

équipé d'un dispositif pour faire vibrer l'écran de protection, mais il a fallu quatre jours martiens pour tamiser assez de matériau. Pendant ce temps, toute l'eau éventuelle s'était sublimée. D'autres échantillons ont raté leur entrée dans les ouvertures en raison des vents violents qui balayaient la sonde. Avec le temps, cependant, nous avons apprivoisé le vent et la texture du sol, et nous avons réussi à analyser des échantillons prélevés à différents endroits et profondeurs.

Pendant ce temps, les détecteurs atmosphériques accumulaient des données météorologiques. Un lidar (un radar laser) fourni par l'Agence spatiale canadienne nous a permis de mesurer la poussière atmosphérique, ainsi que la profondeur optique du brouillard au sol et la hauteur des nuages de glace d'eau. *Phoenix* a également enregistré la température de surface et la pression. Nous avons ainsi cartographié l'environnement du haut de la couche de glace jusqu'au sommet de la troposphère (la première couche de l'atmosphère, où se déroulent la plupart des phénomènes météorologiques), pendant que les sondes en orbite cernaient le contexte général de la région.

Un sol assez bon pour des asperges

L'une des grandes surprises a été la découverte de carbonate de calcium (à une concentration de cinq pour cent) et de perchlorate (à 0,5 pour cent) dans le sol. Ces composés ont une grande importance dans la recherche de traces de vie.

Le carbonate de calcium se forme lorsque le dioxyde de carbone atmosphérique se dissout dans de l'eau liquide et forme de l'acide carbonique. L'acide réagit avec le calcium présent dans le sol pour former du carbonate, un minéral très répandu sur Terre, et plus connu sous le nom de calcaire ou de craie. L'instrument WCL a mesuré un pH de 7,7, légèrement alcalin et très proche de celui des océans terrestres, où se forme aussi du carbonate de calcium.

Les planétologues traquent les carbonates sur Mars depuis des décennies. La multitude de canyons, de structures de type fluvial et d'anciens fonds lacustres ne laissent presque aucun doute : Mars était jadis une planète humide. Cela suggère que l'atmosphère était autrefois beaucoup plus épaisse. Tout le dioxyde de carbone est forcément allé quelque part,

et le réservoir naturel est le carbonate de calcium. *Phoenix* a fourni les premières preuves que ce dernier entre effectivement dans la composition du sol martien. Les satellites ont depuis repéré des affleurements isolés de carbonate de calcium, bien que d'autres types de carbonates semblent plus répandus.

Le carbonate de calcium apporte des preuves supplémentaires que le site d'atterrissage de *Phoenix* a été humide dans un passé récent, il y a moins de deux milliards d'années. Cela pourrait également expliquer pourquoi le sol formait une croûte : ce minéral peut constituer un ciment.

Le sol alcalin du site d'atterrissage de *Phoenix* est assez différent de ce que les autres atterrisseurs ont observé. Avec un peu plus d'eau et d'atmosphère, vous pourriez y faire pousser des asperges (elles aiment les sols alcalins). À l'inverse, le rover *Opportunity* avait traversé des sols anciens acides, riches en sulfates. Ces derniers traduisent un régime chimique différent et hostile à la vie.

Quant au perchlorate, on le trouve sur Terre sous forme de perchlorate d'ammonium, qui sert d'oxydant dans les moteurs de fusée à propergols solides. Le perchlorate rend l'eau impropre à la consommation à des concentrations supérieures à 25 parties par milliard. Mais ce qui est un poison pour nous est une manne pour les micro-organismes. Des processus naturels peuvent créer du perchlorate en petite quantité, et il peut s'accumuler dans les déserts arides puisqu'il n'est pas lessivé comme ailleurs. Dans le désert d'Atacama au Chili, il ne pleut qu'une fois par décennie, et le perchlorate peut s'accumuler. Les bactéries survivent en utilisant les perchlorates et les nitrates comme sources d'énergie. Pourrait-il en être de même sur Mars ?

Les modèles climatiques globaux de Mars les plus récents, mis au point par François Forget, de l'Institut Pierre Simon Laplace, à Paris, et ses collègues, intègrent la dynamique orbitale de Mars et les fortes oscillations de l'obliquité (l'angle entre le plan orbital et l'axe de rotation, actuellement de 25 degrés). Ils ont permis d'estimer l'évolution du climat au cours des dix derniers millions d'années. L'intensité du chauffage solaire aux pôles varie de façon spectaculaire entre les périodes froides (comme aujourd'hui) et les longs épisodes chauds. Quand l'obliquité est grande, les températures polaires grimpent

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Kessler, *Martian Summer: Robot Arms, Cowboy Spacemen, and My 90 days with the Phoenix Mars Mission*, Pegasus, 2011.

C. R. Stoker *et al.*, *Habitability of the Phoenix landing site*, *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, article E00E20, 16 juin 2010.

P. H. Smith *et al.*, *H₂O at the Phoenix landing site*, *Science*, vol. 325, pp. 58-61, 3 juillet 2009.

N. Horowitz, *Premières expériences martiennes*, *Dossier Pour la Science* n° 60, juillet-septembre 2008. http://bit.ly/doss_60_viking

S. Atreya, *Le méthane, signe de vie sur Mars et Titan ?*, *Pour la Science* n° 356, juin 2007. http://bit.ly/356_mars_titan

J. Bell, *Mars : un passé humide*, *Pour la Science* n° 352, février 2007. http://bit.ly/352_mars

✓ SUR LE WEB

Site de la NASA consacré aux missions martiennes : <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/>

Site du projet Phobos LIFE : www.planetary.org/programs/projects/life/design.html

Page du site de l'ESA consacrée à la mission *Exomars* : <http://exploration.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=118>

Les missions européennes

Si les résultats des missions martiennes de la NASA sont spectaculaires, l'Agence spatiale européenne (ESA) n'est pas en reste. Elle s'est engagée dans l'exploration martienne dès 2003 grâce au lancement du satellite *Mars Express*. Toujours en opération, ses instruments ont contribué à révolutionner notre compréhension de la planète rouge. *Mars Express* embarquait un petit atterrisseur anglais, *Beagle 2*, mais celui-ci a échoué à se poser en douceur à la surface.

Sur ces bases, afin d'apprendre à se poser et à se déplacer sur la surface de Mars, l'ESA a décidé de lancer son propre rover de 300 kilogrammes, nommé *Exomars*, avec pour objectifs de rechercher des traces de vie passée et de comprendre l'évo-

lution de l'habitabilité de Mars. Pour cela, le rover devait utiliser une foreuse guidée par sondage radar et capable d'atteindre un à deux mètres de profondeur, afin de prélever des échantillons non altérés par le rayonnement et les espèces chimiques de l'atmosphère présentes en surface. Ces échantillons auraient été analysés par des spectromètres et un microlaboratoire embarqués.

Prévu initialement pour un lancement en 2013, le projet a souffert des aléas de la programmation spatiale et des crises budgétaires. L'idée même d'un rover entièrement européen a finalement disparu en 2009 pour être remplacée par un projet commun NASA-ESA. Lancé en 2018, le nouveau rover mixte sera beaucoup plus gros que le projet eu-

ropéen d'origine. Il emportera les instruments scientifiques d'*Exomars*, ainsi qu'un ensemble d'outils fournis par la NASA et destinés à préparer des échantillons pour un retour sur Terre (assuré par une autre mission de récupération, après 2020).

Pour se poser sur Mars, le rover de 2018 bénéficiera du système « *sky crane* » (grue volante) utilisé pour *Mars Science Laboratory*. Afin de maîtriser malgré tout les technologies pour atterrir sur Mars, l'ESA développe de son côté un atterrisseur de démonstration plus modeste. Il sera emporté par l'autre composante du nouveau programme conjoint NASA-ESA : un nouveau satellite construit par l'ESA et lancé par la NASA en 2016, destiné à détecter et cartographier dans l'atmosphère

les traces de gaz marqueurs d'une activité géophysique, voire biologique. Le projet est ambitieux, mais fragile : en septembre 2011, la NASA a annoncé qu'elle n'aurait pas les ressources pour financer pleinement sa contribution. Pour pallier cette défection, les Européens se tournent à présent vers la Russie, qui pourrait être intéressée à fournir un lanceur en échange d'une place pour des instruments russes sur le satellite. Après la perte probable de sa sonde *Phobos-Grunt*, quel sera le choix de l'Agence spatiale russe ? Le programme *Exomars* va-t-il survivre ? Les décisions cruciales seront prises en février 2012...

François Forget
Institut Pierre Simon Laplace,
CNRS, Paris

et la glace d'eau des calottes devient instable, se sublime et se reforme sur les volcans de haute altitude proches de l'équateur, donnant naissance à de vastes glaciers. À ce stade, les pôles deviennent tempérés. Peut-être le carbonate de calcium a-t-il été formé lors de ces périodes chaudes et humides ?

L'observation par le lidar de chutes de neige autour de la sonde, tôt le matin vers la fin de l'été martien, nous a conduit à imaginer comment un écosystème microbien pourrait fonctionner. La neige sublimée pourrait se lier à la surface des grains de poussière. L'eau ainsi adsorbée agit comme une très mince couche de liquide. Durant un épisode chaud, cette couche pourrait s'épaissir au point de percoler et former une interface liquide entre les grains de poussière, où des micro-organismes seraient totalement immergés. Les nutriments et oxydants détectés par *Phoenix* seraient alors disponibles pour alimenter ces microbes. Cela étant, il faudrait aussi que ces derniers soient capables d'hiberner pendant plusieurs millions d'années pour survivre aux épisodes froids et secs.

Le perchlorate a une autre propriété intéressante : à haute concentration, il peut abaisser le point de congélation de l'eau à -70°C . Cela signifie que des micro-organismes pourraient trouver une niche sur Mars même quand le climat se refroidit. Pour toutes ces raisons, la découverte de

perchlorate a fait sensation dans la communauté des exobiologistes.

La présence de perchlorate pourrait aussi résoudre un mystère vieux de 35 ans. En chauffant des échantillons de sol dans un minuscule four, la mission *Viking* a détecté l'émission de chlorométhano-gènes. Les scientifiques de la mission, incapables de comprendre comment de tels composés chimiques pouvaient avoir une origine martienne, les ont attribués à une contamination par un agent nettoyant utilisé avant le lancement.

Le pôle est-il habitable ?

Le perchlorate suggère une interprétation différente. Des chercheurs de l'Université nationale autonome du Mexique ont reproduit l'expérience avec des échantillons de sol semblables à ceux de Mars, prélevés dans l'Atacama, avec de petites quantités de perchlorate ou sans. Ils ont retrouvé le dégagement gazeux que *Viking* avait observé : le perchlorate libère son oxygène et brûle les composés organiques présents, émettant par ce processus des chlorométhano-gènes. Ainsi, si le sol martien analysé par *Viking* renfermait du perchlorate, il aurait pu contenir des quantités non négligeables de composés organiques, plus d'une partie par million, qui auraient échappé à la détection. L'observation par

l'instrument TEGA d'une libération de dioxyde de carbone par les échantillons chauffés à plus de 300°C , exactement ce qu'on attendrait si des substances organiques étaient oxydées par du perchlorate, renforce cette interprétation.

Somme toute, les chances de trouver des indices de vie sur Mars n'ont jamais paru aussi bonnes. Mais les données de *Phoenix* s'arrêtent là. C'est maintenant à *Mars Science Laboratory* et, plus tard, à la mission *Exomars* de chercher d'autres traces de vie. Les résultats de *Phoenix* ne nous donnent que des preuves indirectes, alors que l'instrument d'analyse de *Mars Science Laboratory* peut reconnaître des signatures organiques dans le sol sans chauffage.

Phoenix a rempli sa mission pendant cinq mois avant que l'obscurité et les températures frigorifiques de l'hiver polaire martien ne s'installent. Nous avons perdu son signal en novembre 2008. Quand le printemps est revenu au pôle Nord de Mars l'année suivante, nous avons espéré que l'atterrisseur reviendrait à la vie, mais ce ne fut pas le cas. La dernière image satellite montrait *Phoenix* couché sur la rive d'une longue fracture ressemblant à une rivière, ses panneaux solaires cassés, enfoui dans de la glace de dioxyde de carbone. L'avant-poste scientifique d'hier est devenu partie intégrante du paysage d'aujourd'hui. ■