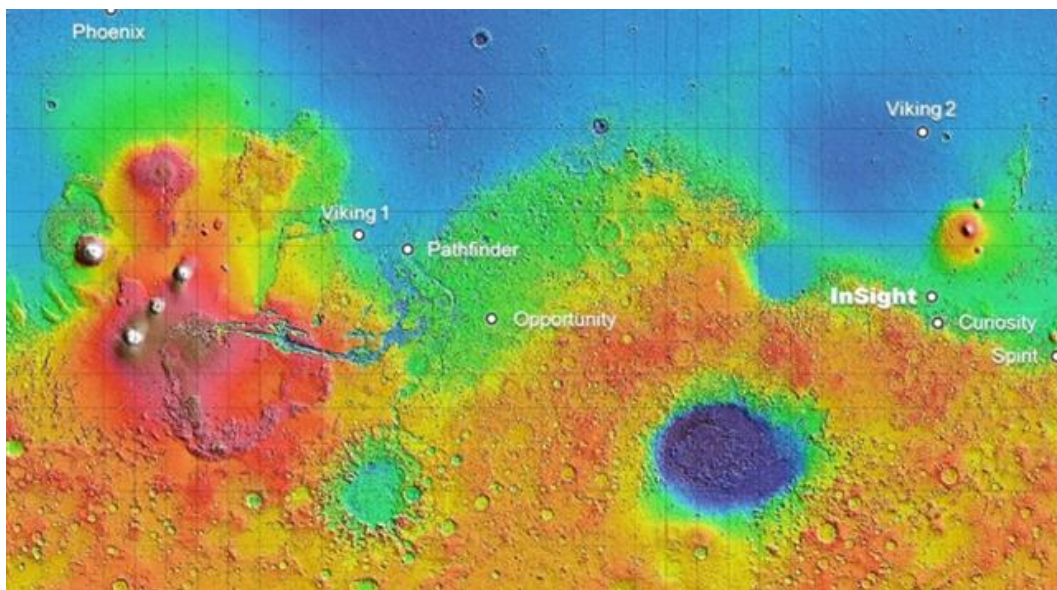
### 1. Objectif de la mission

Q = « Comment fonctionnent les nervures profondes du sous-sol martien ? Comment s'imbriquent la croûte, le manteau et le noyau de cette planète décidément pleine de surprises et qui ressemble à la nôtre? »

R = « ... Et si nous jetions un œil sur l'enfant de métal du CNES, nommé INSIGHT ? Il est équipé d'un sismomètre, SEIS, grandement testé sous toutes les coutures, et il va pouvoir enfin nous raconter une première histoire sur les battements de cœur de la planète rouge, quatrième et dernière planète rocheuse de notre système solaire, situé avant la première ceinture d'astéroïdes... »

Q = « Mais dans quel berceau régional l'enfant INSIGHT s'est-il posé ? »

R = « Sur Elysium Planitia, au nord du site d'investigation de Curiosity où la différence de la température entre le jour et la nuit est en moyenne de 70°. »

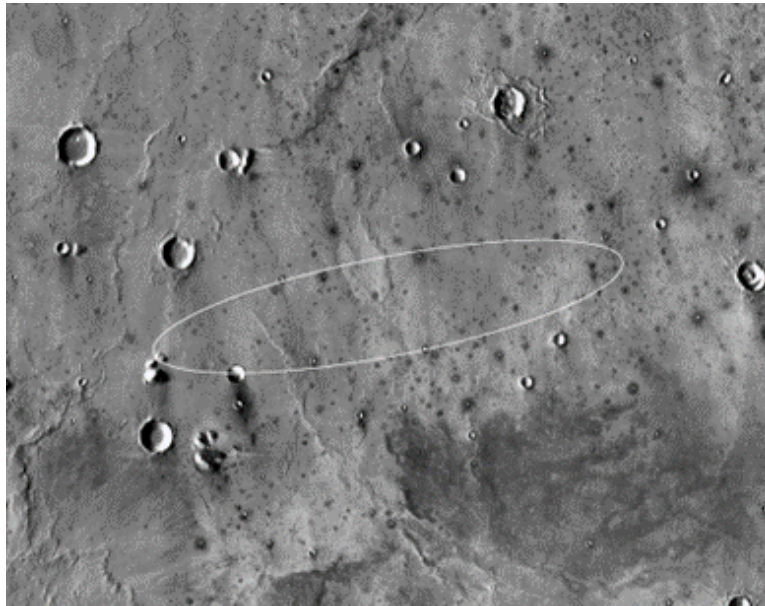


Crédit NASA

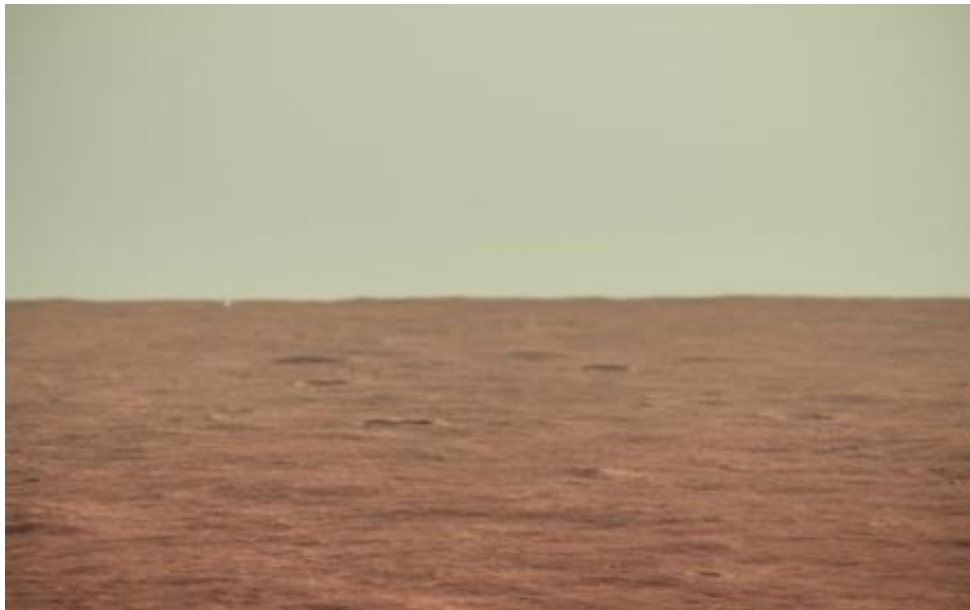


Le 5 mai 2018, INSIGHT décolle de la Terre et se pose sans encombre sur Mars le 26 novembre. Elysium est l'un des endroits les plus plats et les plus sûrs de la planète. Le centre de l'ellipse se situe à 4° de latitude nord et 136° de longitude est. Curiosity, son voisin le plus proche, s'est posé de l'autre côté de l'équateur, par 4,5° de latitude sud. Plus à l'est, dans le cratère Gusev, notre Spirit immobilisé (dernier message le 22 mars 2010).

Ce site correspond à l'âge Hespérien, entre 3,5 et 4 milliards d'années, configuration idéale pour le faisceau radar de l'altimètre de descente qui va sécuriser l'atterrissage.



*Ellipse d'atterrissage de la sonde InSight : 130 km de long, 27 km de large (crédit NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona).*



*Site d'atterrissage. Crédit FLICKR/CC/KEVIN GILL.*



## 2. Instruments

### 2.1 Le séismomètre SEIS



Crédit : IPGP David Ducros.

C'est le principal instrument de la mission. De l'extérieur vers le centre, on distingue le bouclier thermique et éolien WTS, l'enveloppe de protection thermique RWEB, puis l'enceinte de confinement sphérique qui protège les pendules à très large bande. Le berceau de mise à niveau motorisé ainsi que les capteurs de courte période sont également visibles.

- RWEB (Remote Warm Enclosure Box) : boîtier qui vient renforcer la protection du bouclier thermique et éolien WTS (l'espace intermédiaire est sous-vide). Le bouclier résiste à des vents de 60 à 100m/s (cf dust devil).





*A gauche, le bouclier thermique et éolien WTS (crédit CNES). A droite, représentation d'artiste illustrant le rôle de protection du WTS à la surface de Mars (crédit IPGP/David Ducros). En bas, La jupe extensible du WTS, avec la cote de mailles dans la partie inférieure (crédit NASA/JPL-Caltech/IPGP/Philippe Labrot).*

Q = « Mais, qu'est-ce qu'un sismomètre ? Comment cet appareil fonctionne-t-il ? Quelles images va-t-il nous révéler du sous-sol martien ? »

« Une tectonique des plaques ? » ; « Une activité résiduelle des volcans ? » ;

« Jusqu'à combien sur l'échelle de Richter ? », ...

R = Un sismomètre mesure les mouvements internes d'un corps rocheux au moyen de capteurs fins. Exemple, les sismomètres placés sur la Lune nous ont apporté des informations précieuses sur les tremblements de terre de la Lune.

Ci-dessous, SEIS INSIGHT (= Interior exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport), sous la responsabilité du CNES, permet d'étudier l'histoire souterraine de Mars en élaborant une sorte de diagramme des mouvements du sous-sol dus à son activité sismique et aux impacts météoritiques.

Depuis 2012, des ingénieurs et des chercheurs de 5 pays ont travaillé sur ce projet. Ils ont réalisé ce bijou d'investigation du sous-sol martien. SEIS est capable de détecter le déplacement d'un atome. Philippe Lognonné de l'Institut de Physique du Globe de Paris et responsable scientifique de la mission, a conçu le sismomètre à très large bande, adapté au domaine des basses fréquences, c'est-à-dire, inférieures à 1 Hz (1 oscillation par seconde), fréquence d'étude des tremblements de Terre.

En complément du sismomètre français, les contributions des autres pays sont les suivantes : l'électronique par les Suisses, le câble et la protection thermique et éolienne par le Jet Propulsion Laboratory américain, le système de nivellement par les Allemands et les sismomètres de haute fréquence par les Britanniques.



*La sphère en titane contenant le sismomètre SEIS © IPGP/SODERN/CNES/Piraud)*

Et si nous regardions à l'intérieur de la sphère les technologies qui vont permettre l'investigation souterraine de Mars ?

## 2.2 L'intérieur du séismomètre

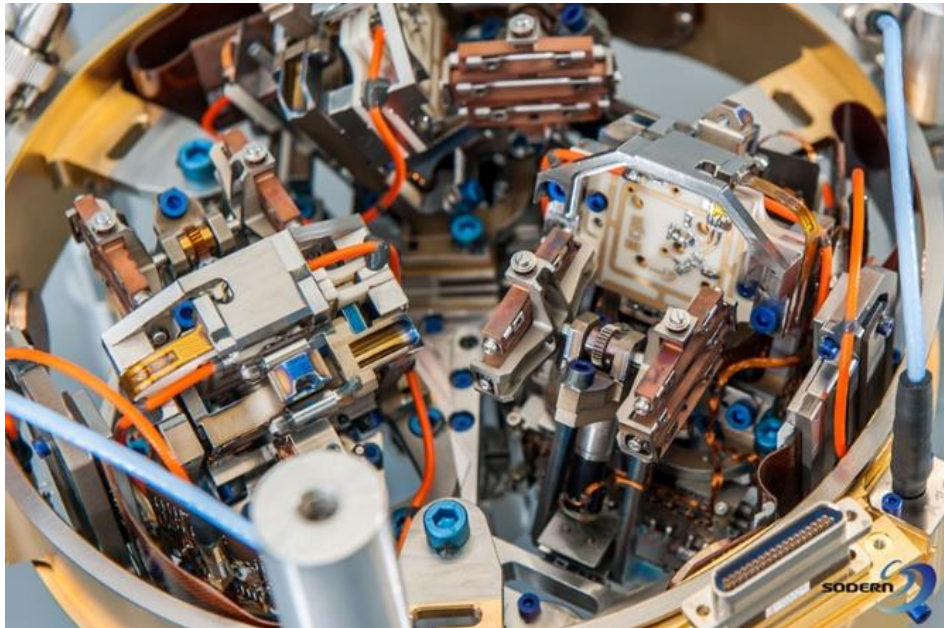
SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure), déployé le 19 décembre 2018, a pour objectif d'établir des cartes du sous-sol martien en 3D.



*Les composants du sismomètre SEIS : de gauche à droite: un des capteurs très large bande (VLB), le berceau permettant de compenser les irrégularités du terrain et la sphère contenant les capteurs VLB. Crédits : IPGP/SODERN/CNES/Piraud)*



Pendules VBB : les 3 pendules VBB peuvent détecter les plus infimes mouvements de Mars ; un système électronique mesure précisément les déplacements de la partie mobile des pendules. Il y a un pendule pour chaque direction de l'espace.



*Les 3 pendules VBB à l'intérieur de l'enceinte de confinement en titane (crédit SODERN)*

### 3. Résultats

Avril 2021 : plus de 600 séismes enregistrés sont analysés par l'équipe internationale du Mars Quake Service (MQS) de la mission InSight. La moisson des relevés sismiques est surveillée quotidiennement par le sismomètre, SEIS, à très large bande déposé par le bras robotique d'InSight à la surface de Mars ; il est le cousin modernisé des sismomètres emportés par les sondes Viking dans les années 70. Sur ces 600 séismes détectés, 60 se situent à grande distance du site d'atterrissage, bien à l'est des plaines volcaniques d'Elysium : SEIS révèle une discontinuité à une dizaine de km de profondeur (croûte), entre une couche altérée très poreuse et une autre couche bien plus saine ainsi que le manteau et le noyau.

Sur Terre, les sismomètres, enterrés et soustraits à l'action des vents, mesurent les ondes sismiques, leurs types, leurs vitesses de propagation, l'énergie associée, et localisent leurs sources par « triangulation » pour déterminer la nature et la répartition des roches à l'intérieur de la Terre : comprendre comment elles peuvent supporter les températures et les pressions exercées sur elles, la fréquence des ondes et les temps de trajet variables selon les structures souterraines. Sur Mars, le sismomètre SEIS est seul, au gré des vents martiens. Aussi, les signaux enregistrés et le bruit sismique étant faibles, il faut déterminer ceux qui viennent du ventre de Mars.

Eric Beucler, Professeur des Universités au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique (LPG) à l'Université de Nantes explique : « SEIS contient 3 sismomètres principaux qui trouvent l'origine des ondes sismiques. Les planétologues utilisent les décalages entre les types d'ondes et leurs différentes

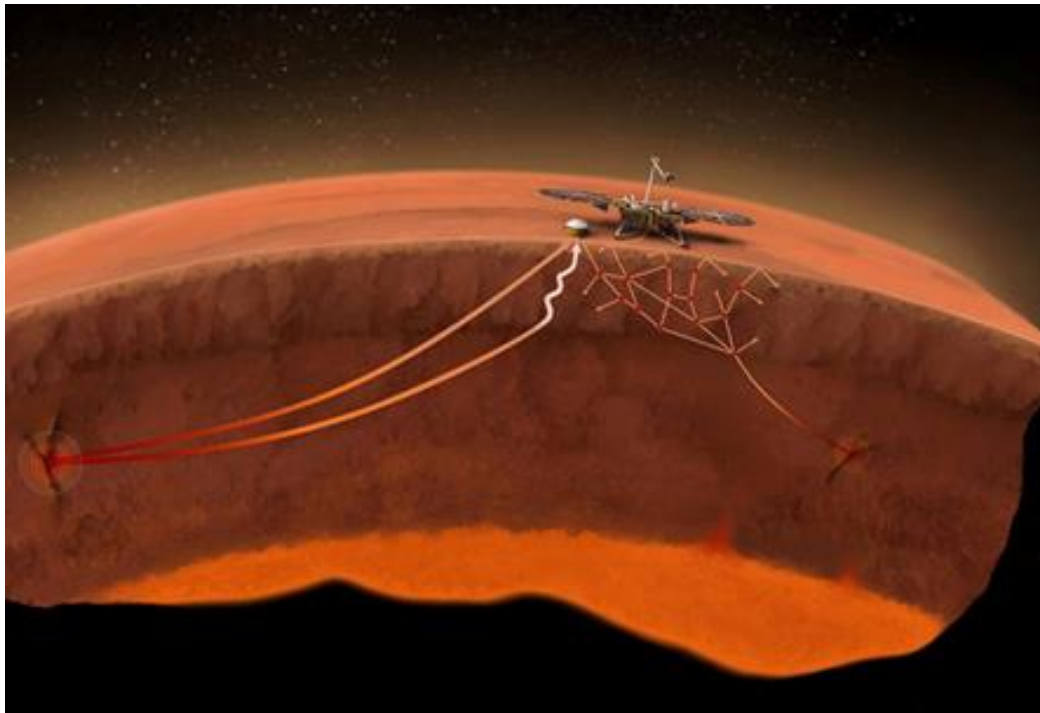


fréquences et déphasages, quand elles se propagent en surface ou qu'elles sont réfléchies par des couches internes. Cela nous permet de définir la structure interne de Mars et l'évolution de sa température. »

**Questions à Philippe Lognonné :**

- Q = « Quels sont les résultats concernant la croûte de Mars ? »

- R = P. L. : « Nos travaux reposent sur l'analyse des enregistrements de séismes, composées d'ondes de compression (ondes P), et d'ondes de cisaillement (ondes S). Parfois, elles se convertissent de l'une en l'autre et se réfléchissent quand elles croisent des discontinuités dans le sous-sol : on parle alors d'ondes secondaires. Il nous faut bien classer toutes ces ondes pour mesurer les différences de temps de trajet après la conversion. Cet outil est très utile pour en estimer l'origine. 7 méthodes sont utilisées pour traiter les ondes sismiques : les résultats comparés affinent les modèles et sont utilisés pour mesurer l'effet de l'atmosphère, sachant que la pression atmosphérique tape suffisamment le sol martien et provoque un bruit sismique qui se propage dans la croûte et remonte après avoir rebondi. Ainsi, l'analyse de ce bruit permet de mesurer le temps d'aller-retour. Mais ceci fonctionne seulement pour la croûte, couche peu profonde, et pas pour le manteau ou le noyau.



Crédit : Institut Physique du Globe.

- Q = « Qu'en est-il des travaux sur le manteau de Mars ? »

- R = P. L. : « Les vitesses sismiques des ondes multiples, issues des rebonds, des ondes P et S contre la surface martienne, varient à des profondeurs différentes selon 2 paramètres : la pression et la température. Par référence aux météorites martiennes retrouvées sur Terre, on échafaude des

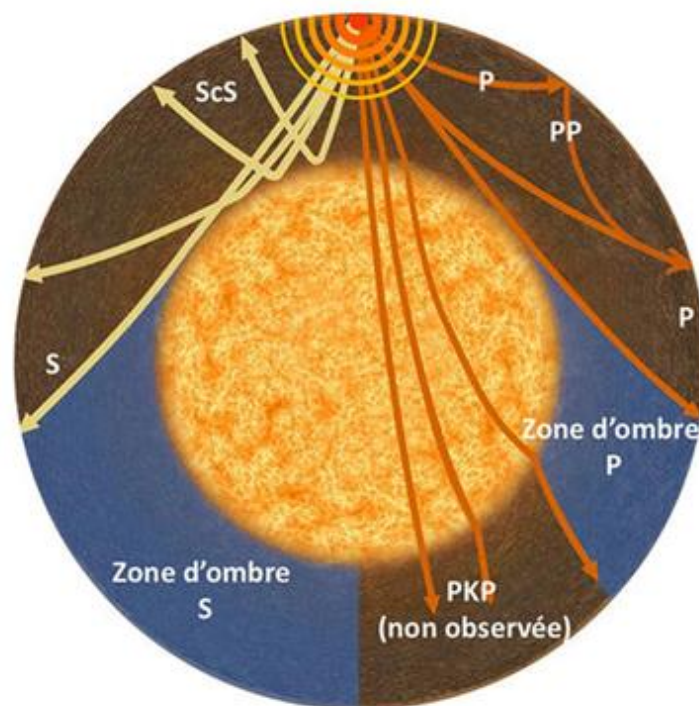


scénarios sur la minéralogie du manteau et on peut utiliser ces signaux sismiques comme un thermomètre du manteau martien. Ainsi, nous avons une image précise des températures en fonction de la profondeur et du flux de chaleur dans le manteau. Ces données sont cruciales. La question est étudiée dans l'expérience HP3 : le flux de chaleur serait trois à cinq fois plus faible que sur Terre ; voilà pourquoi Mars est encore relativement chaude car elle a pu avoir une activité volcanique dans les dix derniers millions d'années. »

- Q = « Qu'avons-nous appris sur le noyau de Mars? »

- R = P. L. : « Les rebonds des ondes sismiques sur le noyau révèlent qu'il est bien liquide, relativement gros et son rayon est au maximum de 1830 km... Un noyau aussi large montre qu'il est moins dense que prévu et que les éléments légers y sont particulièrement abondants, avec une masse volumique comprise entre 5,7 et 6,3 g/cm<sup>3</sup>. Aussi, nous n'avons pas trouvé de minéraux riches en calcium et en titane (= pérovskites), à la base du manteau, alors que les théories le prévoyaient. Ce gros noyau contrôle la propagation des ondes sismiques et génère des zones d'ombre qui empêchent InSight de recevoir les données sismiques de certaines régions. En effet, il est impossible de connaître l'activité de Tharsis (où se situe Olympus Mons), ce haut plateau volcanique au relief très tourmenté et inaccessible plus actif que les plaines d'Elysium.

Après 940 jours martiens, pas de séisme supérieur à 3,7 sur l'échelle de Richter, alors que nous espérons en étudier d'une magnitude de 4,5, voire 5. Aussi, nous avons modifié nos méthodes d'interprétation des données, en les adaptant à ces secousses plus faibles que prévues. »

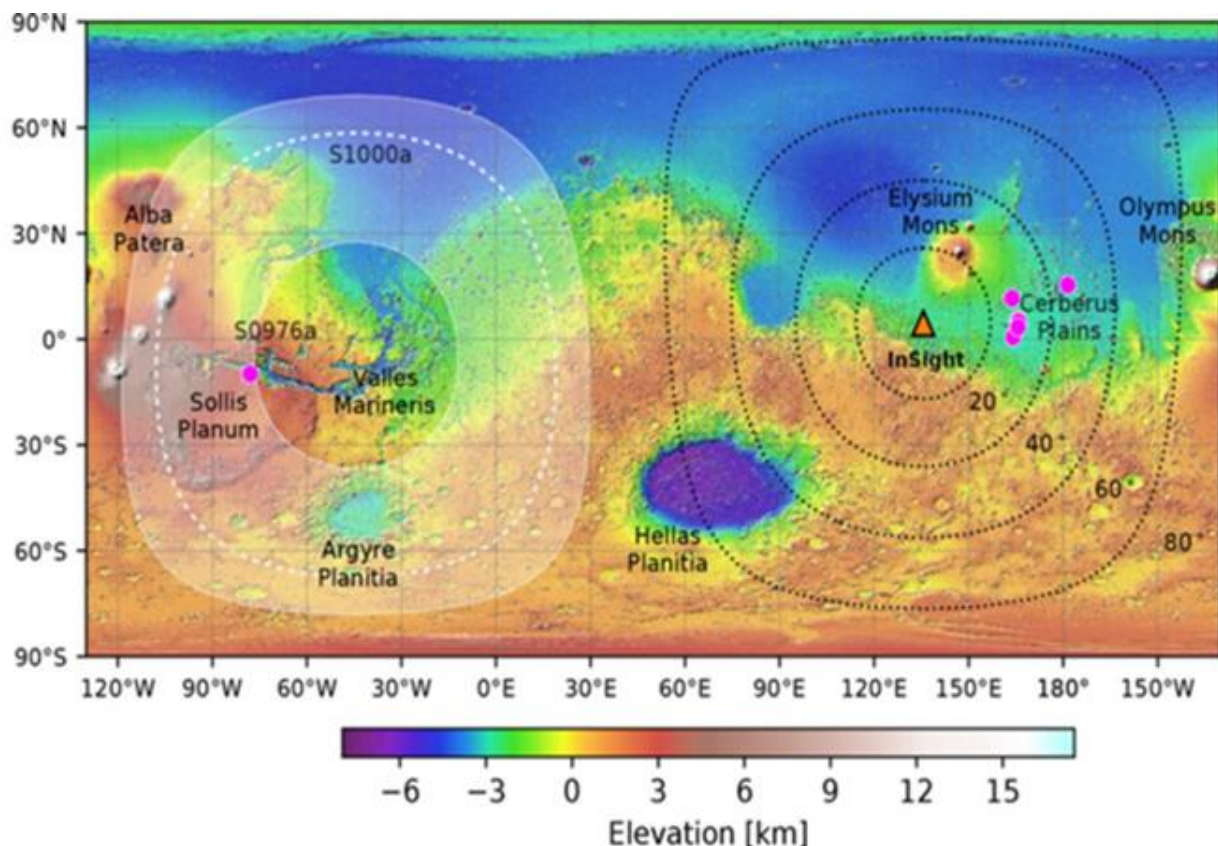


Propagation des ondes sismiques (P compression, S cisaillement). Crédit : Institut Physique du Globe.



### Des événements de forte magnitude

En 2021, 2 séismes majeurs ont produit des ondes qui se sont propagées dans le manteau et traversé le noyau à quelques semaines d'intervalle. Le premier (noté S0976a) a été généré par un "tremblement" de Mars, le deuxième (S1000a) par un impact de météorite très violent. Leurs magnitudes élevées sont estimées à 4,2 et 4,1. Les épicentres se situent dans l'hémisphère opposé par rapport à SEIS. Illustrations ci-dessous.



Crédits : Horelston et al. (2022) TSR.

La partie la plus centrale de Mars serait entièrement liquide, sauf si une éventuelle graine solide de très petite taille échappe à cette "échographie". La taille du noyau serait comprise entre 1780 et 1810 km, au lieu de 1830 km selon une estimation antérieure, soit 53% du rayon total de la planète.

### Des ondes électromagnétiques

InSight, premier engin équipé d'un magnétomètre, détecte des signaux électromagnétiques dans la croûte de la planète 10 fois plus puissants que prévu. Les ondes varient au cours de la journée, et sont particulièrement puissantes au milieu de la nuit. Ces signaux sont dus à l'interaction entre les vents solaires soufflant sur Mars et son atmosphère.

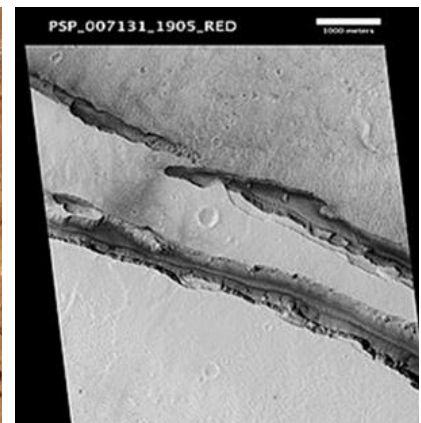
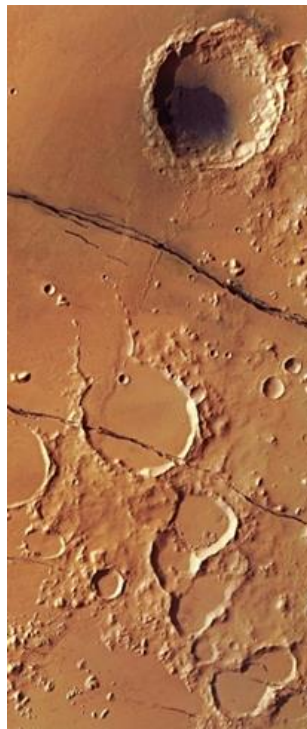
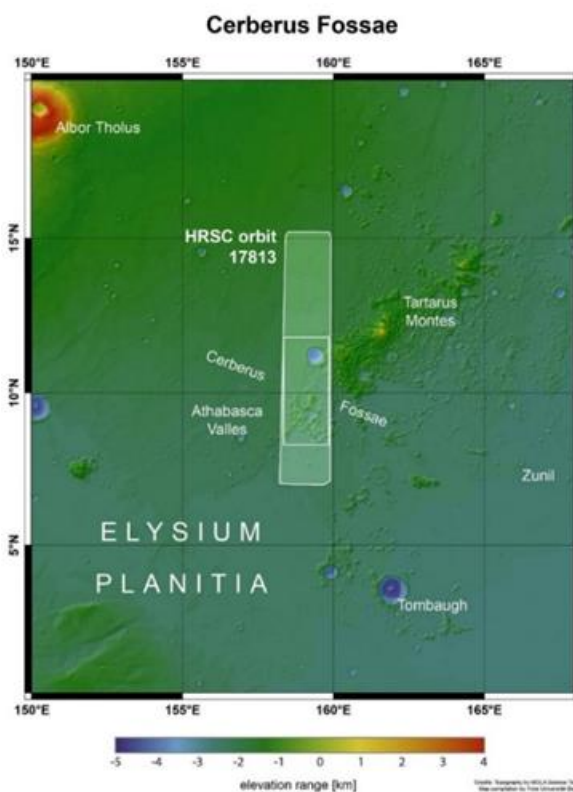


## Petite biscotte martienne

La sismologue Mélanie Drilleau, ingénieure CNRS à ISAE-SUPAERO, et son équipe ont scanné le ventre martien. Les résultats de SEIS ont permis d'établir le premier tableau des données sismiques martiennes. La majorité des séismes proviennent de Cerberus Fossae, zone située dans Elysium Planitia où les crevasses très profondes en seraient l'origine. L'échographie sismique a permis de préciser la structure souterraine.

Mélanie Drilleau : « La croûte martienne est compatible avec une roche de type gabbro (= roche magmatique), élément principal de la croûte océanique terrestre. L'intérieur de Mars est plus chaud aujourd'hui que dans le passé. »

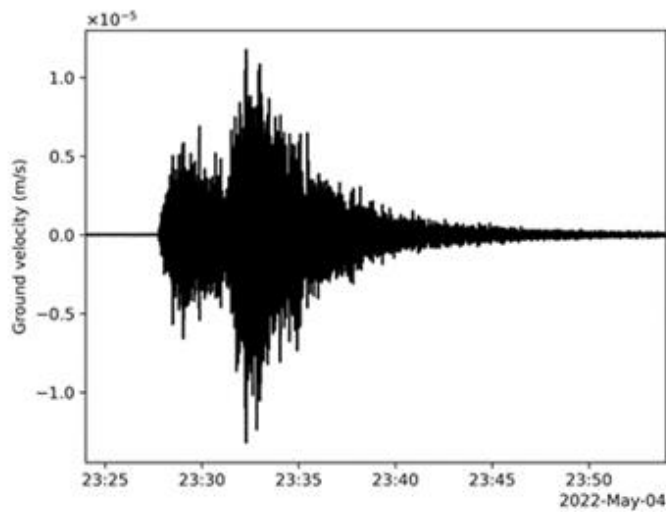
Cette étude, publiée dans la revue américaine « Journal of Geophysical Research - Planets » a impliqué 5 laboratoires français, l'Observatoire Royal de Belgique, l'ETH de Zurich et le Jet Propulsion Laboratory (USA).



*Gros plan de plusieurs creux de Cerberus Fossae, vus par HiRISE  
(la barre d'échelle est de 1,0 km). Crédits NASA / ESA*

## Big One

Le 4 Mai 2022, S1222a, le Big One, plus fort séisme de magnitude 4,7 à 5, a « secoué » Mars durant 10 heures (1 heure en moyenne pour les autres séismes), et ce n'est pas le résultat d'un impact météoritique.



*Sismogramme enregistré sur Mars par Insight lors du séisme « Big One ». Crédits ESA / NASA.*

## Conclusion

Depuis les années 90, nombre de remises en question des projets d'études sismiques ont été faites pour enfin parvenir en 2018 à poser sur Mars une conception technologique humaine appropriée et efficace qui a donné des résultats forts instructifs. « Ceux-ci, très encourageants, ouvrent la voie à des études sismiques sur les planètes et leurs satellites dans notre système solaire : futures missions sur Titan –satellite naturel de Saturne- (mission Dragonfly 2027) et sur la Lune (FSS 2025) », résume Charles Yana, chef de projet SEIS-InSight au CNES depuis 4 ans.

Les résultats permettent de déceler l'existence d'une première discontinuité à 10 km de profondeur entre la croûte et le manteau, et révèlent d'autres interfaces plus profondes, c'est-à-dire une deuxième discontinuité à 25 km et une troisième à 35 km. Le noyau martien est dense, chaud, plus compressible et fait d'un liquide visqueux. La présence d'une très grande quantité d'éléments plus légers mélangés dans le noyau interne aurait en partie détruit le champ magnétique. Un cinquième de son poids serait constitué principalement de soufre avec des petites quantités d'oxygène, de carbone et d'hydrogène. Le manteau a une épaisseur de 1560 km et la croûte, plus fine qu'estimée, possède 2 à 3 sous-couches.

SEIS a fonctionné près de 4 ans grâce au savoir-faire des équipes du CNES pour dépolir les panneaux solaires. Au total, la mission InSight-SEIS a détecté 1319 tremblements de Mars !

*Yves Tichené : Carrière dans l'Aéronautique en tant que Personnel Navigant Commercial. Formateur des équipages PNC et PNT au niveau de l'expertise Sécurité. Astronome amateur conférencier. Fondateur d'une section Astronomie au sein d'Air France en 1992. Co-fondateur du Groupe Astrovoyageurs Extrêmes en 2015 avec une chaîne sur Youtube.*



# Vie de l'Association, janvier à mars 2024

Par Jean-Marc Salotti, APM

Chers membres,

Voici les nouvelles de l'association pour le premier trimestre 2024 :

- Le 20 mars, Yves Tichené a fait une conférence au siège d'Air France à Roissy, « Chroniques des rovers martiens et d'un lascar volant. »
- Le 13 février, Jean-Marc Salotti a présenté la problématique des missions martiennes habitées à l'école d'ingénieurs Elisa Aerospace à Saint-Jean d'Illac en Gironde. Il y avait une centaine d'étudiants dans la salle.
- Etienne Martinache s'attelle à la traduction en français du livre de Robert Zubrin « The New World on Mars ». Affaire à suivre.
- Le conseil d'administration de APM se met en ordre de bataille pour préparer la prochaine European Mars Conference qui aura lieu du 21 au 23 octobre 2024 à Paris. Affaire à suivre également.

## Nouvelles de la Mars Society

- La Mars Society a lancé un nouveau concours de poster martien. Voir ici : <https://www.marssociety.org/news/2024/03/15/red-planet-creativity-join-our-2024-poster-contest/>
- La convention de la Mars Society aura lieu du 8 au 11 août à Seattle : <https://www.marssociety.org/news/2024/03/12/save-the-date-2024-international-mars-society-convention/>
- La Mars Society lance un nouveau journal spécialisé dédié aux missions de simulation en terrain analogue à la surface martienne : <https://www.marssociety.org/news/2024/02/25/mars-society-to-publish-journal-of-space-analog-research/>

## DEVENIR MEMBRE :

Vous pouvez soutenir notre Association en devenant membre : <https://planete-mars.com/devenir-membre/>

Prenez soin de vous et en avant Mars !

Jean-Marc Salotti

Responsable du bulletin APM