

fossile qui peut nous en apprendre davantage, cette fois sur la morphologie probable des premiers *Homo heidelbergensis*. Il s'agit d'un crâne mis au jour (en plusieurs fragments) à Ceprano, dans le Sud du Latium, sur la rive d'un lac qui n'existe plus et qui avait comme affluent la version ancienne du fleuve Sacco actuel. Ce fossile, découvert en 1994 à Campo grande, à moins d'une centaine de kilomètres au Sud-Est de Rome, a été soumis depuis à diverses études.

En outre, des fouilles systématiques ont été entreprises depuis 2001 sous la direction de Italo Biddittu et l'un d'entre nous (G. Manzi) dans la région de Ceprano, avant tout pour vérifier la datation proposée à l'époque de la découverte, à savoir 800 000 à 900 000 ans. D'après les résultats de ces fouilles, publiés en 2010, le crâne de Ceprano est plus jeune que ne le supposaient les premières hypothèses avancées. L'âge suggéré par l'ensemble des données est en effet approximativement de 400 000 ans ; plus précisément, il se situe dans l'intervalle compris entre 430 000 et 385 000 ans. Cela correspondait à une période de climat tempéré, au cours de laquelle le grand lac qui occupait une grande partie du bassin de Ceprano se retirait et laissait place à des zones marécageuses et au cours calme d'un fleuve sinueux.

Ce résultat inattendu a conduit les auteurs (G. Manzi et ses collègues) de la nouvelle estimation chronologique à commenter dans leur article de 2010 : « La morphologie du fossile de Ceprano [...] qui ne semble pas avoir de correspondants contemporains où que ce soit sur le continent européen, apparaît intéressante dans la mesure où elle accroît fortement et de façon inattendue le niveau de diversité morphologique des populations européennes du Pléistocène moyen. » Cela suggérerait la possibilité d'envisager des « scénarios plus complexes pour l'évolution humaine en Europe, qui prennent en compte soit une variabilité intraspécifique considérable [...], soit la coexistence de différentes lignées évolutives ».

Depuis, de nouvelles analyses ont été réalisées sur la morphologie du crâne de Ceprano, dans un cadre comparatif le plus large possible et à la lumière de la nouvelle chronologie. En particulier, une étude publiée par Aurélien Mounier, de l'Université de la Méditerranée à Marseille, et ses collègues confirme les conclusions auxquelles étaient parvenues des recher-



ches précédentes. Résumons-les dans les grandes lignes. Avant tout, certains traits architecturaux de l'homme de Ceprano sont archaïques et similaires à ceux de *Homo erectus* en Asie et de *Homo ergaster* en Afrique ; mais en même temps, il existe divers caractères discrets qui rapprochent le crâne italien de la variabilité des êtres humains du Pléistocène moyen, c'est-à-dire de *Homo heidelbergensis*. Enfin, le fossile de Ceprano ne montre aucun caractère dérivé dans le sens néandertalien et il apparaît davantage similaire aux fossiles contemporains que l'on découvre en Afrique, que des fossiles européens.

Le crâne de Ceprano réunit donc dans une seule pièce une mosaïque de caractères archaïques et évolués, africains et eurasiatiques. Cela suggère qu'il puisse témoigner d'un peuplement ancestral de *Homo heidelbergensis*, dont la morphologie crânienne s'est ensuite modifiée en Europe, acquérant une particularité distincte dans le sens néandertalien, tandis qu'elle a été conservée partiellement en Afrique et en Asie continentale.

Ainsi, l'homme de Ceprano, à la lumière de la nouvelle estimation chronologique qui lui confère un âge réduit de moitié par rapport aux datations précédentes, ne perd pas de son intérêt. Bien au

4. LA MÂCHOIRE DE MAUER. Découverte en 1907 à Mauer, près de Heidelberg en Allemagne, cette mandibule date d'environ 500 000 ans. C'est à partir de ce vestige qu'a été définie et nommée l'espèce *Homo heidelbergensis*. Cet ossement est resté pendant pratiquement tout le XX^e siècle le plus ancien fossile humain trouvé en Europe.

contraire, il prend un intérêt nouveau et sans doute plus important encore. Il ne doit plus être considéré dans le cadre du premier peuplement de l'Europe, mais dans celui d'une espèce variable et largement distribuée, qui représenterait le dernier ancêtre commun, avant sa disparition (en raison de spécialisations allopatriques, à savoir des différenciations de nouvel-

LE CRÂNE DE CEPRANO
réunit donc dans une seule pièce
une mosaïque de caractères archaïques
et évolués, africains et eurasiatiques.

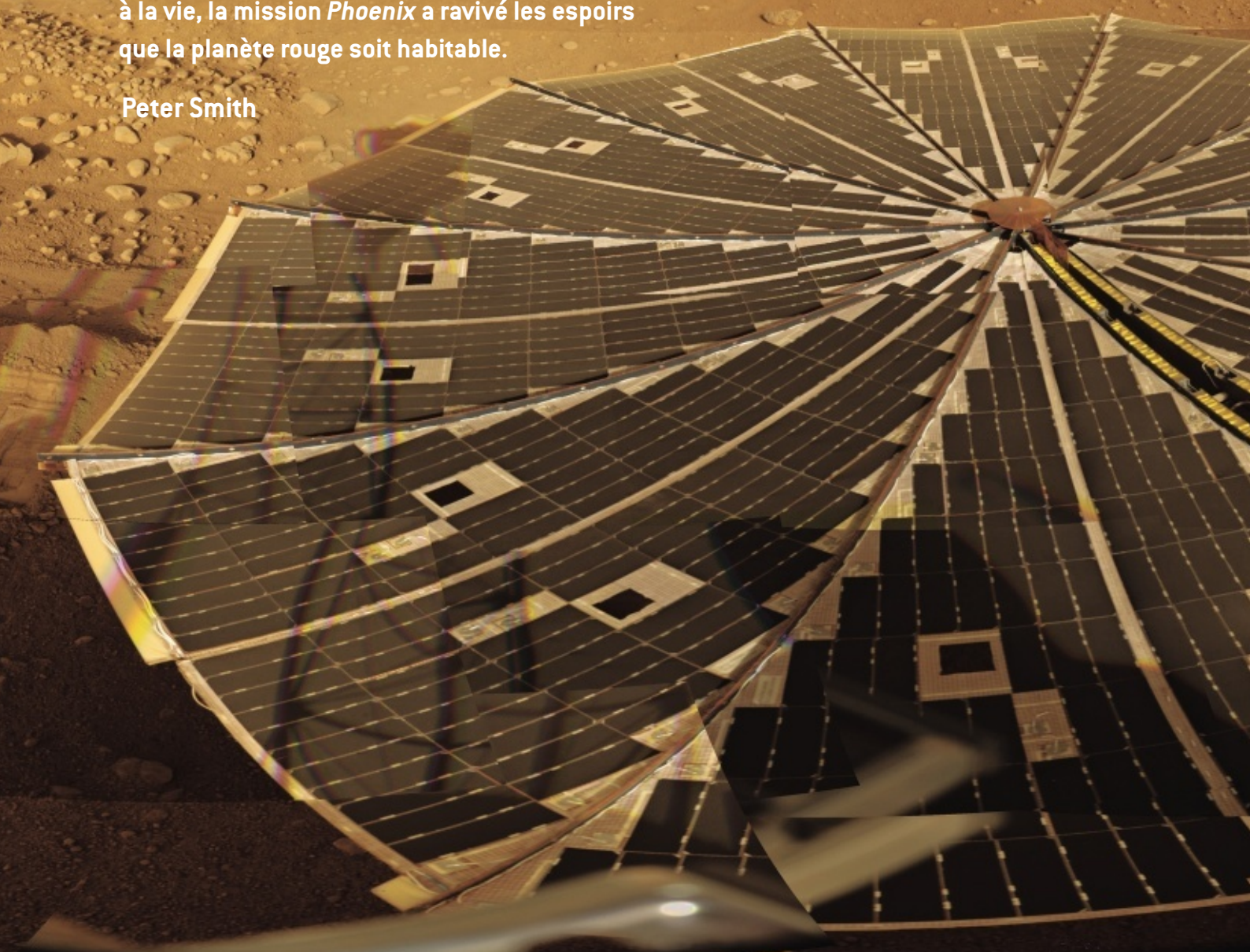
les espèces dues à la séparation géographique des populations), de *Homo sapiens*, *Homo neanderthalensis* et des hommes encore sans nom précis représentés par la phalange de Denisova. Dans ce nouveau contexte, l'homme de Ceprano se pose comme un bon candidat pour représenter le type morphologique ancestral de *Homo heidelbergensis*. ■

Planétologie

On a creusé sur MARS

En découvrant de la glace d'eau
juste sous la surface et des composés propices
à la vie, la mission *Phoenix* a ravivé les espoirs
que la planète rouge soit habitable.

Peter Smith



L'ESSENTIEL

✓ La mission *Mars Science Laboratory* a décollé en novembre 2011, en emportant la panoplie d'instruments d'analyse la plus complexe jamais envoyée sur Mars.

✓ Ses objectifs ont été en partie déterminés par la mission *Phoenix*, qui a révélé en 2008 que le sol de Mars pourrait ne pas être hostile à la vie, contrairement à ce qu'avaient suggéré les missions *Viking* en 1976.

✓ *Phoenix* a confirmé l'existence de glace d'eau et de carbonate de calcium juste sous la surface, et a aussi découvert des composés inattendus, tels que des perchlorates et de la neige.

NASA/JPL-Caltech, Univ. d'Arizona et Univ. Texas A&M

Le 26 novembre 2011, la mission *Mars Science Laboratory* de la NASA a décollé de cap Canaveral, en Floride, à bord d'une fusée *Atlas V*. En août 2012, après une descente finale à l'aide d'une sorte de « grue volante », le robot d'exploration le plus complexe jamais envoyé sur Mars se posera dans le cratère Gale, au milieu d'un des plus riches dépôts d'argiles et de sulfates de la planète, vestige d'une époque où l'eau était abondante.

De la taille d'une petite voiture, le rover, dénommé *Curiosity*, explorera pendant une année martienne la base du pic central du cratère, qu'on pense être la partie la plus ancienne. Puis il commencera l'ascension de l'empilement de sédiments de cinq kilomètres de haut qui occupe le centre du cratère, en remontant l'évolution géologique jusqu'aux dépôts de l'ère moderne et en scrutant chaque couche à la recherche des minéraux hydratés.

Un bras robotique prélèvera des échantillons et les déposera dans un laboratoire de chimie embarqué. Les instruments d'analyse que celui-ci renferme détermineront la structure minéralogique et la composition élémentaire des roches, et détecteront les matériaux organiques éventuels. Ces analyses tenteront de répondre à la question : Mars a-t-elle été propice à la vie par le passé ?

Mars Science Laboratory est une étape logique dans la suite des missions au sol qui se sont succédé ces 15 dernières années : *Sojourner*, *Spirit* et *Opportunity* et la plus récente, *Phoenix*. Ces missions, ainsi qu'une série de sondes en orbite (les dernières en date étant *Mars Express* et *Mars Reconnaissance Orbiter*), ont révélé une planète à l'histoire complexe, qui a connu une époque humide. Même dans son état actuel désertique et glacial, la planète rouge

1. LA VUE DU SITE D'ATERRISSAGE

de la sonde *Phoenix* montre l'un de ses deux panneaux solaires, au premier plan d'un paysage aux petites roches polygonales typique des régions de pergélisol, sur Mars comme sur Terre.

montre des signes d'activité. Les traces de méthane gazeux détectées au-dessus de la région de Nili Fossae sont parmi les plus intrigants. Ce gaz, s'il existe bien, a-t-il une origine géologique ou biologique ? Cette année, *Mars Reconnaissance Orbiter* a découvert dans l'hémisphère Sud, entre 30 et 50 degrés de latitude, la formation de traces à la surface en été, dont l'explication la plus simple serait le dégagement d'eau saumâtre.

Mais ces espoirs se heurtent aux résultats des missions *Viking* de 1976. Les analyses des deux atterrisseurs jumeaux ont indiqué que Mars était hostile à toute forme de vie. Les sols étaient dépourvus d'eau et de molécules organiques, et à plus forte raison de micro-organismes en sommeil. Des oxydants puissants, tels que le peroxyde d'hydrogène, couplés à un intense rayonnement ultraviolet, stérilisaient la surface. Pour la plupart des scientifiques, la recherche de la vie sur Mars a

commencé avec les missions *Viking*, et s'est achevée avec elles.

Comment concilier ce tableau lugubre avec les indices d'activité de la planète rouge ? La mission *Phoenix* pourrait détecter la réponse. Ses analyses chimiques menées sur le sol martien, les premières depuis *Viking*, suggèrent une autre interprétation : il est possible que les sondes *Viking* n'aient détecté aucune molécule organique parce qu'elles étaient détruites par la technique d'analyse. En outre, *Phoenix* a découvert de la glace d'eau juste sous la surface. Ni sèche ni stérile, notre voisine pourrait donc être habitable.

Au moment où le rover *Curiosity* s'apprête à assurer la relève, il est temps de revenir sur l'histoire de la mission *Phoenix* et de dresser son bilan.

Ce n'est pas tous les jours que quelqu'un vous propose un vaisseau spatial gratuit. Au début de 2002, des scientifiques de la NASA m'ont rappelé l'existence, dans une

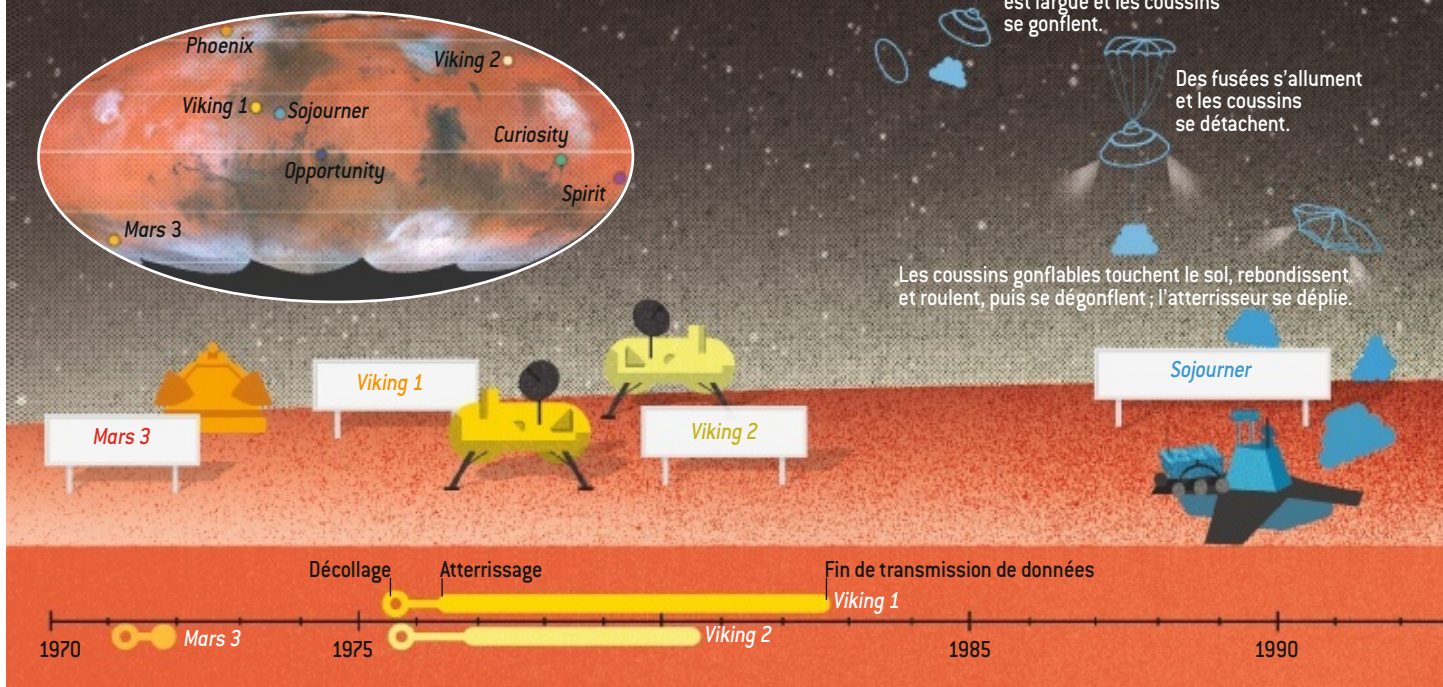
salle blanche du constructeur *Lockheed Martin* à Denver, d'une sonde *Surveyor* en attente. Elle aurait dû être lancée en 2001, mais la NASA avait annulé le vol quand son jumeau, *Mars Polar Lander*, avait été perdu à l'atterrissage en décembre 1999.

Surveyor renaît de ses cendres

Les scientifiques de la NASA voulaient rénover la sonde dans le cadre du nouveau programme *Scout* de l'Agence spatiale et me proposaient d'être le responsable scientifique. J'hésitai. D'un côté, je ressentais toujours l'envie de tirer au clair la question de la vie sur Mars. Au fond de moi-même, je n'ai jamais cru aux résultats des atterrisseurs *Viking*. Pourquoi n'avaient-ils vu aucun matériau organique ? Celui-ci pouvait-il être dissimulé dans un endroit où une mission appropriée saurait le dénicher ?

TROIS FAÇONS DE SE POSER SUR MARS

Sept sondes spatiales ont atterri avec succès sur Mars jusqu'à présent, pour l'essentiel sous les tropiques martiens. *Phoenix* a atterri juste à l'intérieur du cercle Arctique. Se poser en toute sécurité n'est pas chose aisée. L'atmosphère est assez épaisse pour qu'un bouclier thermique soit nécessaire, mais pas assez pour freiner suffisamment la sonde avec un parachute. Les atterrisseurs *Phoenix*, *Viking* et la sonde soviétique *Mars 3 lander* ont utilisé des propulseurs pour leur descente finale ; *Sojourner*, *Spirit* et *Opportunity* ont rebondi sur d'énormes coussins gonflables, et *Mars Science Laboratory (Curiosity)* sera déposée par une sorte de grue volante.



D'un autre côté, aucun objectif scientifique évident n'était défini. La sonde *Surveyor* avait été conçue pour se poser près de l'équateur, recueillir des échantillons de sol avec un bras robotique et déployer un petit rover pour analyser les roches avoisinantes. De nouveaux instruments pouvaient remplacer les anciens, mais pour quels objectifs ?

C'est alors que William Boynton, directeur de l'équipe du spectromètre à rayons gamma du satellite *Mars Odyssey*, a annoncé la découverte de glace d'eau près de la surface autour de la calotte polaire Sud de Mars. Cet instrument détecte en effet les rayons gamma, mais aussi les neutrons, qui indiquent la concentration en hydrogène dans le sol jusqu'à un mètre de profondeur. Des signaux suggéraient aussi la présence d'eau dans les plaines du Nord, notamment une mince couche de sol riche en glace d'eau située à la limite d'extension hivernale de la calotte de glace de dioxyde de carbone.

Il existe sur Terre une zone analogue de sol gelé, ou pergélisol, autour de l'Arctique. C'est le « congélateur » de la planète, qui conserve la trace des formes de vie qui y ont résidé ou qui y ont été apportées par les vents. La glace peut être âgée de plusieurs millions d'années. Eske Willerslev, de l'Université de Copenhague, au Danemark, avait retrouvé les principales branches de l'arbre du vivant en effectuant des analyses d'ADN sur du pergélisol sibérien. Était-il possible d'en faire autant sur Mars ?

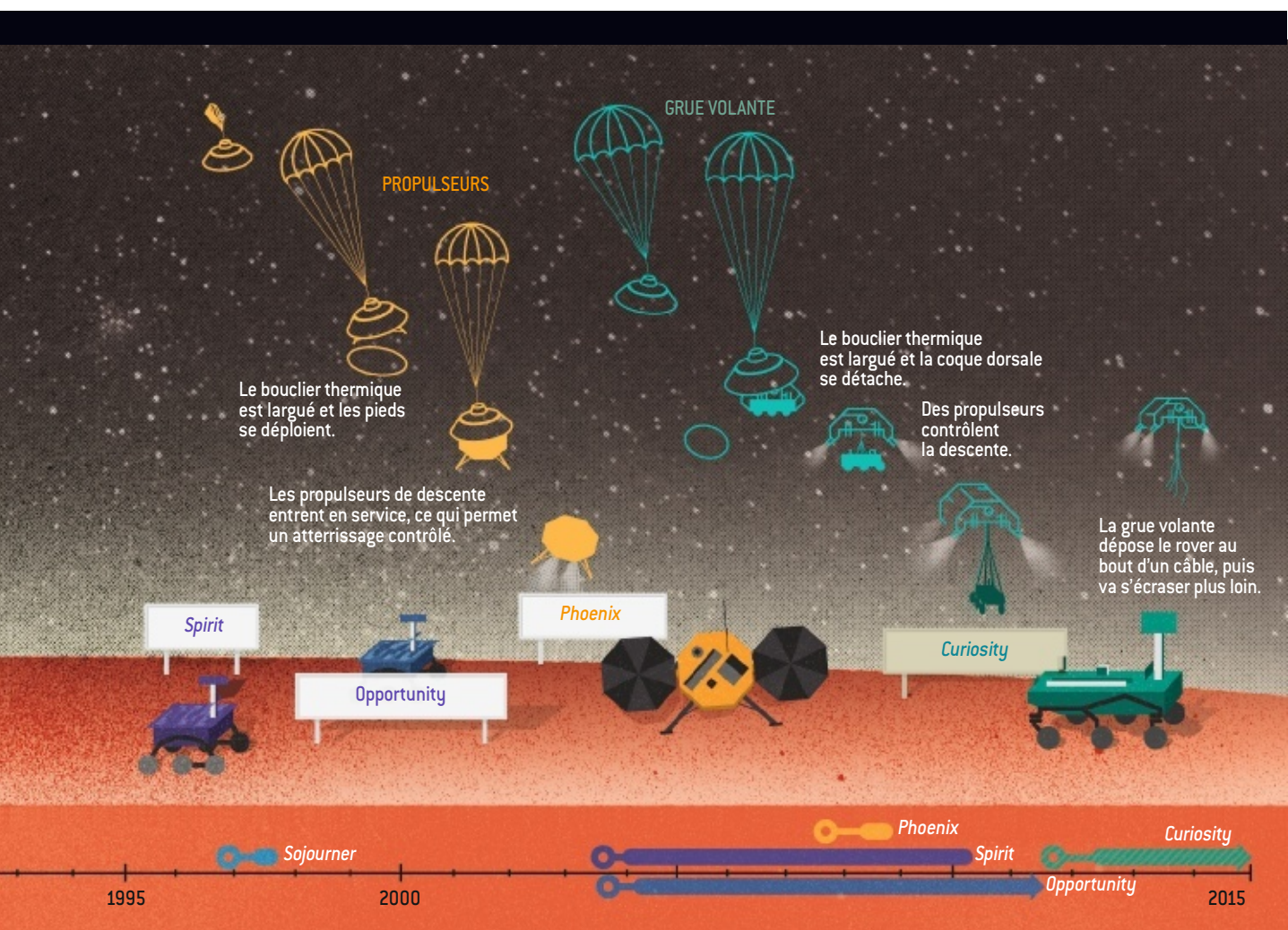
Des anomalies en cascades

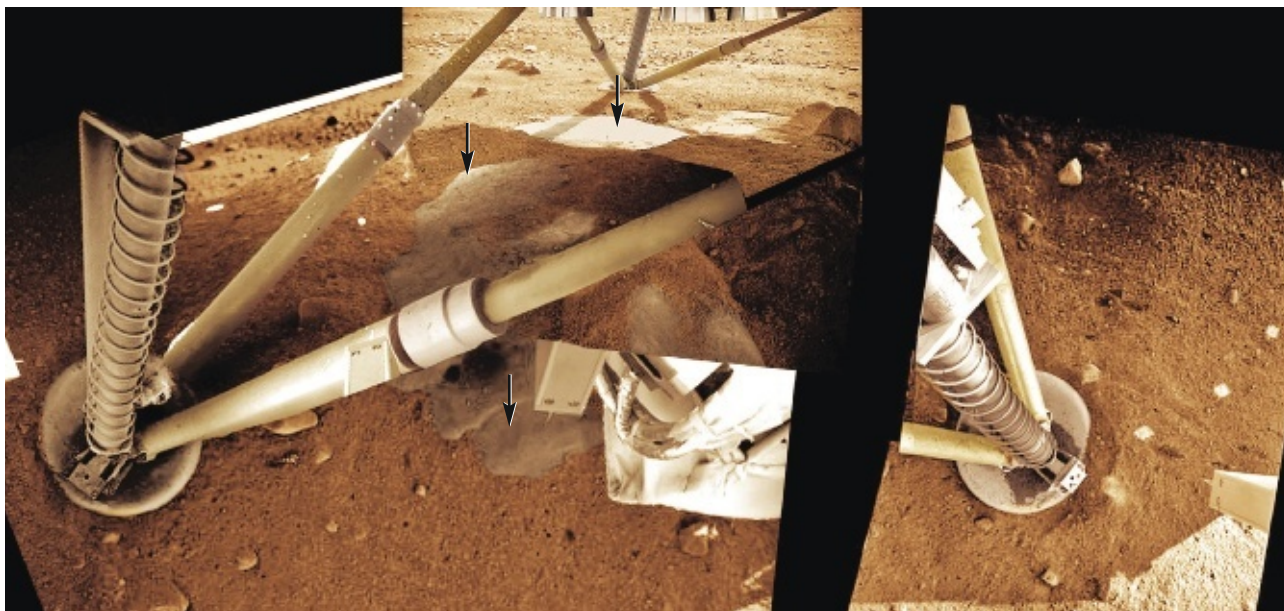
J'ai jeté mon dévolu sur les plaines du Nord et commencé à sélectionner les instruments qui permettraient de progresser. J'ai monté un partenariat entre l'Université d'Arizona, le *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA, et *Lockheed Martin*. Nous avons nommé *Phoe-*

nix cette mission, car la mission *Surveyor* abandonnée revenait à la vie. En août 2003, la NASA a sélectionné notre projet. La date de lancement, fixée à août 2007, nous laissait quatre années pour tout préparer.

Ce temps a été passé à examiner, réviser et tester la sonde *Surveyor* afin de trouver les défauts de conception qui avaient condamné sa jumelle. En tout, nous avons trouvé environ 25 défauts majeurs. Corriger tous ces problèmes a été ardu, mais quand même plus facile et moins coûteux que de construire une nouvelle sonde à partir de zéro. La plupart des problèmes ont été réglés par l'ajout de dispositifs de chauffage, la réduction de la taille du parachute et le renforcement de la structure. D'autres ont nécessité des modifications du logiciel. Un défaut, cependant, a été plus difficile à comprendre et à corriger.

Le radar d'atterrissage provenait d'un avion de chasse F-16 de la fin des années 1990.





2. DES TACHES BLANCHES BRILLANTES (flèches) ont été mises en évidence sous la sonde *Phoenix* par le bras robotisé une semaine après l'atterrissage. Il s'agit sans doute de glace d'eau mise à nu quand les propulseurs de descente ont soufflé le sol.

Quand nous avons effectué des tests de largage dans le désert des Mojaves, le système a fait des erreurs graves d'estimation d'altitude et a perdu des données. Nous nous sommes tournés vers les concepteurs du radar, la Société *Honeywell*, mais ils n'ont pas pu nous aider, car ce modèle obsolète n'était plus fabriqué.

En combinant des simulations numériques et de nouveaux tests, l'équipe d'ingénieurs a lentement réparé une à une les anomalies. Un nouveau test, en octobre 2006, fut concluant. Tout semblait en ordre.

Mais nos espoirs furent de courte durée. Nous avons en effet découvert que des reflets sur le bouclier thermique lors du largage pouvaient induire en erreur le radar et entraîner une mauvaise estimation de l'altitude. Les antennes et les interrupteurs se sont eux aussi révélés potentiellement défectueux. Les ennuis semblaient sans fin. En février 2007, cinq mois avant l'intégration de la sonde au véhicule de lancement, nous avions 65 anomalies en cours d'analyse. La NASA s'inquiétait du fait que nous découvrions sans arrêt de nouvelles défaillances.

Cependant, la gravité des anomalies allait diminuant. En juin, nous avons réussi à convaincre les comités d'évaluation que les risques qui subsistaient étaient acceptables. C'était tout de même un pari. D'autres défauts nous avaient peut-être échappé.

En août 2007, nous avons terminé les derniers tests au Centre spatial Kennedy. Un violent orage lors de l'installa-

tion sur le lanceur causa une dernière frayeur, mais, par chance, la sonde ne subit aucun dégât, et le 4 août, de bonne heure, la fusée décolla sans encombre : *Phoenix* était enfin en route vers Mars.

Dix mois plus tard, les équipes d'ingénieurs du JPL et de *Lockheed Martin* préparaient les manœuvres d'atterrissage. *Mars Odyssey* et *Mars Reconnaissance Orbiter* avaient ajusté leurs orbites pour se trouver au-dessus de la zone de descente, afin de relayer les signaux de *Phoenix* (ils arrivaient sur Terre avec une quinzaine de minutes de décalage).

Un atterrissage périlleux

L'atterrissage sur Mars est beaucoup plus complexe que sur la Terre ou la Lune. La sonde doit passer par plusieurs étapes. Au départ, c'est un véhicule de croisière interplanétaire. En larguant l'étage de croisière, se profile un véhicule capable de supporter la chaleur dégagée par le frottement avec l'atmosphère, où il pénètre à près de 20 000 kilomètres par heure. Ralentissant à 1 500 kilomètres par heure, le véhicule d'entrée libère ensuite son parachute. Dans l'atmosphère ténue de Mars, le parachute peut au mieux abaisser la vitesse jusqu'à 150 kilomètres par heure, ce qui est encore beaucoup trop rapide pour se poser en douceur. Un kilomètre au-dessus du sol, l'atterrisseur se sépare du parachute et de la coque pro-

tectrice, et 12 propulseurs ralentissent sa chute jusqu'à une vitesse finale d'une dizaine de kilomètres par heure, tout en réduisant la vitesse transversale à moins d'un mètre par seconde, et en maintenant l'engin parallèle à la surface. Quand l'atterrisseur se pose à la surface, le choc est amorti par des « pieds » spécialement conçus. Enfin, la sonde doit déployer ses panneaux solaires et ses instruments et se préparer pour sa mission. Et tout cela en sept minutes...

Je retins mon souffle pendant la phase finale : nous avions tous à l'esprit les problèmes de radar et la perte de *Mars Polar Lander*. Mais après une interminable descente égrénée par le décompte de l'altitude, un signal arriva de la surface : *Phoenix* s'était posée sans heurts.

Deux heures après – le temps nécessaire pour que *Mars Odyssey* fasse le tour de Mars et repasse au-dessus de la zone d'atterrissage –, la sonde *Phoenix* envoyait la confirmation que ses panneaux solaires avaient bien été déployés, et ses premières images. Le premier aperçu de l'Arctique martien était magique. Des formes polygonales et de minuscules cailloux s'étendaient à perte de vue. Après six ans de préparation, la mission scientifique pouvait commencer.

Notre équipe de 35 chercheurs, 50 ingénieurs et 20 étudiants commença à travailler en continu. Deux équipes assuraient des demi-journées martiennes (soit 12 heures et 20 minutes). Nous nous sommes

ainsi lentement décalés par rapport aux journées terrestres !

La première surprise eut lieu avant même que le bras robotique ait creusé sa première tranchée. Pour vérifier la position du pied arrière, nous avons fait passer le bras sous la sonde, et la caméra a révélé que les propulseurs avaient soufflé la terre sèche sur environ cinq centimètres de profondeur, révélant des taches brillantes, faisant penser à de la glace (*voir la figure 2 ci-contre*) ! Le bras ne pouvait examiner cela de plus près, mais nos attentes vis-à-vis de la première excavation en sortaient renforcées.

Lorsqu'il a commencé à pelleter le sol, le bras robotisé a mis au jour une couche brillante. Des portions de cette couche ont disparu en trois ou quatre jours martiens (ou « sols »). Cela pouvait être de la glace d'eau qui se sublimait, ou de la glace de dioxyde de carbone. Cette dernière aurait cependant dû disparaître plus rapidement à la température ambiante de -30°C . L'instrument TEGA (*Thermal and Evolved-Gas Analyzer*, soit analyseur thermique de gaz évolué) a confirmé par la suite qu'il s'agissait bien de glace d'eau. C'était la première preuve directe de la présence de glace d'eau sur Mars.

La glace exposée suggérait que tout l'environnement de l'atterrisseur – et sans doute les régions polaires entières – n'était pas une plaine désertique sèche comme il y paraissait, mais un champ de glace d'épaisseur inconnue. Trois instruments d'analyse devaient permettre d'analyser cette glace : TEGA, constitué de huit petits fours reliés à un spectromètre de masse qui analyse la composition des gaz s'échappant des échantillons chauffés, WCL (*Wet Chemistry Lab*, ou laboratoire de chimie aqueuse), qui mélange un échantillon du sol avec de l'eau venant de la Terre, puis analyse les ions en solution ; et enfin un microscope.

La priorité était d'étudier la chimie du sol à la recherche des traces d'eau liquide, sans parler de nutriments et autres sources d'énergie disponibles pour d'éventuels micro-organismes. Nous avons aussi tenté d'identifier la stratification du sol jusqu'à l'interface glace-roche. Le bras devait recueillir des échantillons et les placer dans les orifices d'analyse sur le pont de la sonde. En principe, c'est aussi simple que de mettre du sable dans un seau avec une petite pelle ; mais en pratique, manipuler le bras robot à 300 millions de

kilomètres est un vrai défi. Au centre des opérations, à Tucson, dans l'Arizona, un banc d'essai avec une réplique du bras robotisé, des caméras et des ouvertures destinées à accueillir les échantillons nous aidait à préparer les manœuvres. Nous testions toutes les instructions avant de les envoyer sur Mars. Il restait cependant deux aspects que nous ne pouvions pas reproduire : le vent et les propriétés du sol martien.

Tenus en échec par des mottes collantes

Le sol de Mars semblait former une croûte, contrairement aux sols meubles de l'Arizona. Résultat, la pelle du bras robotisé se remplissait de mottes collantes. Or les écrans destinés à empêcher des cailloux d'entrer dans les orifices d'analyse se révélaient aussi très efficaces pour bloquer les mottes ! Le bras a réussi à poser son premier échantillon sur l'ouverture de l'instrument TEGA, mais pas un seul grain n'est descendu jusqu'au four. L'instrument était

L'AUTEUR



Peter SMITH est professeur de planétologie à l'Université d'Arizona, aux États-Unis. Il a notamment travaillé sur les missions robotisées *Mars Reconnaissance Orbiter*, *Sojourner*, *Spirit* et *Opportunity*. Il a reçu la médaille ESAM (médaille de réussite scientifique exceptionnelle) de la NASA.



3. LA COQUE DE PROTECTION DE MARS SCIENCE LABORATORY, lancé le 26 novembre dernier, comporte un bouclier de rentrée atmosphérique plus grand que ceux des capsules *Apollo*.

Des astronautes microscopiques

Des roches extraterrestres ont-elles ensemencé la vie sur la Terre ? Pour tester cette idée, des micro-organismes s'apprêtent à faire un aller-retour vers Mars.

Est-il possible que la vie sur Terre vienne de... Mars ? Depuis une vingtaine d'années, cette idée est sortie des livres de science-fiction pour devenir une hypothèse scientifique. On estime qu'une tonne de météorites d'origine martienne tombe chaque année sur Terre. Des micro-organismes auraient pu être transportés par ce biais.

Les impacts qui ont arraché ces roches à la planète rouge sont des événements violents, mais des expériences montrent que certaines espèces peuvent y survivre. En rentrant dans l'atmosphère terrestre, ces roches ne sont chauffées par le frottement que sur une épaisseur de quelques millimètres.

Outre le décollage et l'atterrissage, des micro-organismes survivaient-ils au voyage entre la Terre et Mars, dans le vide glacial de l'espace ? La plupart des météorites martiennes mettent des milliers ou des millions d'années pour rallier la Terre, mais environ une sur dix millions fait le trajet en environ un an. Un micro-organisme peut-il survivre aussi longtemps ?

La sonde *Phobos-Grunt*, lancée le 9 novembre 2011 par l'Agence spatiale russe, devait apporter la réponse. Malheureusement, peu après le lancement, le contact avec la sonde a été perdu. Cependant, à l'heure où ces lignes sont écrites, un premier contact a été rétabli, qui laisse espérer que la mission pourra être sauvée.

L'objectif principal de la mission *Phobos-Grunt* est de se poser sur Phobos, le satellite de Mars, d'y collecter une pelletée de sol et de la ramener sur Terre. Mais la sonde embarque aussi l'expérience LIFE (*Living Interplanetary Flight Experiment*), un échantillon de sol du désert du Neguev, en Israël, qui contient divers micro-organismes. Autour de cet échantillon placé dans un récipient, 30 tubes renferment 10 espèces qui représentent les trois domaines du vivant : les bactéries, les archées et les eucaryotes. Cinq de

ces espèces ont déjà participé à un vol avec l'ultime mission de la navette spatiale *Endeavour* en mai dernier. Présentons les espèces retenues.

Les bactéries

Deinococcus radiodurans survit à d'énormes doses de rayonnements. Au vu des *D. radiodurans* qui ont fait le voyage sur *Endeavour*, je suis presque sûr que leurs cousins survivront au voyage aller-retour vers Phobos. En comparant la robustesse d'individus génétiquement différents, nous espérons mieux comprendre comment ces organismes tolèrent les rayonnements, le dessèchement et le froid extrême.

Alors que *D. radiodurans* tolère l'irradiation sans changer de structure, d'autres bactéries se retranchent dans des coques durcies nommées endospores. L'expérience LIFE en inclut deux. *Bacillus subtilis* est depuis longtemps utilisé comme espèce test dans les vols spatiaux. Il a été démontré que ses endospores, recouvertes d'une mince couche de poussière qui les protège du rayonnement ultraviolet du Soleil, peuvent survivre jusqu'à six ans dans l'espace. Dans l'espace interplanétaire, cependant, le rayonnement le plus dangereux est celui des particules chargées.

L'autre bacille, *B. safensis*, a été découvert il y a dix ans dans le complexe d'assemblage des vaisseaux au Laboratoire JPL de la NASA. Après stérilisation de la sonde *Mars Odyssey* pour éviter de contaminer la planète rouge avec des organismes terrestres, les prélèvements de contrôle ont révélé une espèce qui avait survécu.

Les archées

Les archées ressemblent aux bactéries, mais avec un métabolisme plus proche de celui des eucaryotes. *Methanothermobacter wolfeii* a été choisie non pas parce qu'elle est particulièrement résistante, mais parce qu'elle produit du méthane. L'atmosphère martienne contient des traces de ce gaz, et certains chercheurs ont suggéré qu'il proviendrait d'organismes apparentés à *M. wolfeii*.

Nous avons inclus *Haloarcula marismortui* pour une raison similaire. Native de la mer Morte, elle aime le sel, ce qui est sans doute une nécessité pour les éventuels organismes martiens. Pour ne pas geler, l'eau martienne doit en effet être saumâtre. De fait, une météorite martienne, Nakhla, présente des signes d'immersion dans l'eau salée.

Prospérant dans des sédiments océaniques chauffés par des volcans, *Pyrococcus furiosus* n'est pas supposé ressembler à un organisme martien, mais nous l'avons

inclus comme « témoin ». Si les micro-organismes ne survivent pas, nous devons savoir si c'est dû au stress de l'environnement spatial ou à l'échauffement de la rentrée dans l'atmosphère. Si *P. furiosus* est le seul survivant, nous pourrions retenir cette option.

Les eucaryotes

Les eucaryotes sont les organismes dont les cellules ont un noyau, comme les nôtres. Il est peu probable que de telles cellules proviennent de Mars, mais nous voulons savoir s'ils auraient pu survivre au voyage. Une des espèces retenues est la levure *Saccharomyces cerevisiae*.

De minuscules animaux et végétaux seront eux aussi du voyage. Les tardigrades sont des invertébrés d'environ 1,5 millimètre de long dotés de pattes crochues. Ils sont très résistants aux rayonnements, aux températures extrêmes, et même au vide spatial. Parmi les végétaux, on trouve des graines d'*Arabidopsis thaliana*, un végétal de l'espace : elle a voyagé deux fois à bord des missions *Apollo*.

Si la capsule *Grunt* parvient finalement à partir vers Mars et à revenir en 2014, nous saurons enfin si la vie peut faire des sauts de puce de planète en planète.

David WARMFLASH,
Directeur scientifique
du projet *Phobos-LIFE*



Le tardigrade, animal d'environ 1,5 millimètre de long, est le plus complexe des organismes destinés à faire l'aller-retour vers Mars à bord de la sonde *Phobos-Grunt*.

Photo Researchers, Inc.

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. ■

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Dossier Pour la Science

Découvrir la chimie qui régule les écosystèmes ou la vie autour des sources hydrothermales des abysses ; exploiter de façon raisonnée la richesse des fonds marins (microalgues, ressources minérales, méthane...) ; découvrir des médicaments nouveaux ; protéger les mers contre les marées noires ou les déchets plastiques... Aujourd'hui, la chimie est au centre d'une alliance durable entre les hommes et les océans.

Numéro 73, octobre-décembre 2011 – Prix : 6,95 €

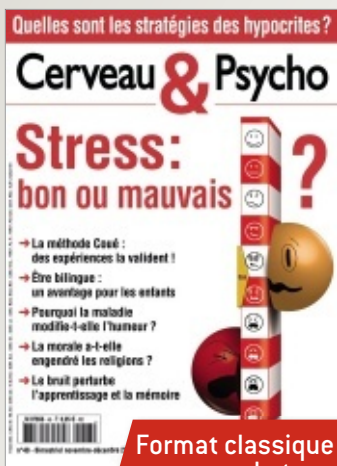
L'Essentiel Cerveau & Psycho

Aujourd'hui, d'innombrables résultats de recherche confirment que les enfants – mais aussi les adolescents et les adultes – soumis à la violence (images, jeux vidéo, etc.) sont eux-mêmes plus violents, moins sensibles aux violences faites à autrui. Sociologues, psychologues, psychiatres cherchent à identifier les causes de la violence pour mieux la combattre.

Numéro 8, novembre 2011-janvier 2012 – Prix : 6,95 €



Format classique
ou pocket



Format classique
ou pocket

Cerveau & Psycho

Nous nous nous sentons stressés par notre rythme de vie, notre travail, etc. Et si le stress n'était pas forcément mauvais ? Certains y trouvent un stimulant et, dans certaines conditions, il renforce la mémoire. Mais, comme en toute chose, il faut éviter l'excès ! À lire aussi : la méthode Coué validée par les psychologues, les enfants bilingues avantagés, les méfaits du bruit sur la concentration, etc.

Numéro 48, novembre-décembre 2011 – Prix : 6,95 €

■ POUR LA
SCIENCE