

LE MENSUEL DE RÉFÉRENCE DES SCIENCES DE L'UNIVERS

L'ASTRONOMIE

L'ASTRONOMIE

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE

ÉDITION
SPÉCIALE



INSIGHT ARRIVE SUR MARS

[ENJEUX] [SCÉNARIO] [TÉMOIGNAGES]





MINISTÈRE
DE LA CULTURE

MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR, DE LA
RECHERCHE ET DE
L'INNOVATION

cité

**sciences
et industrie**



Tous les mois, dans les 76 pages de *l'Astronomie*, des spécialistes vous invitent à découvrir l'actualité astronomique, les recherches en cours, l'astrophysique, l'histoire de l'astronomie, les événements célestes, les techniques utiles pour observer...

L'ASTRONOMIE

En vente chez votre marchand de journaux et par abonnement.

 facebook.com/Magazine.Astronomie

Directeur de la publication Patrick Baradeau
Rédactrice en chef Janet Borg
Rédacteurs en chef délégués Patrick Baradeau,
 Fabrice Mottez
1^{er} Rédacteur graphiste / Ass. de rédaction Mourad Cherfi

Conseillers scientifiques Jérôme Aléon, Allan Sacha Brun,
 Suzy Collin-Zahn, Frédéric Deschamps, Roger Ferlet, Jean Meeus
 et Jean Schneider

Comité de rédaction P. Baradeau, P. Parbel, J. Borg,
 D. Cachon, M. Cherfi, S. Collin-Zahn, P. Descamps,
 M.-H. Ducroquet, P. Durand, A.-M. Huguenin, N. Mein,
 F. Mottez, M.-C. Paskoff, G. Raffaitin, Gilles Sautot

Correction Denis Cachon

Publicité et partenariat Alain Sallez
 alain.sallez@saf-astronomie.fr

ISSN 0004-6302

l'Astronomie est éditée par la
 Société Astronomique de France
 3, rue Beethoven – 75016 Paris

Commission paritaire n°1122 G 82377

Revue publiée avec le concours
 du Centre National du Livre

Imprimerie Roto Champagne



**Ce numéro spécial, du magazine *l'Astronomie*,
 gratuit hors commerce, vous est offert par la
 Société astronomique de France et ses partenaires.
 Il a été produit avec l'aimable collaboration de Gilles
 Dawidowicz et Alain Sallez. Qu'ils en soient remerciés.**

Le magazine *l'Astronomie* est édité par la
 Société astronomique de France.

WWW.SAF-ASTRONOMIE.FR



RETROUVEZ LA SAF SUR
 FACEBOOK ET TWITTER
 > SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE
 > @SAFASTROFRANCE

LINKEDIN : SOCIETE-ASTRONOMIQUE-DE-FRANCE

Toutes les communications relatives à la rédaction de *l'Astronomie* doivent être adressées au Rédacteur en chef de *l'Astronomie*, au siège de l'association. Toutes les illustrations et figures non créditées ont été fournies par les auteurs. Tous droits réservés. La Société Astronomique de France décline toute responsabilité en ce qui concerne la publicité commerciale, ainsi que les offres de cession ou d'échange insérées dans *l'Astronomie*. (Décision du Conseil du 14 décembre 1966)

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les art. L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. Toutefois, des photocopies peuvent être réalisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Copyright, 6 bis, rue Gabriel Laumain – 75010 Paris, auquel la Société Astronomique de France a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs.



LE MOT DU PRÉSIDENT

Le millésime 2018 sera décidément un bon cru pour la planète Mars ! Elle se trouve cette année à sa plus courte distance de la Terre : 57,6 millions de kilomètres. Après avoir brillé avec un superbe éclat rouge et enchanté tout l'été l'horizon sud du ciel nocturne, l'exploration spatiale la remet à la Une de l'actualité en cette fin d'année.

Héritière de cinquante ans d'activités spatiales, Mars est devenue l'astre qui a suscité — et suscite encore — le plus grand nombre de missions. Parmi les orbiteurs actuellement en activité, retenons : les américains *Mars Odyssey*, *Mars Reconnaissance Orbiter* et *Maven*, les européens *Mars Express* et *Trace Gas Orbiter*, ainsi que l'Indien *Mangalyaan*. Sur son sol, le rover *Curiosity* de la Nasa est toujours en activité (l'autre rover, *Opportunity*, a cessé d'émettre il y a peu, le 10 juin 2018).

Avec l'atterrissage du robot de la mission *Mars InSight* (Interior Exploration using Seismic Investigation, Geodesy and Heat Transport) du 26 novembre a pour but d'étudier la structure interne de Mars grâce au déploiement à sa surface d'une station géophysique embarquée dans un atterrisseur fixe. La France a apporté une contribution décisive à cette mission en fournissant le sismomètre SEIS (Seismic Experience for Interior Structure).

InSight est une étape importante dans la « conquête » de la planète rouge. Les prochaines missions martiennes seront dédiées à la recherche de vie extraterrestre. Mais poser le pied sur Mars sera le prochain grand défi de l'exploration spatiale habitée internationale. En effet, toutes les puissances spatiales ont Mars dans le viseur. Dans ce club encore très fermé, les États-Unis, l'Europe, l'Inde et le Japon ont été rejoints par la Chine et même les Émirats arabes unis. Les initiatives privées apporteront leur contribution. SpaceX d'Elon Musk et Blue Origin de Jeff Bezos déclarent envisager d'y envoyer l'homme vers les années 2030. Pour parvenir à ce but de nouveaux lanceurs lourds (SLS, Flacon Heavy, BFR, New-Glenn) sont en développement ainsi que de nouvelles capsules habitables ou cargo (Orion, Dragon, Cygnus, ATV, HTV, Progress).

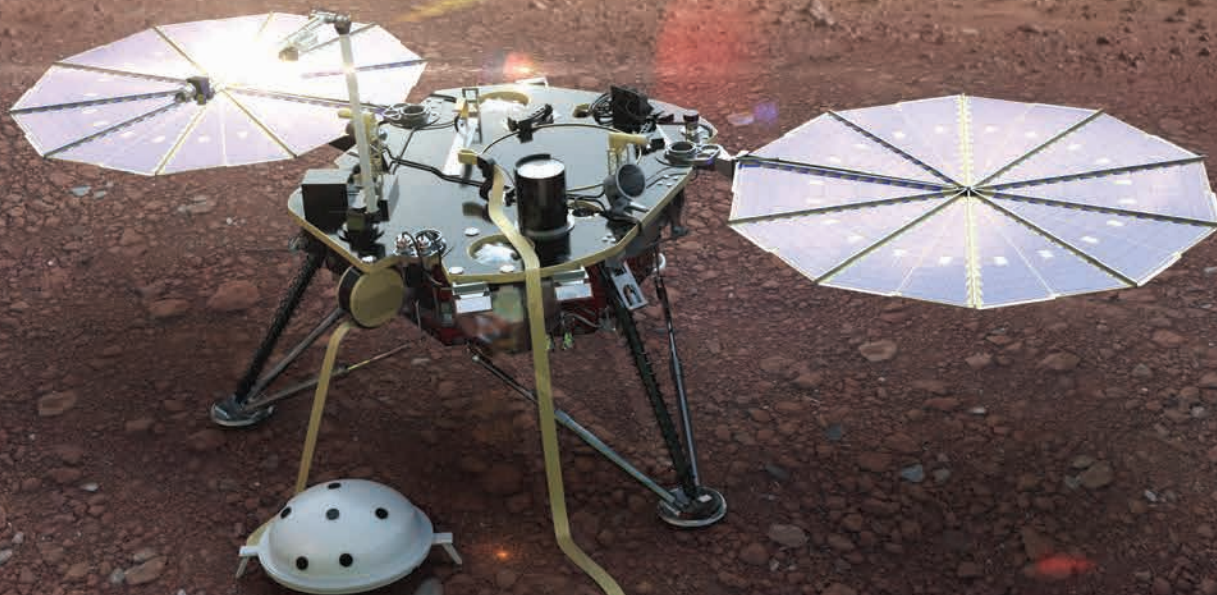
Les missions robotisées actuelles, comme *Mars InSight*, et celles à venir (notamment les cinq missions de 2020, dont *ExoMars* pour l'Europe, associée à la Russie) préparent progressivement le débarquement de l'Homme sur la planète rouge. Au-delà des déclarations « promotionnelles » des uns et des autres, on peut envisager qu'une première mission humaine vers Mars sera réalisée d'ici une vingtaine d'années, réalisant enfin l'un de nos rêves les plus anciens.

Patrick Baradeau

Président de la Société astronomique de France



SOMMAIRE



6 UN SISOMÈTRE FRANÇAIS SUR MARS

Francis Rocard

10 L'ESSENTIEL DE LA MISSION

Alain Sallez

**12 L'EXPÉRIENCE SEIS : QU'ELLES SONT
LES ENJEUX SCIENTIFIQUES ?**

Philippe Lognonné
et W. Bruce Banerdt

**16 INTERVIEW DE JEAN-YVES LE GALL,
PRÉSIDENT DU CNES**

Gilles Dawidowicz

18 SEIS : QUELLE AVENTURE !

Fabienne Casoli et Philippe Laudet

24 TÉMOIGNAGES

26 UNE VISION NOUVELLE DE L'ATMOSPHÈRE DE MARS

Aymeric Spiga

30 DÉTERMINER LE NORD GÉOGRAPHIQUE MARTIEN

Denis Savoie

32 SÉISME ET SÉMANTIQUE

Daniel Kunth

Sodern 2018

ÉDITORIAL

Depuis les années 1960, une trentaine de missions ont été lancées vers Mars. Grâce à elles, on en sait aujourd'hui beaucoup plus sur le sol et l'atmosphère martiens. Toutefois, aucune mission n'a encore sondé la structure interne de la planète, et ce sera le rôle d'*InSight*, une mission de la Nasa avec une forte participation de l'agence spatiale française, le Cnes. Les instruments seront déployés dans l'hémisphère nord de la planète pour une durée nominative d'environ un an et auront pour but de mieux comprendre comment s'est formée Mars, une planète analogue à la Terre, et comment elle a évolué par la suite, jusqu'à devenir si différente de notre planète. L'instrument principal de la mission est un sismomètre SEIS (acronyme pour « expérience sismique pour structure interne »), justement sous responsabilité française.

Un sismomètre est un instrument qui mesure les mouvements internes d'un corps rocheux ; sur Terre ils mesurent les tremblements de terre et peut-être qu'un jour ils pourront prévoir les éruptions volcaniques. Au cours des missions Apollo, des sismomètres ont été déployés sur la surface de la Lune et leurs données nous aident à mieux comprendre l'intérieur du globe lunaire. SEIS va permettre de retrouver des traces de l'histoire interne de Mars en mesurant les mouvements du sous-sol, dus à l'activité sismique interne de la planète et aux impacts météoritiques.

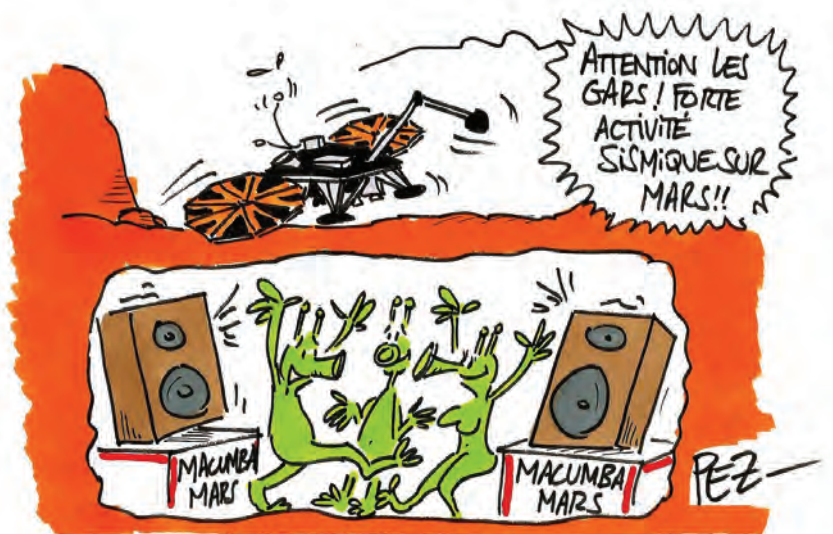
L'idéal pour étudier l'intérieur d'une planète est de disposer d'un réseau de sismomètres, mais on peut déjà apprendre beaucoup avec un seul instrument, à condition qu'il soit très sensible et capable de détecter des déplacements de la taille d'un atome, comme l'est SEIS. Du point de vue d'un ingénieur spatial, c'est un défi. Aucun sismomètre terrestre ne pourrait survivre à un tir dans l'espace, ni aux conditions de fonc-

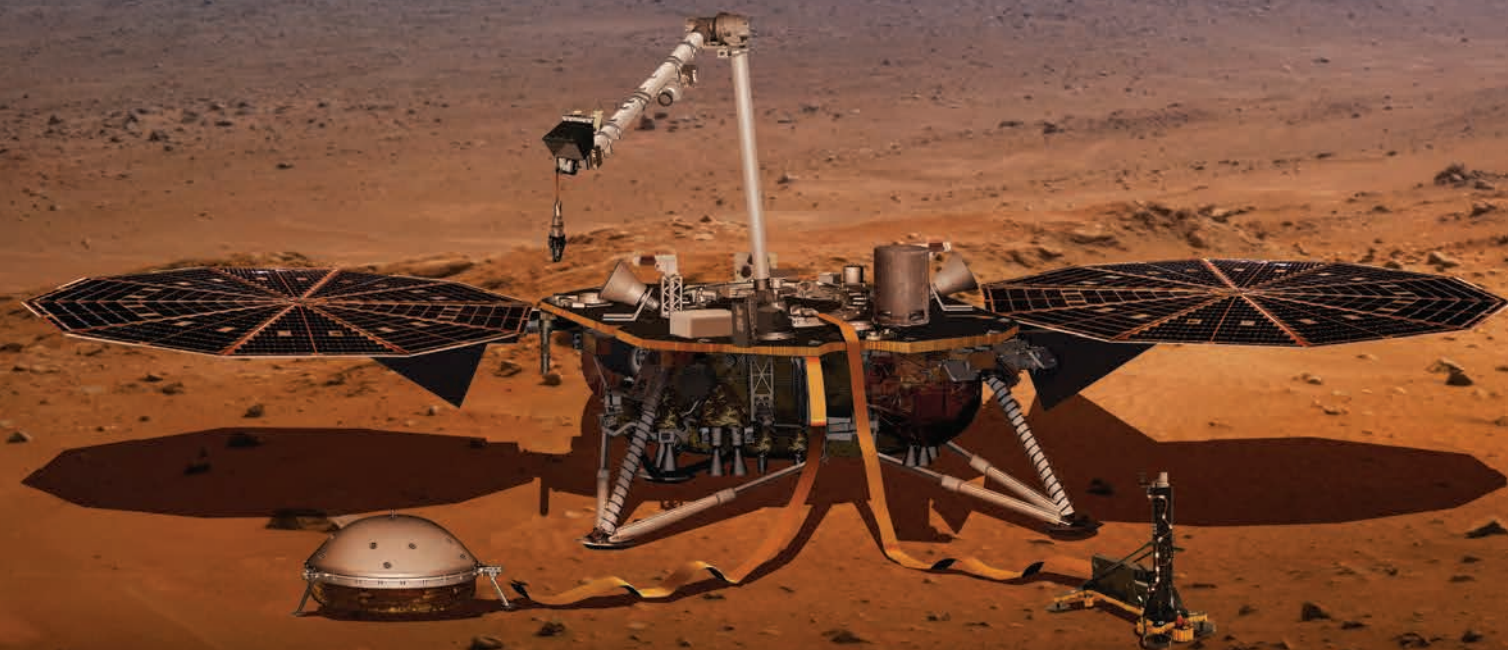
tionnement sur Mars. Il faut donc sélectionner des composants spéciaux et les soumettre à toutes sortes de tests pour les pousser dans leurs retranchements ; il faut aussi résoudre tous les problèmes d'étanchéité et de fuites qui apparaîtront surtout aux très basses températures et ce n'est pas une fois sur Mars qu'on pourra les résoudre. Enfin, ni poussière, ni germes, ni bactéries venant de la Terre.

Depuis 2012, chercheurs et ingénieurs de cinq pays différents travaillent sur ce projet et le moment tant attendu arrive ! Entre temps, il aura fallu se comprendre entre terriens avant d'aller sur Mars. Cette formidable aventure humaine, scientifique et technique est décrite dans cette édition spéciale, en grande partie extraite d'un dossier paru dans le magazine *l'Astronomie* de mai 2018, pour avoir une vue d'ensemble de SEIS et d'*InSight*.

Janet Borg

Rédactrice en chef de l'Astronomie





UN SISMOMÈTRE FRANÇAIS SUR MARS

NASA/JPL

Aujourd'hui se pose sur Mars la mission *InSight* avec à son bord un sismomètre français. Son but : sonder l'intérieur de Mars afin de décrypter les caractéristiques physiques de sa structure interne.

Quand on s'implique dans le spatial, il faut être patient et avoir une certaine ténacité. C'est ce qu'a fait Philippe Lognonné de l'Institut de physique du globe de Paris. Ce géophysicien, spécialiste de la structure interne des planètes telluriques, y compris la Terre et la Lune, a eu l'idée d'envoyer un sismomètre sur Mars afin de déterminer les paramètres de sa structure interne. En effet, après de nombreuses missions d'exploration de la planète rouge, aucun sismomètre n'avait encore fonctionné sur Mars (celui des sondes *Viking* dans les années 1970 placé sur l'atterrisseur n'avait finalement mesuré que le vent). Mars est-elle géologiquement active? Y a-t-il des tremblements de Mars? Peut-on détecter les impacts des météorites sur Mars? Autant de questions qui jusqu'à aujourd'hui n'ont pas trouvé de réponse.

Mais pour mettre un sismomètre sur Mars, il faut y envoyer un atterrisseur afin qu'il se pose en douceur et dépose (ou pas) le sismomètre au sol. Or, une mission martienne coûte environ 500 millions d'euros et la France n'en a jamais réalisé. Les innombrables implications françaises dans l'exploration de Mars (*Curiosity*, *ExoMars*, *Mars Express*, *Mars Odyssey*...) ont eu lieu via des coopérations soit au sein de l'Agence spatiale européenne, soit avec la Nasa, la Russie ou encore le Japon et prochainement la Chine.



En 1987, P. Lognonné a saisi la première occasion avec l'URSS de l'époque et le développement du sismomètre Optimism (le bien nommé...) qui devait être embarqué à bord de deux petites stations sur la mission *Mars96*. Malheureusement, la mission fut un échec à cause d'une défaillance du lanceur *Proton* et la sonde a fini au fond du Pacifique. Les tentatives ultérieures furent nombreuses tant pour aller sur Mars que sur la Lune: 13 tentatives rien que pour Mars dont 5 sur des projets approuvés mais finalement abandonnés. La dernière tentative se nomme *InSight* et devrait être la bonne.

InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) est la 12^e mission du programme Discovery de la Nasa. Ces petites missions d'exploration planétaire ont lieu tous les deux ans environ pour un coût d'environ 500 millions de dollars. Elles sont sélectionnées après une rude compétition et une phase

d'étude d'un an. Le responsable scientifique d'*InSight* est Bruce Banerdt du Jet Propulsion Laboratory. Banerdt et le JPL constituent leur projet avec une totale liberté, la seule contrainte étant le budget et le calendrier qu'il faut respecter scrupuleusement.

Depuis 1987 et les débuts du développement de *Mars96*, le Cnes a soutenu P. Lognonné, notamment via des études de R&D afin d'améliorer les performances du sismomètre. P. Lognonné a ainsi conçu le sismomètre VBB (très large bande) qui devait à la fois être très sensible et avoir une sensibilité étendue (si j'ai bien compris!) au domaine des basses fréquences (inférieures à 1 Hz qui est la fréquence typique pour étudier les tremblements de terre). En effet, nous ne savons pas si des tremblements de terre ont lieu sur Mars. Dans le domaine des basses fréquences, il est néanmoins possible de mesurer la « marée » de Phobos. C'est-à-dire la (très) petite perturbation gravitationnelle que provoque la lune Phobos proche de Mars

Le sismomètre SEIS, ici en cours d'intégration au Cnes à Toulouse en 2014, est constitué de 3 pendules VBB réalisées par la Sodern, d'un système de nivellement allemand, de 2 sismomètres haute fréquence britanniques, d'un long câble et d'une protection thermique et contre le vent américains, ainsi que d'un boîtier électronique suisse.



Après trois mois de déploiement du sismomètre à la surface de Mars, les premières mesures des tremblements de Mars pourront enfin avoir lieu.

quand celle-ci passe au-dessus du sismomètre avec une période de 7 h et 39 min. Ce signal, quoique faible, permet d'étudier le sous-sol proche de Mars sans aucun tremblement de terre. Durant les années 1998-2003, le Cnes a étudié le projet *Net-Lander* de trois stations géophysiques devant être déployées sur Mars. Ce projet a finalement été abandonné alors qu'une étude détaillée (phase B) avait été achevée. C'est pour cette raison que Bruce Banerdt a contacté P. Lognonné afin que ce dernier fournisse le sismomètre de la mission *In-Sight*. En effet, les Américains n'avaient pas de sismomètre équivalent et le développer aurait coûté cher et pris du temps ce qui

est incompatible avec une mission *Discovery* dans laquelle le temps de développement est particulièrement court.

En mai 2011, la mission *GEMS* (GEophysical Monitoring Station), son nom à l'époque, est présélectionnée avec deux autres missions (l'une vers Titan et l'autre devant se poser sur une comète) parmi 28 concurrents pour une phase d'étude de faisabilité. Et finalement, le 20 août 2012, la mission *In-Sight* est définitivement sélectionnée pour un lancement au printemps 2016.

Le Cnes constitue rapidement une équipe projet sous la responsabilité de

Philippe Laudet. Une des difficultés est que le sismomètre SEIS (Seismic Experience for Interior Structure) est réalisé avec plusieurs partenaires : l'électronique par les Suisses, le câble et la protection thermique et contre le vent par le JPL, le système de nivellement par les Allemands et les sismomètres haute fréquence par les Britanniques.

Alors que les pendules VBB fonctionnaient au laboratoire ou plutôt en cave sismique, des problèmes de fabrication de ces pendules sont apparus au cours du développement. Pas moins de 15 pendules ont ainsi dû être réalisées afin d'en avoir 3 fonctionnelles pour le modèle de



Le sismomètre SEIS est constitué de 3 pendules VBB (Very Broad Band) ici intégrées dans une sphère en titane maintenue sous vide. © Sodern.



vol et trois autres pour le modèle de rechange. De surcroît, la sphère en titane, qui doit être maintenue sous vide afin d'obtenir une oscillation normale des pendules, s'est révélée non étanche. Malgré un travail acharné de toute l'équipe SEIS, la Nasa a annoncé le report du tir à seulement 3 mois de l'échéance.

Au début de l'année 2018, le sismomètre de vol a été testé dans sa globalité et a été intégré sur l'atterrisseur *InSight* chez l'industriel Lockheed Martin. Le lancement c'est fait le 5 mai sur une fusée *Atlas V* depuis la base de Vandenberg et l'atterrissage à lieu aujourd'hui 26 novembre.

Après trois mois de déploiement du sismomètre à la surface de Mars et de tests, les premières mesures des tremblements de Mars pourront enfin avoir lieu : ce sera seulement 30 ans après les premiers travaux sur le sismomètre Optimism! ■

L'ESSENTIEL DE LA MISSION

InSight (acronyme de l'anglais Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport pour Exploration interne par les sondages sismiques, la géodésie et les flux thermiques), proposée par le Jet Propulsion Laboratory, est retenue en 2012 dans le cadre du programme Discovery initié par la Nasa. Il s'agit d'explorer à moindres frais le Système solaire avec des sondes robotisées et un objectif scientifique précis. C'est la raison pour laquelle *InSight* s'appuie sur la technologie développée et employée par Lockheed-Martin pour la mission martienne *Phoenix* en 2007. C'est l'étude de l'intérieur du globe martien qui distingue la mission *InSight* de toutes celles déjà engagées sur la planète rouge. Parmi les pays partenaires, notons la forte présence française avec la fourniture du sismomètre SEIS. La fenêtre de tir a été établie pour que la sonde consomme le minimum d'énergie durant son trajet vers Mars. Après un report en 2016, les conditions sont finalement réunies le 5 mai dernier pour procéder au lancement d'*InSight* avec une fusée Atlas V 401. Une fois arrivée sur Mars, l'atterrisseur, d'un diamètre de 1,5 m et d'une hauteur d'environ 1 m, déploiera ses deux panneaux solaires pour atteindre une envergure de 6 m. La masse totale de l'atterrisseur est de 360 kg, dont une cinquantaine pour les instruments.

UN SCÉNARIO À ÉCRIRE

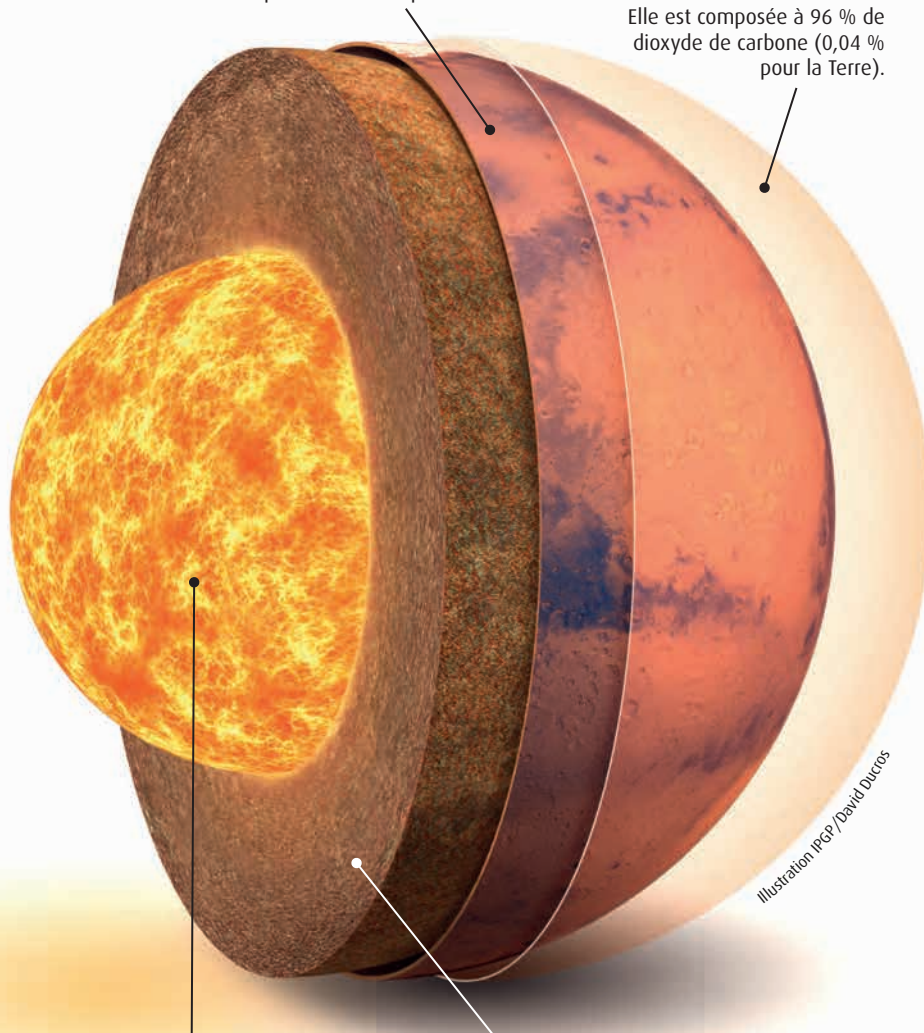
Grâce aux données recueillies, il sera possible de déterminer la taille et l'état (solide ou liquide) du noyau ; l'épaisseur de la croûte ; la composition du manteau ; le flux de chaleur interne du globe... La grande sensibilité du sismomètre SEIS permettra de mesurer l'activité sismique et d'évaluer la fréquence et l'intensité des

impacts de météorites. Et pour la première fois, un magnétomètre enregistrera le champ magnétique local avec une grande précision. Grâce à ces informations, les scientifiques feront une avancée significative en écrivant le scénario de la formation et de l'évolution de Mars. A noter que deux nanosatellites expérimentaux (*MarCO-A* et *MarCO-B*) ont

été largués après le lancement d'*InSight* pour suivre leur propre trajectoire vers Mars. Leur conception permettra de transmettre en temps réel les données d'*InSight* lors de son entrée, de sa descente et de son atterrissage, contrairement à l'orbiteur *MRO* qui enverra les informations avec un décalage de plusieurs heures. ■

La croûte aurait une épaisseur estimée à 65 km, proche de celle de la Terre. Mais cette valeur est très imprécise. *InSight* devrait déterminer son épaisseur à 5 km près.

L'atmosphère martienne est très ténue. Au niveau du sol, sa pression est de 600 millibars, soit environ 170 fois moins que celle de la Terre au niveau de la mer. Elle est composée à 96 % de dioxyde de carbone (0,04 % pour la Terre).

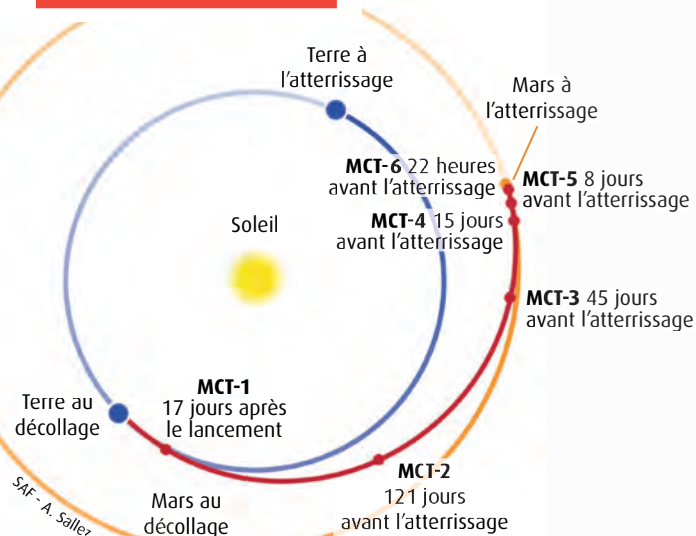


Le noyau recèle bien des secrets. Est-il figé ou présente-t-il encore une partie liquide ? Son évolution est aussi liée à la nature du manteau avec lequel il a formé un champ magnétique global aujourd'hui disparu.

Le manteau semble présenter une composition proche de celui de notre planète. Cependant, de nombreuses incertitudes demeurent sur son épaisseur, sa composition... Y a-t-il une discontinuité comme pour la Terre ?

Illustration JPCP / David Ducros

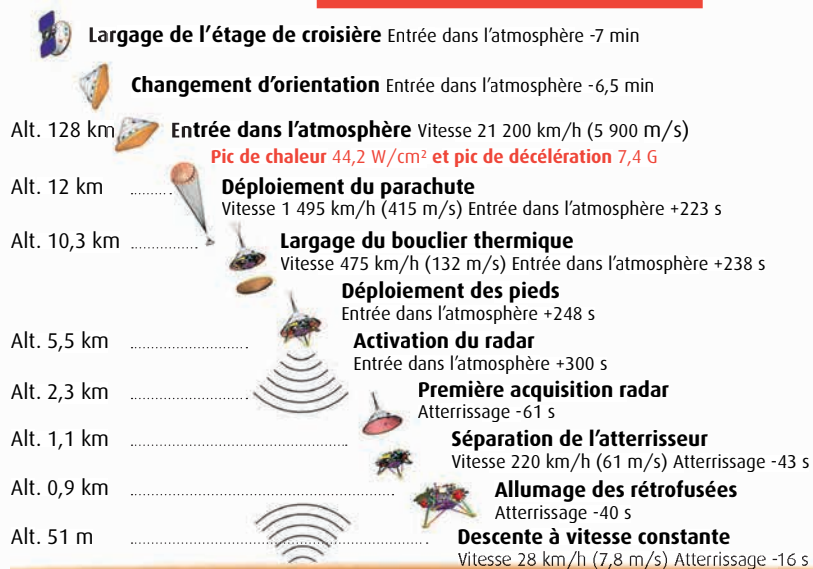
L'ITINÉRAIRE D'INSIGHT



Entre le lancement de la sonde (5 mai 2018) et son arrivée sur Mars (26 novembre 2018), la Terre et Mars ont parcouru une grande distance sur leur orbite autour du Soleil.

La courbe rouge montre le périple d'*InSight*, depuis son départ de notre planète jusqu'à son atterrissage sur Mars, soit 485 millions de kilomètres. Plusieurs manœuvres de correction de trajectoire (MCT) de la sonde sont programmées pour assurer un atterrissage au bon endroit !

LES ÉTAPES DE L'ATTERRISSAGE



SAF - A. Saliez
Source NASA/JPL

Atterrissage

Déploiement des panneaux solaires
16 minutes après l'atterrissage, le temps que la poussière retombe.

LES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS

Bras robotisé de 1,8 m de longueur destiné à placer les instruments SEIS, sa cloche de protection et le HP³ avec le grappin situé à son extrémité. Le succès de la mission repose sur le bon fonctionnement de ce bras.

Caméra de 45° de champ.

TWINS - Temperature and Winds for InSight. Capteurs de mesure de la température et de la vitesse du vent.

RISE - Rotation and Interior Structure Experiment.

Une des deux antennes permettant de mesurer avec précision les variations de la durée du jour et d'orientation de l'axe de rotation de Mars pour déterminer la répartition des masses du globe.

Un des deux panneaux solaires. L'ensemble produit 200 à 700 W selon la luminosité et le dépôt de poussière.

SAF - A. Saliez
Source NASA/JPL-Caltech

SEIS - Seismic Experiment for Interior Structure (expérience sismique pour la structure intérieure). Ce sismomètre, d'une masse de 29,5 kg, est chargé de mesurer les infimes tremblements du sol martien engendrés par l'activité interne du globe de la planète ou les impacts de météorites. Le sismomètre est protégé du vent, des poussières et des variations brutales de température par une cloche de 69 cm de diamètre et de 35 cm de hauteur pour une masse de 12 kg.

Caméra de 120° de champ.

Capteur de pression.

Câbles d'alimentation, de pilotage et de réception des mesures.

Antenne UHF destinée à la communication.

Sonde de flux de chaleur. Ce mécanisme à percussion, équipé de capteurs de chaleur, s'enfonce jusqu'à cinq mètres dans le sol.

HP³ - Heat flow and Physical Properties Package (ensemble instrumental flux de chaleur et propriétés physiques). Développée par l'agence spatiale allemande DLR, cette expérience est destinée à mesurer la température du sous-sol, jusqu'à cinq mètres de profondeur, distance atteinte en moins de 30 jours.

L'EXPÉRIENCE SEIS

QUELS SONT

LES ENJEUX

SCIENTIFIQUES?

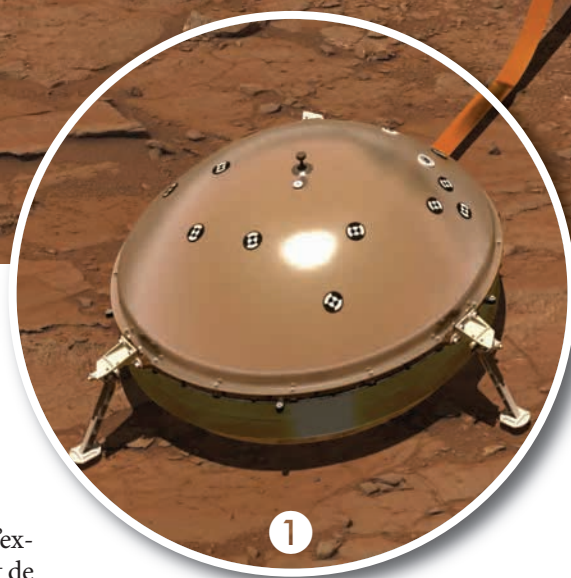
Les missions martiennes des vingt dernières années ont dressé de Mars l'image d'une ancienne, très ancienne, oasis de notre Système solaire, la seconde après la Terre.

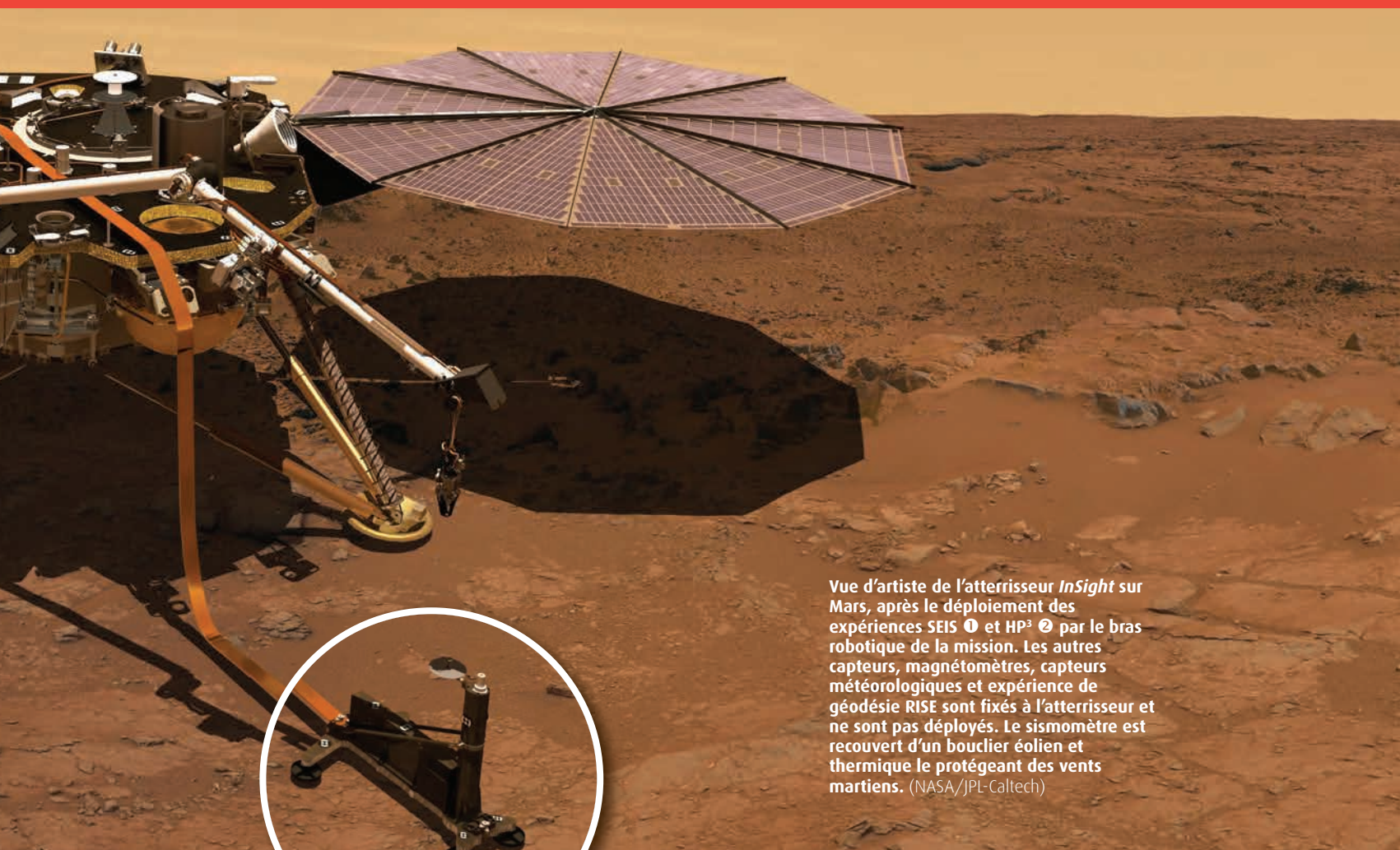
Rivières, lacs et peut-être océans y étaient présents, et une forte activité volcanique y régnait, propice au dégazage du manteau vers une atmosphère beaucoup plus dense qu'aujourd'hui et compatible avec la présence d'eau liquide stable à la surface. Mais cet équilibre s'est effondré il y a 3 à 4 milliards d'années. L'eau s'est transformée en glace dans le pergélisol ou dans les calottes polaires et à la surface ne subsistent que des rivières asséchées, des dépôts de sulfates ou, pour les terrains les plus anciens, d'argiles. Le tout surplombant une croûte basaltique qui garde encore la mémoire magnétique de la dynamo martienne. Pourquoi Mars a-t-elle perdu son habi-

tabilité et quelles sont les raisons de l'extinction de sa dynamo magnétique et de l'affaiblissement du volcanisme? Comment s'est-elle formée et quelle quantité d'énergie a-t-elle libérée lors de son accretion et de sa différenciation? La croûte basaltique de Mars recouvre-t-elle une croûte plus primitive extraite d'un océan de magma? Mars est-elle aujourd'hui encore tectoniquement active, comme le suggère la faible cratérisation des plus petites caldeiras de certains volcans ou de quelques coulées de lave sur ces édifices?

Les réponses à ces questions sont cachées dans la structure interne de la planète, et déterminer celle de Mars est un des enjeux majeurs de la planétologie comparée.

La taille du noyau nous donnera en effet l'état final de l'accrétion et de la différenciation de Mars, et ce surtout pour une deuxième planète tellurique du Système solaire, après la Terre. Il sera alors possible de comparer ce processus pour deux planètes telluriques situées à des distances différentes du Soleil et s'étant donc formées à des températures différentes dans la nébuleuse protoplanétaire de notre Système solaire. Cette comparaison sera d'autant plus complète que nous avons déjà des échantillons de la croûte martienne profonde avec les météorites martiennes trouvées sur Terre et dont la composition nous renseigne tout autant





Vue d'artiste de l'atterrisseur *InSight* sur Mars, après le déploiement des expériences SEIS ① et HP³ ② par le bras robotique de la mission. Les autres capteurs, magnétomètres, capteurs météorologiques et expérience de géodésie RISE sont fixés à l'atterrisseur et ne sont pas déployés. Le sismomètre est recouvert d'un bouclier éolien et thermique le protégeant des vents martiens. (NASA/JPL-Caltech)

sur la composition des réservoirs magmatiques du manteau martien que sur la dynamique et la chronologie de la différenciation du noyau. Le couplage de ces informations sismologiques, cosmochimiques et minéralogiques nous permettra alors d'estimer le rapport de masse entre fer et silicates dans la nébuleuse protoplanétaire de notre Système solaire et de mieux comparer les processus de formation des noyaux planétaires, pour deux objets de masse et de gravité différentes.

Mars, comme toutes les planètes telluriques, a été à l'origine chauffée par son accréation, il y a 4,5 milliards d'années, mais également par la suite par la désintégration des éléments radioactifs. Lorsqu'une planète ne peut pas évacuer sa chaleur interne par conduction thermique, son manteau s'anime de mouvements lents, appelés courants de convection. Localement, des réservoirs de magma peuvent alors apparaître par

fusion partielle du manteau, alimentant des remontées de magma à même de traverser la croûte vers la surface. La croûte ainsi formée transfère non seulement la chaleur vers la surface, mais aussi les éléments radioactifs du manteau, car ces derniers ont tendance à migrer vers le magma des réservoirs. L'épaisseur de la croûte et le flux de chaleur à sa surface sont donc des paramètres clefs de l'évolution du volcanisme planétaire et leurs mesures, des objectifs importants d'*InSight*.

Enfin, le manteau, par sa structure et sa température, contrôle la vigueur de la convection, avec le réchauffement ou le refroidissement des courants de convection lorsqu'ils traversent les discontinuités minéralogiques du manteau, associées à la transformation de la structure cristallographique de l'olivine (un minéral vert présent dans certaines roches volcaniques et prédominant dans le manteau) en des phases plus com-

pactes, puis enfin de sa décomposition en deux phases distinctes. Le noyau, par sa taille, pourrait donc tout simplement empêcher cette dernière discontinuité d'exister, car une pression d'au moins 20 GPa (soit 200 000 bars) lui est nécessaire, ce qui implique des noyaux d'un rayon inférieur à 1 750 km.

La détermination de la structure interne de Mars sera l'objectif de la mission *InSight* avec pour cela toute la panoplie ou presque des instruments géophysiques. L'instrument principal de la mission s'appelle SEIS, initiales de la traduction anglaise d'« Expérience Sismique de la Structure Interne ». Il s'agit donc logiquement d'un sismomètre très large bande, qui permettra d'enregistrer tout autant les ondes haute fréquence des petits séismes régionaux que les ondes de surface de 50 à 100 secondes de période, excitées par les séismes lointains de plus grande magnitude. À l'image de la Terre, où la sismologie permit à Richard D. Oldham de découvrir en 1906



1. La structure interne de Mars. De la surface au centre, on distingue la croûte en gris, le manteau rougeâtre et le noyau en jaune. Seul le noyau est liquide, constitué de fer enrichi en éléments légers. Un des objectifs d'*InSight* est de déterminer la profondeur des discontinuités entre la croûte et le manteau (le « moho » martien) et entre le manteau et le noyau. (NASA)

Le noyau liquide, puis à Andrija Mohorovicic de mettre au jour la discontinuité entre la croûte et le manteau en 1910, l'objectif des sismologues sera de retrouver dans les signaux sismiques enregistrés les ondes réfléchies par ces discontinuités ou bien de mettre en évidence dans le train des ondes de surface le ralentissement de ces dernières lorsque leur longueur d'onde les confine dans la croûte. Mais d'autres instruments géophysiques accompagneront SEIS. Le premier, HP³, est une taupe robotique à même de s'enfoncer dans le sol pour y déployer sur 5 mètres de longueur une succession de capteurs de température permettant de mesurer le flux de chaleur s'échappant de la planète. Une mesure jamais réalisée sur Mars et qui permettra non seulement de connaître le taux de refroidissement de la planète, mais aussi de prédire la profondeur où l'eau pourrait devenir liquide. RISE (initiales de la traduction anglaise d'« Expérience de Rotation et de Structure Interne ») déterminera avec précision la vitesse de précession et la variation de la durée du jour martien, et cherchera dans la rotation de Mars une

La détermination de la structure interne de Mars sera l'objectif de la mission *InSight*, avec, pour cela, toute la panoplie ou presque des instruments géophysiques.

petite nutation associée à la différence de rotation entre le noyau liquide et le manteau solide de la planète, et dont l'amplitude permettra une seconde détermination de la taille du noyau. Enfin, le dernier instrument fonctionnera de pair avec une des meilleures centrales météorologiques jamais déployées sur Mars et le magnétomètre 3 axes IFG, qui utilisera le champ magnétique externe de l'ionosphère martienne pour sonder la planète. Il sera ainsi possible de mesurer les variations de la conductivité électrique du manteau et de la croûte martienne, qu'elles soient associées à l'augmentation de température du manteau ou à la présence d'eau liquide dans la croûte.

Toutes ces méthodes ont fait leurs preuves sur Terre, mais dans des contextes de réseaux géophysiques ou météorologiques. Déployer un réseau sur Mars fut donc, ces vingt dernières années, l'objectif de plusieurs projets, depuis l'ambitieux réseau Nasa-Esa *Mesur-Marsnet* du début des années 1990, avec 16 stations américaines et quatre stations européennes jusqu'au projet franco-américain *Netlander* avec quatre stations. Tous se heurtèrent tant au coût qu'à la difficulté de lancer avec un seul lanceur plusieurs stations martiennes...

La mission *InSight*, avec une seule station, peut donc surprendre, d'autant que la sismologie dans son principe consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes. Pour cela, il faut tout autant mesurer les temps de propagation entre deux points que connaître la distance entre ces deux points. Comment le faire avec une seule station sismique ?

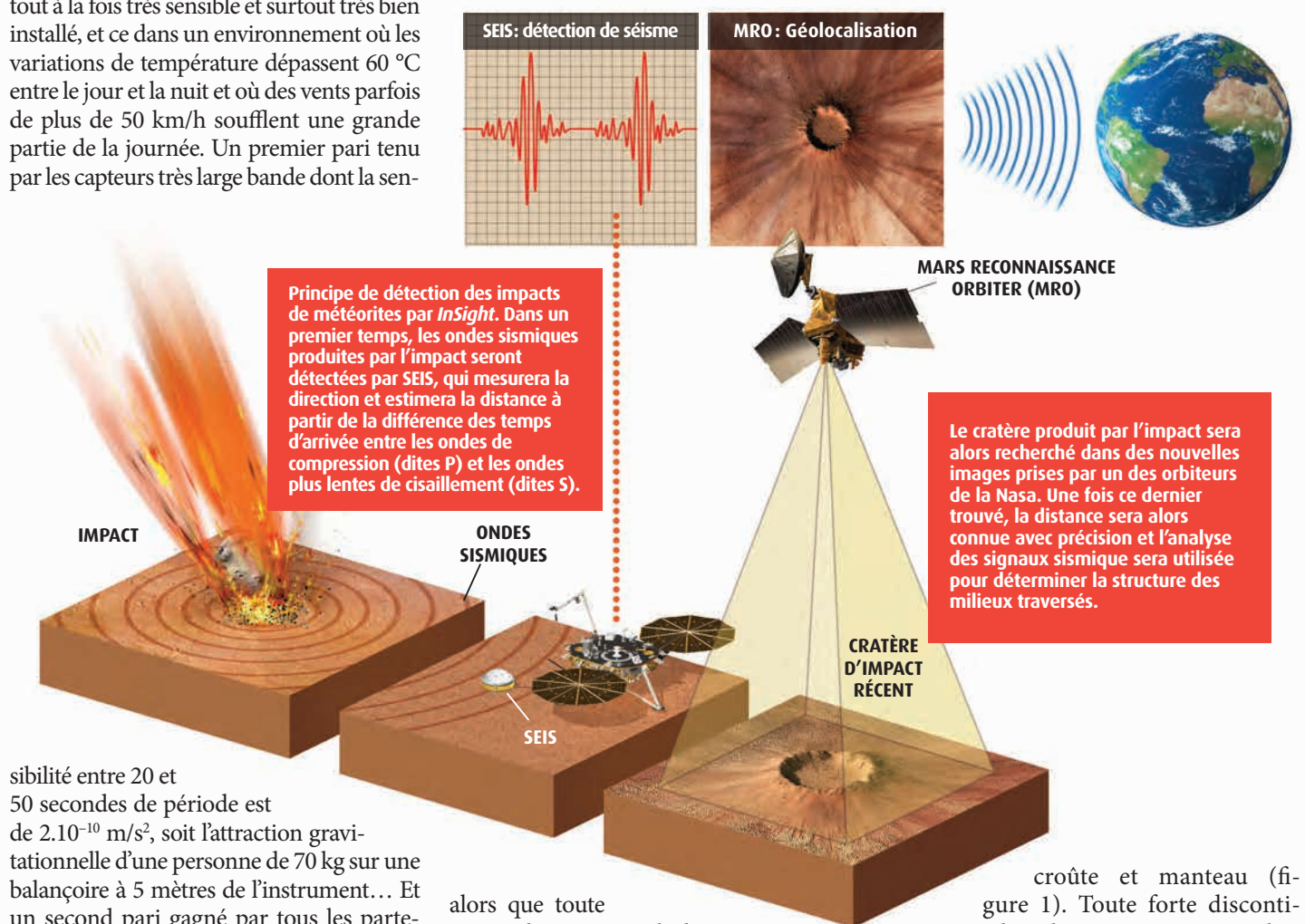
La première stratégie d'*InSight* sera basée sur la détection des ondes de surface. Ces dernières se propagent à la surface de la planète et sont, sur Terre, les ondes sismiques ayant les plus fortes amplitudes. L'objectif d'*InSight* sera donc de les détecter lors de leur premier passage, puis une seconde fois, après qu'elles auront fait un tour complet à la surface de la planète, à une vitesse de l'ordre de 3,5 km/s, soit donc environ 1 h 45 min plus tard. La mesure précise de leur vitesse pourra alors être faite et, avec le temps d'arrivée de l'onde de surface directe et indirecte, la position et le temps du séisme seront déterminés, permettant

alors l'interprétation des temps d'arrivée des ondes de volume P et S en termes de modèle interne. Simple dans le principe, cette approche est en fait un défi technologique de taille, en raison de la faible amplitude de l'onde de surface: pour un séisme distant de 90° et après les 20 000 km de propagation du tour supplémentaire, l'accélération du sol générée par les ondes de surface d'un séisme de magnitude 4,5 sera de quelques dixièmes... de milliardième de la gravité martienne...

Le sismomètre d'*InSight* doit donc être tout à la fois très sensible et surtout très bien installé, et ce dans un environnement où les variations de température dépassent 60 °C entre le jour et la nuit et où des vents parfois de plus de 50 km/h soufflent une grande partie de la journée. Un premier pari tenu par les capteurs très large bande dont la sen-

séismes de magnitude supérieure à 4,5 et donc potentiellement localisables par leurs ondes de surface. Quelques séismes par an pourraient dépasser une magnitude de 5, comme sur la Lune où le tiers des 27 séismes tectoniques détectés par le réseau Apollo en 7 ans dépassait cette magnitude 5. La localisation des séismes nous renseignera sur l'activité sismique contemporaine de la planète. Un refroidissement thermoélastique de la lithosphère se traduira ainsi par une activité sismique diffuse et globalement répartie,

être détectés pendant la durée de vie nominale d'*InSight*, soit de l'ordre de 5 par an. Mais tous ces impacts formeront des cratères d'une dizaine, parfois de quelques dizaines de mètres, facilement détectables par les imageurs des orbiteurs de la Nasa ou par ceux de l'Esa. Leur distance sera alors connue avec précision et les différences de temps d'arrivée entre l'onde P et les autres ondes sismiques permettront de déterminer la profondeur du moho martien, cette discontinuité entre



sibilité entre 20 et 50 secondes de période est de $2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$, soit l'attraction gravitationnelle d'une personne de 70 kg sur une balance à 5 mètres de l'instrument... Et un second pari gagné par tous les partenaires de l'expérience, qui fournirent le cocon dans lequel ces capteurs furent intégrés pour un maximum de protection puis couplés à leur électronique de contrôle et d'acquisition. Sur les 29 kg de l'instrument, plus de 20 kg sont ainsi utilisés pour le nivellement au sol des capteurs sismiques, leur protection thermique et éolienne et leur liaison électrique avec l'atterrisseur.

Au total, plusieurs dizaines de séismes sont espérés pendant les deux années terrestres de la mission nominale, donc 5 à 10

alors que toute accumulation régionale de la sismicité trahira l'existence de zones encore actives tectoniquement.

Mais le soin dans la première installation robotique d'un instrument sismologique sur une planète permettra aussi à *InSight* de détecter les ondes sismiques émises par des impacts de météorites, sources bien moins énergétiques que les séismes, mais qui elles aussi pourront être localisées avec précision (figure ci-dessus). Une dizaine uniquement pourraient

croûte et manteau (figure 1). Toute forte discontinuité dans la croûte, en particulier celle trahissant une ancienne croûte primaire, sera aussi détectée.

Décembre 2018 sera donc, pour tous les géophysiciens terrestres, le début de la découverte sismologique et géophysique d'une planète. Un beau cadeau pour le 60^e anniversaire de la fin de l'Année géophysique internationale et, avec les premiers résultats en 2019, un plus beau encore pour le 50^e anniversaire des débuts de la sismologie lunaire *Apollo*. ■

Jean-Yves Le Gall

Le président du Cnes a ouvert ses portes à *l'Astronomie*. Il nous éclaire sur la mission *Mars InSight*. Des propos recueillis par notre spécialiste **Gilles Dawidowicz**.

« On sait que Mars a été habitable. La question maintenant, c'est de savoir si Mars a été habitée. »

***l'Astronomie* : Pour commencer, quelle est la situation de la sonde InSight à quelques heures de son arrivée sur Mars ?**

J.-Y. Le Gall : La sonde est prête à se poser. Après un magnifique décollage de nuit depuis la base spatiale de Vandenberg (Californie) le 5 mai dernier et une croisière nominale de près de 7 mois, tous les instruments scientifiques à bord sont prêts à fonctionner. Le rôle de l'industrie française, et notamment de la société Sodern - une PME située en région parisienne - a été prépondérant dans cette réalisation. Maintenant, la sonde se prépare à entrer dans l'atmosphère de Mars à la vitesse prodigieuse de 5,9 km/s.

C'est une grande fierté pour le Cnes de fournir l'instrument principal de la mission, le sismomètre SEIS. Bien que le défi technologique ait été énorme et que les diverses équipes impliquées aient finalement réussi à résoudre des problèmes très complexes, avec le recul quel est votre regard sur ce programme audacieux dont l'origine date de 2010 ?

C'est en effet une grande fierté. La sonde *InSight* est la seule sonde partie vers Mars sur le créneau de 2018 ! Le fait que SEIS soit au cœur de la mission est une grande responsabilité pour nous. Concernant les problèmes passés, il faut comprendre que sur Mars, on a besoin de faire le vide absolu pour que cet instrument fonctionne. L'atmosphère de Mars a en effet deux particularités : elle est très ténue et elle est très agitée. Ce qui fait que les vents peuvent perturber le fonctionnement d'un sismomètre comme cela s'est produit à l'époque des sondes *Viking*, qui mesurèrent les courants d'air au lieu d'une éventuelle activité sismique. Il a donc fallu réaliser une sorte de cloche à fromage pour *InSight*, pour mettre l'instrument SEIS à l'abri du vent.

Comment le Cnes a-t-il défini cette mission, ses objectifs ?

Cette mission est très intéressante au point de vue de la science, car il faut tenter de comprendre pourquoi Mars a perdu son eau et la majeure partie de son atmosphère. De fil en aiguille, il convient donc de déterminer si le cœur de Mars est aujourd'hui solide ou encore liquide. Ces objectifs scientifiques considérables ont conduit à traiter des sujets industriels et technologiques innovants, tant les instruments requièrent de la sophistication et des mesures de précision.

Quel est le coût de la mission, côté français ?

Le coût est un peu inférieur à 100 millions d'euros. Cela valide notre stratégie de « niche » où l'on apporte des instruments d'exception grâce à l'excellence de notre communauté scientifique, au très haut



Cnes

niveau de technicité de nos laboratoires et à notre savoir-faire industriel de pointe. Seule la France en est capable actuellement. On peut donc espérer avoir des résultats scientifiques à un coût moindre que si l'on développait la sonde tout entière par nous-mêmes.

Etiez-vous à Vandenberg le 5 mai dernier pour le lancement ?

Oui, bien sûr. *InSight* a fait partie des lancements d'importance pour cette année et c'est la première fois que l'on a lancé une sonde vers Mars depuis cette base spatiale.

Vous attendez-vous à un succès médiatique équivalent ou supérieur à celui de la mission *Rosetta* ?

Je ne sais pas, mais le noyau de la comète Churyumov-Gerasimenko était tellement spectaculaire qu'il a suscité un engouement exceptionnel que personne n'imaginait. Il est clair que pour *InSight*, ce sera un peu différent.

Avez-vous déjà vécu « de près » de précédentes missions martiennes ? Si oui, lesquelles et quels souvenirs en tirez-vous ?

Oui, j'étais au lancement de *Mars Express* le 2 juin 2003 à Baïkonour. J'étais alors président de Starsem et d'Arianespace. J'en garde un souvenir extrêmement ému. À l'époque, on parlait assez peu de cette mission européenne. Et pourtant, quel succès ! J'ai suivi de près durant deux ans les sujets de mécanique céleste, car l'étage *Frégat* avait été développé spécialement pour ce tir vers Mars. L'injection vers la trajectoire martienne fut un moment très très fort. Plus récemment, il y a eu également l'atterrissage de *Curiosity* à la surface de Mars, le 6 août 2012, dans le cratère Gale.

Le Cnes poursuit sa forte implication dans l'exploration automatique de Mars, particulièrement aux côtés des Américains. Est-ce qu'*InSight* est un prolongement logique de la mission *Curiosity*, toujours en cours, et dans laquelle les équipes du Cnes à Toulouse sont particulièrement impliquées ?

Oui, mais c'est surtout la mission *Mars 2020* qui est un prolongement logique de *Curiosity*. C'est même son frère jumeau, mais très nettement

amélioré. Et en ce qui nous concerne, SuperCam va succéder à ChemCam. Il y aura peut-être aussi la possibilité d'embarquer à bord un drone pour voler dans l'atmosphère de Mars. Une mission spectaculaire !

À propos des Américains, ce sont eux qui ont rencontré le plus de succès sur Mars. Comment expliquer que les autres nations aient tant de difficultés à atteindre Mars ?

Il n'est pas simple de se mettre en orbite autour de Mars et c'est également très difficile de s'y poser. Il y a à ce jour seulement trois puissances spatiales qui ont réussi à s'y mettre correctement en orbite : les Américains, les Européens et les Indiens. Les Russes et les Chinois n'ont pas eu les succès escomptés. Quant aux atterrissages, seuls les Américains ont réussi la majeure partie de leurs entreprises malgré quelques échecs aussi, car l'atmosphère de Mars est très piègeuse, avec des zones non homogènes. L'Europe quant à elle, durant la descente de *Schiaparelli* le 19 octobre 2016, a accumulé beaucoup de données sur la structure de l'atmosphère, même si la fin de la descente s'est mal passée... Mais beaucoup de progrès ont été faits, notamment sur les technologies d'atterrissage, des rétrofusées aux airbags en passant par la grue volante de *Curiosity*, très sophistiquée.

La planète rouge fascine toujours autant. Peut-être même de plus en plus, au point de repenser les missions habitées d'ici à 2025-2030. Est-ce que le Cnes entend jouer un rôle majeur dans cette aventure historique ?

Bien sûr. Le Cnes possède aujourd'hui une expertise scientifique sur Mars unique en Europe : nous avons été les artisans de *Mars Express*, et dans le cadre de coopérations bilatérales avec les Américains et même avec les Indiens et les Japonais, nous avons de quoi travailler conjointement. Et le Cnes possède aussi de fortes compétences dans les vols habités, grâce aux programmes liés à la Station spatiale internationale et à l'ATV. Mais 2025-2030 me paraît un peu ambitieux : je vois plutôt la décennie 2030 pour les vols habités vers Mars.

Que pensez-vous des ambitions martiennes des pays tels que la Chine, l'Inde ou les Émirats arabes unis ?

Cela montre que Mars, c'est là où il faut être. Je suis frappé de voir qu'en 2020 il n'y aura pas moins de cinq missions vers la planète rouge ! *ExoMars* pour l'Europe et la Russie, *Mars 2020* avec les États-Unis, une mission chinoise présentée au président Macron le 9 janvier dernier, la mission indienne *Mangalyaan-2* et la mission émiratie *Hope*.



Mais pourquoi cet engouement ?

On sait que Mars a été habitable. La question maintenant, c'est de savoir si Mars a été habitée. Mars est en quelque sorte le Graal des astronomes et des exobiologistes qui iront en 2020 jusqu'à forer son sous-sol pour y chercher des traces de vie...

Une très grande mission internationale vous semble-t-elle utopique ?

Cela peut se faire aussi, comme on l'a vu à la dernière réunion de l'ISEF (International Space Exploration Forum). Il y a un travail d'importance à l'échelle internationale qui se met en place et la France est très bien placée. Aujourd'hui, le Cnes a noué des coopérations avec le monde entier et se positionne pour être la plateforme fédératrice des initiatives martiennes. Depuis quelques années, nous avons posé des jalons un peu partout dans ce sens. Pour le climat, nous sommes aujourd'hui l'agence spatiale de référence dans le monde. Il faut trouver des sujets où l'on peut être numéro un. On ne peut pas se contenter de regarder les autres faire la une des journaux. Dans l'exploration, il y a beaucoup à faire. C'est un enjeu essentiel pour la France et l'Europe. ■



**SEIS | QUELLE
AVENTURE!**

L'aventure, on ne sait jamais quand elle va vous tomber dessus ! Pour nous, elle a commencé en mai 2011, quand la Nasa a choisi 3 projets parmi les 29 propositions de petites missions planétaires soumises à l'appel à idées Discovery 12. Parmi les élues pour entrer dans une phase d'étude compétitive, *GEMS*, pour Geophysical Monitoring Station, une mission martienne proposée par Bruce Banerdt du Jet Propulsion Laboratory en Californie, avec comme instrument principal le sismomètre SEIS fourni par la France sous la responsabilité du Cnes, et conçu par une équipe pilotée par Philippe Lognonné de l'Institut de physique du globe de Paris.

Quinze mois de suspense et de travail acharné plus tard, en août 2012, appel téléphonique de la Nasa : il ne restait plus qu'un projet, et c'était le nôtre ! Ce projet, qui a été rebaptisé *Insight*, pour Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport, est maintenant prêt à se poser sur Mars. Entre mai 2011 et novembre 2018, entre la première sélection et l'arrivée, nous aurons donc vécu durant sept ans une extraordinaire aventure aussi bien technologique qu'humaine.

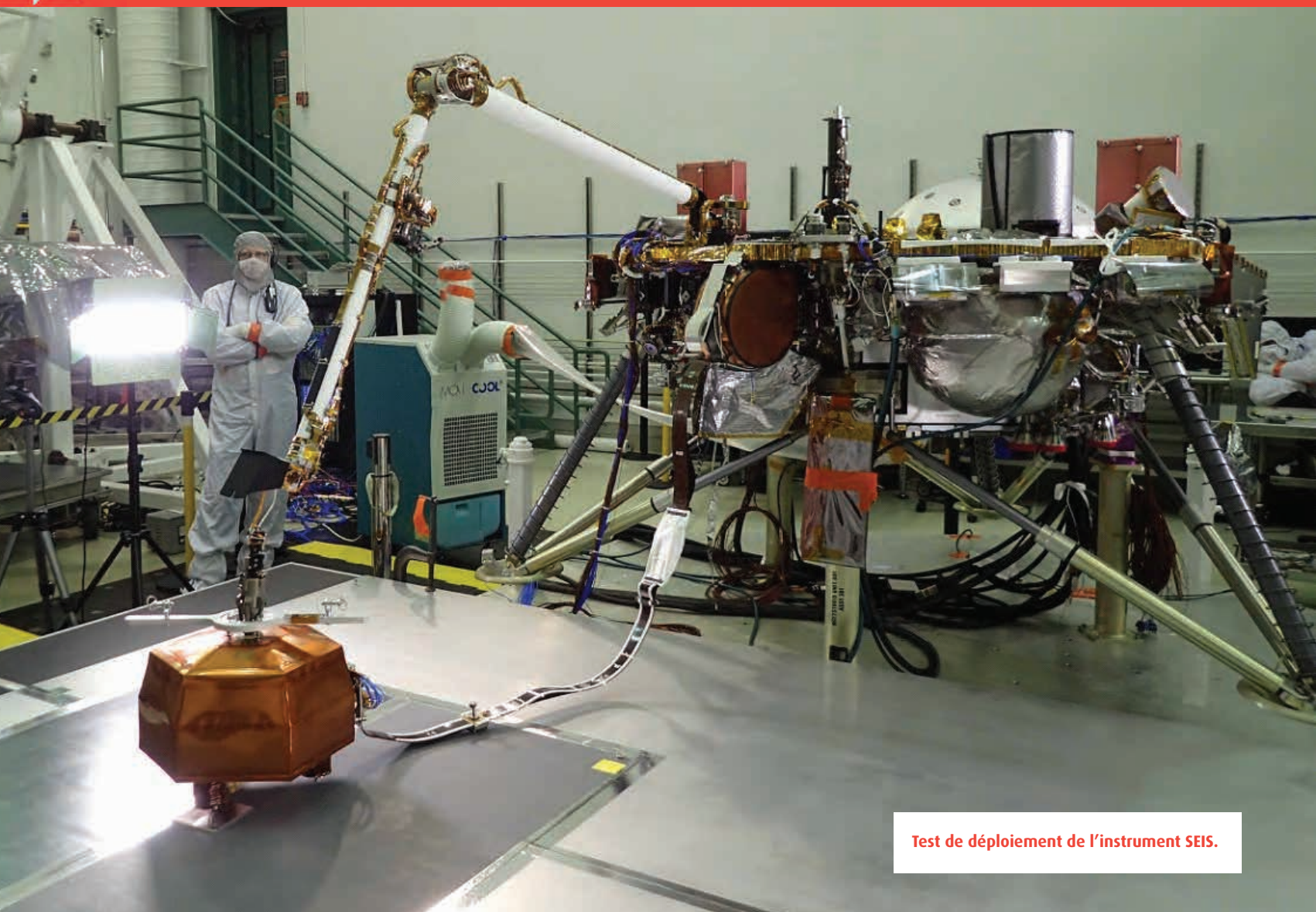
UNE AVENTURE TECHNOLOGIQUE

Pour étudier l'intérieur d'une planète, tous les scientifiques en sont d'accord : un réseau de sismomètres, c'est vraiment l'idéal. Si l'on n'a pas les moyens de déployer un réseau, on peut déjà apprendre

énormément de choses avec un seul sismomètre, à condition qu'il soit très sensible, comme SEIS, qui est capable de détecter des déplacements de la taille d'un atome. Mais du point de vue d'un ingénieur spatial, c'est un défi. Aucun sismomètre terrestre avec de telles performances ne survivra jamais à un tir dans l'espace, ni aux conditions de fonctionnement sur Mars. Des vibrations destructrices pendant le décollage, un voyage de plus de six mois avec des températures variant du glacial au torride (-35°C à $+40^{\circ}\text{C}$) des chocs de milliers de g pendant la phase d'atterrissage, puis une fois sur Mars deux ans au moins d'écoute sismique qui verront la température de l'instrument varier de -60°C à -5°C . À ces températures, les graisses et lubrifiants durcissent, les mécanismes se grippent, les composants électroniques ne sont pas garantis par leurs constructeurs. Quiconque a déjà essayé d'utiliser

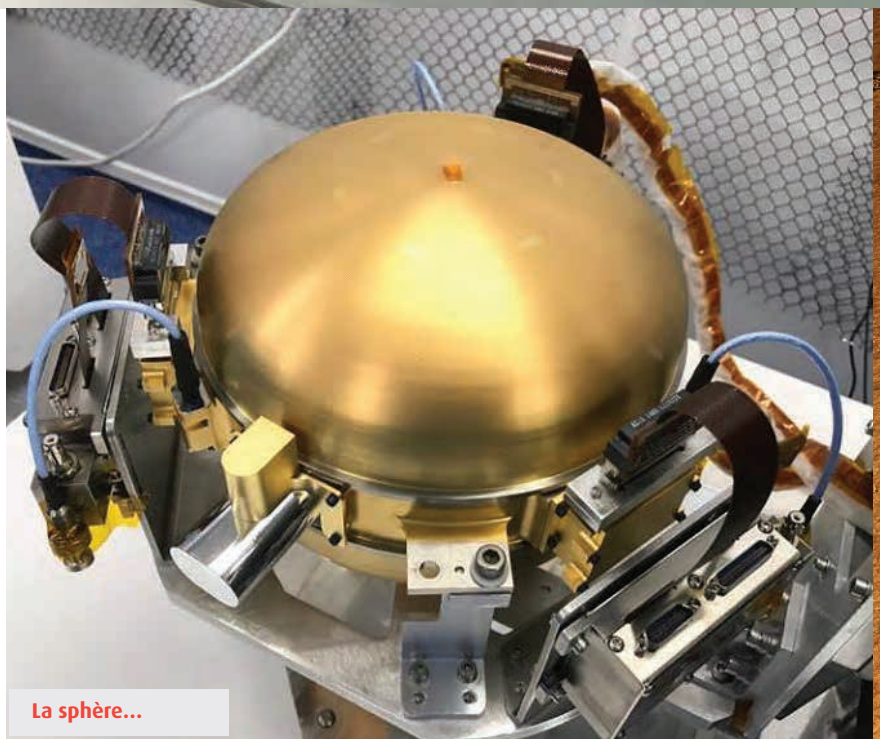
un appareil de haute technologie par grand froid le sait bien : les téléobjectifs des appareils photo se grippent, les smartphones s'arrêtent au bout de quelques minutes... Il faut donc sélectionner des composants spéciaux et les soumettre à toutes sortes de tests pour les pousser dans leurs retranchements. Il faut construire des séries de maquettes de plus en plus réalistes pour tester tous les éléments de l'instrument, puis l'instrument complet, et ainsi vérifier qu'il peut survivre à ces violents traitements.

Ce n'est pas tout, car les trois « axes », les sismomètres individuels, qui sont au cœur de l'instrument SEIS doivent être protégés des conditions martiennes et sont donc placés, on pourrait même dire très tassés, dans une sphère composée de deux demi-coques en titane dans laquelle on fait un vide inférieur à 10^{-5} mbar, équivalent à la pression des



hautes couches de l'ionosphère à 120 km d'altitude sur Terre. Mais pour alimenter et piloter les détecteurs, ainsi que pour recevoir les mesures, il faut bien avoir des passages à travers la sphère : dans notre cas, trois connecteurs de la taille d'une pièce de 20 centimes d'euro, avec chacun pas moins de 37 fils électriques qui traversent plusieurs matériaux différents, et qui réagissent donc de manière différente aux variations de température. D'où d'innombrables problèmes d'étanchéité et de fuites, apparaissant essentiellement à froid, et qu'il a fallu résoudre. Car dans l'espace, si on ne prend pas de mesures adéquates, tout ce qui peut casser ou fuiter casse ou fuit à un moment ou un autre.

Pour pimenter l'affaire, comme les trois axes sont très sensibles à la présence de la moindre particule de poussière,



l'instrument doit être assemblé dans une salle spéciale, ultra-propre, garantissant moins de 10 000 particules de taille supérieure à 5 micromètres par mètre cube, soit vingt fois moins que l'épaisseur d'un cheveu.

Enfin, poser un instrument sur le sol de Mars implique de suivre des règles spécifiques dites de protection planétaire, pour limiter la pollution de la planète par des germes et bactéries terrestres. Cela implique en particulier des nettoyages et des prélèvements réguliers sur toutes les surfaces de l'instrument pour garder sous contrôle le niveau de contamination microbiologique.

Et tout cela dans un planning très tendu. La date de tir ne recule jamais. En effet, avec les fusées actuelles, on ne peut partir de la Terre vers Mars que dans certaines configurations plus favorables, qui se produisent tous les 26 mois et durent quelques semaines : ce sont les créneaux de lancement. Si on rate le créneau, cela coûte extrêmement cher de reporter le tir au créneau suivant. La mission avait été sélectionnée sur la base d'un lancement en mars 2016, qui s'est avéré intenable et auquel il a fallu renoncer en

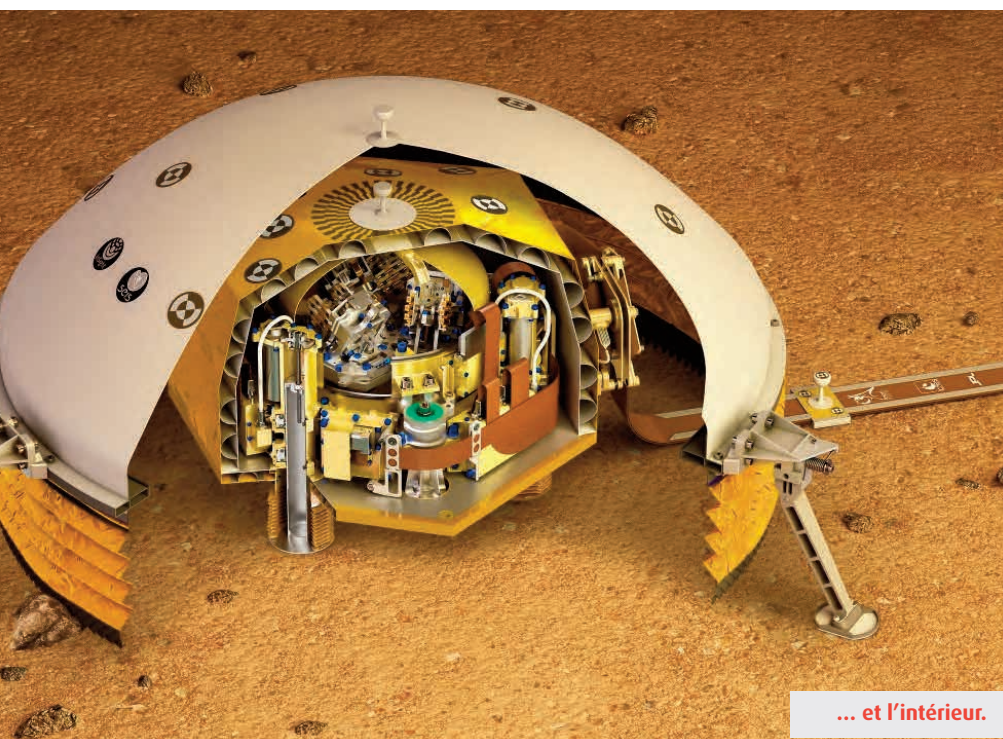
décembre 2015. Quoi qu'il en soit, dès qu'une difficulté survient, il faut la résoudre, si possible sans prendre de retard. Or, les questions qui se posent chaque jour concernent un système totalement nouveau, jamais réalisé auparavant, et les réponses ne sont jamais simples. Chacune peut avoir des conséquences insoupçonnées, qui ne se révéleront que plus tard, tant les interfaces entre tous les sous-systèmes et les partenaires sont riches et complexes. Avec en finalité une performance scientifique qui doit être préservée à tout prix ! Chaque jour, des décisions difficiles remontaient au chef de projet. Il avait au maximum quelques heures pour consulter les experts et faire le bon choix, et ensuite assumer la responsabilité de la prise de risque immanquablement associée.

UNE AVENTURE HUMAINE

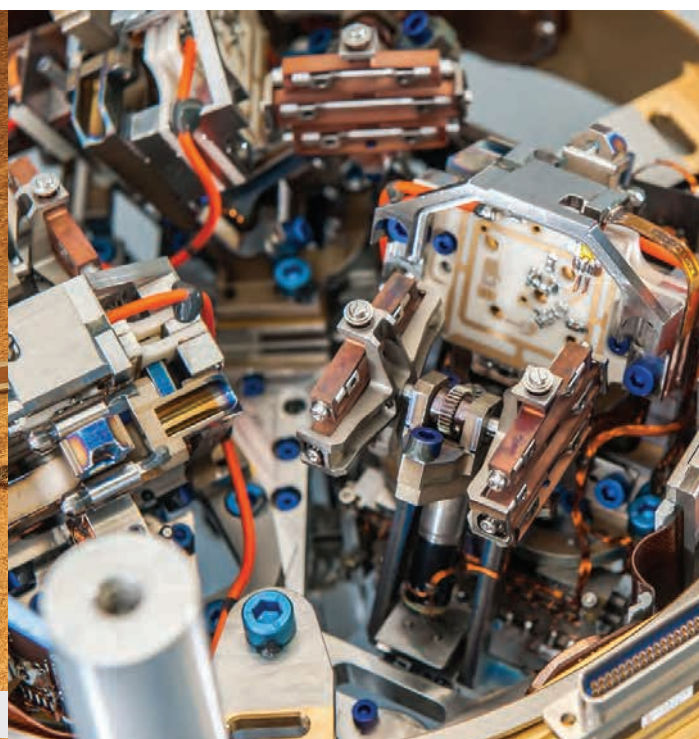
Cinq pays, quatre monnaies, quatre langues... Il faut se comprendre entre Terriens avant d'espérer aller sur Mars ! Des milliers de mails, des centaines de conférences téléphoniques et de vidéo-conférences, des gigaoctets de comptes rendus et de documents... Mais en réalité, rien ne remplace les rencontres,

surtout quand on n'a pas le droit à l'erreur parce que le temps est compté. On n'a pas le temps de mal se comprendre ! Les différences de cultures pimentent les discussions et les approches quand on élabore une stratégie devant une difficulté à surmonter, et le décalage de 9 heures avec la Californie n'arrange rien : 17 h à Toulouse, c'est 8 h du matin au JPL. D'où de très nombreux voyages non seulement en Europe, mais aussi en Californie, au Jet Propulsion Laboratory à Pasadena, et à Denver dans le Colorado, où l'industriel Lockheed Martin, responsable de la construction d'*Insight*, est basé...

Entre contributeurs au projet, tout se base sur la confiance, car chacun réalise sa partie sur les financements de son pays : il n'y a pas d'échange de fonds. Le boîtier électronique a donc été financé par les contribuables suisses et réalisé à Neuchâtel, le sismomètre basse fréquence, cœur de l'instrument, par les Français à Limeil-Brevannes et Paris, le sismomètre haute fréquence par les Anglais à Oxford et Londres, le câble qui relie l'instrument à l'atterrisseur a été confié aux Américains à Pasadena, le système qui permet de poser SEIS à plat



... et l'intérieur.





DATES CLÉS

6 mai 2011:
présélection de *GEMS*

20 août 2012 :
sélection d'*InSight*

5 mai 2018:
lancement

26 novembre 2018:
atterrissage sur Mars

sur le sol de Mars aux Allemands à Göttingen... Chacun fournit donc un élément de l'instrument et c'est au Cnes, maître d'œuvre de SEIS et responsable du bon fonctionnement de l'instrument vis-à-vis de la Nasa, de faire vivre ce consortium complexe, d'assembler le puzzle en temps et en heure, et enfin de le tester. Un rôle qui implique souvent de rappeler aux partenaires qu'il faut tenir le calendrier... fermement mais courtoisement.

Côté France, SEIS est le fruit d'une collaboration entre l'agence spatiale nationale, le Cnes, le laboratoire scientifique IPGP (Institut de physique du globe de Paris) qui dépend du CNRS et de l'université Sorbonne-Paris-Cité, et des industriels au premier rang desquels la société Sodern, filiale d'Ariane Group et spécialisée dans l'optronique et la neutronique. Se sont ainsi confrontées, parfois vigoureusement, la vision des chercheurs et celle des ingénieurs : car si l'IPGP savait tout des sismomètres terrestres, il avait peu l'expérience du spatial et de ses contraintes ; à l'inverse, le Cnes n'avait aucune expérience de ce type d'instrument. Ce sont là aussi des modes de fonctionnement et des approches complémentaires avec lesquels il a fallu composer.

Au plus fort de l'activité, pas loin de 200 personnes travaillaient en France sur ce projet, dont 120 au Cnes, avec une vaste palette de compétences et d'expériences : management de projet, mécanique, électronique, thermique, avionique, spécialistes de la qualité qui contrôlent la bonne mise en œuvre des procédures.

Une telle pression du planning pour un tel défi technologique a mis les femmes et les hommes à rude épreuve sans discontinuer pendant sept années. Les familles des membres du projet se souviendront longtemps des hauts et des bas de SEIS, « bas » qui avaient une forte tendance à se produire aux alentours des fêtes de fin d'année ! Au-delà des équations, de la technologie, des problèmes budgétaires, ce sont les hommes et les femmes qui ont transformé ce projet en réalité.

La sélection d'*InSight* en 2011 n'était donc que le début d'une aventure de sept ans. Un vrai *cliffhanger*, avec crises, coups d'adrénaline, revers de fortune, situations qui semblent sans issue, et un *happy end* à la fin. Mais pour *InSight* et SEIS et les équipes de chercheurs et d'ingénieurs, le *happy end* est le début d'une nouvelle « saison » : l'aventure continue. D'abord, un lancement et quelque 485 millions de kilomètres à parcourir. Et puis deux ans au minimum d'opérations sur Mars... pour enfin prendre le pouls de la planète rouge. ■

NOUVEAU **UN PLANÉTARIUM** **DERNIÈRE GÉNÉRATION !**

PARTEZ    LA DÉCOUVERTE
DES ÉTOILES ET DES GALAXIES
DANS L'UN DES PLUS PERFORMANTS
PLANÉTARIUMS DU MONDE !

Le Planétarium de la Cité de l'espace se dote d'un nouveau simulateur astronomique très haute définition (vidéo 8K) pour des spectacles astronomiques    360  . Unique en France, il est équipé de **boitiers de vote** sur chacun des sièges, pour **plus d'interactivité avec le public**. Le d  me flambant neuf permet également une **qualité d'image inégalée** jusqu'ici : voyagez aux confins du cosmos à la Cité de l'espace !



Découvrez notre programmation
sur **www.cite-espace.com**



Isabelle Savin de Larclause, responsable VBB (CNES)

Je suis arrivée sur la mission *InSight* en mai 2016 pour suivre le développement des sismomètres et les activités de la sphère chez Sodern, et le tout sans phase d'acclimatation ! J'ai découvert un univers où tout m'était nouveau : la thématique, les équipes, ce mode de fonctionnement en équipe intégrée et multiculturelle et le train allait vite, très vite ! Passées ces quelques semaines d'apnée, un équilibre et un rythme se sont établis. Lundi matin, réveil à 4h40, petit-déjeuner à l'aéroport, croiser à nouveau ces mêmes visages, congénères esseulés de transhumance hebdomadaire, embarquement à 6h, 1h15 de prolongation de nuit, et arrivée à 7h45. Il fait décidément froid là-haut habillée en sudiste, j'ai oublié ce décalage climatique. 40 minutes d'A86 à rêvasser d'un monde un peu moins gris, 8h45, « *bonjour Sodern* », c'est parti pour trois à cinq jours. Humainement, j'ai énormément appris, l'intérêt du multiculturalisme, l'art de la médiation, l'importance de la solidarité, mais aussi la résilience face aux échecs, la persévérance, car le stress, le doute m'ont souvent accompagnée.

Michel Nonon, architecte spatial système sol (CNES)

Mi 2012, la mission *InSight* et le projet de sismomètre SEIS sont sélectionnés par la Nasa ; je rejoins l'équipe du Cnes pour une aventure humaine et technique mouvementée et passionnante. Pendant six années, je vais accomplir ce travail d'ingénieur qui m'est cher : définition, tests de la commande et du contrôle de l'instrument SEIS, essais du système complet (instrument, atterrisseur, centre de mission, centres d'analyse des données...) et préparation des opérations. Le planning de cette coopération internationale est serré et rythmé par de nombreuses missions en Europe, aux États-Unis et des téléconférences hebdomadaires en fin de journée pour se mettre au rythme des Américains du centre de Denver au Colorado ou de la côte ouest à Pasadena en Californie. Lorsqu'enfin SEIS est achevé et livré, je vis alors l'un de mes meilleurs moments sur ce projet. Je me retrouve à côté de SEIS et d'*InSight* qui sont connectés dans la salle blanche d'assemblage et de tests à Denver et je réalise que c'est la dernière fois que je les vois et qu'ils vont se poser sur Mars. Je suis très ému !



Sylvain Tillier, ingénieur mécanicien en instrumentation scientifique spatiale (CNRS)



Je suis impliqué sur *InSight* depuis le tout début, en 2010, et même avant, étant donné que les projets précédents, conduits dans notre laboratoire (équipe de planétologie de sciences spatiales de l'IPGP), ont servi de tremplin à cette mission. Mon rôle a été d'une part de concevoir et de développer des sous-systèmes mécaniques pour les capteurs sismiques VBB (très large bande), comme le dispositif qui leur permet d'être très peu sensibles aux variations thermiques parasites rencontrées sur Mars et, d'autre part, de garantir la conformité de ces oscillateurs mécaniques ultra-sensibles vis-à-vis des performances attendues pour satisfaire les objectifs de la mission. Mon métier me permet de satisfaire un vif intérêt, ainsi qu'un émerveillement profond, pour les missions d'exploration spatiale qui bousculent sans cesse l'imagination. Le décollage de la fusée a été pour moi un moment fort, qui a marqué l'aboutissement de longues années de travail passionnées. Ce fut aussi la satisfaction de voir qu'à force de persévérance, les nombreuses difficultés et échecs rencontrés, notamment la fuite de 2015 qui a entraîné le report de la mission, ont finalement pu être surmontés.

Catherine Delelis, Responsable technique (Sodern)

De 2014 jusqu'à la livraison du cœur du sismomètre au Cnes en 2017, je fus la responsable technique du projet SEIS chez Sodern. Mon rôle était de garantir le respect des exigences inhérentes à la mission. Pour moi, ce fut l'aboutissement d'années de travail sur différents modèles de sismomètres spatiaux, et je suis très fière d'avoir contribué à la mission *InSight* ! Mon meilleur souvenir remonte à 2017. Nous venions de sceller la sphère étanche dans laquelle se trouvent les trois capteurs sismiques : une opération critique, car à ce stade, nous avions atteint un point de non-retour : si cette opération avait échoué, tout aurait été à refaire. Nous avons donc réalisé un test avec l'Institut de physique du globe de Paris afin de vérifier que les signaux émis par les capteurs étaient toujours nominaux. Dès qu'il est apparu que tout était normal, ce fut un immense soulagement pour toute l'équipe, et le couronnement d'années de travail en commun !



David Demazeux, câbleur-intégrateur (Sodern)

J'ai rejoint le projet SEIS chez Sodern en 2014 en tant que câbleur-intégrateur. Le cœur des capteurs sismiques est constitué de pivots qui convertissent les vibrations détectées en signaux électriques, lesquels constituent le signal utilisé pour la mesure. Ces signaux électriques empruntent des fils de cuivre émaillé dont le diamètre est à peine supérieur à celui d'un cheveu humain. Mon rôle était de braser ces fils à 280 °C sur le cœur du sismomètre. Comme le cuivre se déforme à la chaleur, je devais souder chaque fil en moins d'une seconde, ce qui était un vrai challenge puisque le câblage devait être parfait pour garantir une tenue mécanique suffisante lors du transfert spatial. Après chaque brasure, nous retirions la moindre particule parasite, au micromètre près. Je garde en particulier un excellent souvenir de ma collaboration avec un ingénieur du Jet Propulsion Laboratory (centre de recherche de la Nasa), qui était totalement passionné par cette aventure, au point de travailler tous les week-ends. Son engouement était communicatif !



Mélanie Drilleau, ingénieure de recherche (CNRS)

Depuis déjà quatre ans, je travaille sur la mission *InSight*. Mon activité principale consiste à développer des algorithmes pour contraindre la structure interne de Mars à partir des données enregistrées par le sismomètre SEIS. Je me suis toujours posé beaucoup de questions sur la formation de l'Univers, des planètes, de nos origines... Et aujourd'hui, mon orientation professionnelle me paraît évidente. Pourtant, j'avoue avoir longtemps hésité entre des études scientifiques et littéraires. Jusqu'à présent, pour moi, le moment le plus émouvant de la mission a été la confirmation du succès du lancement le 5 mai 2018. Toute l'équipe, réunie pour l'occasion sur la base spatiale de Vandenberg en Californie, était extrêmement émue de voir tous nos efforts se concrétiser enfin. Aujourd'hui, j'avoue être très impatiente de pouvoir analyser les premières données sismologiques martiennes et de découvrir ce que nous pourrions en déduire concernant la structure interne de Mars.

Clément Perrin, sismo-tectonicien (IPGP)

Chercheur postdoctoral à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), j'ai eu l'opportunité d'être intégré au projet *InSight* il y a un peu plus d'un an pour étudier les sources sismiques potentielles générées par les failles martiennes. Pour cela, j'utilise l'imagerie satellitaire exceptionnelle disponible sur Mars afin de cartographier ces structures majeures. Je combinerai par la suite ces données avec les signaux enregistrés par le sismomètre SEIS afin de mieux caractériser l'activité sismique de la planète. Arrivé récemment dans les sciences spatiales, j'ai d'abord reçu une formation universitaire en géologie et géophysique. *InSight* est pour moi une occasion unique de participer à une mission spatiale, mais aussi d'élargir mon champ d'étude sur les mécanismes de déformation de la partie la plus superficielle des planètes telluriques. Mon souvenir le plus marquant a été le lancement de la fusée, en particulier pour ce moment de partage et d'émotion entre toutes les personnes ayant contribué au projet.



Lucile Fayon, ingénieure de recherche (IPGP)

Je travaille sur *InSight* depuis quatre ans, dont trois dans le cadre de ma thèse de doctorat. Mon travail de thèse a consisté à développer un modèle numérique et mécanique du sismomètre SEIS pour modéliser les résonances du système de nivellement. Ce modèle permettra d'identifier les signaux parasites et de contraindre les propriétés de la surface et du sous-sol martien. J'ai aussi commencé à développer un nouveau type de capteur de déplacement ultra-sensible pour de futurs sismomètres planétaires. L'espace m'a toujours passionnée et tout au long de mes études, j'ai tenté de rejoindre ce domaine. La recherche est une évidence pour moi, puisqu'elle permet d'améliorer les connaissances de l'humanité sur le monde qui nous entoure. Je n'ai pas trouvé de métier qui me paraissait plus noble que celui-ci. Mon travail sur *InSight* m'a déjà procuré plusieurs moments marquants comme les nuits passées à tester les capteurs, le stress engendré par le report de la mission, ou encore le lancement. Mais je pense cependant que le plus beau reste à venir : l'atterrissage, le réveil de SEIS et l'acquisition des premières données venant de Mars, sur lesquelles je pourrai travailler.

UNE VISION NOUVELLE DE L'ATMOSPHÈRE DE MARS

La mission *InSight* du programme Discovery de la Nasa doit avant tout explorer la structure interne de Mars, mais étudier sa météorologie est également au programme.

La mission *InSight* du programme Discovery de la Nasa est la première mission planétaire à faire d'un sismomètre (SEIS, instrument français) son instrument principal. *InSight* doit explorer la structure et l'activité de l'intérieur de Mars, dans l'espoir de reconstituer l'histoire de sa formation et de découvrir son activité sismique actuelle. En apparence, étudier la météorologie de Mars n'est pas le but premier de la mission *InSight*.

À la fin des années 1970, les atterrisseurs *Viking* se sont posés à la surface de Mars et ont permis, grâce à leurs instruments météorologiques, de découvrir depuis la surface l'activité de l'atmosphère de Mars en deux endroits distincts de la planète. Le but principal des missions *Viking* était d'explorer l'environnement martien et son habitabilité. En complé-

ment, à titre purement expérimental, les sondes *Viking* embarquaient un sismomètre. L'analyse s'est révélée difficile : les sismomètres *Viking* ont surtout enregistré une forte contribution atmosphérique au signal sismique.

ATMOSPHÈRE ET BRUIT SISMIQUE CAPTURÉ PAR INSIGHT

Les capteurs météorologiques sont en fait une composante essentielle au succès de la mission *InSight*. Pourquoi ? L'échec relatif des mesures *Viking* nous renseigne par l'exemple. À moins d'enterrer complètement un sismomètre dans le sous-sol martien, ce qui requerrait une instrumentation d'une masse bien supérieure à ce que l'on peut acheminer sur Mars à l'heure actuelle, toute expérience géophysique sur Mars doit composer avec le signal sismique indésirable excité par l'atmosphère. Les variations de tem-

pérature atmosphérique augmentent le niveau de bruit du sismomètre, le vent qui souffle fait vibrer la sonde *InSight* sur la surface de Mars, causant des ondes sismiques capturées par le sismomètre, et les variations de pression atmosphérique exercent des forces qui déforment la surface, donc provoquent également des perturbations sismiques. Les variations dues à la turbulence atmosphérique, qui se développent sur des échelles de temps inférieures à la minute, sont les plus à même de causer du bruit sismique atmosphérique.

La première stratégie d'*InSight* pour limiter ces perturbations indésirables de l'atmosphère est de recouvrir le sismomètre d'une cape rigide protectrice. La seconde stratégie est de déterminer de la manière la plus précise et complète possible les variations de l'atmosphère afin d'évaluer le bruit sismique qu'elles créent

* Maître de conférences à Sorbonne Université (faculté des sciences) à Paris |
chercheur au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) / Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL).

An artist's rendering of the InSight Mars lander on the surface of Mars. The lander is in the lower right foreground, with its solar panels and instruments visible. In the background, a massive, towering dust devil (dust devil) rises from the horizon, its base near the lander. The sky is a hazy, orange-brown color, and a small, bright sun is visible in the upper center of the dust devil's column. The overall scene depicts a typical Martian morning environment.

La vitesse du vent
peut varier très vite
sur Mars, causant un
soulèvement de fines
particules à sa surface,
les *dust devils*.

Vue d'artiste de la station *InSight* dans un environnement typique d'une matinée sur Mars, avec un *dust devil* passant à proximité. Reproduction d'un dessin original de l'artiste Manchou, utilisé avec permission. (IPGP/Manchou/Bureau 21)

et de nettoyer, autant que faire se peut, le signal sismique mesuré à la surface de Mars de l'indésirable signal atmosphérique. Cette technique porte le nom de décorrélation de pression et nécessite des mesures de la pression atmosphérique de fine précision et haute fréquence (20 mesures par seconde). Le capteur de pression embarqué sur *InSight* possède donc des caractéristiques inédites par rapport aux capteurs de pression précédemment envoyés sur Mars. Il est de plus associé à deux capteurs de température et de vents (nommés TWINS) qui vont sonder l'activité atmosphérique en continu pour évaluer les périodes (au cours de la journée, au cours de l'année) pendant lesquelles il est opportun de réaliser les meilleures mesures sismiques.

InSight est donc autant une station géophysique qu'une station météorologique. Pour faire des mesures sismiques révélant la structure et l'activité interne de Mars, il faut d'abord nettoyer ces mesures du bruit atmosphérique, comme l'on nettoierait une frise de cathédrale couverte de boue pour en apprécier tous les détails. Est-ce là la seule utilité des capteurs météorologiques d'*InSight*? Évidemment

non. On peut prendre la boue et en faire de l'or, comme disait Charles Baudelaire.

EXPLORER L'ATMOSPHÈRE DE MARS AVEC INSIGHT

Plusieurs capteurs météorologiques, mesurant pression, vents, température, ont été embarqués sur des robots à la surface de Mars (*Viking*, *Pathfinder*, *Phoenix*, *Curiosity*) répartis dans plusieurs régions caractéristiques de la planète rouge. Ces mesures météorologiques passées ont été d'une importance capitale pour comprendre à la fois le climat de Mars et son cycle des poussières, de l'eau et du dioxyde de carbone. L'analyse de la météorologie depuis la surface est parfaitement complémentaire des observations spatiales depuis l'orbite de Mars. Une station météorologique à la surface de Mars est une excellente méthode pour obtenir des séries temporelles complètes de pression, température, vents, ce dont les orbiteurs sont incapables. En contrepartie, les orbiteurs donnent un contexte global et régional aux mesures d'un atterrisseur ne donnant accès qu'à une seule région très localisée de la planète.

Pour interpréter les mesures sismiques, il est nécessaire d'observer en continu l'atmosphère, ce qui est un des grands atouts d'*InSight* par rapport aux précédentes mesures météorologiques à la surface de Mars, qui avaient toutes des trous dans la couverture temporelle pour des raisons diverses et variées. En pratique, *InSight* va donc permettre de manière inédite de sui-

vre au cours des saisons les variations de vent, température et pression créées par les circulations à grande échelle dans l'atmosphère de Mars: cellules de Hadley (courants lents faisant circuler chaleur et espèces chimiques d'un hémisphère à l'autre), ondes atmosphériques planétaires, cycle de condensation/sublimation du CO₂ atmosphérique en des calottes saisonnières. À tout moment pendant la mission, s'il survient un phénomène d'ampleur, telle une tempête de poussière très étendue, *InSight* pourra enregistrer tous les soubresauts atmosphériques associés à ce phénomène. Équipé de caméras couleurs, l'atterrisseur *InSight* permettra également un suivi de l'activité dans l'atmosphère dans la région de son site d'atterrissage: charge en poussières dans l'atmosphère, présence de nuages de glace d'eau, brouillard matinal, évolution des dépôts de poussières à la surface sous l'effet de l'érosion éolienne.

InSight sera en fait un complément très intéressant de la mission *Curiosity*, qui possède des capteurs de vents et de température similaires à ceux d'*InSight*. Le rover *Curiosity* est situé à seulement 400 km au sud du site d'atterrissage d'*InSight*, donc le contexte météorologique de grande échelle est similaire entre les deux missions. En revanche, *Curiosity* fait des acquisitions météorologiques à l'intérieur du cratère Gale, où l'influence régionale de la topographie sur les vents est considérable. Comparer les mesures des deux missions permettra donc, via

Plusieurs capteurs météorologiques ont été embarqués sur les robots répartis à la surface de Mars, dans plusieurs régions de la planète.

InSight, de mieux évaluer le contexte atmosphérique global dans lequel elles se trouvent toutes les deux; et, en négatif, d'expliquer les nombreux phénomènes météorologiques associés à la topographie dans les mesures de *Curiosity*.

Une autre caractéristique intéressante des mesures météorologiques d'*InSight* est l'acquisition haute fréquence. Le capteur de pression est de ce point de vue particulièrement performant, et il en est également de même dans une moindre mesure pour les capteurs de vent et de température. *InSight* sera donc particulièrement bien équipé pour évaluer la variabilité rapide, turbulente de l'atmosphère proche de la surface de Mars. *InSight* pourra enregistrer avec précision les nombreux tourbillons et cellules convectives qui passent au cours de la journée, lorsque le sol chauffé par le Soleil provoque des instabilités convectives à proximité de la surface. La vitesse du vent peut y varier très vite, provoquant un soulèvement des fines particules de poussière de la surface vers l'atmosphère. Lorsque ces poussières sont entraînées dans un tourbillon convectif, cela donne naissance aux *dust devils* (« diables de poussière »), fines colonnes de poussière caractéristiques observées dans les déserts terrestres et sur Mars. *InSight* sera même équipé, contrairement aux campagnes précédentes, de capteurs d'une fréquence si haute qu'il sera potentiellement possible de décrire en détail comment l'énergie turbulente de l'atmosphère se dissipe en de minuscules tourbillons.

Ce phénomène universel existe sur Terre comme sur Mars, mais ses échelles caractéristiques diffèrent dans l'atmosphère très ténue de Mars.

UN POINT DE VUE ORIGINAL SUR L'ATMOSPHÈRE DE MARS

La combinaison de mesures sismiques et de mesures météorologiques est un avantage indéniable d'*InSight*, qui rend sa façon d'étudier l'atmosphère de Mars particulièrement originale.

Premier exemple, les *dust devils* précités (et, en fait, tous les tourbillons convectifs, qu'ils transportent de la poussière ou non) seront détectés par les capteurs météorologiques, mais également par le sismomètre car la chute abrupte de pression qu'ils impliquent déforme la surface du sol. Autrement dit, les tourbillons convectifs atmosphériques causent des microséismes. *InSight* sentira ainsi passer de tels phénomènes depuis beaucoup plus loin que s'il avait été simplement une station météorologique. L'instrumentation d'*InSight* peut donc permettre d'étudier une surface plus grande autour de l'atterrisseur que les missions précédentes.

Deuxième exemple, toute perturbation un peu soudaine dans l'atmosphère (par exemple, un impact de météorite ou, moins rarement, un vent soufflant sur une montagne ou un cratère), de jour ou de nuit, cause l'émission d'ondes de gravité dans l'atmosphère, analogues aux ondes qui se forment quand on jette un caillou dans une eau calme. Ces

ondes, qui révèlent la variation de température et de vent suivant la verticale, ont une signature à la fois météorologique et sismique. *InSight* pourra donc les détecter depuis la surface pour la première fois. Les impacts de météorite devraient d'ailleurs être plus directement repérés par l'émission d'infrasons que le capteur de pression d'*InSight* sera capable de détecter.

En définitive, s'il n'est pas certain qu'*InSight* révolutionne la science atmosphérique martienne, la mission va procurer une vision nouvelle et originale des phénomènes atmosphériques martiens, avec une possibilité de découvertes inattendues, permises par des capteurs à la couverture temporelle et à la précision inégalées. *InSight* est donc un jalon important pour connaître l'environnement dans lequel évolueront les futures missions martiennes, robotiques ou humaines. La mission *InSight* préfigure d'ailleurs, très probablement, des campagnes de mesure avec des réseaux de multiples stations météorologiques/géophysiques à la surface de Mars. ■

COAUTEURS: ■ DON BANFIELD, Senior Scientist à Cornell University, USA ■ JOSÉ-ANTONIO RODRIGUEZ-MANFREDI, chercheur au Centro de AstroBiología (CAB), INTA, Espagne ■ FRANÇOIS FORGET, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) / Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL) à Paris ■ PHILIPPE LOGNONNÉ, directeur de recherche à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP).



nasa

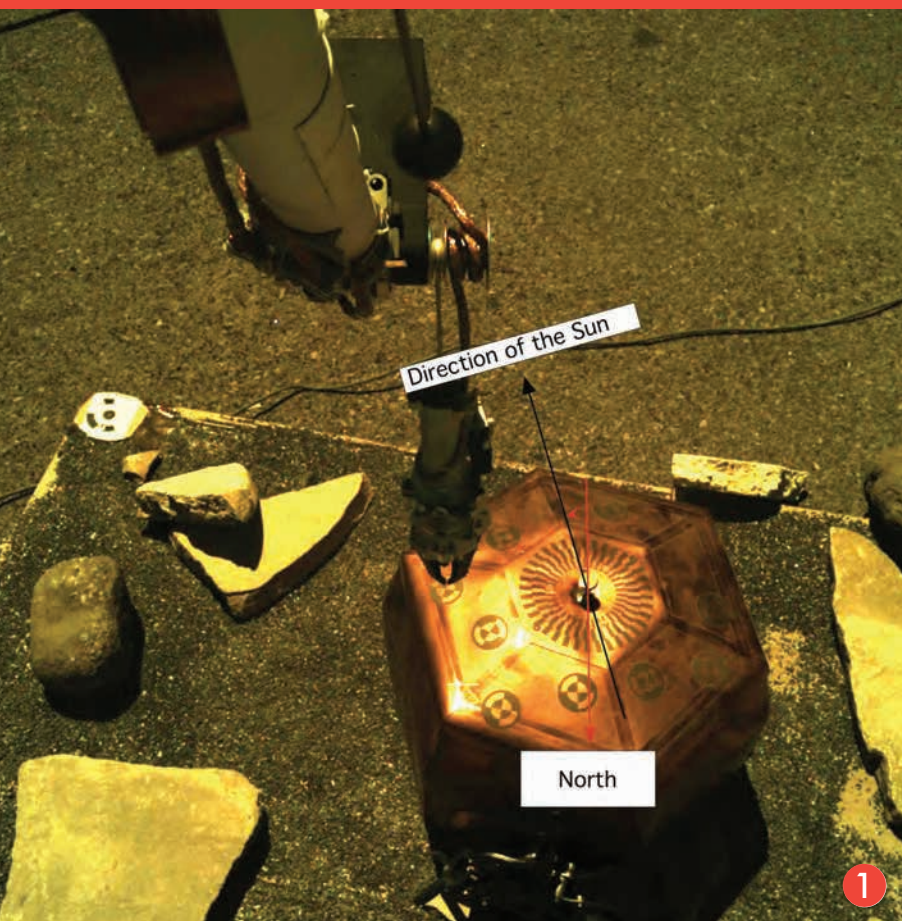
DÉTERMINER LE NORD GÉOGRAPHIQUE MARTIEN

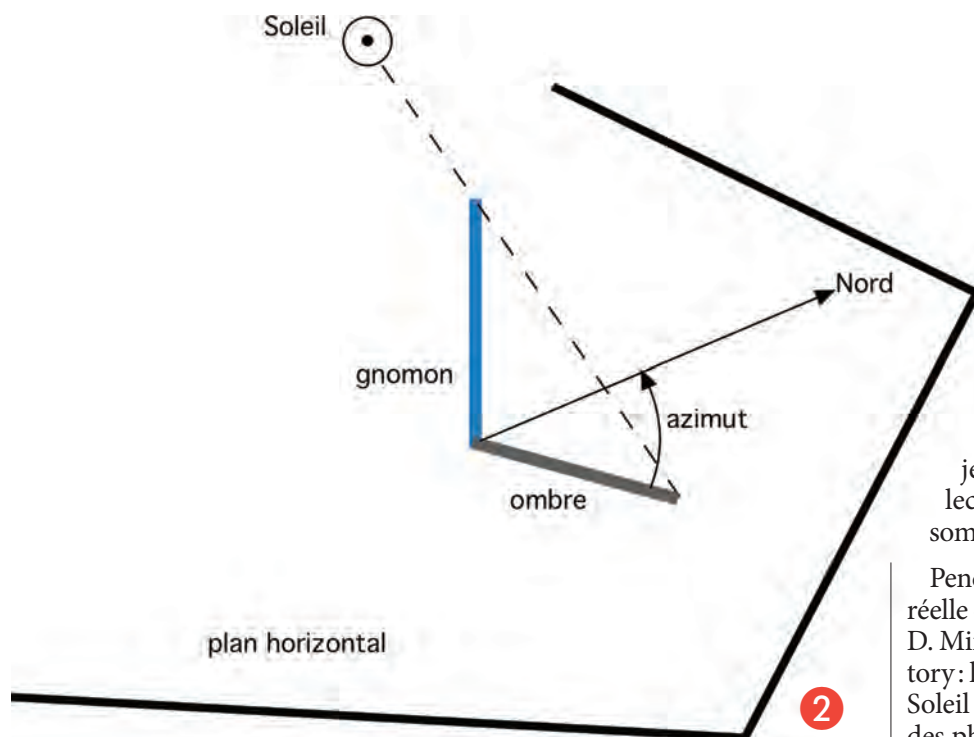
La sonde *InSight* (Nasa) arrive sur Mars aujourd'hui. Elle embarque parmi ses instruments le sismomètre SEIS (IPGP) qui sera déposé à la surface et recouvert à terme d'une cloche de protection. Afin de pouvoir traiter les données sismiques, il est nécessaire de déterminer l'orientation de l'instrument par rapport au nord géographique martien.

Pour cela, *InSight* emporte sur Mars un « gnomon », appendice vertical surmontant une mire dont l'ombre portée permet de déterminer la position du Soleil localement, et par extension la position et l'orientation de la sonde à la surface. L'ombre du gnomon sera transmise sur Terre via la caméra qui équipe le bras manipulateur (fig. 1).

On se trouve *a priori* devant un problème « classique » d'astronomie de position : connaissant les coordonnées géographiques du lieu et l'heure UTC, déterminer l'azimut du Soleil (fig. 2). En fait, le problème est un peu plus compliqué : d'une part, ce qui sert de gnomon est la tige de préhension du sismomètre, dont la forme géométrique n'est pas spécialement adaptée au repérage d'une ombre. D'autre part, il faut disposer d'une solution du mouvement du Soleil pour un observateur martien. Quant à la qualité des images transmises, elle ne sera pas optimale.

Avec mes collègues A. Richard et M. Goutaudier, nous avons donc mis au point une méthodologie permettant de déterminer le nord géographique avec une précision comprise entre 0° et 5°. Pour cela, nous avons développé une théorie du mouvement du Soleil à partir de la théorie VSOP87 de P. Bretagnon, qui a été modifiée et rapportée à l'équateur martien à l'aide des transformations issues de Konopliv et coll.*, basées sur les données de positionnement des missions *Mars Global Surveyor*, *Mars Reconnaissance Orbiter* ou encore *MER Opportunity*. On peut alors passer dans un repère local martien pour finalement obtenir la déclinaison du Soleil et son ascension droite dans un repère planétocentrique. Connaissant l'heure et les coordonnées géographiques de l'atterrisseur (en théorie 137° de longitude est, 4° de latitude nord), on calcule alors les coordonnées horizontales du Soleil (azimut et hauteur) et l'instant de passage au méridien.





projettera une ombre sur une mire segmentée en trois anneaux; une des difficultés majeures résidera justement dans la lecture précise de la position du sommet de l'ombre circulaire.

Pendant l'été 2017, des tests grandeur réelle ont été effectués avec K. Hurst et D. Mimoun au Jet Propulsion Laboratory : le sismomètre SEIS a été placé au Soleil sur un décor martien et, à partir des photos de l'ombre du gnomon sur la mire, il a été possible de l'orienter correctement par rapport au nord géographique terrestre (fig. 1).

Enfin, d'autres tests ont été effectués depuis à l'aide de POV-Ray, un logiciel de « lancer de rayons » qui nous a permis de reconstituer le sommet du sismomètre SEIS puis de simuler l'ombre qu'il porte sur la mire. La théorie du Soleil a été intégrée au logiciel en tenant compte du diamètre apparent de ce dernier ($0^{\circ} 22'$ en décembre 2018) et donc des effets de pénombre. Les images ont ensuite été dégradées pour s'approcher au mieux de ce qui est attendu en pratique sur les prises de vues de la caméra, l'objectif était de se mettre en situation quasi réelle pour définir une méthodologie et estimer la précision attendue dans la détermination des azimuts, hauteurs et direction du nord (fig. 3).

Même si cette étape de l'orientation du sismomètre à l'aide d'un gnomon est très anecdotique dans cette importante mission spatiale *Insight*, il est amusant – et d'un certain point de vue assez ironique – d'utiliser un instrument qui remonte aux Babyloniens pour orienter un concentré de sciences et de technologie. ■

* « An improved JPL Mars gravity field and orientation from mars orbiter and lander tracking data », *Icarus*, 274, 2016.



Le déploiement du sismomètre SEIS est prévu entre le 12 et le 25 décembre 2018 : pendant cette période, la déclinaison du Soleil variera d'un peu plus de 2° , passant de $-20^{\circ} 24'$ à $-18^{\circ} 15'$. Le Soleil étant sous l'équateur martien, l'ombre du gnomon tournera dans le sens des aiguilles d'une montre et sera orientée vers le nord à midi solaire local (azimut nul). Bien que l'on soit tenté d'utiliser l'ombre méridienne pour orienter le sismomètre, il faut rappeler que la variation d'azimut dans une zone proche de l'équateur est très rapide au voisinage de la culmination et c'est donc à cet instant que l'on commet les plus grandes erreurs d'orientation.

C'est aussi le moment où l'ombre est la plus courte et en conséquence celui où la précision d'une mesure d'angle sur la mire est la plus faible. Nous avons donc déterminé quels étaient les instants les plus favorables à la mesure de l'azimut du Soleil, en incluant des incertitudes sur les coordonnées géographiques, un décalage de UTC dans la transmission des données, et une non-verticalité du gnomon. On a ainsi obtenu des fenêtres horaires optimales pendant la dizaine de jours où la caméra permettra de visualiser le gnomon (la caméra sera au nord de SEIS, car il ne faut en aucun cas que l'atterrisseur porte ombre sur l'instrument). Celui-ci



SÉISME ET SÉMANTIQUE

Le mot séisme est issu du grec ancien *seismos* et signifie tremblement de terre, ébranlement, lui-même dérivé de *serein*, secouer, ébranler. Il fut introduit par le sismologue anglais John Milne, à la fin du XIX^e siècle. La structure du mot évoque bien le concept : la syllabe « sé » nous fait plonger vers le bas tandis qu'« isme » propulse et rebondit vers le haut. Pourtant, le mot fut l'objet de polémiques, au motif de n'avoir pas transcrit la diphtongue grecque *ei* par *i* (sur le modèle *leitourgia* → *liturgie*). C'est la raison pour laquelle ses dérivés retenus par l'Académie française sont sismique, sismologie, sismographe, sismologue au lieu de séismique, séismologie, etc.

Au sens figuré, on parle d'un événement inattendu, mais bouleversant, littéralement d'un choc. On évoque volontiers un séisme politique et, en économie finan-

cière, le risque 6-SMIC serait bien susceptible d'effrayer le patronat* !

Un sismographe est équipé d'un capteur des mouvements du sol, le sismomètre, qui les enregistre sur un support visuel ou numérique : le sismogramme. Une secousse de l'écorce terrestre peut avoir des origines diverses : humaine (explosion nucléaire) ou naturelle (volcanique ou tectonique).

Reconnaissons que les séismes n'ont jamais épargné les êtres vivants et sont connus depuis la nuit des temps. Il y eut 26 séismes notables de 92 à 126 après Jésus-Christ, en Chine. Ces séismes provoquèrent beaucoup de dégâts et firent de nombreuses victimes, incitant le scientifique et philosophe chinois Zhang Heng (78-139 après Jésus-Christ, lors de la dynastie des Han) à inventer le système du sismographe. Cet instrument, décoré de tortues, d'oiseaux, de dragons, de crapauds et d'autres représentations d'ani-

maux, ressemblait à une jarre d'environ 1,80 m de diamètre (figure ci-contre). À l'extérieur du vase, huit têtes de dragons marquaient les principales directions de l'espace, à l'instar d'une rose des vents. Sous chaque tête se tenait un crapaud, sa gueule grande ouverte vers le dragon. Lors d'un tremblement de terre, l'un des huit dragons relâchait une balle en cuivre dans la gueule du crapaud immédiatement situé en dessous. Dans le sismographe se nichait un pendule en cuivre muni de 8 bras mobiles, un par un connectés à un dragon. Lors du séisme, le pendule bougeait vers l'un de ces bras mobiles et poussait un levier qui libérait la balle. La direction du tremblement où se trouvait l'épicentre était déterminée par le dragon qui relâchait sa balle. Ce sismographe chinois fut le premier et plus ancien instrument capable de donner des informations sur les séismes. Il est rap-



Mars est un milieu hostile, aussi les capteurs sont-ils reliés à l'atterrisseur par des câbles et soigneusement protégés par un bouclier éolien et thermique.

Les scientifiques adorent les séismes. On les dit conservateurs, en ce qu'ils freineraient des quatre fers dès qu'une idée nouvelle ou exotique se fait jour. Ce n'est évidemment pas exact. Chaque chercheur – quelle que soit sa discipline – rêve de pouvoir dynamiter les concepts en vigueur, pourfendre le *statu quo*, mettre au jour un phénomène nouveau, voire fonder une discipline nouvelle. D'ailleurs, les découvertes scientifiques ébranlent nos attentes les plus folles. Ce fut le cas de la remise en cause du temps absolu, de la découverte de la quantification de la matière, ou du boson de Higgs et, plus près de nous encore, nous venons d'éprouver le grand frisson, la secousse inattendue, violente et pourtant imperceptible des ondes gravitationnelles ! Quant à savoir la nature exacte de l'énergie noire, gageons que cet épais mystère prépare d'autres branle-bas dans le landerneau scientifique ! ■

* Paul Jorion, *La Crise : Des subprimes au séisme financier planétaire*, Paris, Fayard, 2008.

porté que la sensibilité de l'instrument permettait de détecter un tremblement de terre distant de plus de 650 km.

Des sismographes similaires furent inventés dans la Perse ancienne plus de 1 000 ans après ce sismographe chinois, tandis qu'en Europe, les premiers sismographes n'apparurent que vers 1880.

Le mot séisme possède une connotation négative, mais puisque ce qui ne tue pas nous rend plus fort, nous avons su ouvrir de nouveaux champs d'exploration et utiliser les ondes sismiques naturelles ou artificielles, comme puissants moyens d'investigation des propriétés élastiques des matériaux terrestres, puis lunaires et maintenant martiens !

Car tout comme la Terre, Mars est soumise aux séismes. C'est ce qu'ont montré de récentes études portant sur des images haute résolution de la planète rouillée. Puisqu'une activité sismique est encore à

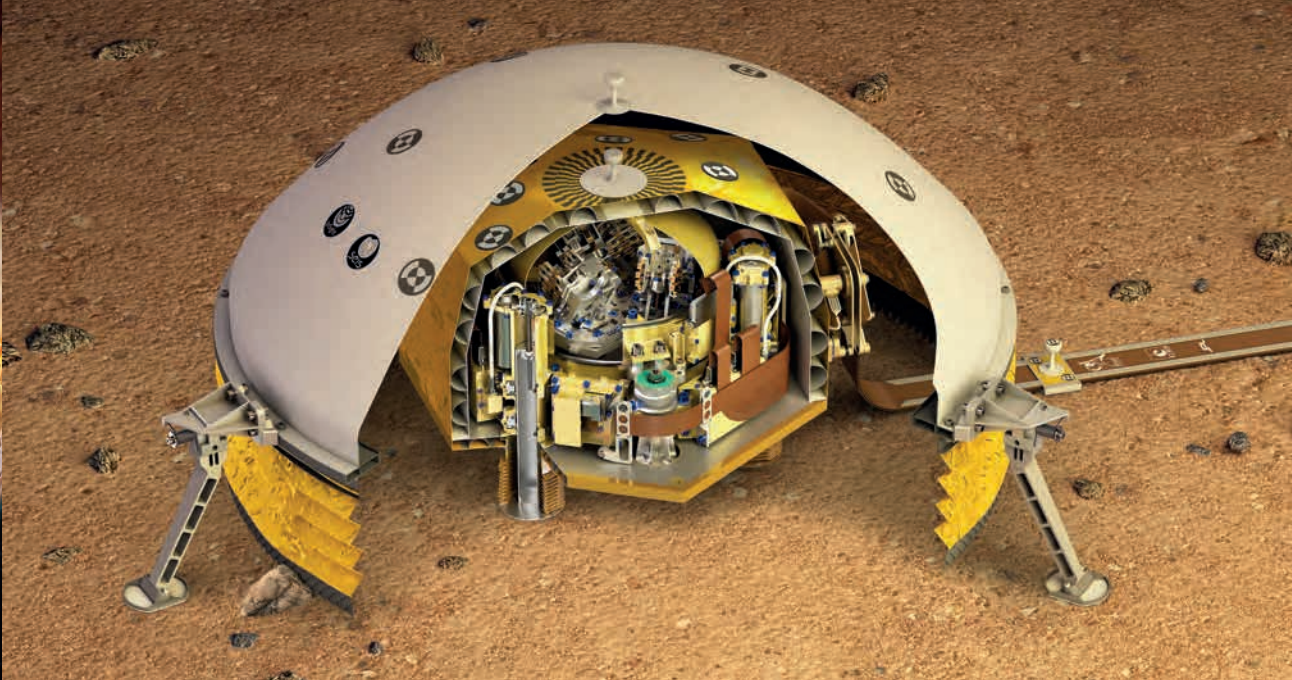
l'œuvre sur Mars, la mission *InSight* trouve toute sa justification. Cette mission a pour but de déposer des instruments géophysiques sur la planète afin d'en étudier la structure interne, son objectif principal étant de recueillir des informations quant à l'histoire de la planète Mars et à l'évolution des processus qui ont marqué sa formation. Par ailleurs, avec stupéfaction et tremblements, on pourra qualifier son activité sismique et déterminer si le noyau est solide ou liquide.

Le sismomètre SEIS déposé par *InSight*, n'aura rien à envier à son ancêtre chinois. Oubliés la bave du crapaud et les jets de flamme du saurien, au profit d'un capteur trois axes large bande, et un capteur d'accélération microélectromécanique très résolvant dans les fréquences hautes. Cette combinaison permettra d'atteindre un niveau de qualité bien supérieur au détecteur de notre philosophe chinois.

Oubliés la bave du crapaud et les jets de flamme du saurien, au profit d'une combinaison d'instruments bien plus performants.



Rubrique librement inspirée du livre *Les Mots du ciel*, 2015, D. Kunth, CNRS éditions. Nouvelle édition poche Biblis.



SEIS, un sismomètre conçu par l'IPGP pour dévoiler la structure interne de Mars



L'institut de physique du globe de Paris, un institut dédié aux sciences de la Terre, des planètes et de l'environnement

Organisme de recherche en géosciences de renommée mondiale, l'institut de physique du globe de Paris (IPGP) étudie la Terre et les planètes, du noyau jusqu'aux enveloppes fluides les plus superficielles, à travers l'observation, l'expérimentation et la modélisation. Bientôt centenaire, il couvre toutes les disciplines des sciences de la Terre et conduit des études à toutes les échelles de temps et d'espace.

Principal acteur de l'observation des aléas telluriques en France, l'IPGP a la charge de services d'observation labellisés en volcanologie, sismologie, magnétisme, gravimétrie et érosion à travers ses observatoires permanents notamment sur les îles de Guadeloupe, de la Martinique, de la Réunion.

L'IPGP offre à ses étudiants des formations en géosciences qui associent observation, analyse quantitative et modélisation et qui reflètent la qualité, la richesse et la diversité thématique des recherches menées par les équipes de recherche de l'institut.



www.ipgp.fr

 @IPGP_officiel

 Chaîne IPGP



INTÉRIEUR DE LA TERRE
ET DES PLANÈTES



RISQUES NATURELS



SYSTÈME TERRE



ORIGINES



U-S-PC

Université Sorbonne
Paris Cité



université
**PARIS
DIDEROT**
PARIS 7



Nous sommes les éclaireurs de l'espace.

Depuis plus de 50 ans, nous orientons les satellites et les sondes d'exploration dans l'espace.

Grâce à notre expertise reconnue en matière d'instruments scientifiques de pointe, nous contribuons à l'étude du système solaire et des planètes qui le composent.



4 centres d'excellence

À Paris Les Halles, les collaborateurs du Siège élaborent la politique spatiale de la France et de l'Europe, bâtissent et coordonnent les programmes du CNES, qu'ils soient conduits dans un cadre national, européen ou international.

À Paris Daumesnil, la Direction des lanceurs (DLA), qui développe depuis plus de 40 ans les lanceurs européens, est plus que jamais engagée au sein d'une équipe intégrée avec l'Agence spatiale européenne.

Le Centre spatial de Toulouse (CST) est le plus grand centre technique et opérationnel du CNES. Ses ingénieurs conçoivent, développent, réalisent, mettent à poste, contrôlent et exploitent les systèmes orbitaux. Ils contribuent aussi à l'utilisation des données spatiales pour le bénéfice de tous et imaginent le spatial de demain dans un souci d'innovation et de créativité.

Les équipes du **Centre spatial guyanais (CSG)** réalisent les lancements de la gamme des lanceurs européens. Idéalement situé à proximité de l'équateur, le port spatial est un atout majeur du programme spatial européen.

L'ESPACE EN TÊTE

Le CNES, **fort de ses 4 centres et 2 400 employés**, est un acteur spatial européen et international majeur, par sa capacité d'innovation et son expertise technique.

Au carrefour de la recherche et de l'industrie, le CNES conçoit, développe et exploite les systèmes spatiaux du futur, pour le bénéfice des citoyens. Il soutient également l'industrie spatiale française, l'accompagnant notamment dans ses contrats à l'export.

Après avoir réalisé les premières générations de la famille Ariane, ses équipes rassemblent aujourd'hui l'Europe autour de différents programmes scientifiques et techniques et elles imaginent les grands projets qui permettront d'avoir toujours l'espace en tête.

L'action du CNES est structurée autour de cinq grands domaines d'intervention, menés dans un cadre de coopération à tous les niveaux, national, européen et international.



Ariane



Sciences

Observation

Télécommunications



Défense

