



4. LE MIMÉTISME DÉPEND DU SEXE : dans certaines espèces, seule la femelle est mimétique, ce qui est suffisant pour garantir la survie des espèces : le mâle s'accouple, dissémine ses gènes. Ensuite sa protection n'est plus nécessaire, tandis que la femelle, plus vulnérable, doit avoir une longévité suffisante pour assurer la maturation et la ponte des œufs. La femelle de l'espèce *Heraclides torquatus*, comestible (en haut, colonne de gauche) imite la femelle de l'espèce *Parides sesostris*, toxique (en haut, colonne de droite). Les mâles (en bas) ne sont pas mimétiques.

portent des espèces mimétiques, lesquelles imitent souvent plusieurs modèles distincts. Ces espèces mimétiques, polymorphes, présentent des formes très variées imitant divers modèles. Ainsi, la capacité d'imitation semble limitée à des espèces et à des genres caractérisés par une grande variabilité génétique. Il n'est pas interdit de penser qu'il existe chez ces papillons des transposons (ou gènes «sauteurs»), analogues à ceux qui ont été mis en évidence chez les bactéries ou chez la drosophile.

Ces gènes ou groupes de gènes ont la capacité de se délocaliser dans le génome, et selon leur position, ils s'expriment ou non, activent ou inhibent l'expression d'autres gènes situés à proximité. Ces gènes sauteurs augmentent notablement la variabilité génétique. De plus, divers types de stress environnementaux, tels des modifications du milieu de culture ou de la température semblent déclencher le mouvement d'éléments transposables dans le génome, augmentant la fréquence de certaines mutations. De surcroît, certains de ces mécanismes dépendent du sexe : chez la drosophile, par exemple, les taux de mutations aug-

mentent notablement au cours de l'accouplement de mâles sauvages ayant des éléments transposons avec des femelles domestiques qui n'en ont pas.

Ces phénomènes, que le généticien américain Christopher Wills qualifie de «processus de facilitation évolutionniste», sont capables d'augmenter le taux de mutations et d'activer des gènes cryptiques qui sont présents dans le génome, mais qui, avant la translocation des transposons ne sont pas exprimés. Ces mécanismes pourraient être responsables de la variabi-

lité génétique observée chez les papillons mimétiques et contribueraient tant à l'activation de gènes cryptiques qu'à la multiplication de formes nouvelles, la sélection éliminant les moins «performantes», celles qui protègent le moins bien l'espèce, c'est-à-dire les moins mimétiques.

Certains papillons mimétiques ne se contentent pas d'avoir le même aspect que l'espèce qu'ils imitent, ils en adoptent aussi les comportements, tels leurs types de vol, leurs habitudes de voler dans des lieux ensoleillés ou ombragés : ainsi, deux formes mimétiques d'*Hypolimnas dubius*, émergent de leur chrysalide au même moment de la journée que leurs deux modèles respectifs, *Amauris niavus*, et *Amauris tartarea*. L'étude génétique de ces lépidoptères suggère qu'il existerait un supergène regroupant les gènes du comportement et les gènes de la couleur : lors de croisements entre ces formes, les facteurs de coloration et de comportements seraient transmis simultanément. Si la simultanéité de l'expression de ces gènes n'était pas respectée, les mimes risqueraient d'éclore avant les modèles : ils seraient alors dévorés par les oiseaux qui, faute d'avoir goûté aux modèles empoisonnés, n'auraient pas fait l'apprentissage qui assure la survie des mimes.

Les papillons sont une excellente illustration de la biodiversité et un modèle de choix pour l'étude du mimétisme. Toutefois, le mimétisme n'est qu'un des éléments de la survie des espèces, soumises aussi aux équilibres démographiques et aux facteurs écologiques locaux. L'étude de la biologie des papillons pourrait donc être un terrain fédérateur idéal pour favoriser l'évolution... des concepts évolutionnistes.

Jean-Louis FISCHER, enseignant à l'Université Paris 8, est chercheur au Centre Alexandre Koyré d'histoire des sciences et des techniques (EHES-CNRS-MNHN). Jean-Georges HENROTTE, physiologiste et généticien, est directeur de recherches honoraire au CNRS.

W. WICKLER, *Le mimétisme animal et végétal*, Hachette, 1968.

G. BERNARDI, J. PIERRE, NGUYEN THI YONG, *Le polymorphisme et le mimétisme de Papilio dardanus Brown (Lepidoptera Papilionidæ)*, in *Bull. Soc. Entomol. Fr.*, vol. 90, pp. 1116-1158, 1985.

C. WILLS, *La sagesse des gènes*, Champs Flammarion, 1991.

H. TYLER, K. BROWN, K. WILSON, *Swallowtail Butterflies of the Americas*, éditions Scientific Publishers, 1994.

G. PASTEUR, *Biologie et mimétismes*, éditions Nathan, 1995.

C. CLARKE et al., *Mimicry and other Controversial Topics in East African Lepidoptera*, in *J. East Afric. Nat. Hist.*, vol. 84, pp. 3-19, 1995.

M. BOULARD, *Mimétisme*, in *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, sous la direction de P. Tort, PUF, pp. 2961-2986, 1996.

La mission *Pathfinder* sur Mars

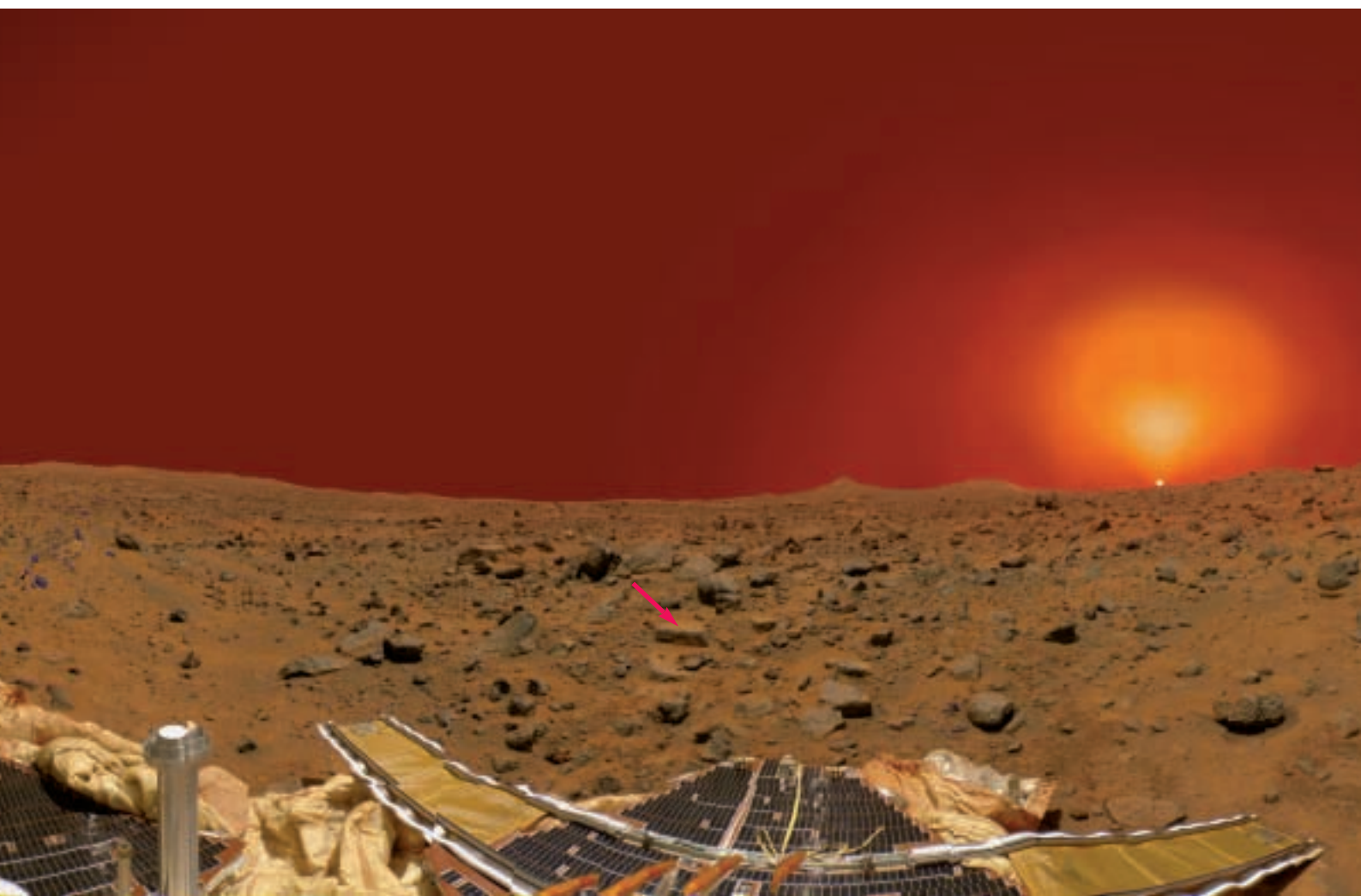
MATTHEW GOLOMBEK

Les informations recueillies sur Mars par un robot automobile confirment que le climat chaud et humide de la planète était propice à la vie.

«**D**es roches, regardez, des roches!» Le 4 juillet 1997, vers 16 heures 30, la sonde *Pathfinder* envoie ses premières images de la surface de Mars et, dans la salle de commande, chacun scrute les écrans de réception. Nous

avons envoyé cette sonde sur Mars pour en étudier les roches, mais nous n'étions pas certains d'en observer : nous avons choisi le site d'atterrissage sur des images dont les plus petits détails ont un kilomètre de long. Le premier contact radio après l'atterrissage

indiquait que la station reposait quasi horizontalement : nous étions inquiets, car la présence de roches aurait dû plutôt l'incliner. Puis les toutes premières images montrèrent la sonde elle-même : elle semblait en bon état. Enfin, après quelques minutes angoissantes, les pre-



mières images de la surface révèlent une plaine parsemée de roches, exactement comme nous l'avions prévu.

L'exploration de Mars est motivée par une question fondamentale : sommes-nous seuls dans l'Univers ? L'un des principaux éléments qui a permis l'émergence de la vie sur Terre est la présence d'eau liquide. Aujourd'hui, à la surface de Mars, l'eau liquide est instable : la température et la pression sont si basses que la glace se sublime en vapeur. Pourtant, les photographies de la mission *Viking*, en 1976, montrent des traces d'écoulement et d'anciens lacs sur les hauts plateaux : la plupart des planétologues supposent que le climat fut autrefois plus chaud et plus humide qu'aujourd'hui,

mais on ne peut exclure totalement que ces structures se soient formées par effondrement, le sous-sol ayant fondu en raison d'un réchauffement géothermique. La mission *Pathfinder* devait également apporter de nouveaux arguments dans ce débat.

Les dépressions qui auraient autrefois abrité des lacs sont dans des terrains qui, d'après la densité de cratères de météorites, ont le même âge que les plus vieilles roches terrestres (on extrapole à Mars des calculs de fréquence de chutes de météorites réalisés pour la Lune, dont on a daté des roches). Or les anciennes roches terrestres montrent clairement que la vie existait déjà il y a 3,6 à 3,9 milliards d'années. Si la vie s'est déve-

loppée sur Terre à cette époque, pourquoi pas sur Mars aussi, si les conditions étaient semblables ?

En 1976, la mission *Viking*, qui comportait deux sondes constituées chacune d'un orbiteur et d'un module d'atterrissage, avait déjà rapporté plus de 57 000 images (que les planétologues étudient encore). Les deux modules d'atterrissage avaient cherché des organismes vivants sur deux sites, mais ils n'en avaient pas trouvé.

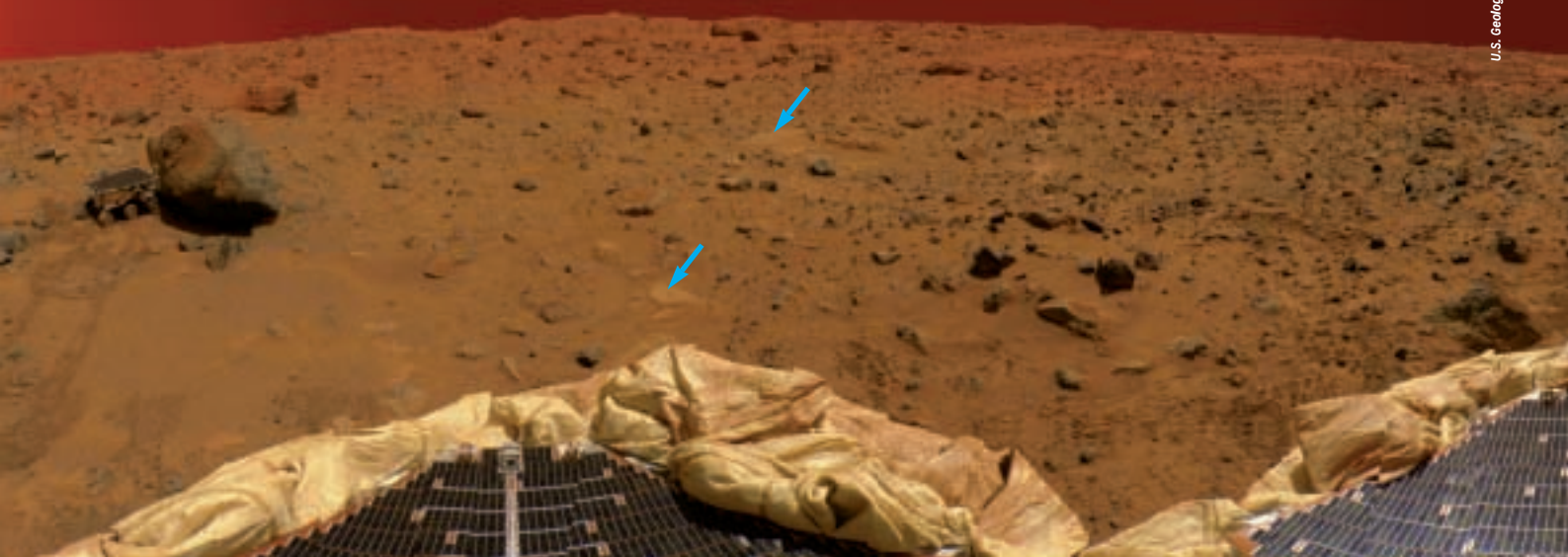
Avec la mission *Pathfinder*, nous avons recherché des traces de vie de façon moins directe : la sonde est posée à l'embouchure d'un vaste chenal où nous espérons que des roches provenant des hauts plateaux anciens, brisées par des impacts météoritiques, ont

1. LE CRÉPUSCULE SUR ARES VALLIS, site d'atterrissage de *Pathfinder*, en vue panoramique sur 360 degrés, a été reconstruit à partir d'un coucher de Soleil réel (en bas à droite) et de plusieurs images (des parties du ciel et du terrain ont été complétées par ordinateur ; lors d'un vrai coucher de Soleil, les ombres seraient plus allongées et le sol plus sombre). Le robot automobile analyse le rocher nommé Yogi, à droite de la rampe arrière de la sta-

tion. Plus à droite apparaissent des taches rose blanchâtre (flèches bleues), nommées Scooby Doo (plus près de la station) et Banc de Baker. Le robot n'a pas réussi à creuser la surface de Scooby Doo : le sol y est bien compact. Le Jardin des Roches est à gauche de la partie centrale. Le rocher plat (flèche rouge) devant le Jardin des Roches, est couvert de poussière, mais les faces inclinées d'autres grandes roches en sont dépourvues.



Laurie Grace



été déposées par de violents torrents. Le robot mobile de *Pathfinder* transporte un analyseur chimique, qui identifie les éléments chimiques dans les roches et détermine leur composition. La station principale, fixe, est équipée d'une caméra multispectrale, qui montre la forme, la texture et la couleur des roches. L'ensemble de ces informations indiquera quels minéraux composent les roches, donc comment et dans quelles conditions celles-ci se sont formées. On obtiendra ainsi des informations sur le climat primitif de Mars et sur la possibilité, pour la vie, de s'y être développée.

Outre le spectromètre à rayons X, à particules alpha (des noyaux d'hélium, composés de deux photons et de deux neutrons) et à protons, pour l'analyse chimique, et la caméra multispectrale, la sonde *Pathfinder* a emporté sur Mars un ensemble d'appareils d'analyse atmosphérique et météorologique. Le robot mobile devait aussi réaliser dix expériences sur le comportement de l'équipement vis-à-vis des contraintes environnementales,

telles l'abrasion de films métalliques sur une roue ou l'adhérence de poussières sur un panneau solaire.

Une entrée remarquable

La partie la plus périlleuse de la mission *Pathfinder* a duré cinq minutes : après un vol interplanétaire tranquille, la sonde est entrée dans l'atmosphère de la planète, puis s'est posée à la surface. Environ 30 minutes avant l'entrée dans l'atmosphère, l'étage de croisière s'est séparé du module d'atterrissage. À 130 kilomètres au-dessus de la surface, la sonde est entrée dans l'atmosphère, abritée par un bouclier thermique qui la ralentissait. Puis, 134 secondes avant l'atterrissage, un parachute s'est déployé et le bouclier a été largué. Pendant la descente, la station était suspendue à une corde, à 20 mètres sous son bouclier arrière.

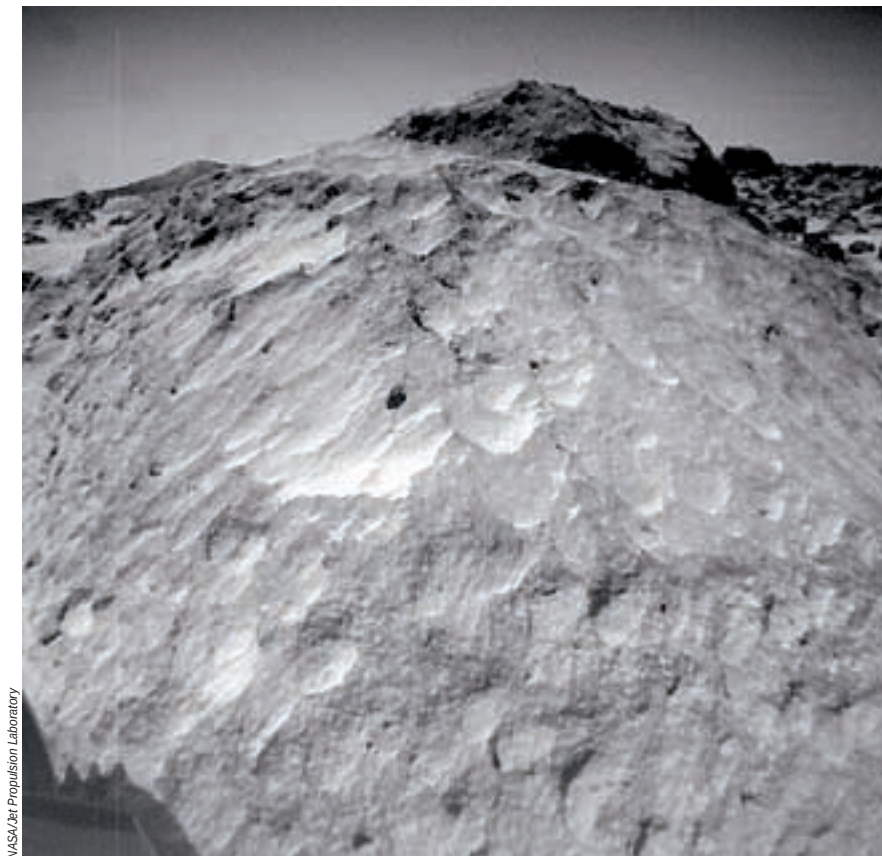
À l'approche de la surface, l'altimètre radar de *Pathfinder* a déclenché l'allumage de trois petites fusées qui ont encore ralenti la descente du véhicule. Des sacs gonflables géants se sont

alors déployés autour de la sonde, le lien avec le parachute a été coupé et l'engin a touché la surface de Mars à une vitesse de 50 kilomètres-heure. Il a alors rebondi une quinzaine de fois, sans que la pression diminue dans les sacs. Après l'immobilisation, les sacs se sont dégonflés et le module s'est ouvert. Les opérations d'exploration ont commencé.

Si le succès de cette nouvelle technique d'atterrissage était très attendu, le reste de la mission dépassa nos espérances : la station a fonctionné trois fois plus longtemps que prévu, et le robot mobile 12 fois plus longtemps. Le module a envoyé 2,3 milliards de bits d'informations, dont plus de 16 500 images prises de la station, 550 du robot, et environ 8,5 millions de mesures de la température, de la pression et du vent. Le robot, obéissant à 230 commandes, a parcouru un total de 100 mètres, explorant ainsi plus de 200 mètres carrés de surface. Il a rapporté 16 analyses chimiques des roches et des sols, et il a réalisé des expériences de mécanique des sols, ainsi que les essais techniques sur le matériel.

Nous l'avons indiqué, les premières images que nous avons reçues de *Pathfinder* ont confirmé nos prévisions, établies d'après les images des satellites *Viking*. Celles-ci montrent un paysage semblable aux plaines parcourues de vallées et de chenaux, dans l'Est et au centre de l'État de Washington, aux États-Unis, et qui se sont formées par l'écoulement rapide des centaines de kilomètres cube d'eau contenus dans les Grands Lacs : le site d'atterrissage, en aval de l'embouchure d'Ares Vallis, dans la région nommée Chryse Planitia, est une plaine qui semble avoir été parcourue par des crues catastrophiques. La densité des cratères de météorites sur le sol indique que celui-ci s'est formé il y a 1,8 à 3,5 milliards d'années.

Des cailloux, des galets et des blocs de pierre polis ressemblent à ceux qui sont déposés par les crues sur la Terre. Dans le champ de pierres que nous avons nommé le Jardin des Roches, au Sud-Ouest de la station, les rochers appelés Requin, Demi-Coupole et Moe sont penchés et entassés, comme s'ils avaient été déposés par un rapide courant d'eau. Les roches de plus de 50 centimètres de diamètre ont un sommet plat et sont souvent surélevées, comme le sont les roches déposées lors d'une crue. Les Pics Jumeaux, à l'horizon Sud-Ouest, semblent avoir été sculptés par un courant. Selon les images prises par *Viking*, la sta-



NASA/Jet Propulsion Laboratory

2. CE ROCHER DÉCAPÉ PAR LE SABLE, nommé Moe, ressemble à des «rochers éolisés» que l'on trouve sur Terre et qui sont altérés par des particules de la taille de grains de sable, transportées par le vent. Sur la Terre, de telles particules sont généralement formées quand l'eau fait éclater les pierres. Les rainures de Moe pointent toutes vers le Sud-Ouest, à peu près la même orientation que celle des stries éoliennes observées ailleurs sur le site.

tion reposerait sur le flanc d'une large crête qui descend en pente douce vers le Nord-Est, à partir des Pics Jumeaux, et qui serait une langue de débris déposés par les eaux, à l'abri des pics. De petits chenaux qui traversent le paysage ressemblent à ceux que l'on trouve dans l'État de Washington, où les crues ont emporté les matériaux fins.

Les roches qui sont en vue de la station sont gris sombre et couvertes de quantités variables d'une poussière brun jaunâtre. Cette dernière semble être la

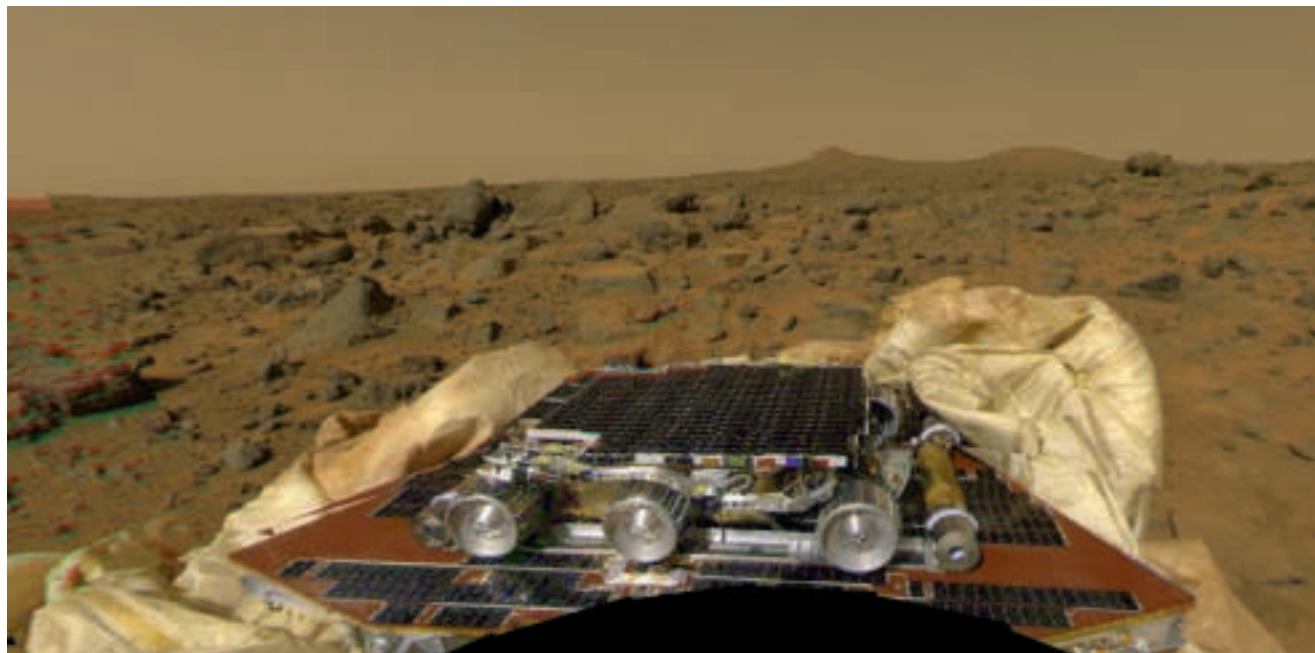
même que la poussière très fine (environ un micromètre de diamètre) qui flotte dans l'atmosphère. On observe aussi, derrière les rochers, des traînées de poussière accumulées par le vent.

Certaines roches sont rainurées ; elles ont sans doute été érodées par des particules de moins de un millimètre de diamètre que le vent emporte au ras du sol. La caméra du robot a aussi montré des dunes de sable, dans la dépression située derrière le Jardin des Roches. De la boue séchée couvre la base de certaines roches

sur quelques centimètres ; elle aurait été dégagée par le vent. Malgré ces signes d'une lente érosion éolienne, les roches et la surface semblent avoir peu changé depuis leur dépôt par la crue.

Une composition inattendue

Le spectromètre a mesuré les compositions de huit roches : ce ne sont pas des basaltes, comme les météorites martiennes tombées sur Terre, les seules



NASA/Jet Propulsion Laboratory

3. LES PREMIÈRES IMAGES de *Pathfinder* ont été regroupées sur cette représentation panoramique, où l'on voit des roches sombres, de la poussière rouge vif et un ciel couleur caramel. De nombreuses pierres, en particulier dans le Jardin des Roches (au centre), sont penchées et entassées, signe qu'elles furent déposées par un courant d'eau rapide. Environ un kilomètre derrière le jardin, à l'Ouest-

Sud-Ouest, se dressent les Pics Jumeaux, qui ont aidé à déterminer le site d'atterrissage sur les images de l'orbiteur *Viking*. Le lendemain de l'atterrissage, le véhicule a dégonflé les sacs gonflables qui le protégeaient et a déployé deux rampes ; le robot est descendu par la rampe arrière. Les petites rayures vertes et rouges sur l'image sont dues à la compression des données.



NASA/Jet Propulsion Laboratory

4. CES DUNES DE SABLE, qui tapissent la dépression située derrière le Jardin des Roches, prouvent indirectement que l'eau a existé sur Mars : sur Terre, le sable est formé principalement par l'action prolongée de l'eau courante sur les roches. Les dunes se seraient formées grâce à du sable apporté par le vent, qui a remonté la

pente douce jusqu'à la crête de la dune, puis a dévalé la pente raide (orientée à l'opposé du robot sur cette image). Des dunes plus grandes ont été observées par le satellite, mais aucune n'est proche du site d'arrivée de *Pathfinder*. Le sable serait plus répandu qu'on ne pensait à la surface de Mars.

autres roches martiennes que nous connaissions, mais des andésites, formées dans des conditions très différentes! Les basaltes, pauvres en silicium, et riches en fer et en magnésium, sont le type de roches le plus répandu sur Terre. On en a aussi découvert sur la Lune. Ils se forment quand le manteau supérieur d'une planète fond : le magma monte à travers la croûte et se solidifie près de la surface. D'après la composition des météorites martiennes et la présence de plaines et de montagnes qui ressemblent aux structures produites par volcanisme basaltique sur Terre, les géologues s'attendaient à découvrir des basaltes sur Mars.

Or, les roches analysées par *Pathfinder* sont très riches en silicium, ce qui les classe parmi les andésites. Sur la Terre, ces dernières se forment, par exemple, quand la lithosphère et la croûte basaltique humide s'enfoncent profondément. Elles fondent partiellement, formant un résidu solide, riche en fer et en magnésium, qui continue à s'enfoncer ; le magma issu de la fonte, plus riche en silicium, remonte à la surface. Ces andésites martiennes auraient ainsi une origine volcanique : leur surface est parsemée d'alvéoles, possibles traces de gaz piégés dans la roche lors du refroidissement de celle-ci.

Comme nous ignorons de quelles régions de Mars proviennent ces andésites, nous ne savons pas interpréter leur présence. Si ce sont des roches caractéristiques des hauts plateaux, alors la croûte ancienne de Mars aurait une composition proche de la croûte continentale terrestre, ce qui est étonnant : les histoires géologiques des deux planètes sont très différentes. Ces roches pourraient n'être aussi qu'une proportion mineure des roches riches en silicium, dans une plaine à prédominance basaltique.

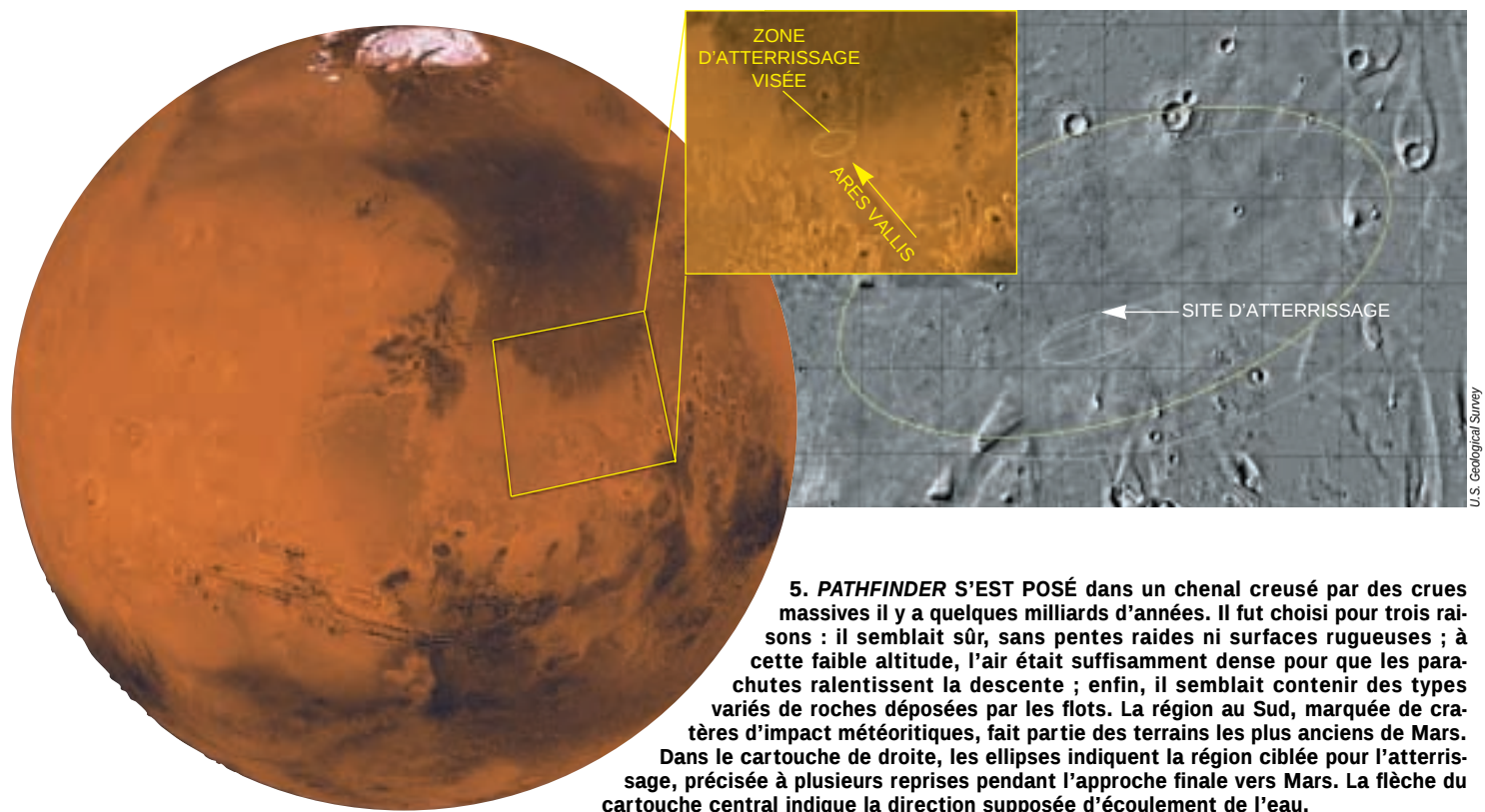
Toutes les roches que nous a montrées *Pathfinder* ne semblent toutefois pas être d'origine volcanique. Certaines sont stratifiées, comme les roches sédimentaires terrestres formées par le dépôt dans l'eau de fragments plus petits. De nombreux cailloux et galets arrondis jonchent aussi le sol. Enfin, certains rochers plus grands semblent contenir des galets, et leur surface porte des alvéoles, peut-être laissés par le départ de cailloux plus petits. Ces rochers seraient des conglomérats, formés dans l'eau courante par le mélange et la compaction de galets érodés, de sable, de limon et d'argile. Comme la formation de tels conglomérats prend du temps, l'eau liquide a dû être stable à la surface de Mars : le climat était donc plus chaud et plus humide qu'aujourd'hui.

Un sol uniforme

La couleur du sol, autour du site d'atterrissage, varie du rouge vif au gris foncé, en passant par le rouge foncé. Toutefois, la composition chimique est partout la même : le sol contient moins de silicium que les roches, mais plus de soufre, de fer et de magnésium. Les différences de couleur résulteraient de légères variations de la minéralogie du fer, ou de la taille et de la forme des particules. Les abondances des divers éléments chimiques sont proches de celles qui ont été mesurées par les deux sondes *Viking*, lorsqu'elles se sont posées respectivement à 800 kilomètres à l'Ouest et à des milliers de kilomètres à l'Est, dans l'hémisphère Nord de Mars. Le sol de toute la planète a donc probablement cette même composition.

Un matériau rouge vif ou rose couvrirait également une partie du site. De même composition que le sol, il semble très dur, car les roues du robot ne l'ont pas entamé.

La sonde *Pathfinder* a aussi étudié le dépôt de la poussière atmosphérique de Mars, à l'aide de plusieurs capteurs magnétiques : cette poussière, très magnétique, serait constituée de petites particules de silicate (peut-être de l'argile) et d'une sorte de ciment composé



5. PATHFINDER S'EST POSÉ dans un chenal creusé par des crues massives il y a quelques milliards d'années. Il fut choisi pour trois raisons : il semblait sûr, sans pentes raides ni surfaces rugueuses ; à cette faible altitude, l'air était suffisamment dense pour que les parachutes ralentissent la descente ; enfin, il semblait contenir des types variés de roches déposées par les flots. La région au Sud, marquée de cratères d'impact météoritiques, fait partie des terrains les plus anciens de Mars. Dans le cartouche de droite, les ellipses indiquent la région ciblée pour l'atterrissage, précisée à plusieurs reprises pendant l'approche finale vers Mars. La flèche du cartouche central indique la direction supposée d'écoulement de l'eau.

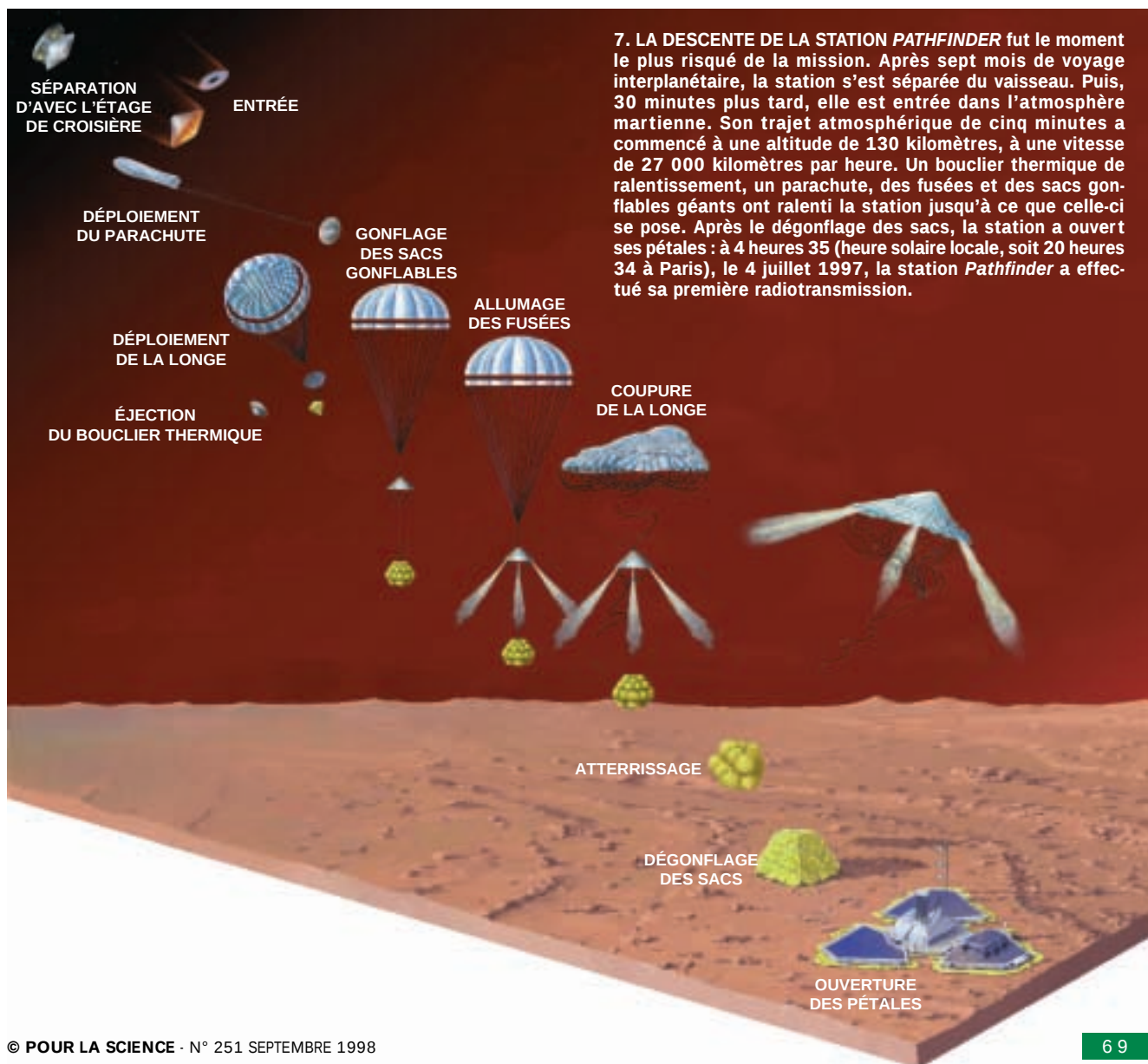
d'un oxyde de fer très magnétique, la maghémite. Cette découverte est un argument supplémentaire en faveur d'un passé humide : la dissolution dans l'eau des matériaux de la croûte aurait libéré le fer, et la maghémite serait un précipité obtenu par congélation et dessiccation.

Le ciel de Mars a la même couleur de caramel que sur les images provenant des stations *Viking*. D'après des images du télescope spatial *Hubble*, on avait imaginé, à tort, que l'atmosphère était très claire et pouvait même apparaître bleue pour un observateur à la surface de la planète. En fait, soit l'atmosphère contient toujours une fine poussière soulevée par des tempêtes locales, soit l'opacité atmosphérique varie notablement sur des intervalles courts. La sonde a mesuré la taille (environ un micromètre) et la forme des particules, ainsi que la



NASA/Jet Propulsion Laboratory

6. CE CONGLOMÉRAT PRÉSUMÉ est, jusqu'à présent, la preuve la plus convaincante d'un passé martien chaud et humide. Ce rocher nommé Ender présente des alvéoles et des inclusions de galets : il se serait, comme d'autres rochers, formé dans un courant d'eau. La station *Pathfinder* est visible en arrière-plan ; le mât ajouré porte la caméra de la station, et le mât de droite porte les capteurs météorologiques.



Tom Moore

quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère (l'équivalent d'un centième de millimètre de pluie sur toute la surface de la planète) : comme les stations *Viking* l'avaient mesuré, Mars est aujourd'hui plus sèche et plus poussiéreuse que n'importe quel désert terrestre.

Les capteurs météorologiques ont enregistré les fluctuations de la température et de la pression. La température atteignait un maximum de -10°C chaque jour à 14 heures (temps solaire local), et un minimum de -76°C , juste avant le lever du soleil. Les températures matinales varient rapidement avec l'heure et avec l'altitude. Les capteurs situés à 0,25, 0,5 et 1 mètre au-dessus de la station mesuraient des températures différentes : sur Mars, le matin, notre nez serait plus froid que nos pieds d'au moins 20°C , parce que l'air, qui se refroidit pendant la nuit, est réchauffé par la surface, d'où il s'élève en petits tourbillons ; l'après-midi, lorsque l'air est réchauffé, la température est homogène.

Une pression minimale, un peu inférieure à 6,7 millibars (environ 0,67 pour cent de la pression atmosphérique terrestre au niveau de la mer), a été atteinte 20 jours martiens après l'atterrissage :



8. CES NUAGES BLEUS, VAPOREUX, dans le ciel crépusculaire de cette photographie prise 39 jours après l'arrivée de la station *Pathfinder* sur Mars, sont probablement composés d'eau gelée. Pendant la nuit, l'eau, présente sous la forme de vapeur dans l'atmosphère, gèle autour de fines particules de poussière ; puis, après le lever du soleil, la glace se sublime. La quantité totale de vapeur d'eau dans l'atmosphère martienne est aujourd'hui faible : si elle tombait en pluie, elle formerait une couche liquide de moins d'un centième de millimètre à la surface de la planète. La station *Pathfinder* a transmis les mêmes images de l'atmosphère que les stations *Viking* il y a plus de 20 ans.

sur Mars, la pression atmosphérique varie avec les saisons, car, pendant l'hiver, 20 à 30 pour cent de l'atmosphère gèle au pôle en une épaisse couche de dioxyde de carbone solide. Ce vingtième jour, l'épaisseur de l'atmosphère était donc minimale, et celle de la calotte polaire maximale. Au début de l'après-midi, des tourbillons de poussière balayaient périodiquement la station, qui a détecté des variations de pression soudaines et brèves, semblables à celles qui avaient été observées par les stations et par les orbiteurs *Viking*. Ces tourbillons seraient une source importante de la poussière dans l'atmosphère martienne. Mis à part ces tourbillons, les vents dominants étaient faibles (soufflant à moins de 36 kilomètres-heure) et variables.

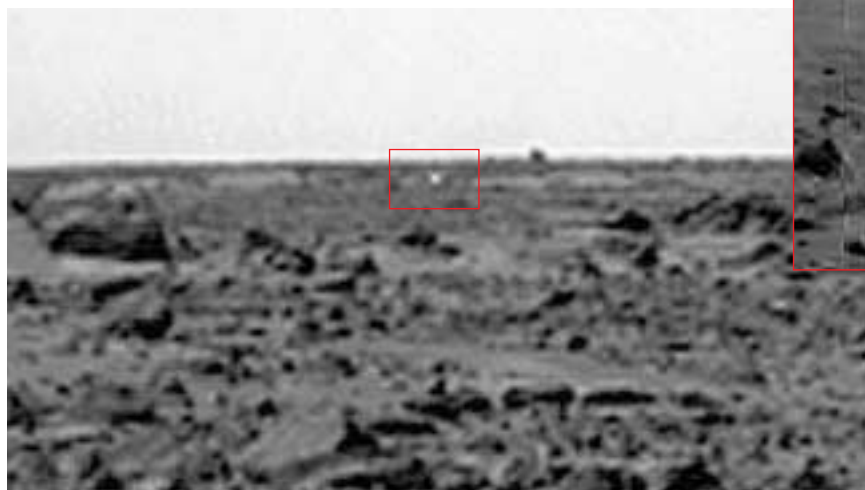
Pathfinder a mesuré les conditions atmosphériques à plus haute altitude, lors de sa descente. La haute atmosphère (au-dessus de 60 kilomètres) était plus froide que ce qu'indiquaient les mesures de *Viking*. Cette différence pourrait sim-

Mars était autrefois plus chaude et plus humide

Les observations de Mars réalisées depuis une trentaine d'années font penser que la planète, au début de son histoire, ressemblait

beaucoup à la Terre, par la présence de pluies, de rivières, de lacs, et peut-être d'un océan. *Pathfinder* a corroboré cette hypothèse (en rouge).

CARACTÉRISTIQUE GÉOLOGIQUE	ORIGINE PROBABLE	INFORMATION
Réseaux de vallées fluviales	Écoulement d'eau souterraine ou d'eau de pluie	Soit l'atmosphère était plus épaisse (permettant les pluies), soit la température interne de la planète, supérieure, a fait fondre le sous-sol (provoquant des crues)
Chenal central ("thalweg") dans des vallées plus larges	Écoulement le long du centre de la vallée	Les vallées se sont formées par écoulement d'eau, pas par glissement de terrain ni par érosion des eaux souterraines
Probables fonds de lacs, avec des réseaux d'écoulement ; dépôts stratifiés dans des canyons	Écoulement vers un lac, par des chenaux	L'eau a existé en surface, pendant une durée inconnue
Zones ressemblant à des grèves et à des plages, et terrasses formées par l'érosion	Ligne côtière possible	L'hémisphère Nord a peut-être porté un océan
Cratères sans bords et terrain ancien fortement érodé	Érosion rapide	Surface altérée par l'eau, y compris par la pluie
Galets arrondis et possibles conglomérats rocheux	Formation de roches dans un courant d'eau	L'eau liquide était stable (l'atmosphère était plus épaisse et plus chaude)
Sable abondant	Action de l'eau sur les roches	L'eau abondait
Poussière fortement magnétique	Taches ou ciment de maghémite (un oxyde de fer) sur des grains de silicate de taille micrométrique	Le cycle hydrologique actif a lessivé le fer des matériaux de la croûte pour former la maghémite



NASA/Jet Propulsion Laboratory

9. DES ÉLÉMENTS DE PATHFINDER apparaissent comme des taches brillantes sur ces images très agrandies. Le bouclier thermique (à gauche) est tombé environ deux kilomètres au Sud-Ouest de la station. Le couvercle arrière (à droite) est posé à un peu plus d'un kilomètre au Sud-Est. Ces points de chute et la position de la station indiquent qu'un vent soufflait du Sud-Ouest.

plement provenir des différences dans la saison et dans l'heure d'arrivée : *Pathfinder* est arrivé à 13 heures (heure solaire locale), tandis que *Viking* est arrivé à 16 heures, quand l'atmosphère était naturellement plus chaude. Pour la basse atmosphère, les mesures des deux missions sont semblables : de la poussière est mélangée uniformément à un air comparativement plus chaud.

Au cœur de Mars

De surcroît, les signaux radio de *Pathfinder* ont permis d'analyser la rotation de Mars. Pendant les communications avec la Terre, un repérage quotidien utilisant l'effet Doppler (qui nous fait entendre plus ou moins aigu le son d'une sirène d'ambulance selon qu'elle s'approche ou qu'elle s'éloigne de nous) et un étalonnage bidirectionnel ont permis de calculer la position de la station à 100 mètres près. En comparant ces mesures avec celles réalisées par *Viking* 21 ans auparavant, nous avons calculé la vitesse de précession de l'axe de rotation de Mars (la précession est le mouvement de rotation de l'axe de rotation de la planète autour de la perpendiculaire au plan de l'orbite). Comme cette vitesse de précession est reliée au moment d'inertie de la planète, nous avons, pour la première fois, calculé ce moment d'inertie.

Ce résultat est important, car le moment d'inertie dépend de la composition interne de la planète, de sorte que nous pouvons maintenant tester des hypothèses sur celle-ci et sur cette composition. Nous supposons, d'après la composition des météorites martiennes, que Mars contenait un noyau métallique ; nous savons main-

tenant que le rayon de ce noyau est compris entre 1 300 et 2 400 kilomètres. En faisant des hypothèses sur la composition du manteau, déduites des compositions des météorites martiennes et des roches mesurées par le robot, les géologues peuvent désormais modéliser et calculer les températures internes.

Les mesures de la vitesse de rotation ont par ailleurs confirmé que celle-ci varie annuellement. Cette variation concorde avec les calculs fondés sur l'échange saisonnier de dioxyde de carbone entre l'atmosphère et les calottes polaires.

Au total, la planète Mars a beaucoup plus ressemblé à la Terre qu'on ne le pensait. Certains matériaux de la croûte ressemblent, par leur abondance en silicium, à la croûte continentale terrestre. En outre, les galets polis, les roches et les abondantes particules de la taille de grains de sable et de poussière confirment l'hypothèse d'un passé où la planète était riche en eau. Mars semble avoir été plus chaude et plus humide, comme la Terre primitive. En revanche, depuis la fin de cette époque, où les crues ont façonné le paysage observé par *Pathfinder* (il y a 1,8 à 3,5 milliards d'an-



NASA/Jet Propulsion Laboratory

10. DES SOLS DE PLUSIEURS COULEURS sont révélés par les roues du robot. Sur cette photographie, le robot gravit la Dune de la Sirène, un empilement de matériaux recouvert de granules sombres de la taille de grains de sable. Les traces des roues découvrent aussi une poussière rouge vif et un sol rouge plus sombre (en bas, à gauche). Les planétologues déduisent de ces traces les propriétés des matériaux de surface.

nées), Mars est une planète très différente de la Terre. Le site semble inaltéré depuis sa formation : il n'y avait pas d'eau sur Mars pendant les périodes récentes. Les informations en provenance du satellite *Mars Global Surveyor*, en orbite autour de la planète rouge, compléteront cette description et apporteront sans aucun doute un nouveau lot de surprises.

Matthew GOLOBEK est responsable scientifique de la mission *Mars Pathfinder*.

Mars, sous la direction de Hugh H. Kieffer, Bruce M. Jakosky, Conway W. Snyder et Mildred S. Matthews, University of Arizona Press, 1992.

Michael H. CARR, *Water on Mars*, Oxford University Press, 1996.

Matthew P. GOLOBEK et al., *Mars Path-*

finder Mission and Ares Vallis Landing Site, in *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, n° E2, pp. 3951-4229, 25 février 1997.

Matthew P. GOLOBEK et al., *Mars Pathfinder*, in *Science*, vol. 278, pp. 1734-1774, 5 décembre 1997.

Jeffrey KARGEL et Robert STROM, *Les changements climatiques sur Mars*, in *Pour la Science*, janvier 1997.

