

et sont des dormeurs qualifiés de polyphasiques, c'est-à-dire qu'ils dorment de manière fragmentée pendant la journée. Que peut-on alors tirer de telles observations en ce qui concerne l'homme? Pour étudier l'adénosine chez nos semblables, nous avons recours à une technique appelée tomographie par émission de positons, ou PET. Il s'agira d'injecter dans le cerveau de Sarah une substance radioactive préparée sur place au centre de recherche de Jülich. Cette substance (dont la radioactivité n'entraîne pas de dégâts sur les tissus vivants) a la propriété de se fixer sur les récepteurs de l'adénosine qui sont encore «libres», c'est-à-dire non occupés par des molécules d'adénosine. Sarah s'allongera alors dans le scanner qui «photographie» son cerveau en captant la radioactivité présentera sur ses récepteurs à adénosine. L'idée est simple: un signal radioactif intense signifiera que le cerveau de Sarah contenait beaucoup de récepteurs libres, et par conséquent qu'il renfermait peu d'adénosine. À l'inverse, un signal plus faible trahira une plus forte concentration d'adénosine.

Les résultats obtenus au terme de telles expériences sur plusieurs volontaires dans notre équipe livrent des enseignements importants. Nous avons ainsi observé que le nombre de récepteurs de l'adénosine de type A1 libres dans le cerveau commence à augmenter après 28 heures sans dormir... Une hausse de 10%, qui continue de s'accroître si l'on prolonge la veille jusqu'à 52 heures. Que se passe-t-il? Comme le sujet reste éveillé par la force de la volonté, les neurones se mettent à produire davantage de ces récepteurs, ce qui démultiplie l'action de l'adénosine et augmente d'autant la pression de sommeil, ce besoin de dormir qui devient peu à peu irrésistible.

UN TIERS DES PERSONNES SONT PLUS AFFECTÉES

Pourtant, nous ne sommes pas tous affectés de la même manière par le manque de sommeil, comme l'ont observé des chercheurs de l'université de Pennsylvanie: environ un tiers des personnes testées dans leur équipe résistent bien et conservent des performances cognitives presque intactes dans des tests d'attention, même après plusieurs jours passés sans fermer l'œil. Une capacité robuste, stable, que l'on peut mesurer régulièrement avec les mêmes résultats, et qui semblent déterminée en grande partie génétiquement, comme le montrent les résultats d'études réalisées sur des jumeaux, lesquels présentent généralement les mêmes capacités de résistance à la veille prolongée. Un autre tiers des personnes, en revanche, est très sensible au manque de sommeil. Il s'agit alors de l'éviter impérativement, surtout si l'on exerce un métier qui requiert un

COMMENT LE CAFÉ NOUS MAINTIENT-IL ÉVEILLÉS ?



Les Européens consomment environ 200 milligrammes de caféine par jour, soit entre deux et trois tasses, et parfois beaucoup plus (les Allemands, les Néerlandais ou les Danois en boivent plus de 1,5 fois plus que les Français). La molécule de caféine combat les effets de la fatigue en prenant la place de l'adénosine sur ses récepteurs. Cela a d'abord été mis en évidence par des expériences menées sur des animaux, puis, en 2012, nous avons confirmé cet effet chez l'homme. Lorsque la moitié des récepteurs sont occupés par de la caféine, on se situe dans une fourchette intéressante où le café exerce des effets stimulants sans entraîner d'effets secondaires. La plupart des gens cherchent instinctivement cet équilibre en buvant du café au cours de la journée. Dans nos expériences, nous avons constaté qu'il est atteint avec 450 milligrammes de caféine (l'équivalent de 4 cafés longs) pour une personne de 70 kg. À l'inverse, l'alcool est souvent utilisé comme aide à l'endormissement, et l'on sait qu'il amplifie à la fois la synthèse d'adénosine et son transport à travers les tissus biologiques. Mais il n'aide pas pour autant à faire de bonnes nuits, car après un endormissement brutal, le sommeil devient fragmenté et moins réparateur.

BIBLIOGRAPHIE

D. Elmenhorst *et al.*, **Recovery sleep after extended wakefulness restores elevated A1 adenosine receptor availability in the human brain**, *PNAS*, vol. 114, pp. 4243-4248, 2017.

D. Elmenhorst *et al.*, **Caffeine occupancy of human cerebral A1 adenosine receptors : In vivo quantification with 18F-CPFPX and PET**, *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 53, pp. 1723-1729, 2012.

D. Elmenhorst *et al.*, **Performance impairment during four days partial sleep deprivation compared with the acute effects of alcohol and hypoxia**, *Sleep Medicine*, vol. 10, pp. 189-197, 2009.

bon niveau d'attention dans un environnement pauvre en stimulations. Selon nos observations, une telle variabilité d'une personne à l'autre pourrait résulter de différences de fonctionnement des systèmes cérébraux fondés sur l'adénosine. Ainsi, chez les personnes très résistantes à la privation de sommeil, nous avons mesuré une quantité élevée de récepteurs de l'adénosine non occupés par cette molécule, ce qui se traduisait par une plus forte fixation du marqueur radioactif utilisé dans nos expériences. Il se pourrait alors que ces sujets produisent des récepteurs en excès, mais également moins d'adénosine que la moyenne des personnes.

Après les tests d'imagerie cérébrale, Sarah va à présent connaître la partie la plus agréable de l'expérimentation: coiffée d'un bonnet d'électrodes pour mesurer ses ondes cérébrales, elle va avoir droit à sa première nuit de huit heures de sommeil depuis bien longtemps. Pendant qu'elle s'abandonnera aux bras de Morphée, nous resterons bien éveillés pour voir à quelle vitesse son cerveau se régénère... ■

**PHILIPPE
LOGNONNÉ**

est professeur de géophysique et planétologie à l'université Paris-Diderot et à l'Institut universitaire de France. Il dirige l'équipe Planétologie et sciences spatiales à l'Institut de physique du globe de Paris. Il est le responsable scientifique du sismomètre de la mission *InSight*.



InSight détectera des séismes sur Mars, une première!



Sur Terre, l'étude des ondes sismiques a permis de mieux comprendre la structure de la planète. La mission *InSight* emporte un sismomètre sur Mars, de quoi sonder les entrailles de la planète rouge.

La mission *InSight* est un grand projet de mesures géophysiques de Mars. Quels sont ses objectifs ?

Étudier la structure interne de Mars. De nombreuses questions de géophysique martienne n'ont pour l'instant pas de réponse : la planète possède-t-elle un noyau liquide ? Quelle est la taille de ce noyau ? Quelle est la composition du manteau ? Etc. Pour y répondre, l'idée est simple, mettre en œuvre sur Mars les mêmes outils qui ont permis de déterminer la structure interne de la Terre : en l'occurrence, utiliser des sismomètres pour analyser les ondes sismiques qui se propagent dans la roche de la planète.

Sur Terre, l'idée de séismes est fortement associée à celle de plaques tectoniques, qui sont absentes sur Mars. Quelles sont les sources de séismes sur la planète rouge ?

La tectonique, ce n'est pas uniquement la tectonique des plaques. Il existe d'autres phénomènes qui peuvent faire bouger la croûte d'une planète. Par exemple, les planètes, comme la Terre ou Mars, ont accumulé beaucoup d'énergie sous forme de chaleur lors de leur formation. Cette énergie provient de la collision des roches qui se sont agglomérées pour former les planètes et aussi de la présence d'éléments radioactifs. Ces planètes se sont ensuite progressivement refroidies et contractées : leur volume diminue du fait d'effets thermoélastiques. Les tensions mécaniques, que cette contraction suscite notamment dans la lithosphère (la croûte et la partie supérieure du manteau), produisent des ruptures, des failles, qui s'accompagnent de séismes.

Sur Terre, certains séismes intraplaques, par exemple dans les plaques océaniques, sont le résultat de ce refroidissement. Sur la Lune, pendant sept ans, on a observé environ un séisme par an de magnitude supérieure à 5 sur l'échelle de Richter dû à cet effet. On s'attend donc à voir le même phénomène sur Mars. Alors certes, on ne s'attend pas à voir des séismes de magnitude 7, ou plus, mais on pourrait néanmoins enregistrer des séismes de magnitude 5,5.

Existe-t-il d'autres sources potentielles de séismes sur Mars ?

Oui, deux principalement. D'abord, la présence d'une atmosphère turbulente sur Mars avec du vent, mais aussi des tourbillons de poussière (ou *dust devils* en anglais), provoque aussi des signaux sismiques. Ensuite, il faut également considérer les impacts de météorites.

Enfin, plus spéculatif, on ne sait pas si Mars a encore une activité volcanique. Des points chauds ou des zones très actives seraient une source potentielle de tectonique. La mission

InSight n'a pas été conçue spécifiquement pour chercher du volcanisme mais si on détecte beaucoup de séismes dans une région de Mars, la meilleure explication sera l'activité volcanique. Ce serait une petite surprise, mais cette hypothèse n'est pas complètement irréaliste. Certains grands volcans martiens ont des caldeiras qui étaient actives il y a 50 à 100 millions d'années. Autour de certains volcans, des coulées de lave datent de seulement 2 à 3 millions d'années. Ce qui est très peu à l'échelle géologique.

Mais l'idée d'envoyer des sismomètres sur Mars est-elle nouvelle ?

Non, elle est ancienne. Pour donner une idée, le vol de *Sputnik 1* date de 1957 et, dès 1959, le géophysicien américain Frank Press proposait de réaliser des mesures de sismicité sur la Lune, Mars, etc. En 1962, trois sondes du programme américain *Ranger* devaient transporter des sismomètres sur la Lune. Mais ces missions se sont toutes soldées par des échecs. Il faut dire qu'à cette époque, on tâtonnait avec la maîtrise des techniques pour la conquête spatiale. Par la suite, plusieurs dispositifs de mesure d'activité sismique ont été envoyés sur la Lune (le premier ayant été déployé par les astronautes de la mission *Apollo 12*, en 1969).

Pour Mars, il a fallu attendre les deux sondes *Viking*, qui sont arrivées sur la planète en 1976. Chaque atterrisseur transportait un sismomètre, des capteurs d'ailleurs plutôt bons au vu des techniques de l'époque. Mais les chercheurs se sont aperçus que, le jour, les instruments mesuraient surtout l'activité du vent. Et la nuit, lorsque les perturbations atmosphériques étaient moindres, leur sensibilité était insuffisante pour détecter des séismes.

Malgré ce résultat négatif, les géophysiciens ont vu dans ce premier essai martien un signe encourageant. En améliorant la sensibilité de l'instrument et en développant des techniques pour l'isoler du vent, il devait être possible d'explorer la structure interne de la planète rouge.

Quand avez-vous commencé à travailler sur ces projets de géophysique martienne ?

Après *Viking*, des chercheurs à l'institut de physique du globe de Paris, et des collègues soviétiques ont commencé à réfléchir à un nouveau projet de géophysique martienne. Celui-ci est devenu la mission *Mars 96*. J'ai participé à ce projet grâce à un concours de circonstances. Ma directrice de thèse, Barbara Romanowicz, quittait l'Institut de physique du globe pour prendre de nouvelles fonctions à l'université de Californie à Berkeley. À son départ, je l'ai alors remplacée sur le projet *Mars 96*.

>

> En quoi consistait la mission Mars 96 ?

Cette mission était ambitieuse. Elle comprenait un orbiteur, deux atterrisseurs et deux pénétrateurs qui devaient s'enfoncer de cinq à six mètres dans le sol martien. Chacun des quatre éléments au sol était équipé d'un sismomètre. Malheureusement, lors du lancement, le quatrième étage de la fusée a rencontré un problème. Nous avons alors perdu l'ensemble des équipements, qui sont retombés dans l'atmosphère terrestre. Ainsi, après des résultats nuls des sondes *Viking* et l'échec de *Mars 96*, les grandes questions sur la structure géophysique de Mars restaient ouvertes.

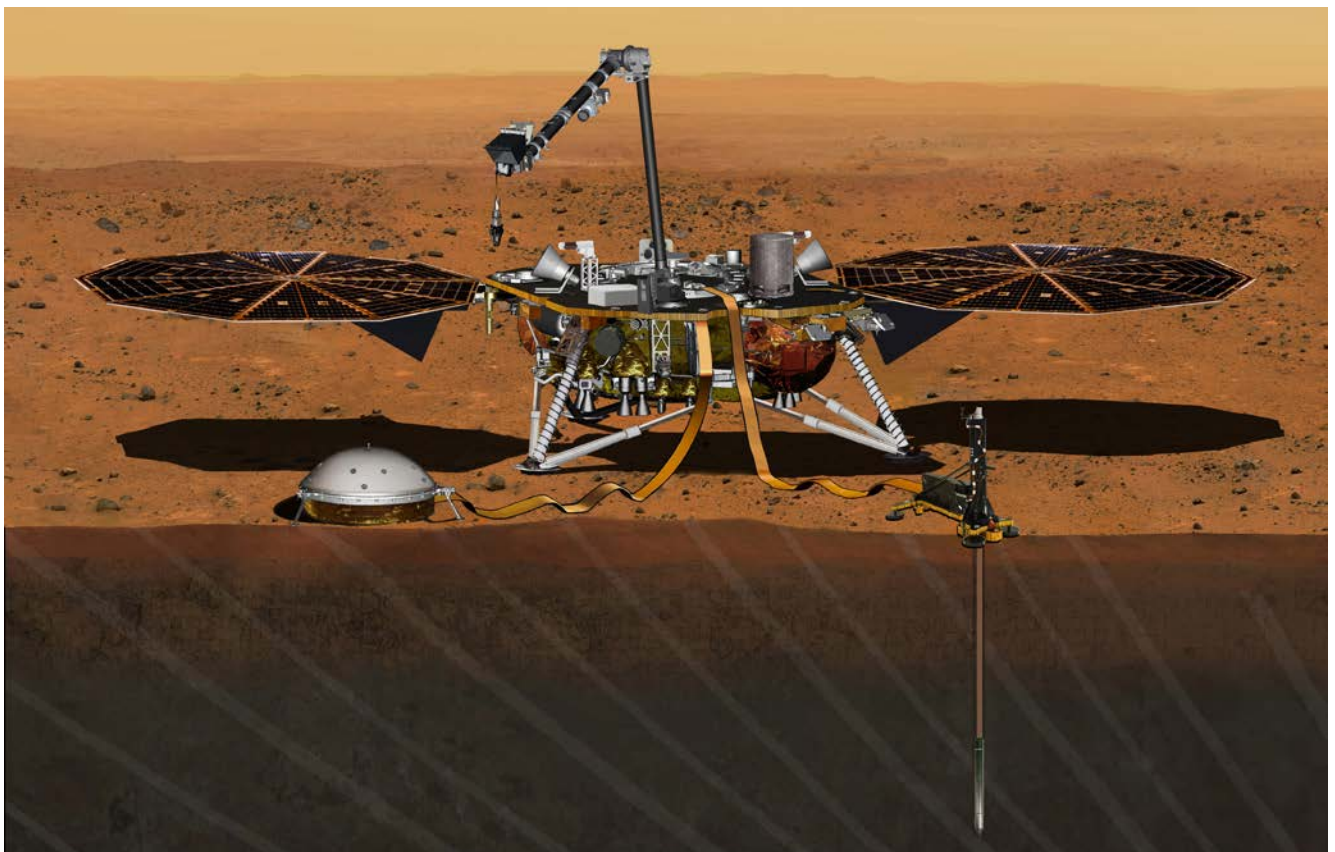
Suite à l'échec de Mars 96, comment la mission InSight a-t-elle vu le jour ?

En Europe, avec plusieurs collègues, j'ai rapidement soumis de nouveaux projets centrés sur la géophysique martienne. Aux États-Unis, Bruce Banerdt, du Jet Propulsion Laboratory, à l'institut de technologie de Californie, faisait la même chose outre-Atlantique. Il faut bien voir qu'après la fin de la course vers l'espace entre les États-Unis et l'Union soviétique, le nombre de missions a beaucoup diminué et les budgets ont été drastiquement réduits. La concurrence entre les différents projets d'exploration spatiale est devenue très forte. Mais notre persévérance a fini par payer : le projet *GEMS2*, rebaptisé *InSight*, a été sélectionné en 2012 dans le cadre du programme

Discovery de la Nasa. Ce programme a pour objectif de financer des projets d'exploration du Système solaire dont le coût est en principe inférieur à 500 millions d'euros.

Nous sommes vraiment dans un esprit de découverte : la mission détectera pour la première fois des séismes sur Mars. Il y a une grande attente des planétologues et des géophysiciens : avant *InSight*, nous n'avions pas de données, après *InSight*, nous en aurons. La mission embarque presque tous les instruments classiques de la géophysique : un sismomètre, un appareil de mesure de flux de chaleur, un magnétomètre et des instruments de géodésie. L'idée est de réaliser une « radiographie » de l'intérieur de la planète Mars aujourd'hui. En utilisant les mesures de la vitesse de propagation des ondes sismiques, des membres de l'équipe d'*InSight* détermineront l'épaisseur de la croûte, la température et la composition minéralogique du manteau, etc. Les planétologues exploiteront ensuite ces données pour affiner leurs modèles. En effet, jusqu'à présent, certains paramètres n'avaient pas de contraintes et devaient être choisis de façon arbitraire. Par exemple, sachant que la croûte se forme à partir de couches successives de lave, une croûte de 30 ou 80 kilomètres implique des conditions différentes sur la quantité d'énergie accumulée lors de la formation de la planète. Les modèles devront alors reproduire les données réelles.

La mission *InSight* se posera dans la région d'Elysium Planitia, sur Mars. Elle embarque plusieurs instruments de mesures géophysiques. Le sismomètre, à l'abri sous une cloche (à gauche), et l'instrument de mesure de flux thermique (à droite) seront installés sur le sol de la planète grâce au bras articulé (au centre). La sonde transporte aussi un magnétomètre et un instrument radio, qui mesurera la vitesse de rotation de la planète (il sera possible d'en déduire, par exemple, la quantité de neige carbonique qui se dépose aux pôles en hiver).



Venons-en aux instruments, en quoi consiste le capteur de flux de chaleur ?

Conçu par l'agence spatiale allemande et l'Institut de recherche planétaire, à Berlin, le capteur repose sur un principe simple. Un percuteur percera un trou dans le sol jusqu'à cinq mètres de profondeur. Des capteurs de température, placés le long de ce forage, mesureront des variations de température en fonction du temps mais surtout en fonction de la profondeur. L'instrument chauffera d'abord le sol et mesurera la diffusion de cette énergie. Nous en déduirons la conductivité thermique de la roche. Et ensuite, nous déterminerons le flux de chaleur s'échappant de la planète qui se refroidit.

Le forage n'ira pas au-delà de cinq mètres ; est-ce suffisant pour mesurer le flux ?

Oui, nous aurons une précision suffisante pour calculer le flux... sauf surprise. En effet, si Mars a connu, par exemple, une période de fort refroidissement dans le passé, le sol, en profondeur, pourrait avoir enregistré ces températures. Nous serons alors incapables de mesurer le flux, mais cette information sur le passé de Mars est aussi intéressante en soi.

Mais pourquoi cette limite de cinq mètres ?

La raison paraît surprenante, mais nous sommes confrontés à une exigence liée à des réglementations très strictes, pour la protection planétaire. On pense qu'entre 5 et 20 mètres sous la surface de Mars, on peut avoir des habitats compatibles avec la survie de bactéries. Pour ne pas contaminer ces zones avec des microorganismes de la Terre, il aurait fallu obéir à des critères de stérilisation drastiques qui auraient considérablement augmenté le budget de la mission *InSight*.

L'instrument principal d'*InSight* est le sismomètre. Quels défis a-t-il représentés ?

La complexité de sa fabrication, supervisée par le Cnes, a nécessité une coopération internationale qui a impliqué notamment l'Institut de physique du globe, l'École polytechnique fédérale de Zurich, l'Imperial College de Londres, le Jet Propulsion Laboratory, l'Institut Max-Planck, avec la participation de l'entreprise Sodern. Cette équipe de plus de 200 ingénieurs et techniciens peut être fière du résultat.

Depuis les sondes *Viking*, la technique a nettement progressé. Le sismomètre est maintenant beaucoup plus sensible. L'un des plus gros défis était de l'isoler des perturbations extérieures. Une double cloche le protège des variations de température (qui sont d'environ 60 °C entre le jour et la nuit sur Mars) et du vent. Le système de protection limite ainsi les variations de température à un maximum de 20 °C en été. Et une jupe empêche le vent de s'engouffrer sous la cloche.

C'est aussi la première fois qu'une mission robotisée installera un instrument au sol grâce à un bras articulé. Jusqu'à présent, les robots approchaient un appareil de mesure de la cible ou prélevaient un échantillon pour le déposer dans l'instrument de mesure à bord de la sonde. D'où l'importance du choix du site d'atterrissage, sur un sol pas trop caillouteux et pas trop

Pour forer au-delà de 5 mètres, les règles de protection planétaire sont plus strictes

dur pour que le percuteur puisse réaliser le forage du capteur de flux de chaleur. Au sol, nous utiliserons des caméras pour sélectionner l'endroit le plus judicieux pour installer le sismomètre et le capteur de flux de chaleur.

Le lancement prévu en 2016 a été reporté à 2018 à cause du sismomètre. Que s'est-il passé ?

Un problème d'étanchéité... Le sismomètre est placé dans une enceinte sous vide pour gagner en sensibilité. Or la fuite, bien que très faible, compromettait la précision de mesure de l'instrument. Il a fallu repenser toute l'enceinte, ce qui a pris du temps. Cela fait partie des aléas du développement de nouvelles techniques dans des conditions extrêmes.

Aujourd'hui, quel est le calendrier de la mission ?

La mission a décollé le 5 mai 2018 de la base de Vandenberg, en Californie [ndlr : lorsque l'entretien a été réalisé, la sonde avait effectué plus de 80% de son voyage]. Elle doit se poser sur Mars le 26 novembre, après sept mois de voyage. Le déploiement des instruments s'effectuera en décembre et en janvier. La phase de mesures scientifiques durera près de deux ans. Point remarquable, elle se fera en partenariat avec des instruments en orbite. Par exemple, les mesures de champ magnétique au sol se feront avec celles de la sonde *Maven*. La moisson de données promet d'être riche en découvertes, de quoi occuper les géologues et les planétologues pendant des années. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR SEAN BAILLY

BIBLIOGRAPHIE

P. Lognonné et al., **Planetary seismology**, dans *Extraterrestrial Seismology*, Cambridge University Press, 2015.

P. Lognonné et al., **Impact seismology on terrestrial and giant planets**, dans *Extraterrestrial Seismology*, Cambridge University Press, 2015.

P. Lognonné et al., **Mars et ça repart !**, Dossier Pour la Science, n° 84, juillet 2014.

D. Baratoux, **Quatre milliards d'années d'histoire**, Dossier Pour la Science, n° 84, juillet 2014.

F. Forget et al., **La planète Mars, histoire d'un autre monde**, Belin-Pour la Science, 2006.



Que mangeaient nos ancêtres il y a plusieurs dizaines de milliers d'années ? L'examen des traces microscopiques d'usure à la surface des dents fossiles apporte des réponses qui bousculent les idées reçues.

Le vrai régime paléo