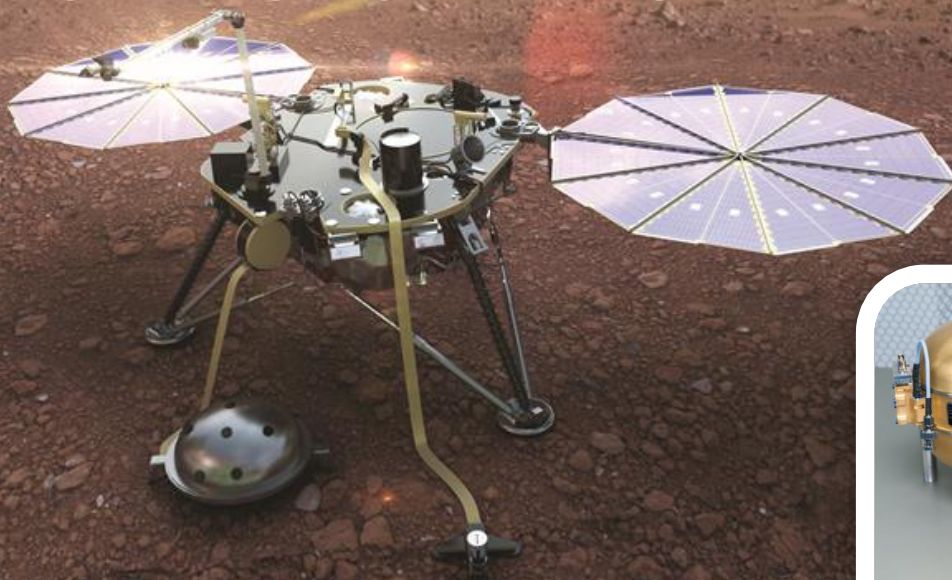


LA MISSION MARS INSIGHT : LA MISSION ET LES DÉFIS DU DÉVELOPPEMENT

Société astronomique
de Montgeron

Mars 2019

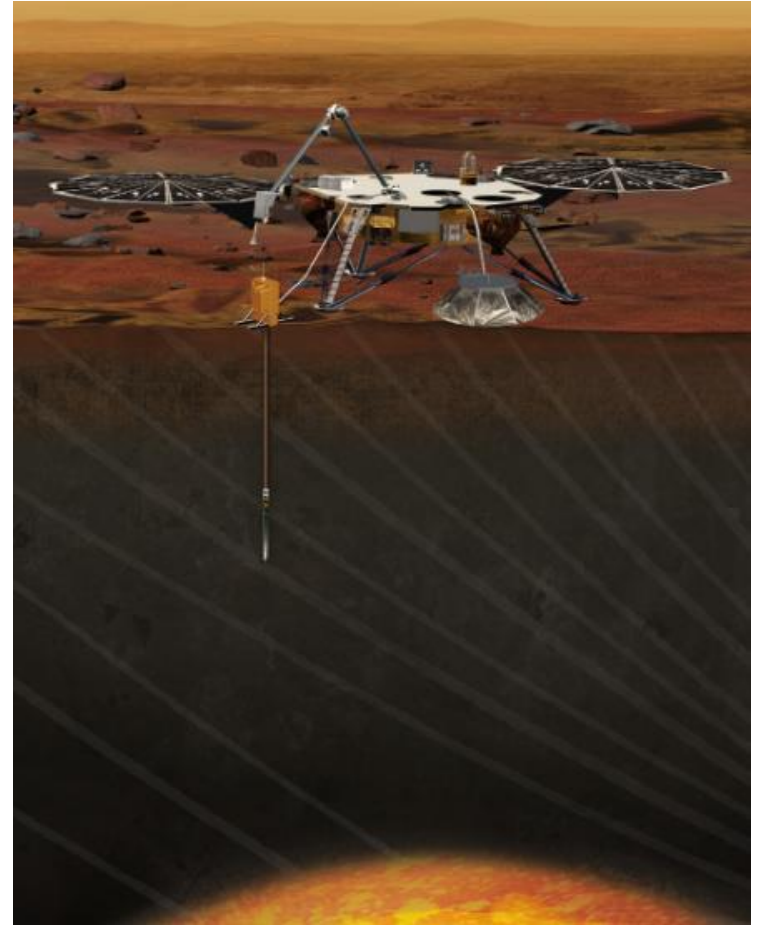
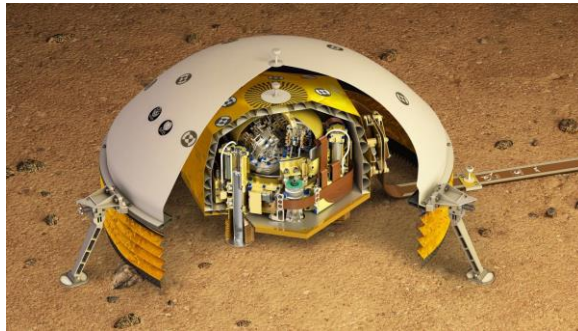


LA MISSION INSIGHT

INSIGHT est la 12eme mission du programme DISCOVERY d'exploration du système solaire

SEIS, son instrument principal, a été développé en France par le CNES, l'IPGP et Sodern

... découvrons son histoire !



LES PARTENAIRES



Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

Responsable de la mission

Pilotage du projet

Responsabilité scientifique

Développement de certains sous-ensembles



Responsable instrument SEIS

Coordination du consortium

Développement de l'instrument



Responsable scientifique

Design du sismomètre

Essais et validation des performances



Fabrication du sismomètre

Conception détaillée

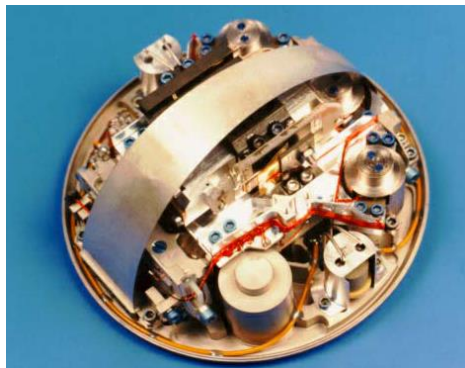
Intégration et essais



GENÈSE DU PROJET

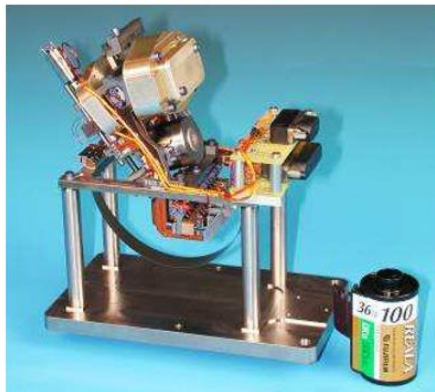
Un partenariat de longue date CNES / IPGP / Sodern

1994
Optimism



Mars 96
1er essai non transformé
Echec du tir du lanceur Russe

2005
NETLANDER
SOD3 / SOD4



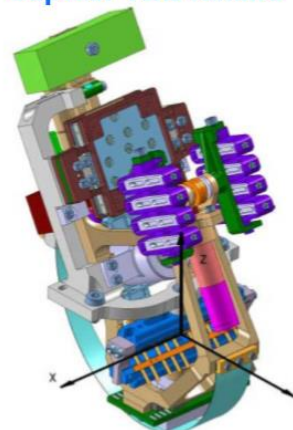
Maquettes d'ingénierie
Projet de réseau de stations
géologiques martiennes
...abandonné pour raisons
budgétaires

2010
RETROFIT
SOD31 / SOD41



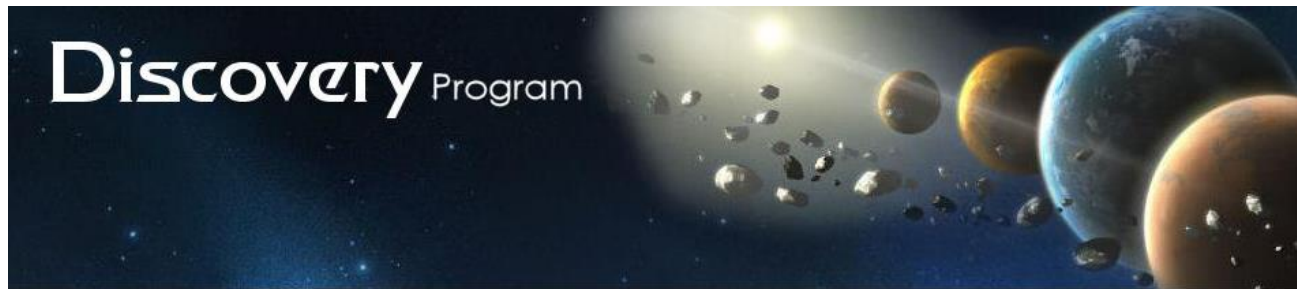
Poursuite de la R&D

2011
SELENE-2
Capteur VBB lunaire



Mission vers la lune
Concept adapté à la gravité
lunaire
... mais mission encore une
fois abandonnée

DISCOVERY



Juin 2010

Appel à idées de la NASA pour la 12eme mission du programme DISCOVERY

Mai 2011

3 missions retenues pour évaluation approfondie

Titan Mare Explorer (TiME)

Comet Hopper (CHopper)

INSIGHT

Insight est finalement retenu
en Aout 2011 !!



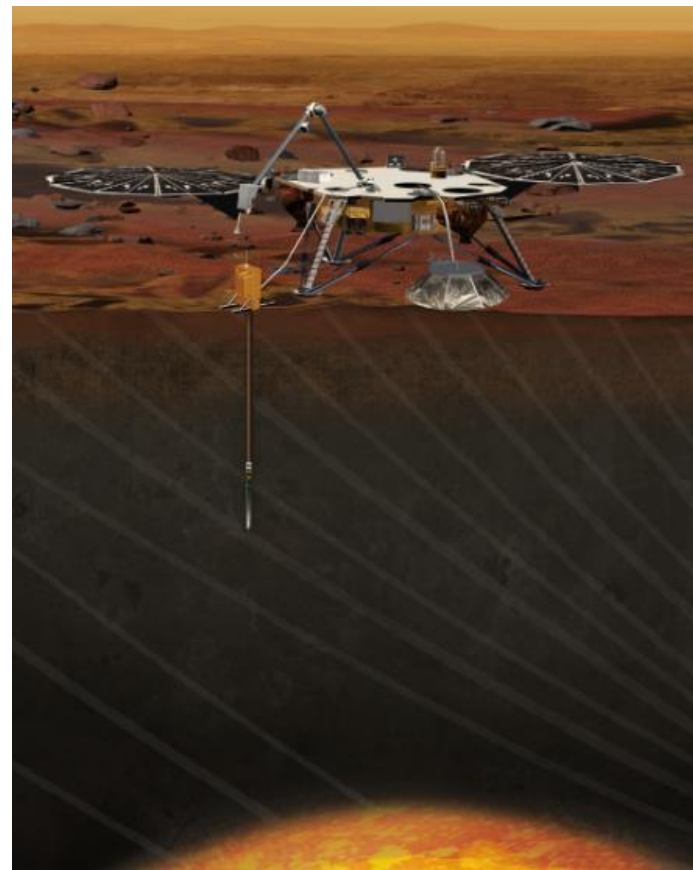
Vue d'artiste de TiME sur une mer de méthane

OBJECTIFS DE LA MISSION

INSIGHT déposera sur Mars atterrisseur statique comportant deux instruments scientifiques : un sismomètre et un capteur de chaleur s'enfonçant jusqu'à 5m sous le sol.

Ces deux instruments fourniront des données permettant de :

- Déterminer la taille, la composition et l'état (liquide / solide) du noyau de Mars, de son manteau et de sa croûte
- Mesurer l'activité sismique de Mars (quantité, magnitude et localisation des séismes)
- Surveiller les impacts météoriques à la surface de Mars.



OBJECTIFS DE LA MISSION

Measurement	Current Uncertainty	InSight Capability	Improvement
Crustal thickness	65±35 km (inferred)	±5 km	7X
Crustal layering	no information	resolve 5-km layers	New
Mantle velocity	8±1 km/s (inferred)	±0.13 km/s	7.5X
Core liquid or solid	“likely” liquid	positive determination	New
Core radius	1700±300 km	±75 km	4X
Core density	6.4±1.0 gm/cc	±0.3 gm/cc	3X
Heat flow	30±25 mW/m ² (inferred)	±3 mW/m ²	8X
Seismic activity	factor of 100 (inferred)	factor of 10	10X
Seismic distribution	no information	locations ≤10 deg.	New
Meteorite impact rate	factor of 6	factor of 2	3X

Objectifs scientifiques

Epaisseur de la croûte

Couches composant la croûte

Vitesse de propagation des ondes

Noyau liquide ou solide

Rayon du noyau

Densité du noyau

Flux thermique

Activité sismique

Localisation des séismes

Taux d'impact des météorites

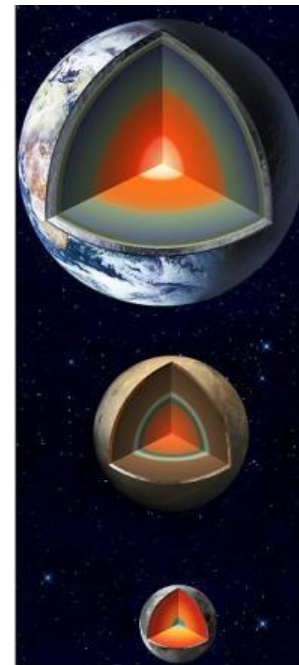
OBJECTIFS DE LA MISSION

L'objectif scientifique principal de la mission est de mieux comprendre comment les planètes telluriques se forment et se différencient.

- Pourquoi la Terre a-t-elle un champ magnétique, et pas Mars ?
- Pourquoi l'activité volcanique de Mars s'est-elle arrêtée ?
- Pourquoi Mars n'a pas de tectonique des plaques ?

Comment Mars est-il devenu un désert froid, désolé, sans vie ?

Pourquoi Mars a-t-elle suivi une évolution si différente de notre planète, alors qu'elles sont issues de la même nébuleuse, à une distance similaire du Soleil ?

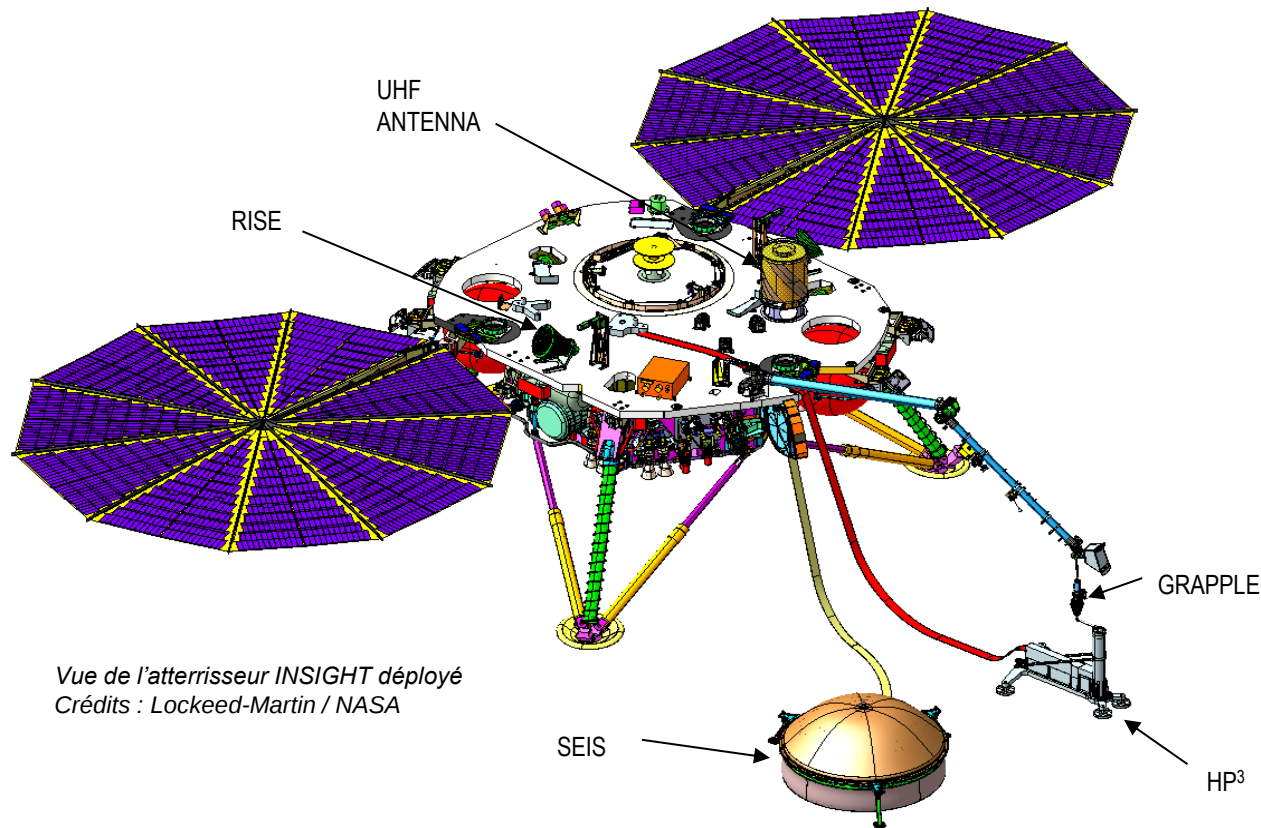


*Structure interne de la planète Terre (en haut), de la planète Mars (au milieu), et de la lune (en bas).
Crédit : NASA*

L'ATTERRISSEUR INSIGHT

INSIGHT est un atterrisseur statique comportant plusieurs instruments scientifiques :

- SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure)
- HP³ (Heat Flow and Physical Properties Package)
- RISE (Rotation and Interior Structure Experiment)

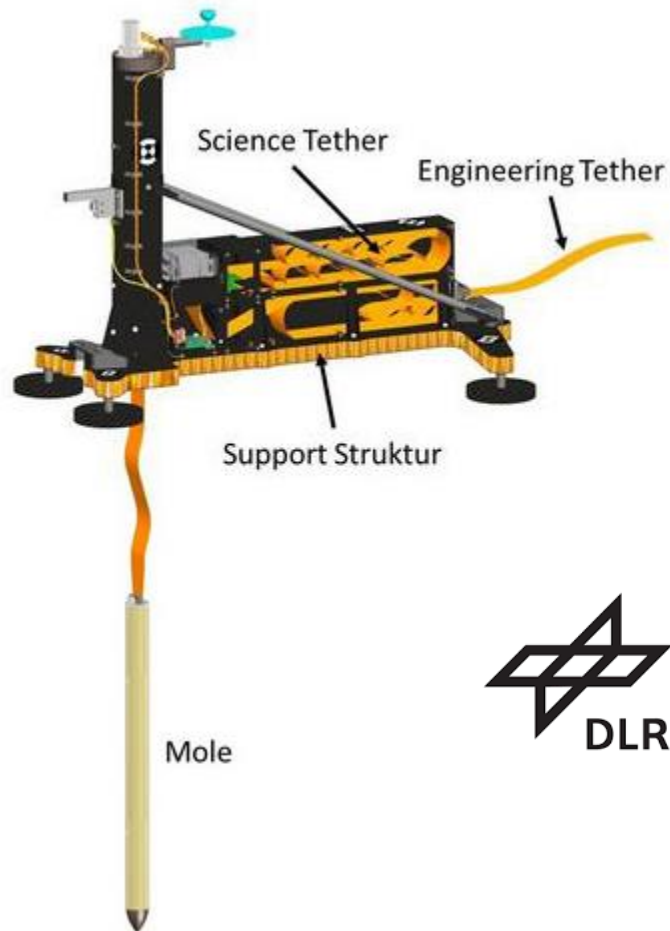


*Vue de l'atterrisseur INSIGHT déployé
Crédits : Lockheed-Martin / NASA*

HP³

L'instrument HP3, fourni par l'agence spatiale allemande (DLR), creusera 5m sous la surface de Mars, afin de mesurer le flux de chaleur issu de son noyau.

La profondeur de 5m permet à la mesure d'être indépendante de la variation de température à la surface.

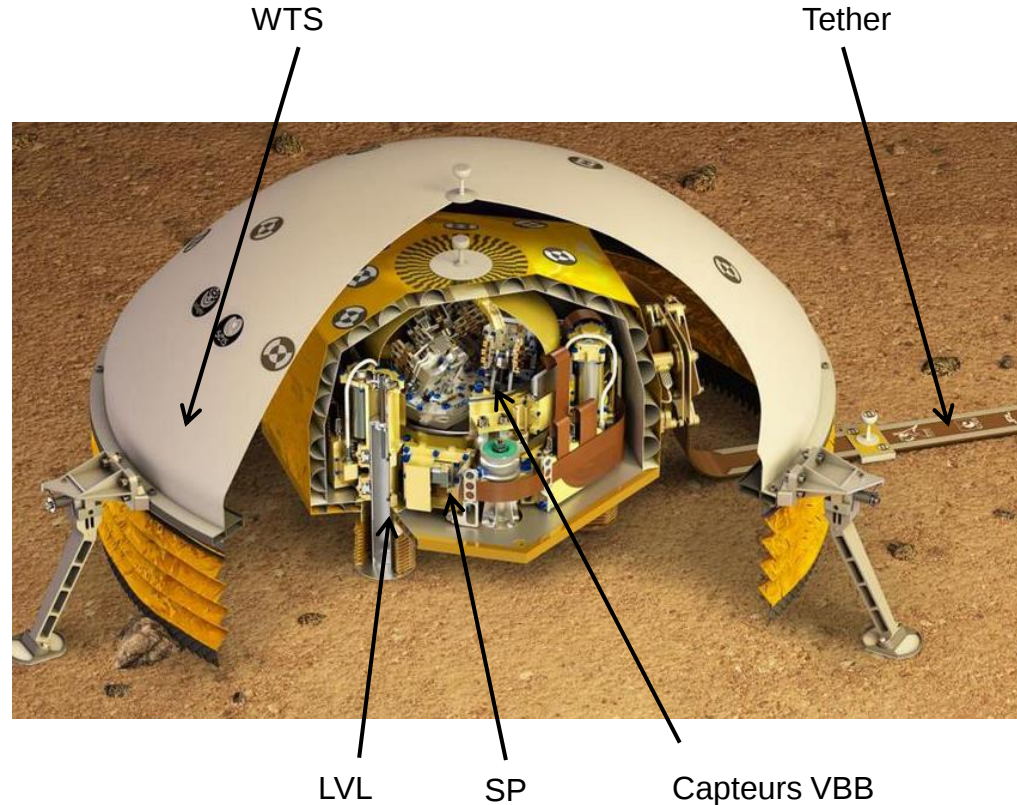




L'INSTRUMENT SEIS

Composition de l'instrument SEIS :

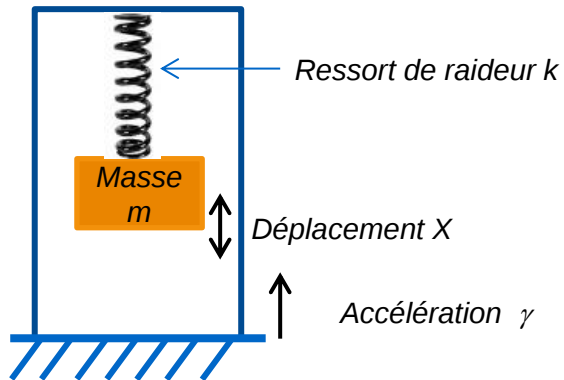
- Sismomètres (capteurs VBB = Very Broad Band) situés dans une sphère dorée
- Système de nivellement qui permet de compenser une pente de 15° (LVL = Leveling system)
- Bouclier protégeant la sphère des vents et des variations thermiques (WTS = wind & thermal shield)
- Une nappe souple (Tether) reliant l'instrument à l'atterrisseur.
- D'autres capteurs sismiques expérimentaux développés par l'université d'Oxford (SP = capteurs Short Period)



PRINCIPE D'UN SISMOMÈTRE

Le principe de base d'un sismomètre est extrêmement simple :

- Le bâti est relié au sol dont on veut mesurer les mouvements
- Un ressort est attaché au bâti
- Une masse est suspendue au ressort, et on mesure ses déplacements par rapport au bâti



... Afin d'avoir une sensibilité maximale, il est nécessaire d'avoir une masse importante ou une faible raideur de ressort....

Le déplacement de la masse est donné par la formule : $X = m\gamma/K$

... pour une application spatiale, on fait bien sûr le choix d'une faible raideur !



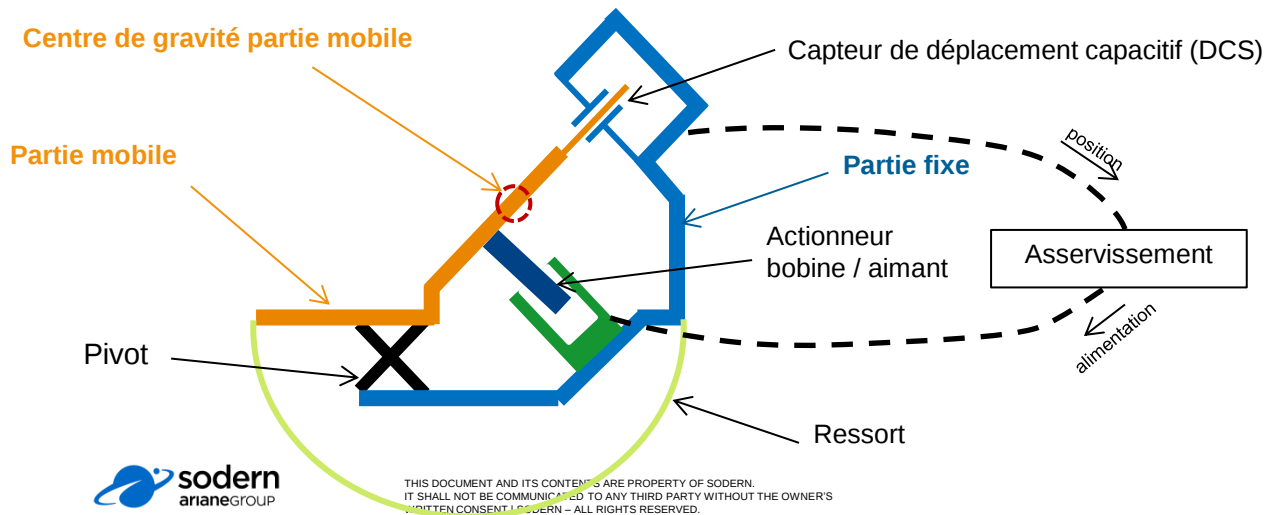
Le sismographe Quervain-Piccard (1936) comporte une masse de 20 tonnes
(crédits : OVSM – IPGP)

LES PENDULES VBB

Ce principe est décliné sur les capteurs VBB (very broad band) de l'instrument SEIS.

Chaque pendule est constitué de :

- Une partie fixe
- Un Pivot assurant une souplesse entre la partie fixe et la partie mobile
- Une partie mobile, dont le centre de gravité est décalé par rapport au pivot, équilibrée avec un ressort.
- Un capteur capacitif de déplacement, situé entre les parties fixe et mobile du pendule.



Mais les pendules obtenus sont si sensibles qu'ils sont inutilisables en l'état : ils doivent être bloqués, ce qui est réalisé en les asservissant.

LES PENDULES VBB

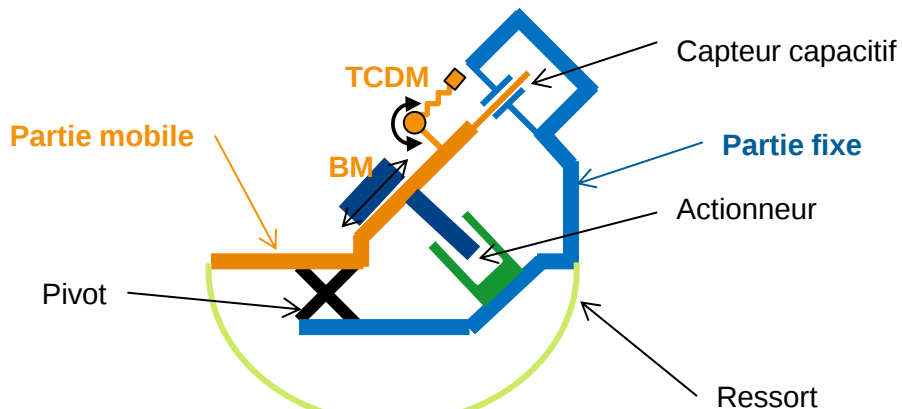
Afin d'assurer le bon fonctionnement du pendule sur Mars, la partie mobile est de plus équipée de 2 mécanismes :

-Un mécanisme d'équilibrage (BM = balance mechanism)

Ce mécanisme déplace une masse de tungstène qui permet d'ajuster finement l'équilibrage du pendule sur Mars en fonction des conditions réelles de nivellement, de gravité et de température.

-Un mécanisme de compensation thermique (TCDM = Thermal compensation device mechanism)

Dispositif permettant de compenser passivement les variations d'équilibrage liées aux dilatations des éléments du pendule au cours d'une journée martienne. Indispensable étant donné les variations journalières de température sur Mars, et la sensibilité du pendule !



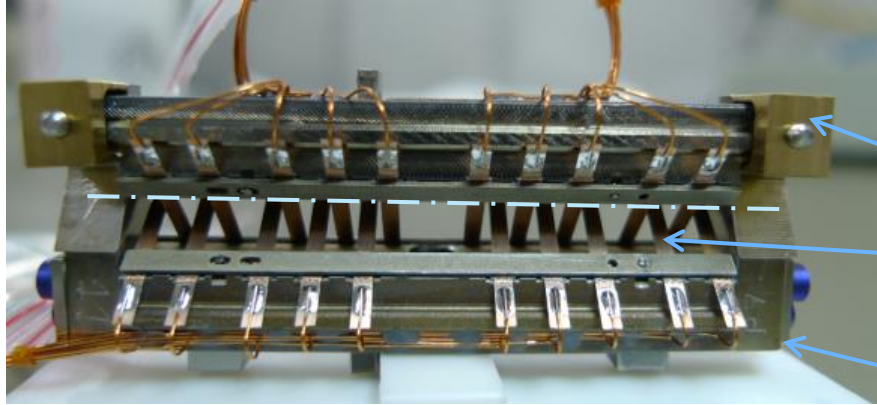
Météo martienne :

La température varie de -80°C à -10°C l'hiver, et de -50°C à +20°C l'été.

On peut observer plus de 50°C de variation entre le jour et la nuit.

QUELQUES SOUS-ENSEMBLES CRITIQUES

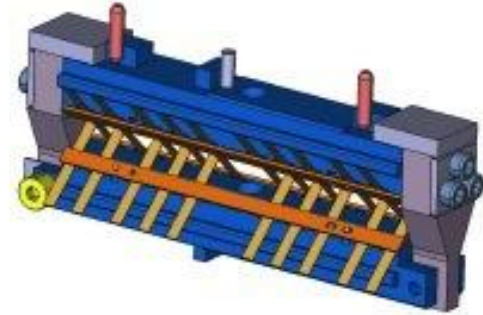
Pivot



Corps fixe

20 lames ressorts – 50 μ m d'épaisseur
Les signaux électriques transitent par ces lames.

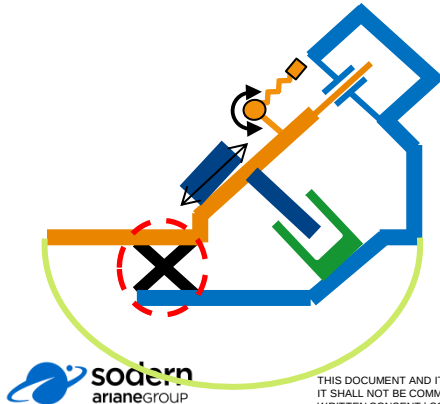
Corps mobile



Le pivot constitue le cœur du pendule.

Rôle :

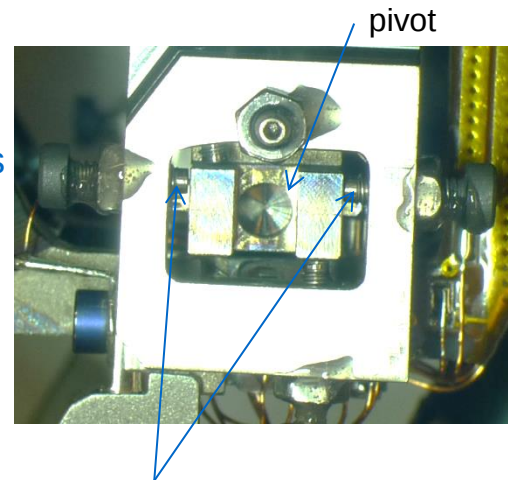
- Grande souplesse suivant un axe de rotation
- Grande raideur dans les autres degrés de liberté
- Transmission des signaux électriques vers la partie mobile.



DIFFICULTÉS RENCONTRÉES SUR LE PIVOT

Principales difficultés

- Le pivot est fortement hyperstatique, ce qui rend sa réalisation très complexe → Flambage de lames
- La course des pivots est limitée à quelques dizaines de microns par des butées mécaniques, afin de ne pas endommager les lames ressort. Cela rend les pivots (et les pendules en général) extrêmement sensibles à la contamination particulaire. → Contaminations particulières fréquentes
 - Le design des butées pivot a été repris après intégration des premiers modèles
- Les corps des pivots étaient déformés par leur serrage sur les pendules. → Difficultés de collage
 - Reprise du design et retrofit de l'ensemble des pendules

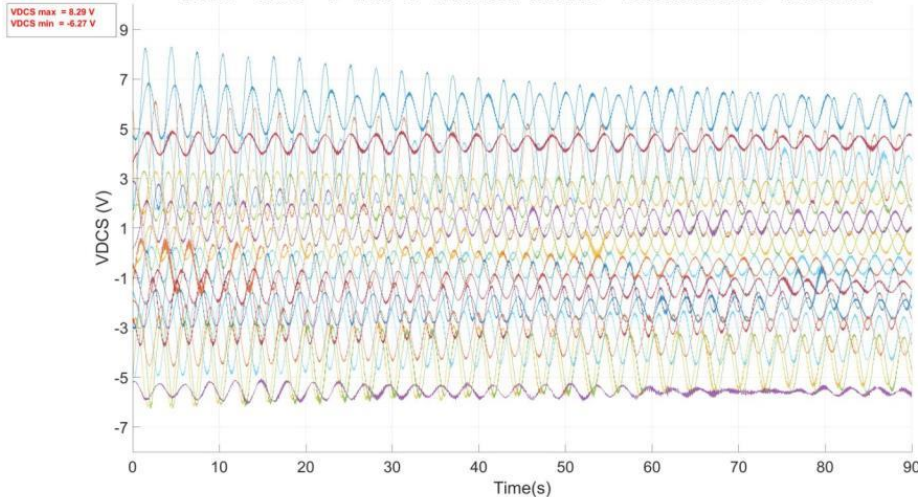


Vis servant de butée
Jeu : $\pm 40\mu\text{m}$!

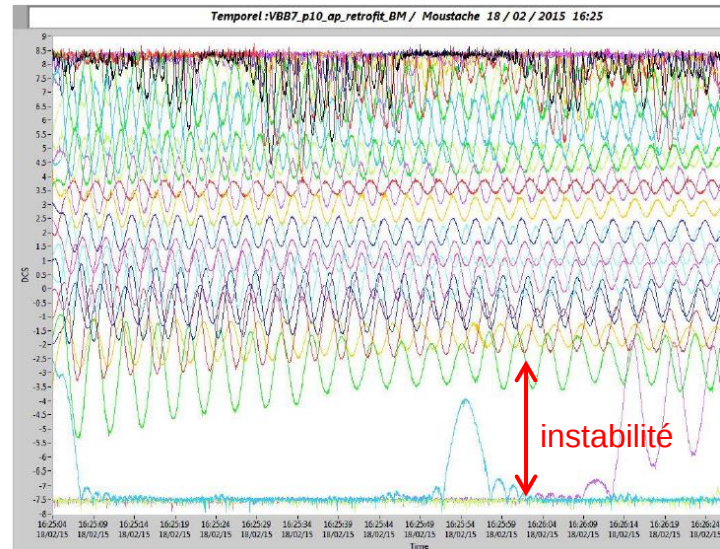
DIFFICULTÉS RENCONTRÉES SUR LE PIVOT

Vidéo flambage de lames

VBB15 - Coil C - T = 25.3 °C - 02/06/2017 09:34:48 - Moustache Curve - Timeseries



Mesure du déplacement en boucle ouverte d'un pendule conforme ...

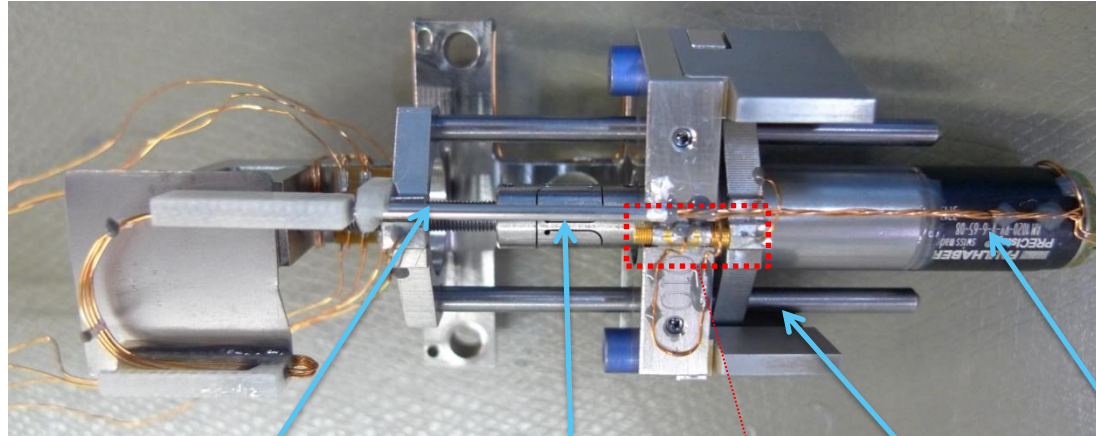


Et d'un pendule présentant un flambage d'une lame pivot

Problème résolu en modifiant les méthodes de montage (collage)
et en stabilisant les pivots en température avant intégration

QUELQUES SOUS-ENSEMBLES CRITIQUES

Mécanisme d'équilibrage (BM)



Caractéristiques :

- Masse déplacée : 55g (15% de la masse des pendules)
- Course de 17mm
- Résolution de 68nm
- Durée de vie de 160 courses complètes
- 2 contacts fin de course

Vis d'entraînement

Accouplement flexible

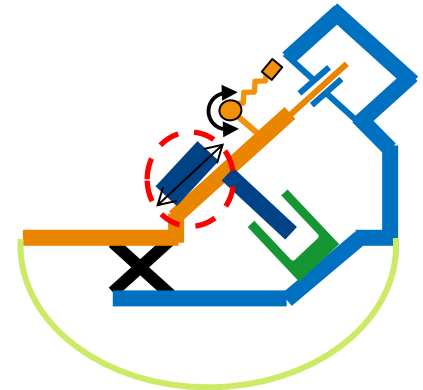
Masses en Tungstène

Motoréducteur



Ø1,7mm

contacts fin de course



DIFFICULTÉS DU MÉCANISME D'ÉQUILIBRAGE

Principales difficultés

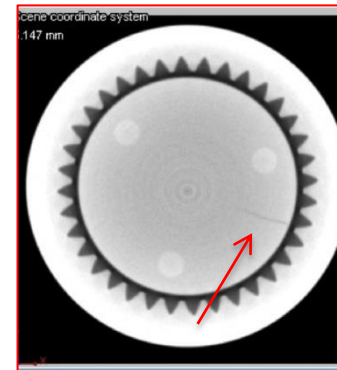
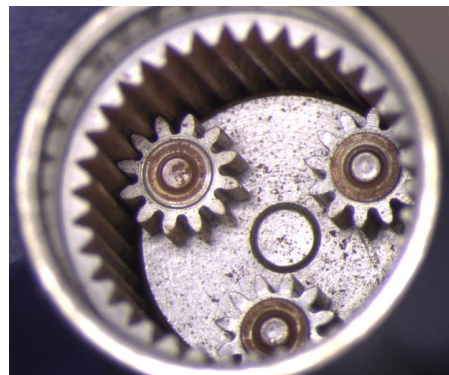
- Choix et validation des micro-moteurs (pièces du commerce)
- Procédés de lubrifications (réducteur, guides, vis d'entraînement)
- Routage des câbles complexe
... objet d'un retrofit peu de temps avant la livraison !

Blocage des 1ers moteurs après 1h de fonctionnement !



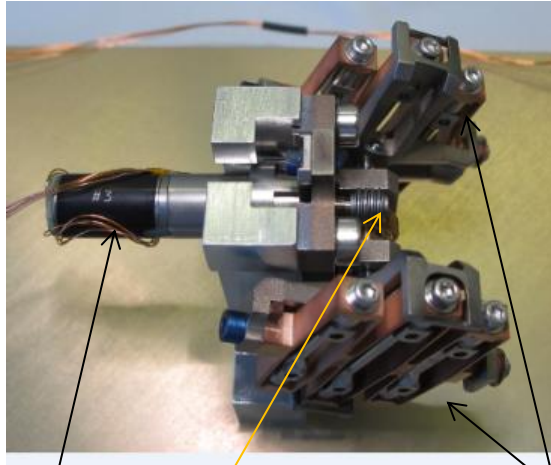
Et sur d'autres moteurs, fissures sur les porte-satellites

Génération de particules d'oxyde et problèmes de durée de vie



QUELQUES SOUS-ENSEMBLES CRITIQUES

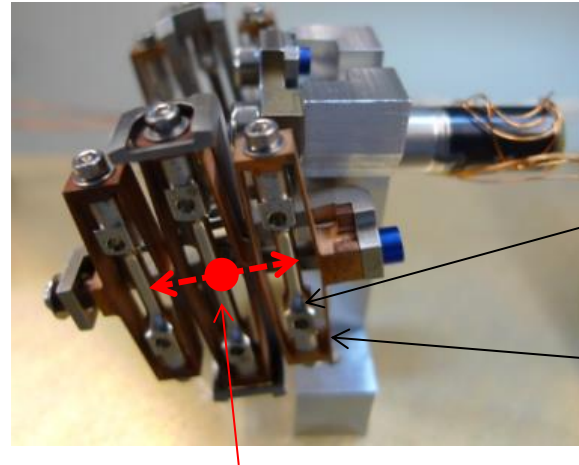
Mécanisme de compensation thermique (TCDM)



Vis sans fin

Moto-réducteur

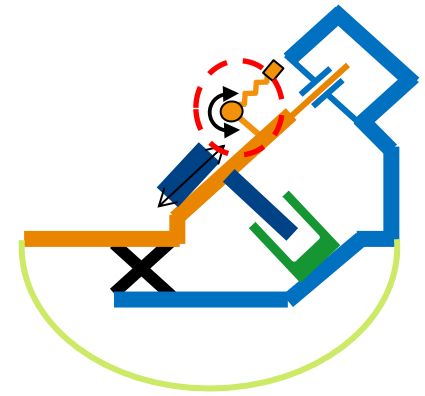
Oreilles



Déplacement du centre de gravité des oreilles en fonction de la température

Invar (très faible dilatation)

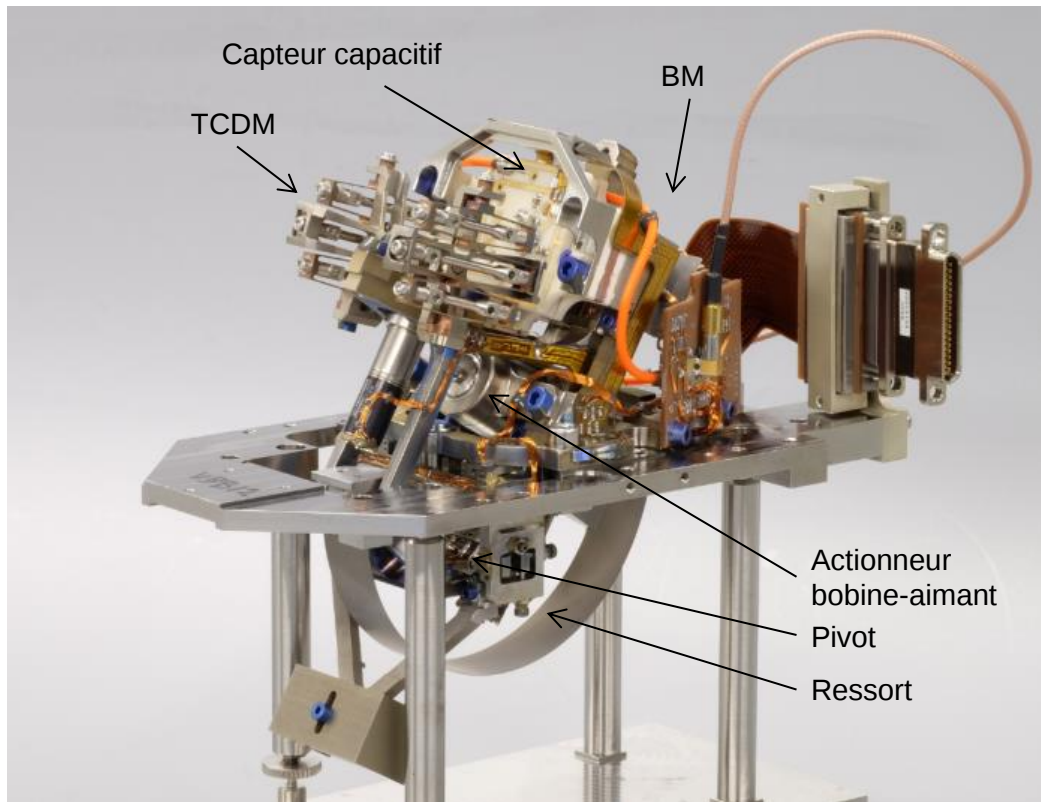
CuBe2 (forte dilatation)



Vidéo

Ce mécanisme met en rotation 2 « oreilles », mécanismes passifs permettant de minimiser l'impact des variations de températures sur l'équilibrage du pendule

PENDULES VBB



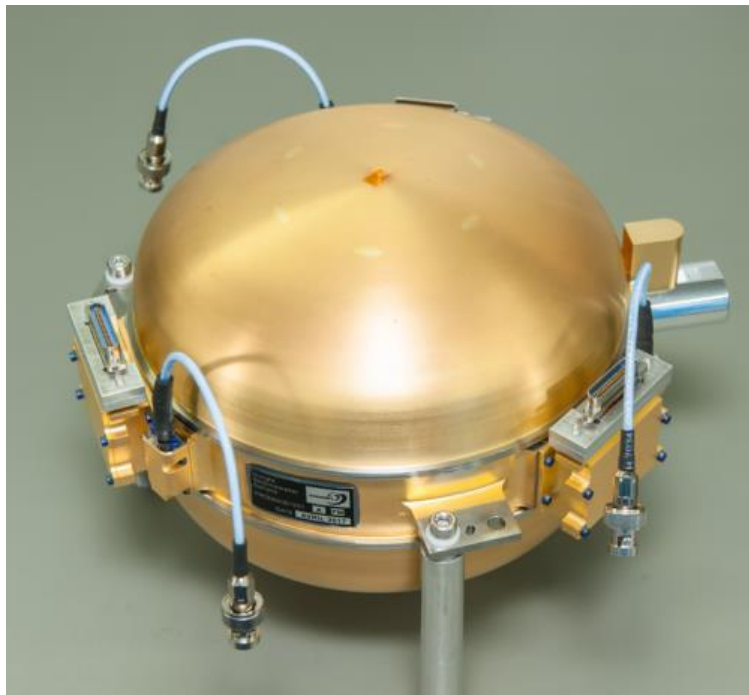
→ Mesure de déplacement : résolution de 10 picomètres (diamètre d'un atome d'hydrogène)

→ réponse fréquentielle très large (0,25 à 200s)

→ Gamme de température -105 / +120°C

→ Environnements mécaniques sévères

LA SPHÈRE SEIS

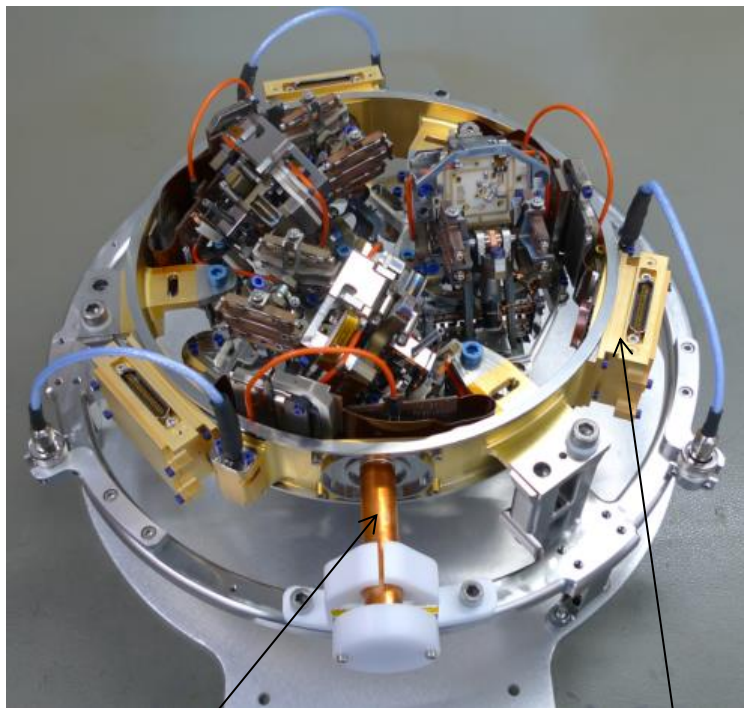


Les 3 pendules VBB sont intégrés dans une Sphère en Titane doré qui :

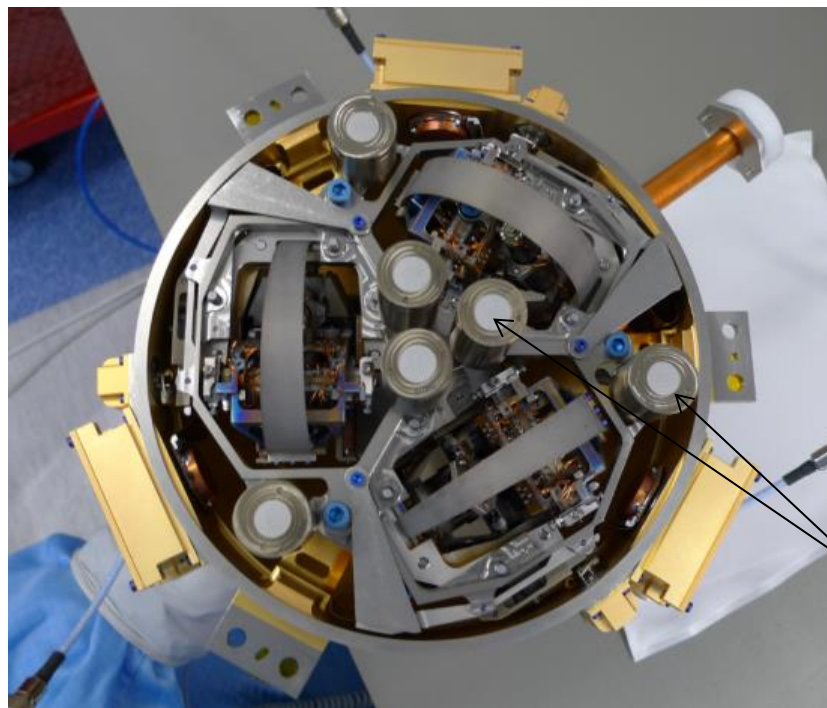
- Isole les pendules de l'environnement Martien : vents, variations de température
- Maintien le niveau de vide du système sur les 3 ans de la mission, les pendules ne pouvant fonctionner efficacement qu'à une pression inférieure à 0,1 mbar. La sphère est équipée à cet effet de mini-pompes passives (Getters)
- Découple thermiquement les pendules du reste de l'instrument, tout en assurant un positionnement extrêmement précis.

LA SPHÈRE SEIS

Vues de la Sphère équipée des 3 pendules VBB



Queusot



Getters

Traversées électriques
(pour chaque pendule : 37 contacts + 1 câble coax)

LES DÉFIS DE LA RÉALISATION DE LA SPHÈRE

L'herméticité nécessaire pour la sphère oblige à faire appel à des technologies particulières, notamment :

- Soudure laser des coques
- Brasures hautes températures
- Fermeture finale par queusottage, après étuvage à plus de 100°C

Vidéo queusottage



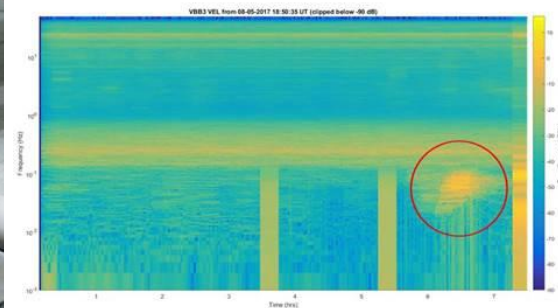
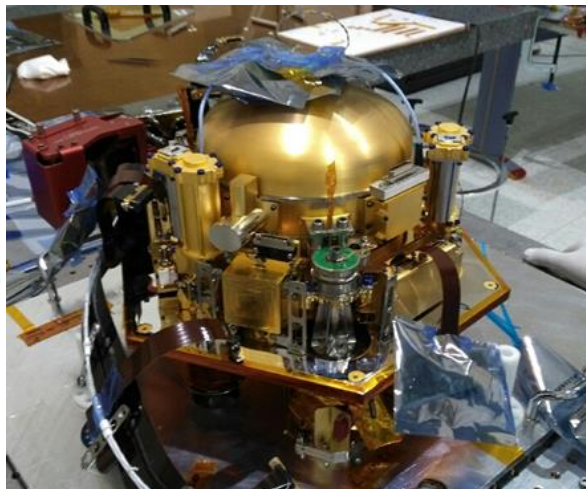
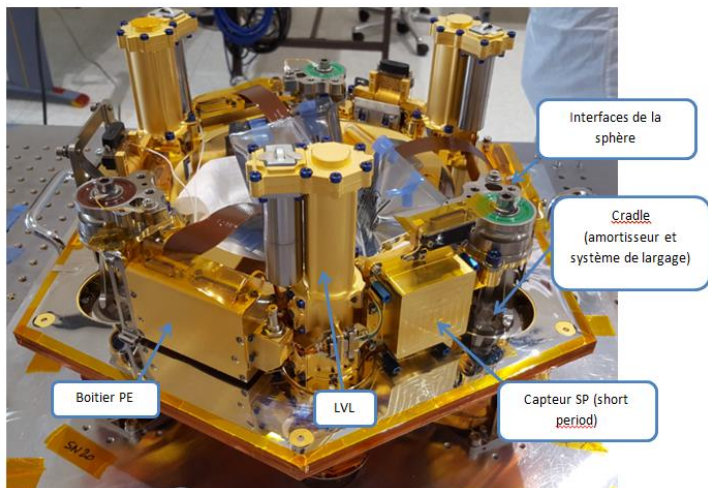
Le queusottage, moment de grande tension pour l'équipe !

La principale difficulté est liée aux environnements extrêmes vus par la sphère : jusqu'à 120°C sur Terre, et -105°C sur Mars.

En 2015, une fuite au niveau des traversées électriques n'a pas pu être réparée, ce qui a provoqué le report du tir de 2016 à 2018.

INTÉGRATION AU CNES

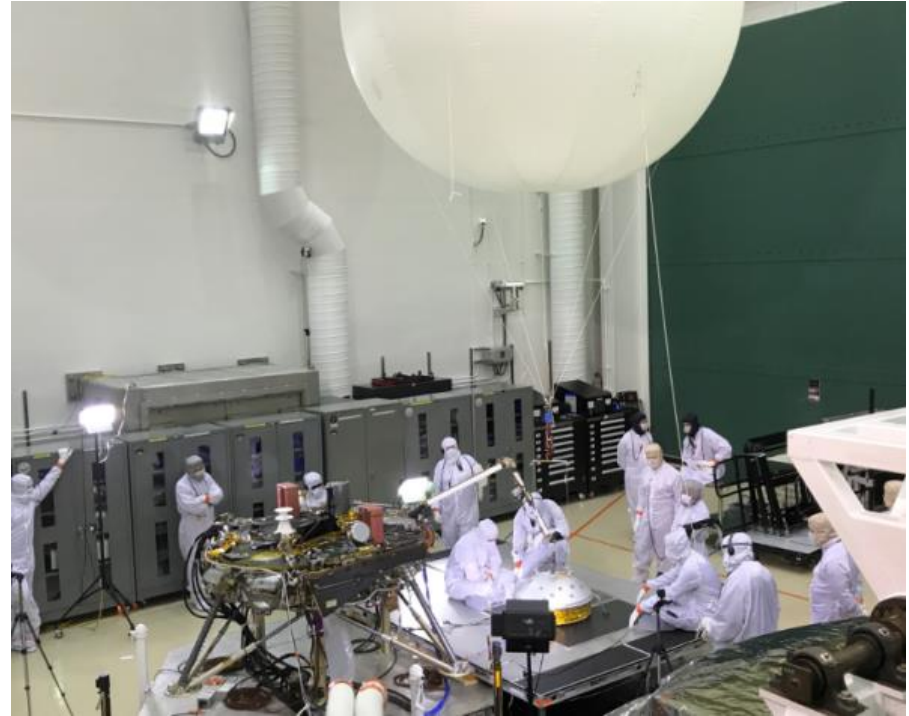
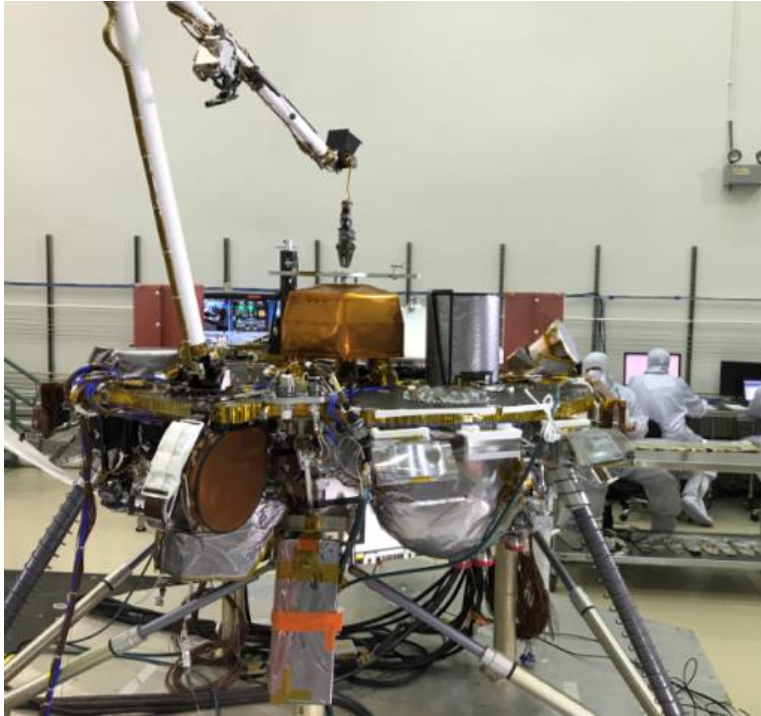
Les capteurs intégrés dans leur sphère ont été livrés au centre spatial de Toulouse en Avril 2017, où ils ont été assemblés sur l'instrument SEIS.



Détection d'un séisme au Japon lors des essais au CNES

Sodern et l'IPGP ont livré au CNES une sphère de rechange début Octobre 2017, pour être intégrée sur un instrument de rechange, préparé en cas de problème sur l'instrument principal.

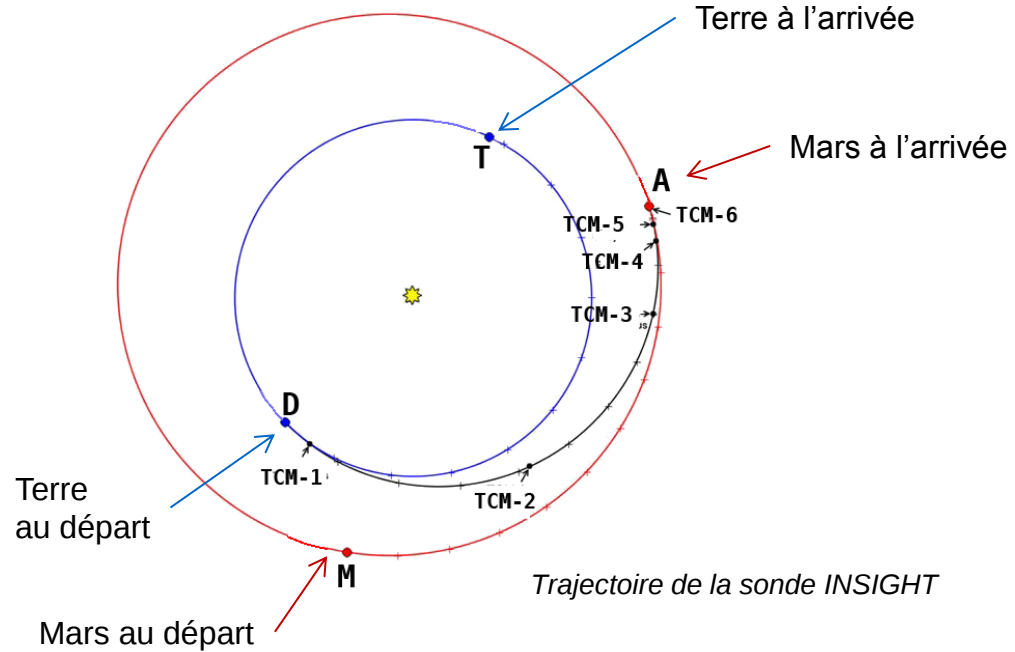
INTÉGRATION SUR L'ATTERRISSEUR INSIGHT



Essais de déploiement de l'instrument SEIS réalisés début Octobre 2017 (Lockheed-Martin)

EN ROUTE VERS MARS !

Tirée de Vandenberg (Californie), sous un épais brouillard, le 5 mai dernier, par un lanceur ATLAS V ...



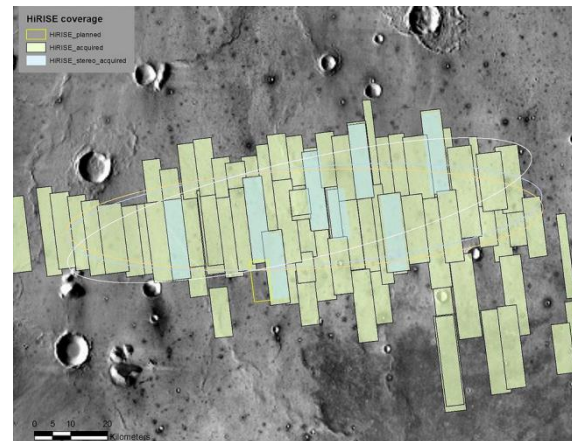
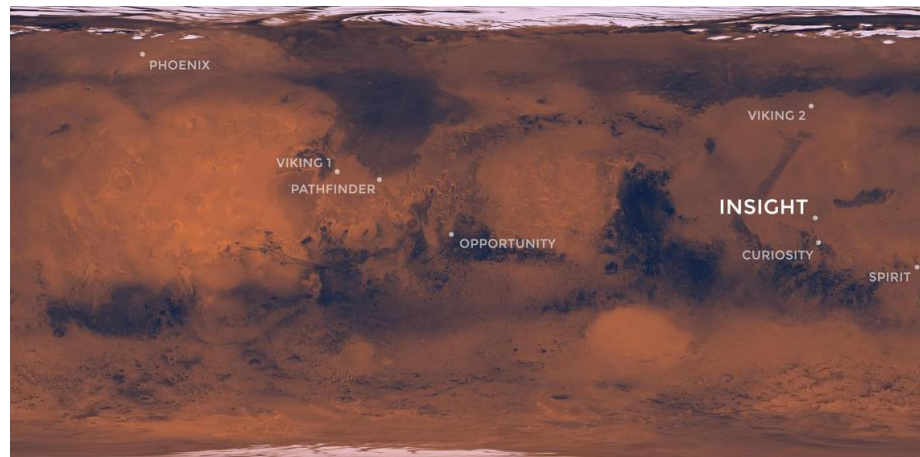
... la sonde est arrivée sur Mars le 26 Novembre 2018 !

SITE D'ATTERRISSAGE

Le site d'atterrissage répond à plusieurs critères :

- Latitude entre 15°S et 5°N, pour que les panneaux solaires puissent fournir suffisamment d'énergie
- Altitude inférieure à -2,5 kilomètres pour que la sonde spatiale parvienne à être ralentie suffisamment avant l'arrivée sur le sol
- L'ellipse retenue doit faire au minimum 110 sur 25 kilomètres
- Les rochers éparpillés en surface ne doivent pas représenter plus de 10 % de la surface
- Absence de reliefs de grande taille, et pentes inférieures à 15 %
- Le régolite doit avoir au moins cinq mètres d'épaisseur, pour faciliter la pénétration du sondeur HP3

Enfin, la taille du site doit être au minimum de 110x25km
(incertitude liée aux vents et à la pression atmosphérique)



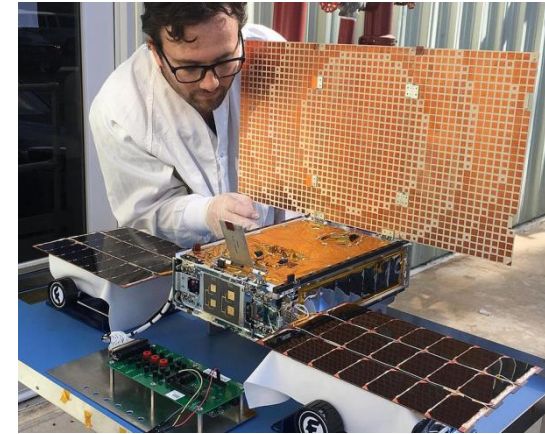
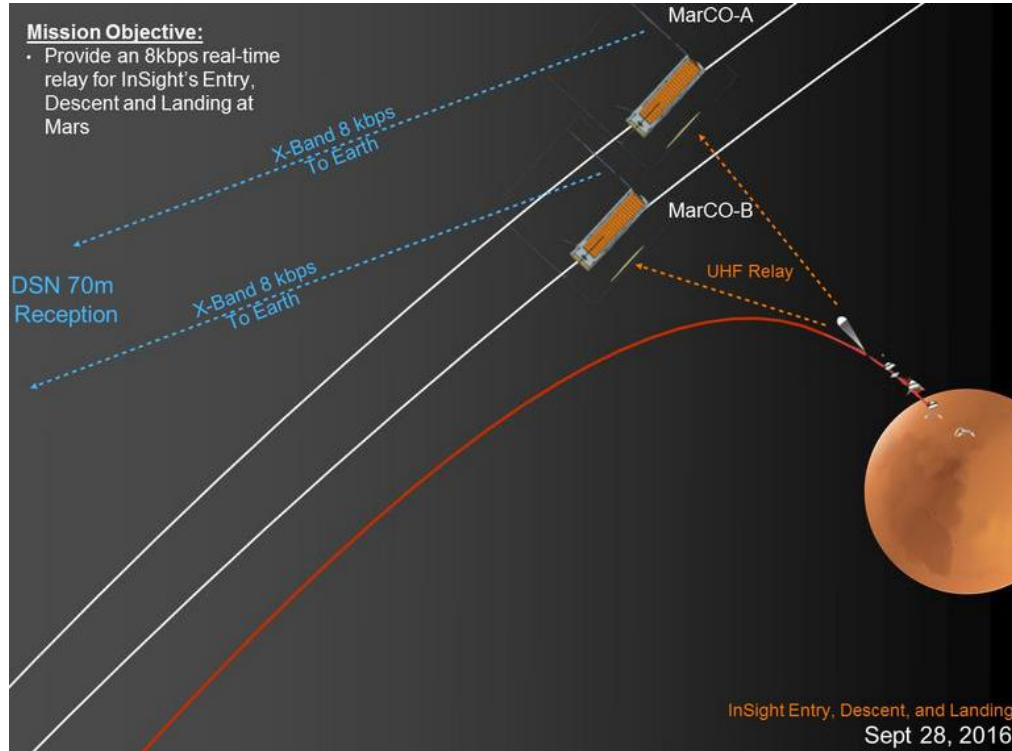
ENTRY, DESCENT & LANDING

Atterrissage sur Mars parfaitement maîtrisé !

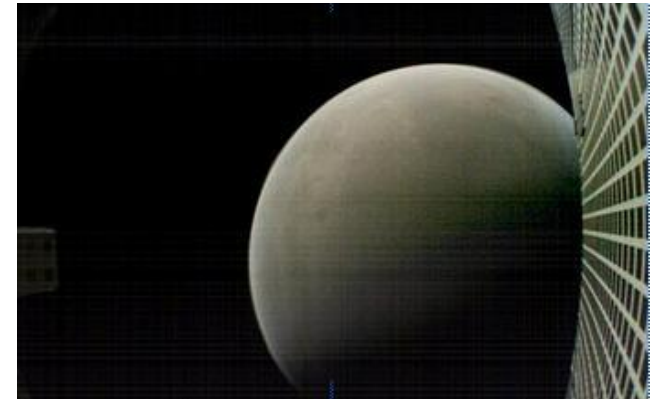


LES CUBESATS MARCO

Atterrissage suivi en direct grâce aux micro-satellites MARCO

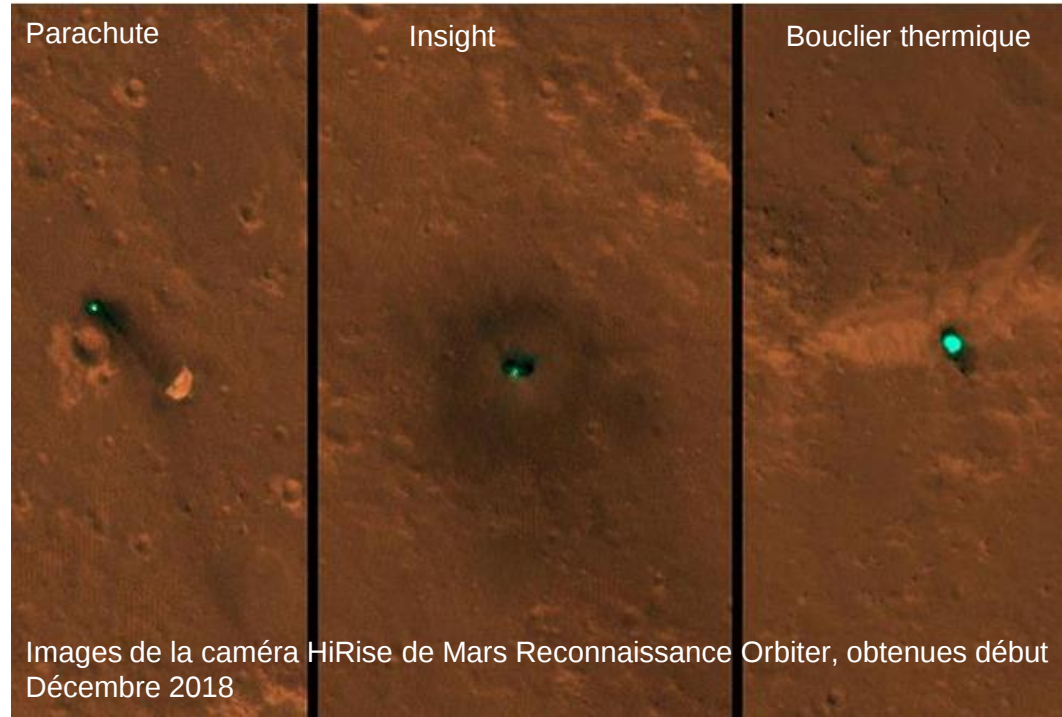
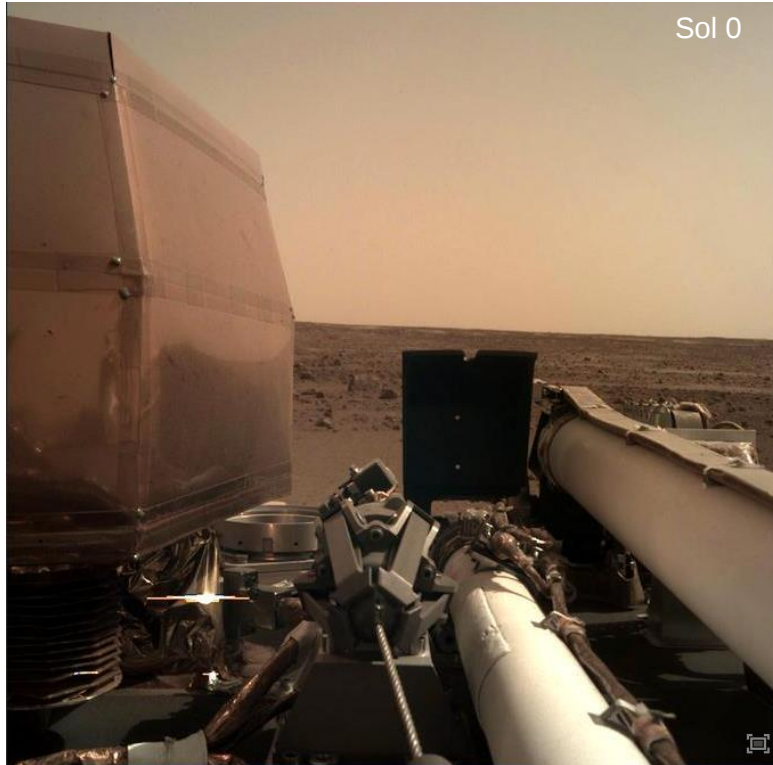


Un satellite MarCO en cours de test avec son antenne (verticale) et ses panneaux solaires déployés.



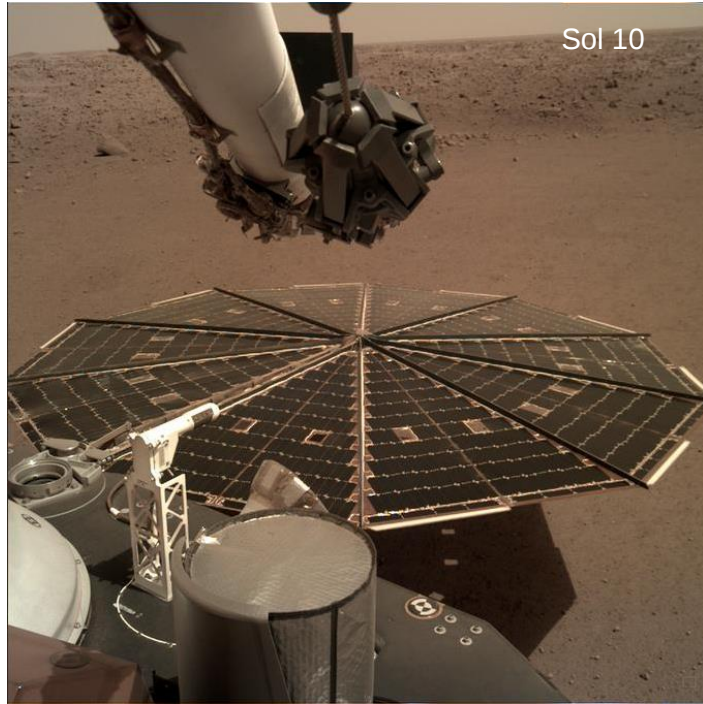
Photographie de la planète Mars prise par MarCO-B après avoir accompli sa mission.

INSIGHT SUR MARS

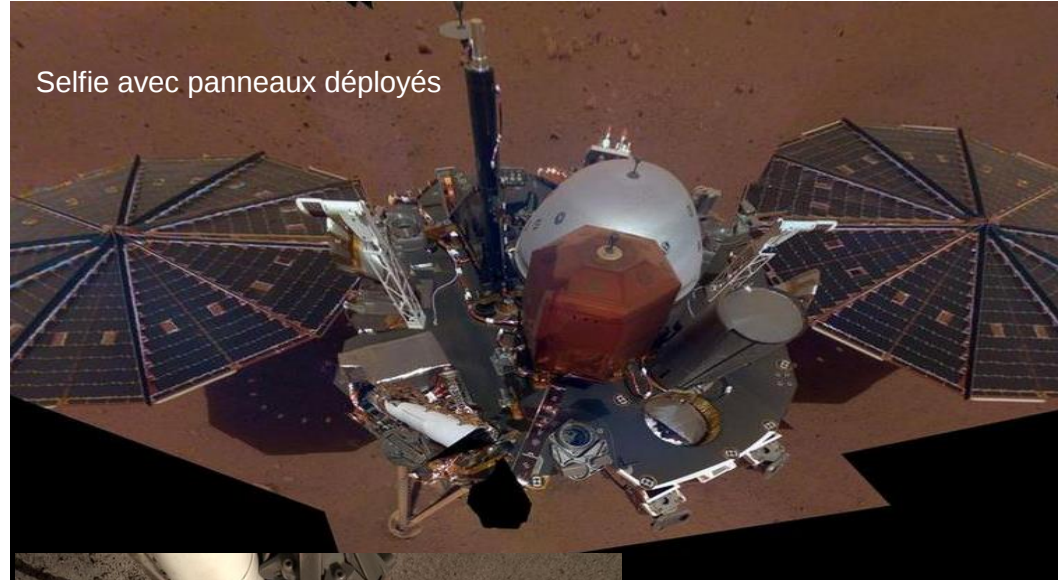


Premières images de la sonde au sol et depuis l'orbite !

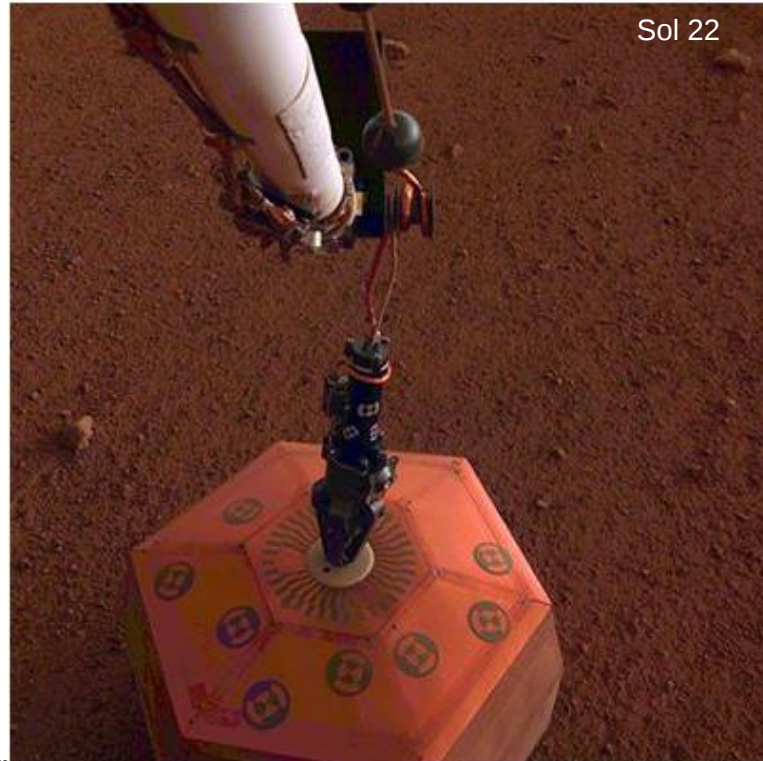
UN DÉPLOIEMENT MÉTICULEUX



Insight enregistre le vent martien

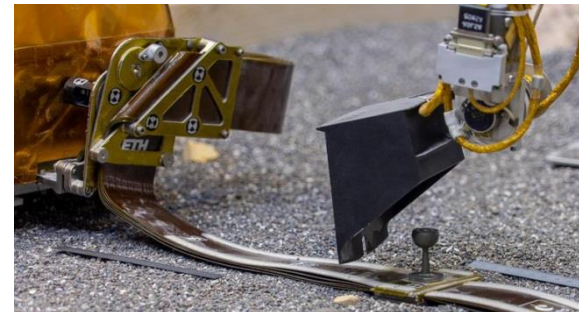
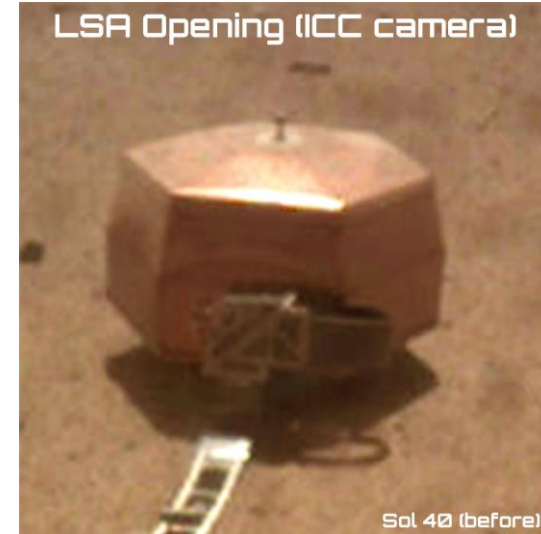


LE 2EME ATERRISSAGE D'INSIGHT



QUELQUES DIFFICULTÉS DU DÉPLOIEMENT

Déploiement du câble « Tether »



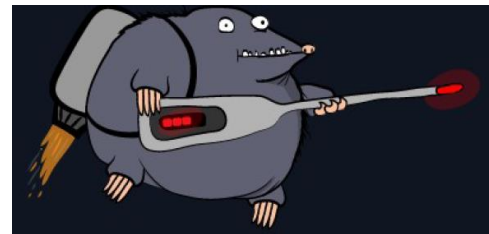
LE BOUCLIER EOLIEN ET THERMIQUE



L'élégance médiévale de la jupe extensible du WTS, avec l'isolant thermique doré alourdi par un anneau de cotte de mailles (© NASA/JPL-Caltech/IPGP/Philippe Labrot).



INSIGHT REJOINT PAR LA TAUPE HP3



LA SITUATION AUJOURD'HUI

Au 15 Mars 2019 – sol 104

- La partie active de la recette en vol de SEIS est terminée
 - Les capteurs sismiques fonctionnent parfaitement
 - Les mécanismes ont été réglés pour limiter au maximum les sources de bruit
 - L'effet de marée de Phobos a été mesuré !
- SEIS acquiert des données en permanence. Place à la science !
- L'expérience allemande HP3 a buté sur un caillou lors de sa première séance de martelage et est bloquée à 30cm de profondeur... les ingénieurs cherchent une solution...



MERCI DE VOTRE ATTENTION !

