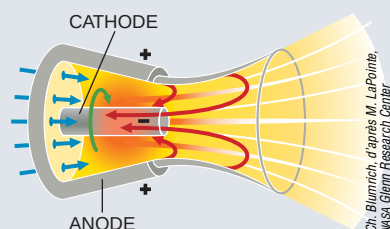


LA PROPULSION MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE

Ces moteurs accélèrent des particules chargées en utilisant des champs magnétiques plutôt que des champs électriques. Le système est composé d'une anode creuse, avec tige centrale formant cathode. Une différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes ionise le gaz propulseur. Cette ionisation engendre un puissant courant électrique radial, qui s'écoule à travers le gaz et le long de la cathode. Ce courant engendre un champ magnétique circulaire, qui interagit avec le courant passant dans le gaz et accélère les particules dans une direction perpendiculaire aux deux, c'est-à-dire axiale. Le gaz propulseur peut être de l'argon, du lithium ou de l'hydrogène, par ordre croissant de rendement. Après s'être intéressée par intermittence à ce système pendant des décennies, la NASA a repris les travaux sur la propulsion magnétohydrodynamique en 1999. À la suite des recherches menées à l'Université de Princeton et dans des centres russes, japonais et allemands, la NASA a construit un prototype de un mégawatt, où le courant circule par impulsions de deux millisecondes.

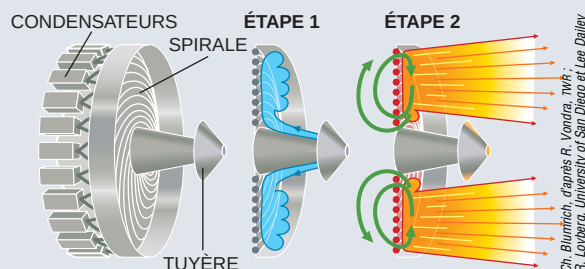


Ch. Blumrich d'après M. LaPointe, NASA Glenn Research Center

Poussée : 100 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 20 à 100 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 21 à 25 jours
Fraction de masse : 6,7 à 31 pour cent

LES MOTEURS À INDUCTION PULSÉE

Le moteur à induction pulsée, qui retrouve les faveurs de la NASA, se fonde sur la création rapide de champs magnétiques et électriques perpendiculaires. Une tuyère éjecte d'abord une bouffée de gaz (en général, de l'argon), qui s'étale contre une spirale de fil électrique d'environ un mètre de diamètre. Une batterie de condensateurs produit alors, dans la spirale, une décharge de courant pendant environ dix millisecondes. Le champ magnétique radial créé par l'impulsion engendre un champ électrique circulaire dans le gaz, qu'il ionise et dont il accélère les particules dans la direction opposée à celle de l'impulsion électrique initiale. Comme leur déplacement est perpendiculaire au champ magnétique, ces particules sont éjectées dans l'espace. Contrairement à d'autres propulseurs électromagnétiques, ce système ne requiert pas d'électrodes, qui ont tendance à s'user, et l'on augmente la puissance en augmentant la fréquence des impulsions. On obtiendrait une puissance de un mégawatt, en émettant les impulsions 200 fois par seconde.

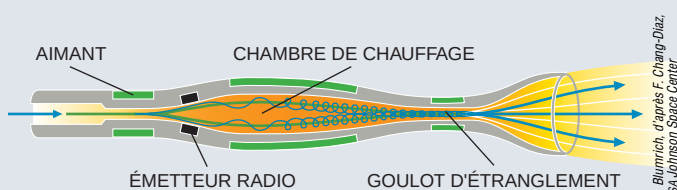


Ch. Blumrich d'après R. Vondra, Tufts ; R. Lenzberg, University of San Diego et Lee Dalley

Poussée : 20 newtons
Vitesse d'éjection des gaz : 50 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique : 110 jours
Fraction de masse : 14 pour cent

VASIMR

Le VASIMR (*Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket*, ou « fusée à magnétoplasma à impulsions spécifiques variables ») comble la lacune entre les systèmes à forte et à faible poussée. De l'hydrogène est d'abord ionisé par des ondes radio, puis guidé vers une chambre centrale où l'on fait régner un champ magnétique. Là, les particules longent les lignes de champ magnétique en tournant autour d'elles à une fréquence qui ne dépend que de leur charge électrique et de leur masse (la fréquence de Larmor). En bombardant les particules avec des ondes radio à la même fréquence, on les chauffe jusqu'à des températures de dix millions de degrés. Une tuyère magnétique transforme enfin le déplacement en spirale en déplacement axial, ce qui engendre la poussée. En réglant le chauffage et le convertisseur magnétique de sortie, le pilote commande la vitesse d'éjection. Le mécanisme est analogue à celui du levier de vitesse d'une voiture. En fermant l'étranglement de sortie, la fusée passe « en cinquième » : on réduit le nombre de particules excitées (et donc la poussée), mais on augmente leur température (et donc la vitesse d'éjection). L'ouverture de l'étranglement correspond à « la première » : poussée forte, mais rendement faible. Un véhicule spatial utiliserait une faible vitesse et un



Ch. Blumrich d'après F. Chang-Diaz, NASA Johnson Space Center

	« Première »	« Cinquième »
Poussée :	1 200 newtons	40 newtons
Vitesse d'éjection des gaz :	10 kilomètres par seconde	300 kilomètres par seconde
Temps de combustion spécifique :	2,1 jours	53 jours
Fraction de masse :	46 pour cent	2,4 pour cent

dispositif de chauffage pour quitter l'orbite terrestre, puis passerait en « cinquième » pour la croisière interplanétaire. La NASA prévoit un vol d'essai avec un système de dix kilowatts en 2004 ; les missions vers Mars nécessiteraient dix mégawatts.

LES VOILES SOLAIRES

Les voiles solaires sont poussées par la faible pression de la lumière solaire. Pour transporter 25 tonnes en un an, de la Terre sur Mars, une voile devrait avoir une surface d'au moins quatre kilomètres carrés et une densité de un gramme par mètre carré. On fabrique aujourd'hui des fibres de carbone presque aussi fines qu'un cheveu, qui feraient ainsi des voiles très légères, mais comment déployer une structure aussi grande et aussi fragile ? En 1993, le Consortium spatial russe *Regatta* a déployé le miroir spatial *Znamya* de 300 mètres carrés, mais, lors d'un second essai en 1999, il s'est emmêlé. La NASA a récemment financé un concept similaire pour une « voile » magnétique qui capterait le vent solaire, les particules chargées émises par le Soleil, plutôt que la lumière solaire.

Poussée : 9 newtons par kilomètre carré (à la distance de la Terre au Soleil)
Vitesse d'éjection des gaz : pas de gaz
Temps de combustion spécifique : 58 jours

Quelle route prendre pour aller sur Mars?

Pour les fusées à forte poussée, la trajectoire la plus économique est l'orbite de transfert de Hohmann. Cette ellipse, tangente aux orbites de la Terre et de Mars, utilise au maximum le mouvement orbital des planètes pour accélérer le véhicule spatial. Celui-ci serait lancé lorsque Mars est en avant de la Terre d'un angle d'environ 45 degrés (ce qui se produit tous les 26 mois). Il quitterait la Terre et arriverait sur Mars de l'autre côté du Soleil par rapport à la position initiale de la Terre (voir la figure 3a). Une telle configuration des planètes forme ce que les astronomes nomment une conjonction. Pour revenir, les astronautes attendraient que Mars soit en avant de la Terre d'un angle de 75 degrés, placeraient leur véhicule sur un arc rentrant et laisseraient la Terre le rattraper.

Chaque étape nécessite deux phases d'accélération. À partir de la surface terrestre, une pointe de vitesse à 11,5 kilomètres par seconde per-

met au véhicule de se libérer de l'attraction terrestre et d'entrer en orbite de transfert. Une autre solution consiste à partir d'une orbite terrestre basse sur laquelle l'engin spatial tourne déjà à une vitesse élevée ; les moteurs doivent alors lui communiquer une vitesse additionnelle de 3,5 kilomètres par seconde. À l'approche de Mars, des rétrofusées ou un freinage dans l'atmosphère doivent ralentir le vaisseau spatial d'environ deux kilomètres par seconde pour entrer en orbite ou de 5,5 kilomètres par seconde pour se poser. Le retour est l'inverse de l'aller.

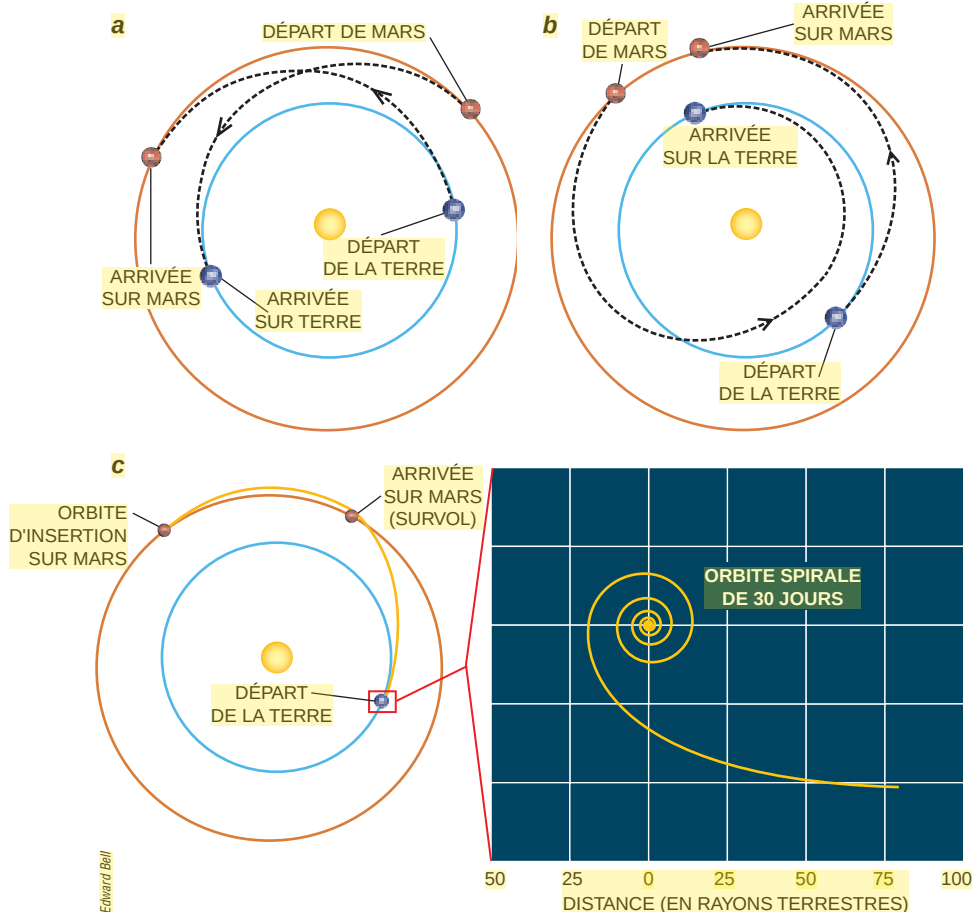
L'aller et le retour durerait un peu plus de deux ans et demi : 260 jours pour chaque étape de voyage interplanétaire et 460 jours de séjour sur Mars. Les principaux projets, tels *Mars Direct* et la mission de référence de la NASA, privilégient les trajectoires de type conjonction, mais abrègent le voyage en consommant un peu de carburant supplémentaire pendant le voyage. Une programmation minutieuse permet également d'assurer que le vaisseau retournera vers la Terre

de façon naturelle en cas de défaillance des moteurs.

Pour raccourcir le voyage, les ingénieurs de la NASA étudient les trajectoires de type opposition (voir la figure 3b), ainsi nommées parce que la Terre s'approche au plus près de Mars (une configuration que les astronomes nomment opposition) à un moment donné de la mission. Ces trajectoires requièrent une accélération supplémentaire, appliquée en cours de route. Le voyage durerait alors un an et demi : 220 jours pour l'aller, 30 jours de séjour sur Mars et 290 jours pour le retour. Le trajet retour piquerait vers le Soleil, utilisant éventuellement l'attraction gravitationnelle de Vénus, et reviendrait vers la Terre par derrière. La séquence pourrait être inversée de sorte que l'aller soit le voyage le plus long. Avec les fusées prévues, ces trajectoires imposent un trop long trajet pour un séjour aussi court, mais elles seraient intéressantes si l'on utilisait des fusées nucléaires très puissantes ou des navettes circulant en permanence entre les orbites de la Terre et de Mars sans jamais s'y arrêter.

Les fusées électriques à faible poussée économisent du carburant, mais elles ne sont pas assez puissantes pour libérer le véhicule de l'attraction terrestre en une seule impulsion. Elles doivent élargir lentement leur orbite, en tournant en spirale autour de la Terre, comme une voiture qui gravit une montagne. Elles atteindraient la vitesse de libération en un an, de sorte que l'équipage serait exposé trop longtemps au rayonnement des ceintures de Van Allen qui entourent la Terre. Ces fusées à faible poussée pourraient uniquement convoier du matériel.

Un moteur VASIMR ouvre d'autres possibilités. En restant en « première » (poussée élevée, mais faible rendement), il peut tourner en spirale pour quitter l'orbite terrestre en 30 jours. Le voyage interplanétaire durerait 85 jours supplémentaires. Durant la première moitié de ce voyage, la fusée fonctionnerait en « cinquième », puis, à mi-parcours, la fusée serait retournée et commencerait à ralentir en rétrogradant. À l'approche de Mars, une partie du vaisseau se détacherait pour se poser sur Mars, tandis que le reste (y compris le module pour le vol de retour) passerait à côté de la planète, continuerait à ralentir et entrerait en orbite martienne 131 jours plus tard (voir la figure 3c).



3. LES DIFFÉRENTES ORBITES pour se rendre sur Mars : les trajectoires de type conjonction (a), opposition (b) et insertion à faible poussée (c).

La sécurité des astronautes

Des êtres humains survivront-ils à l'aller et retour vers Mars? Les ingénieurs du Centre spatial de Houston améliorent sans cesse l'efficacité et la fiabilité des systèmes actuels. Sur la Terre, des volontaires ont passé jusqu'à trois mois dans une chambre close avec laquelle on testait de nouvelles techniques de recyclage de l'air et de l'eau. À des méthodes physiques et chimiques s'ajoutaient des méthodes de régénération biologique, telle la transformation des excréments solides en fertilisants pour faire pousser du blé, qui fournissait de l'oxygène et du pain.

Les ingénieurs cherchent également à minimiser les effets d'une exposition prolongée à l'impesanteur. Les astronautes séjournant plusieurs mois en orbite terrestre perdent une importante quantité de masse osseuse, et souffrent de divers autres maux

(voir *Le corps humain en impesanteur*, par Ronald White, *Pour la Science*, novembre 1998). On éviterait cette ostéoporose en faisant lentement tourner le vaisseau spatial durant son voyage interplanétaire.

Dans plusieurs projets, un câble ou une armature relie la capsule de l'équipage à un contrepoids, un étage de fusée qui a déjà brûlé, par exemple. Une rotation par minute au bout d'un rayon de 340 mètres de long assure une gravité de 0,38 g (0,38 fois la pesanteur terrestre), similaire à celle qui règne à la surface de Mars. En doublant la vitesse, on raccourcirait le bras d'un facteur quatre, mais on augmenterait la force de Coriolis, qui désorienterait les astronautes lors de leur déplacement à l'intérieur du vaisseau.

Cependant, la rotation du vaisseau complique les procédures de manœuvre et de communications ; aussi les médecins examinent-ils

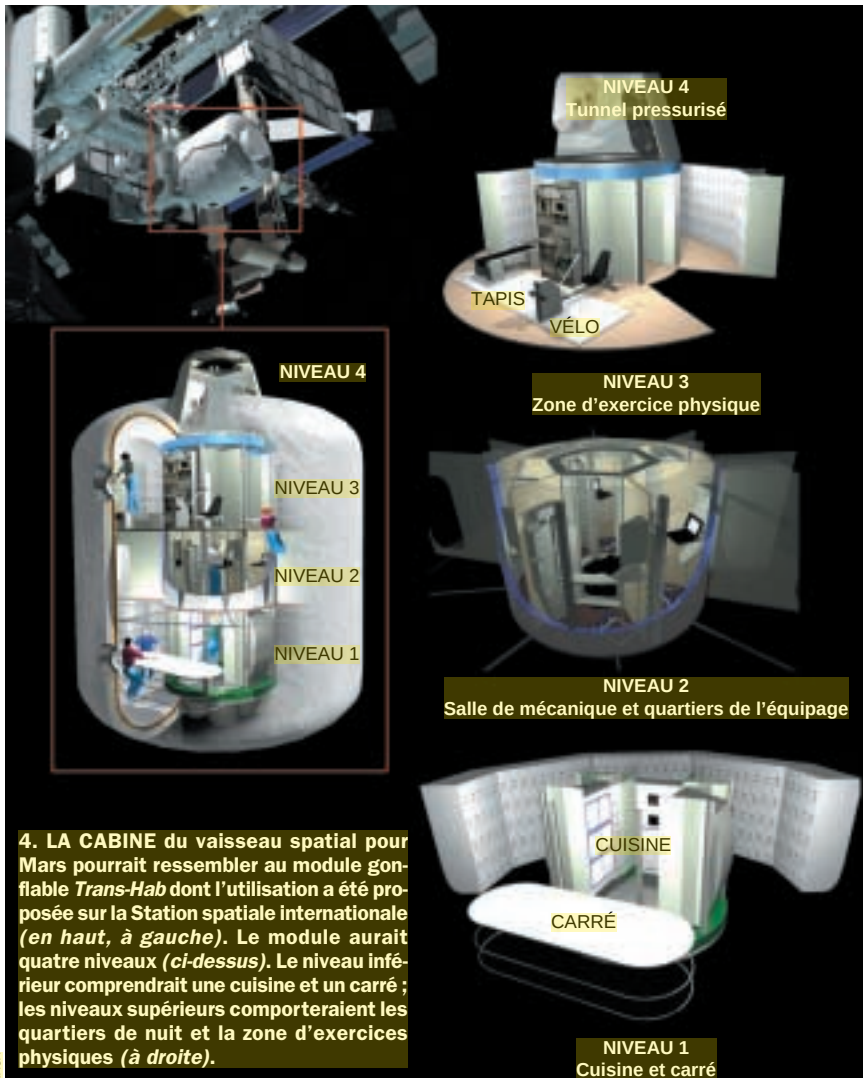
d'autres solutions, comme des exercices physiques spécifiques, des compléments alimentaires et l'utilisation de chaises centrifugeuses.

Ils se préoccupent également des rayonnements que recevrait l'équipage. Au rayonnement cosmique (les noyaux de haute énergie qui traversent en continu notre Galaxie) s'ajouterait celui des éruptions solaires, c'est-à-dire les intenses flux de protons qui sont périodiquement éjectés par le Soleil.

Le rayonnement cosmique a une énergie supérieure à celle des protons des éruptions solaires, de sorte qu'il est plus difficile à arrêter. À bord d'un vaisseau spatial, derrière une paroi d'aluminium de six centimètres d'épaisseur, la dose serait réduite de 20 pour cent par rapport à la même dose sans paroi. Les radiobiologistes estiment que cette exposition n'augmenterait le risque d'un décès par cancer dans les 30 ans que de quelques pour cent. Des pilules contenant des composés antioxydants pourraient diminuer ce risque.

Le rayonnement des éruptions solaires est dangereux, car il survient par jets imprévisibles qui déposent en une seule fois des doses mortelles sur la peau et les organes internes. Une éruption au moins a lieu tous les 11 ans, vers le maximum d'activité du cycle solaire, et des tempêtes un peu moins fortes sont enregistrées tous les deux ans. Les astronautes en orbite terrestre sont protégés par le champ magnétique de la Terre, qui piège et réfléchit les protons, mais pas les voyageurs qui seraient en route vers la Lune et vers Mars.

On sait arrêter les particules : les meilleurs écrans sont en matériaux riches en hydrogène, tel le polyéthylène ou l'eau ; des atomes plus lourds ne sont pas aussi efficaces, car les protons qui les heurtent déplacent leurs neutrons, ce qui déclenche une dangereuse cascade de rayonnement. Une épaisseur d'eau de dix centimètres réduirait la dose reçue lors des éruptions les plus fortes. Les concepteurs de missions ont proposé de créer un écran contre les tempêtes d'éruptions solaires sur le vaisseau en stockant l'eau destinée aux astronautes dans des poches qui entourent leurs quartiers de nuit. Grâce aux satellites d'observation du Soleil, on préviendrait les astronautes en cas d'éruption imminente.



L'environnement martien

Si les astronautes débarquent un jour sur Mars, ils percevront immédiatement les différences avec la Terre : la faible gravité de la Terre modifiera leur démarche. La cadence de la marche étant gouvernée par la gravité (comme la cadence d'un pendule), la vitesse de progression des astronautes sera environ 60 pour cent de celle qu'ils auraient sur Terre, tout en brûlant le même nombre de calories.

Dans l'atmosphère ténue de Mars (équivalente à celle de la Terre à une altitude de 35 kilomètres), la température et la pression varient vite et beaucoup, mais les caractéristiques météorologiques sont généralement uniformes. Bien que le vent atteigne 100 kilomètres par heure, la force qu'il exerce est faible, en raison de la faible densité de l'atmosphère. Les astronautes verraient du brouillard, du givre et de minces nuages bleus tôt le matin. Le ciel change de couleur selon le lieu et le moment de l'observation. Le lever et le coucher du Soleil sont bleus ; sinon, le ciel est couleur caramel. La lumière crée des illusions d'optique. En raison de la proportion variable de lumière solaire directe et d'une lueur indirecte des cieux, la couleur des roches diffère selon l'heure de la journée (voir ci-dessus).

Mars est ennuyeusement plate. Les Pics jumeaux, sur le site de *Mars Pathfinder*, ont à peine 50 mètres d'altitude et sont pourtant clairement visibles à un kilomètre de distance. Même le mont Olympe, la plus haute montagne du Système solaire, avec ses 22 kilomètres d'altitude, ne présente qu'une pente moyenne de quelques pour cent. La topographie devient plus intéressante sur les bords de *Valles Marineris*, une région de gorges et de canyons.

En raison de l'absence de relief, les astronautes verraient que Mars est plus petite que la Terre : la distance à l'horizon est proportionnelle à la racine carrée du rayon de la planète. Deux personnes de 1,70 mètre se verraient à une distance de sept kilomètres. L'horizon est également la limite des communications radio directes sur Mars, qui est dépourvue

d'ionosphère. Les astronautes auraient besoin de satellites relais.

Les poussières martiennes pourraient gêner considérablement les astronautes qui séjourneraient sur la planète rouge. Mars est couverte de poussières d'environ deux micromètres de diamètre, comparables aux particules de la fumée de cigarette. La poussière collerait aux combinaisons spatiales, rayerait les visières des casques, provoquerait des courts-circuits électriques, décaperait les instruments et encrasserait les moteurs. Sur la Lune, également très poussiéreuse, les combinaisons fuyaient après deux jours d'utilisation. De surcroît, les analyses de la sonde *Viking* indiquent que les particules sont enrobées de produits chimiques corrosifs tel le peroxyde d'hydrogène. Bien qu'en faible concentration, ces composés détérioreraient lentement les joints en caoutchouc.

Si une petite proportion des particules est constituée de quartz, comme le laissent supposer les résultats de *Mars Pathfinder*, une autre menace pèse sur les astronautes : la silicose, une maladie pulmonaire qui tue chaque année plusieurs milliers de mineurs et d'ouvriers du bâtiment. Pour conserver leur habitat exempt de poussières, les astronautes devraient se nettoyer soigneusement avant d'y entrer. Cela ne serait pas facile : aimantées et chargées électriquement, les poussières collent partout. Les astronautes pourraient porter des combinaisons constituées de deux couches, dont la couche externe serait laissée dans un sas spécial, hors de la cabine principale.

Enfin la production d'électricité pâtirait également de ces poussières.

Sur *Mars Pathfinder*, la production de courant des panneaux solaires diminuait de un pour cent tous les trois jours, à mesure que de la poussière s'y accumulait. Une tempête de poussière réduirait de moitié la production de courant. C'est pourquoi une mission pourrait nécessiter un réacteur nucléaire de 100 kilowatts.

Les microbes qui accompagneraient inévitablement les astronautes sur Mars compliqueraient la recherche de vie martienne. Inversement, d'éventuels organismes martiens risqueraient d'arriver vers la Terre, au retour d'une mission. Ces organismes ne provoqueraient probablement pas de maladies chez l'homme ou chez d'autres espèces (la plupart des biologistes pensent qu'ils seraient trop différents des formes de vie terrestres), mais le risque d'une catastrophe globale n'est pas nul. La NASA étudie un système de bio-isolement pour les échantillons rapportés, mais la décontamination des astronautes est impossible. Durant le programme *Apollo*, les quarantaines étaient contraignantes, controversées et pas infaillibles. En 1992, les experts ont recommandé que l'on établisse l'existence de vie active ou dormante sur Mars avant d'y envoyer des astronautes ; ainsi les astronautes sauraient quelles régions de la planète peuvent être explorées en toute sécurité et quelles précautions ils devront prendre ailleurs pour éviter un contact direct avec une éventuelle forme de vie martienne.

George MUSSEY et Mark ALPERT sont journalistes à la revue *Scientific American*.



5. YOGI, la roche la plus photographiée par la sonde *Mars Pathfinder* en 1997, a un aspect très différent le matin (à gauche) et l'après-midi (à droite), en raison des variations de la lumière martienne.