

# L'ère des robots planétaires

*Il y a de nombreuses justifications scientifiques à la mise en place de véhicules robotisés mobiles capables d'effectuer des expériences et de prélever des échantillons sur Mars ou la Lune... Et en raison de compétences techniques reconnues, la France est appelée à jouer un grand rôle dans ce domaine !*



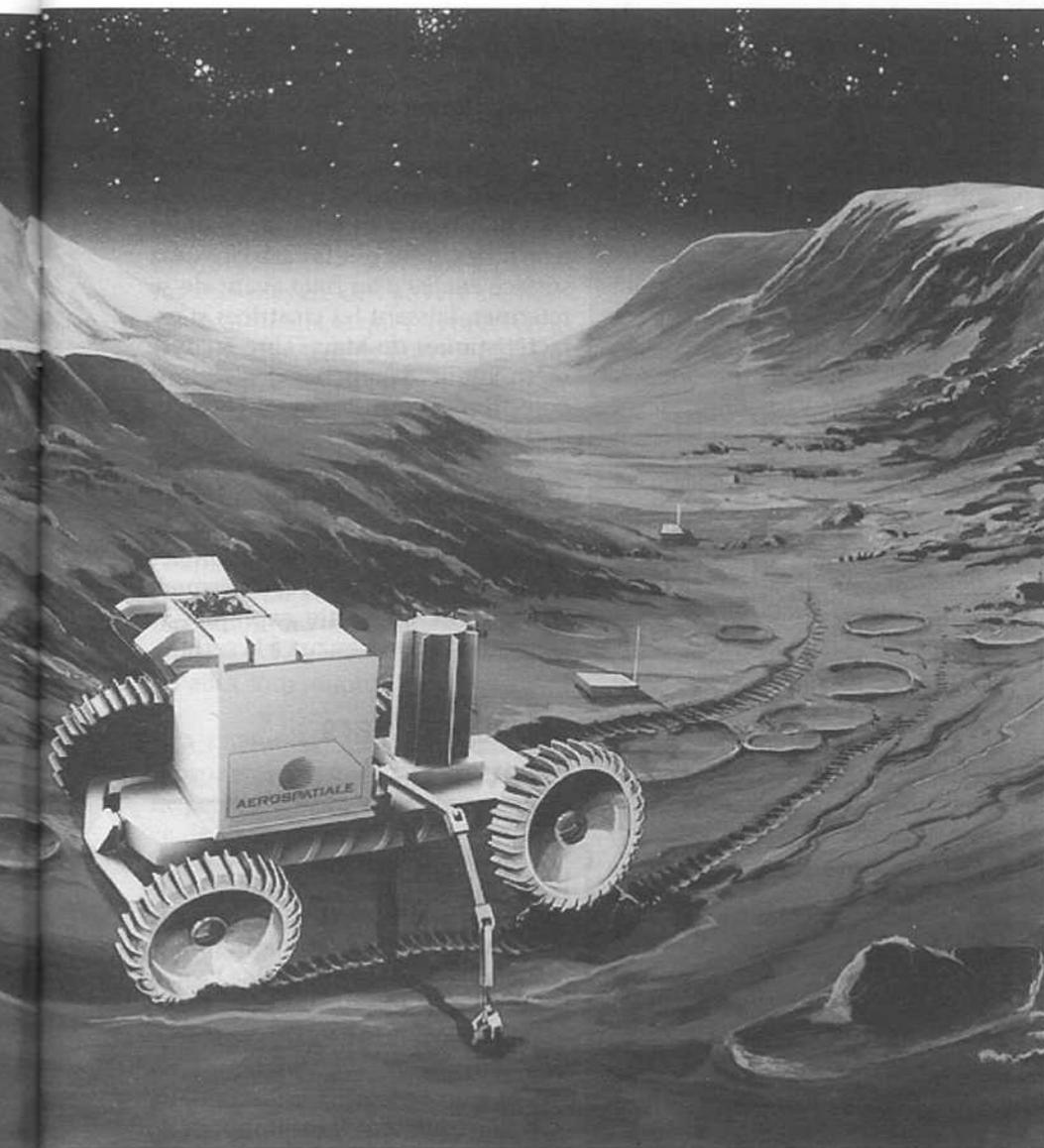
**N**ous sommes en 2005 ou 2007 sur la planète Mars. Dans un environnement froid et hostile, souvent perturbé par des tempêtes de sable d'une violence inconnue sur Terre, d'étranges petits véhicules avancent lentement à travers un désert de dunes de sable, parsemé de rochers souvent escarpés. Un éventuel observateur extraterrestre, débarquant sur le lieu même à l'improviste, pourrait être tenté de croire à l'existence de gros « insectes » à la surface de Mars. En effet, alors que ces engins progressent à la vitesse d'une tortue sur un terrain semé d'obstacles, leur « tête » tourne sur elle-même et, s'immobilisant brusquement, de singuliers « bras » commencent à gratter le sol, à soulever des rochers, à forer... Devant l'observateur sidéré, les « bras » se rétrac-

## Philippe Jamet

tent à l'intérieur du « corps », laissant au passage tomber sur lui du sable et des poussières rougeâtres, qui descendent lentement à la manière de volutes sur le sol.

A plus de 200 millions de kilomètres de là, nous trouvons dans le cadre glacial d'une longue nuit lunaire, un autre « insecte » ayant quelques similitudes avec notre « scarabée » martien. Il se fraye un chemin au milieu des blocs de rochers disloqués, tandis qu'un projecteur, situé sur la « tête » de notre engin, illumine sa lente et silencieuse progression... Ne vous y trompez pas, il ne s'agit pas d'un « remake » robotique de « l'Empire contre-attaque », ou

d'un des merveilleux romans de Stanislas Lem, mais tout simplement de la transposition d'un concept complexe, à savoir celui de « véhicule automatique planétaire » (VAP). Cet important défi technologique consiste en un système robotisé mobile intégré, doté d'instruments scientifiques ultra-performants, capable d'évaluer la situation en un quart de seconde et de contourner d'éventuels obstacles ! Même si le tout récent succès de la mission de maintenance du télescope spatial Hubble vient encore de démontrer combien l'homme était indispensable dans l'espace, il existe des cas où des systèmes robotisés complexes semblent mieux adaptés et moins coûteux. C'est en particulier le cas pour la planétologie, dont le champ de connaissances a été bouleversé aussi bien par des



sondes scientifiques de survol que par des stations fixes ou mobiles « in situ » comme les « Viking » martiens et, auparavant, les « Lunakhod » et « Surveyor » lunaires !

## Les mystères de Mars

Toutes les découvertes concernant la Lune ou Mars, ont amené les scientifiques à se poser autant de questions qu'elles leur ont apporté de réponses. C'est dans ce processus en chaîne que réside l'essence même du progrès scientifique en matière de sciences fondamentales. Ce processus caractérise au plus haut point des disciplines comme l'astrophysique, bien sûr, mais également la géologie,

la géophysique, la minéralogie et, d'une façon générale, tout ce qui concerne la planétologie « in situ » et la planétologie comparée. L'étude approfondie du milieu lunaire, et plus encore celle du milieu martien, apparaissent aux planétologues comme les « clefs » qui nous permettront de mieux appréhender deux particularités qui caractérisent notre système solaire : d'une part, l'importance, à diverses époques, de l'impact météoritique et cométaire et, d'autre part, l'étonnante disparité constatée entre les diverses planètes telluriques de notre système.

Résoudre, par exemple, l'embarassante question de l'origine de la Lune, pourrait nous apporter des informations inestimables sur l'époque fort lointaine, où les planétésimaux

se sont fondus par collision et gravitation pour donner naissance aux planètes. Ces planétésimaux étant eux-mêmes issus du processus d'accrétion du nuage primordial de molécules et de poussières à l'origine de notre système, par le biais d'un effondrement gravitationnel, il n'est pas impossible que les roches lunaires conservent des traces de ces processus : d'où l'intérêt de robots mobiles autonomes, capables de creuser et d'analyser le sol de notre satellite sur des sites aussi divers qu'éloignés.

Mars recèle, pour sa part, des mystères encore bien plus fascinants, à propos desquels il est toujours tentant de laisser courir son imagination. Il est vrai que la planète rouge a toujours marqué notre imaginaire, comme si quelque chose de très profond dans la nature humaine lui suggérait que c'est elle qu'il faut visiter. Si les sondes Viking n'ont pas établi de façon catégorique l'existence de processus biologiques sur notre voisine (les résultats en apparence positifs semblent plutôt dus à la présence d'oxydants réactifs dans le sol martien), il n'en reste pas moins que l'environnement de cette planète paraît déconcertant.

Parmi ces mystères, on trouve l'étonnante géologie ainsi que la curieuse topographie des reliefs, mise en évidence par les photographies prises par les Orbiter des sondes Viking. Il apparaît immédiatement que l'érosion hydraulique a certainement joué un rôle considérable par le passé. Aujourd'hui, ce sont plutôt les vents martiens qui contribuent à façonner cet étrange paysage. L'origine de ces vents provient des spécificités de l'atmosphère martienne (cycle du dioxyde de carbone), mais aussi des températures extrêmes de la planète, dont les écarts, au moment des changements de cycles saisonniers, sont engendrés par une orbite martienne très elliptique et à excentricité relativement conséquente. Les missions passées ont permis de repérer à la surface de Mars toute une variété de paysages : certains spécifiquement martiens, d'autres présentant des analogies avec les paysages lunaires (zones de cratères d'impact, bassins circulaires des régions Hellas et Argy-

re). Des analogies existent aussi avec la Terre : champs de dunes de la région Hellespontis, réseaux de fleuves sinueux asséchés avec leurs affluents et énormes chenaux, traces de lacs et même d'anciennes mers, comme le font penser certaines photos publiées en 1987 par le Jet Propulsion Laboratory de la NASA.

On trouve également des canyons du type de celui du Colorado sur Terre et des coulées volcaniques. Mais, dans ces deux derniers cas, les phénomènes semblent se dérouler à une toute autre échelle que sur Terre, ce qui paraît étonnant en regard de la taille de la planète ! Ainsi le gigantesque canyon Valles Marineris est une monstrueuse cicatrice visible à des millions de kilomètres de la planète, et nombre des chenaux observés peu-

vent atteindre plusieurs centaines de kilomètres de long pour des largeurs cinq à six fois supérieures à celles des grands fleuves terrestres ! En ce qui concerne les volcans, là encore Mars bat tous les records en matière de gigantisme avec les « Léviathans » des régions Amazoni et Tharsis situées dans l'hémisphère nord de la planète, dépassant légèrement l'Equateur sur une petite partie de l'hémisphère sud. Situé un peu au nord-ouest des Monts Tharsis, le volcan géant Nix Olympica s'élève à une altitude de plus de 23 kilomètres, ce qui en fait le plus grand volcan du système solaire.

La disproportion entre les structures géantes et la taille globale de la planète a amené les scientifiques à conclure que la croûte martienne, évaluée entre 40 et 50 kilomètres

d'épaisseur, contre 30 kilomètres pour la Terre serait constituée d'un seul bloc. De ce fait, les mouvements du magma interne agiraient violemment sous l'écorce, sans possibilité d'éjection ou de dégazage progressif. Il suffit alors que la pression et la température du magma interne deviennent trop fortes, pour que la carapace de la surface *craque d'un coup* avant de se refermer, laissant les cicatrices si caractéristiques de Mars. Une analyse méthodique des roches des régions volcaniques constituerait un bon indicateur de la composition interne de Mars. Il est également certain que ce phénomène typiquement martien d'échange entre la carapace et le magma, est à l'origine de remontées d'énormes quantités d'eau, lesquelles peuvent en partie expliquer le creusement des chenaux à la surface.

## Quand Mars avait de l'eau

L'origine de ces chenaux, comme le pense le géophysicien français Battistini, vient peut-être des impacts météoritiques dans des parties de la planète où le sol contenait de l'eau à l'état liquide ou gelé. Les glaces souterraines, en fondant, se seraient écoulées plus ou moins longtemps en créant une couronne de matériaux (éjecta). Toutefois, il est frappant de constater que nombre de ces chenaux, qui semblent sortir de volcans ou de cratères météoritiques, présentent des analogies, non seulement avec des phénomènes catastrophiques de remontées souterraines, ce qui semble logique, mais également avec des *bassins fluviaux terrestres* parfaitement structurés (comme le soulignent d'ailleurs les spécialistes français François Costard, Philippe Masson, directeur du service planétologie de l'Université Paris-Sud Orsay et Nathalie Cabrol, du laboratoire DA-SOP de Meudon).

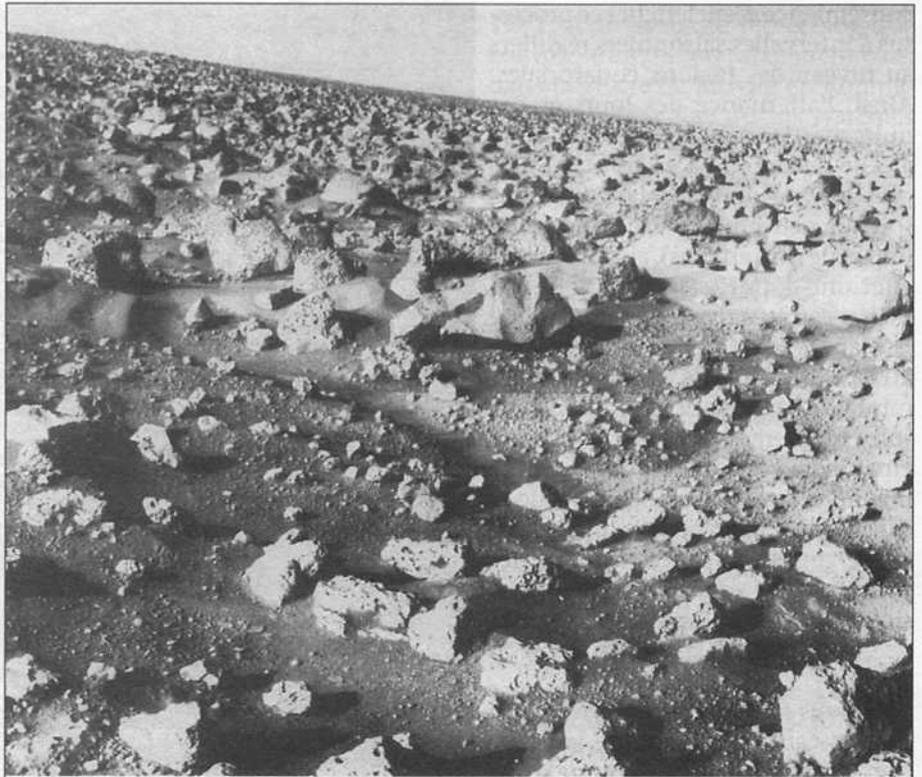
Beaucoup de spécialistes en géomorphologie fluviale estiment que la thèse de Nathalie Cabrol (théorie de la nappe aquifère), n'explique pas tout et que, parmi ces chenaux, les plus anciens n'ont pu être creusés que par des écoulements ayant bénéficié



Sur cette photo, prise par Viking Orbiter-1, on peut voir à droite le gigantesque canyon Valles Marineris, et au-dessus du canyon, les systèmes de réseaux fluviaux. En bas, à gauche, on distingue aussi trois volcans géants des Monts Tharsis.

ficié d'une certaine *durée*. Ceci semble être le cas notamment pour Maja Vallis et Vedra Vallis qui, photographiés en orbite, ressemblent à s'y méprendre à certains systèmes fluviaux terrestres, où des affluents se jettent dans un fleuve. Dans ces deux régions, l'examen des clichés tend à montrer que le « fleuve » a grossi au fur et à mesure de l'arrivée de nouveaux affluents, et que les gorges creusées apparaissent de plus en plus impressionnantes au fur et à mesure de l'écoulement ! Nous serions donc face à un phénomène d'érosion sur une durée importante, commencé bien avant l'époque où se sont déroulés les phénomènes catastrophiques. Pour l'expliquer, il faudrait sans doute chercher du côté des conditions atmosphériques martiennes qui furent dans le passé bien *différentes* de ce qu'elles sont aujourd'hui.

A l'heure actuelle, la pression atmosphérique trop basse (6 millibars) ne permet pas la circulation en surface de l'eau à l'état liquide. L'atmosphère martienne elle-même est extrêmement ténue et principalement composée de dioxyde de carbone (95,3%), d'azote (2,7%), d'un peu de vapeur d'eau et de gaz rares lourds comme l'argon (1,6%). En raison de sa faible masse en comparaison avec la Terre (l'accélération de la pesanteur martienne est de 376 cm/sec contre 981 cm/sec pour notre planète), Mars devait difficilement



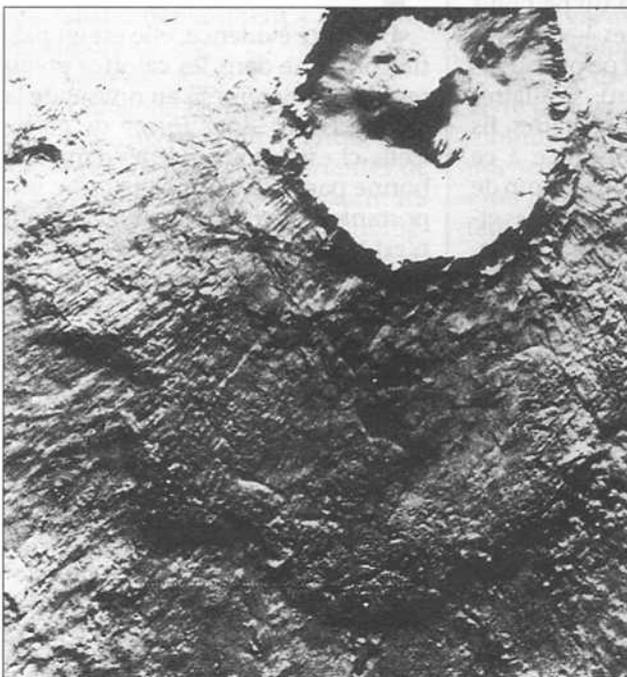
*Photo prise par Viking Lander-2. Ce type de paysage ressemble beaucoup aux déserts rocailloux terrestres.*

compenser par sa gravité le phénomène d'agitation thermique des molécules de ses gaz légers, dans les hautes couches de son atmosphère. Il n'en demeure pas moins que pendant longtemps l'eau a pu trouver des conditions de température et de pression suffisantes pour circuler à l'état liqui-

de à la surface de Mars. Il est même possible que notre planète sœur ait connu des phénomènes de pluie et de neige similaires à ceux que nous connaissons sur Terre.

Mais, comment expliquer ce changement de l'atmosphère martienne ? La réponse se trouve sans doute dans l'énorme dissymétrie qui existe entre les hémisphères nord et sud, de part et d'autre d'un cercle imaginaire, incliné à environ 50° par rapport à l'équateur martien. Au nord, les volcans, les vallées fluviales, les chenaux, les « lacs » et les grands canyons ; au sud un paysage quasi-lunaire bombardé par des cratères d'impact !

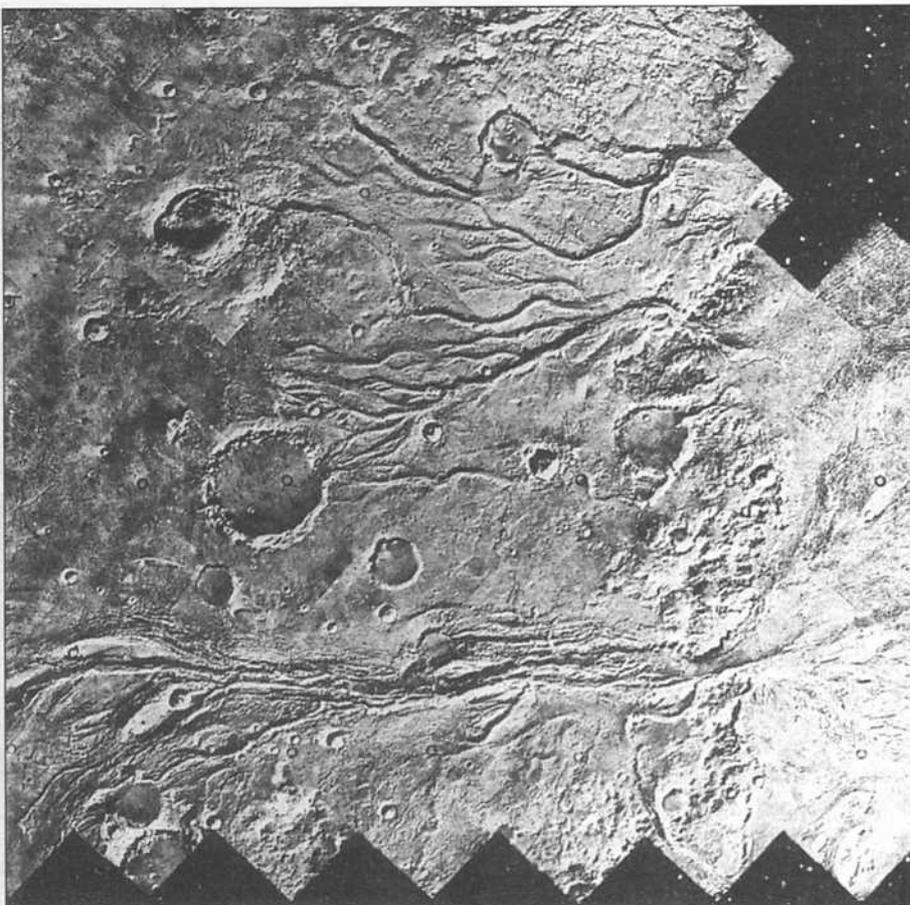
Cette dissymétrie nous laisse croire que l'axe de rotation de la planète sur elle-même aurait été plus incliné par le passé. Il apparaît alors clairement que chacun des deux pôles (comme ce qui se passe pour Uranus, selon un cycle de 42 ans), bénéficiait alternativement de plus de 300 jours d'ensoleillement total ou partiel. Dans ce cas des phénomènes réguliers de sublimation de la glace des pôles en vapeur auraient eu pour



*On peut voir ici un impact météoritique sur une partie de la planète où le sol contenait de l'eau à l'état gelé. Les glaces souterraines, en fondant, se seraient écoulées plus ou moins longtemps en créant une couronne de matériaux (éjecta).*

conséquence d'enclencher ce processus à intervalles saisonniers réguliers au niveau des régions équatoriales. Ainsi, l'alternance des jours et des nuits martiennes (presque identique à celle de la Terre à 41 minutes près plus longue pour la planète rouge, soit un peu plus de 20 minutes de jour et de nuit en plus), aurait eu pour effet une condensation de cette vapeur d'eau en neige (étant donné que la planète Mars ne bénéficie que de 40% de la densité de puissance transmise par l'énergie solaire à cause de son éloignement). De ce fait, Mars aurait bénéficié de tempêtes de neige régulières, avec retombée de celle-ci sur le sol. Et, grâce aux nuages de neige, un effet de serre assurant les conditions de température et de pression indispensables à la circulation de l'eau liquide à la surface.

Il nous faut toutefois aussi expliquer la cause ultérieure de la variation de l'inclinaison de cet axe de rotation. Faut-il faire appel à une théorie « catastrophiste », comme un cataclysme cosmique ? Ou encore à une collision avec un objet éjecté, après désorbitation, par l'explosion d'une supernova « proche » du système solaire et ayant traversé les espaces intersidéraux au cours d'un voyage de plusieurs centaines de millions d'années ? A un bombardement massif de gros astéroïdes ou de grosses comètes arrivant en grappes sur la planète Mars ? Dans ce dernier cas, les deux satellites martiens Phobos et Deimos, visiblement satellisés autour de Mars lors d'un processus de capture par gravitation, ne seraient-ils que des objets résiduels reconstitués dans l'espace, après collision d'un plus gros objet avec la surface martienne. Est-il possible de retrouver à la surface de Mars des matériaux tendant à confirmer cette hypothèse ? Et dans ce cas, les météorites probablement issues de Mars après éjection, et retrouvées dans l'Antarctique, ne pourraient-ils pas être considérés comme des témoins de cet événement catastrophiste ? Ne pourrait-on pas alors trouver la trace d'un tel phénomène au niveau d'autres planètes du système solaire ? Comme on le voit, toute tentative d'explication relative aux spécificités martiennes soulève à son tour bien d'autres questions...



*Il semble de plus en plus probable que l'eau a pu circuler sur Mars à l'état liquide il y a plusieurs milliards d'années, à une époque où les conditions atmosphériques étaient fort différentes de ce qu'elles sont actuellement.*

Quoi qu'il en soit, s'il y a eu de l'eau, on peut imaginer que Mars ait connu — à partir d'une chimie prébiotique analogue à celle qu'a pu connaître la Terre, il y a un peu plus de 3,5 milliards d'années — des processus biologiques de type procaryote (à cellule sans noyau), similaires aux algues bleues et aux bactéries. Ils auraient pu donner naissance à ce que nous connaissons sous le nom de « stromatolithes », c'est-à-dire des gisements fossilifères de micro-organismes primitifs, découverts à la fin du siècle dernier, dans les montagnes Rocheuses américaines par Walcott, ou plus récemment à North Pole en Australie (études effectuées par les Américains Awramik et Schopf et les Australiens Groves, Dunlop et Buick). Naturellement, pour confirmer cela, il nous faudrait pouvoir déposer, au cœur de ces ravins, de petits véhicules automatiques mobiles, équipés d'instruments scientifiques bien plus complexes que les Viking des années 1975-1976.

## Où est passée l'eau martienne ?

De toute évidence, elle est en partie contenue dans les calottes polaires (particulièrement au niveau de la calotte Nord), sous forme de glace. Celle-ci est recouverte pendant une bonne partie de l'année par une importante couche de carboglace, qui n'est en fait que du dioxyde de carbone issu de l'atmosphère et transformé en glace au moment des saisons les plus froides. C'est la sublimation de ce carboglace au moment du réchauffement des calottes polaires (amplifiée par les variations de températures à vitesse accélérée), qui crée ces fameuses tempêtes de poussières ferrugineuses et de sable siliceux, qui peuvent parfois recouvrir pratiquement toute la planète pendant des mois.

Des mesures plus précises de la teneur en eau dans l'atmosphère

martienne prouvent que toute l'eau n'est pas concentrée, loin de là, dans les calottes polaires. Des mesures du rapport deutérium-hydrogène de l'atmosphère martienne étaient d'ailleurs prévues, dans le cadre du programme avorté des sondes soviétiques Phobos, afin de comprendre le pourquoi de la disparition de l'eau liquide à la surface de la planète.\* D'autres expériences, de conception soviétique et française utilisant des spectromètres infrarouge\*\* adaptés à la détection des objets « froids », devaient repérer des régions souterraines de pergélisol, là où une partie de cette eau a pu s'agglomérer sous forme de glace avec le matériau martien. Il existerait en profondeur d'importantes nappes aquifères, témoins des étapes passées du processus d'accrétion ayant conduit à la formation de Mars à partir de planétésimaux. Ces nappes, comme le pense l'astrophysicien belge Armand Delsemme, seraient aussi formées à partir d'eau apportée par les comètes, à l'image de la Terre. Cette eau, sous l'influence des périodes plus ou moins régulières de refroidissement, doit être répartie en couches hétérogènes, glaces « dures » infiltrées dans les interstices des roches pour les parties supérieures qui constituent le pergélisol proprement dit, plus ou moins analogue à son homologue terrestre, et couches à l'état liquide pour les parties plus internes qui composent ce que les spécialistes dénomment « l'hydrolithosphère ».

Selon René Battistini, géophysicien à l'Université de Nantes, il y aurait des variations importantes de l'épaisseur de la couche séparant les deux zones : entre 1,5 et 1,7 kilomètre pour les zones géographiques situées autour de l'équateur martien ; entre 3 et 4 kilomètres en dessous des calottes polaires. Selon le même spécialiste et plusieurs de ses confrères américains, il existerait des échanges thermiques permanents entre les deux zones, entraînant des variations

parfois importantes de leur épaisseur. Dans certains cas, l'accumulation d'énergie thermique interne pourrait localement faire remonter de petites fractions d'eau liquide à la surface, celle-ci s'évaporant immédiatement à cause des conditions atmosphériques martiennes actuelles, caractérisées par une très basse pression.

Comme le dit fort bien Roger-Maurice Bonnet, directeur du programme scientifique de l'ESA, dans son ouvrage *Les horizons chimériques* :

*« Mars constitue sans aucun doute, après notre propre planète, le seul rivage écologique biocompatible de notre système solaire. Peut-être même existe-t-il des restes de vie fossile dans des niches souterraines. »*

Les résultats obtenus par les sondes Viking nous ont en effet appris — à défaut de l'existence actuelle de processus biologiques près de la surface — que Mars possède tous les éléments essentiels à la vie (dont l'azote). Même si les températures sont extrêmement basses (de -29°C le jour à -84°C la nuit), elles sont parfois plus élevées (jusqu'à 20°C dans les régions équatoriales). Leur moyenne, de toute manière, fait qu'elles sont parfaitement compatibles avec l'existence de processus biologiques adaptés à des milieux « hostiles ». En Antarctique, les américains Wishniac et Freedman ont, par exemple, observé des bactéries (enveloppées d'une membrane fibreuse hydrophile), capables de survivre pendant presque un an sans le moindre contact avec l'eau liquide, à une température de -20°C, et ce quelques millimètres à l'intérieur de certaines roches. Toujours en Antarctique, l'exobiologiste américain Christopher Mac Kay a découvert du plancton microscopique, des organismes analogues aux algues bleues procaryotes et même une espèce d'arthropode primitif, au fond des lacs situés sous la carapace de glace !

Plus étonnant encore, apparaît l'adaptation de la bactérie terrestre *Bacillus Subtilis* au rayonnement du milieu spatial, lequel arrive jusqu'au niveau du sol martien, du fait de la faible couche atmosphérique. Sans parler de l'étonnante découverte, en

1991, d'un système bio-écologique complexe en milieu totalement clos, dans la grotte de Movile en Roumanie. Selon Mac Kay de tels systèmes apparaissent à la fois comme « peu probables » mais « possibles » sur Mars (voir *Fusion* n° 45).

## L'idée de sonde robotisée mobile

Cette idée vient de la nécessité de combler les lacunes des données recueillies par les sondes Viking, et de posséder une nouvelle génération de robots capables d'opérer dans des régions aussi diverses que variées, d'éviter des obstacles, d'analyser des échantillons provenant de sites différents tout en intégrant des expériences plus sophistiquées complétant l'arsenal des sondes des années 1975-1976 (Pyrolytic Release Module, Gaz Exchange Module, Labelead Release Module, spectromètre de masse-analyseur en chromatographie à phase gazeuse). Le robot idéal, imaginé par les Américains, doit être capable de creuser plus profond, dans des sols différents, de « déterminer » les endroits les plus favorables des sites traversés, de casser des roches et des cailloux, et de s'adapter à des topographies variables et parfois difficiles d'accès, tout en tentant de répondre à plusieurs questions : à quels types de réactions exotiques peuvent répondre les superoxydants réactifs détectés dans le sol de Mars ? Existe-t-il des formes de vie inconnues non soumises aux lois ordinaires de la chimie du carbone ? Où trouver l'eau à l'état liquide ? Peut-on, à partir d'analyses de surface, repérer des zones riches en matières organiques voire des microsystemes écologiques clos en sous-sol ? C'est dans cet objectif, qu'à la demande de la NASA, les ingénieurs de la firme Martin Marietta ont planché sur leur concept de Super-Viking.

Aujourd'hui, ce projet (comme tant d'autres) est hélas sacrifié sur l'autel de la société post-industrielle. Le Super-Viking consistait, un peu à l'image des sondes Viking de première génération, à associer un Orbiter à un Lander martien. L'Orbiter devait jouer son rôle de relais des télécommuni-

\* Expérience Auguste, élaborée par le Service d'aéronomie de Verrières-le-Buisson.

\*\* Elaboré par le Laboratoire René Bernas d'Orsay, le LPSP de Verrières et l'Observatoire de Meudon.

cations, de la surface martienne à la Terre et vice versa, emporter des caméras de télévision, des équipements de cartographie thermique et de la vapeur d'eau, des expériences de propagation des ondes radios et un spectromètre à rayons gamma.

En ce qui concerne le module d'atterrissage, les ingénieurs américains avaient prévu, outre la reprise des équipements des Viking de première génération, l'emport de nouvelles expériences complémentaires incluant un système unifié d'analyses biologiques et chimiques, un diffractomètre à rayons X, un spectromètre à protons et rayons X et alpha, un équipement permettant de broyer les roches, une station météorologique et des caméras vidéo. Les deux engins associés (d'une masse totale de 3740 kilos contre 3500 pour les Viking, Orbiter compris), auraient été lancés au moyen d'un étage supérieur à partir d'une navette, à la manière des sondes actuelles Magellan, Galileo et Ulysse. Pour un spécialiste tant soit peu averti, ce projet, conçu dans les années 1977-1978, représentait pour l'époque un sacré défi technologique ! Il faut savoir, en effet, que ces Lander Super-Viking, d'une masse totale de 693 kilos (pour une vitesse de déplacement de 150 mètres à l'heure, un rayon d'action mensuel de 50 kilomètres et une vie utile de deux ans), ne pèsent en effet que 95 kilos de plus que la station correspondante de première génération. Ensuite, il faut intégrer d'autres instruments

dans ces 95 kilos : un système global de contrôle intégré (relié à chacun des instruments par des capteurs), douze roues (associées en trois systèmes entourés chacun de deux chenilles), le système de motorisation et le combustible nécessaire pour les deux ans de durée de la mission... tout ceci sans compter le système d'intelligence artificielle permettant à l'engin un certain degré d'autonomie.

Il apparaît donc que le problème ne se résume pas à une question de moyens financiers. En plus de la préparation des différentes expériences, il faudra aboutir à des progrès technologiques robotiques considérables et un degré élevé de miniaturisation de ses composants. Le véhicule totalement automatique et autonome n'est pas pour demain mais pour après-demain !

Toutefois, et pas seulement pour ce qui concerne les analyses de type biologique, l'outil rêvé des scientifiques et un des thèmes de recherche privilégiés des planétologues et des ingénieurs reste « *l'unité mobile tous terrains dotée de ses propres instruments d'analyse biologique, pétrographique, stratigraphique et chimique, intégrant des expériences modifiables suivant les résultats, capable d'éviter de lui-même obstacles et terrains dangereux, et de procéder à l'avance à une cartographie des endroits à explorer les jours suivants* », comme le dit Carl Sagan un des inspireurs américains de ce type

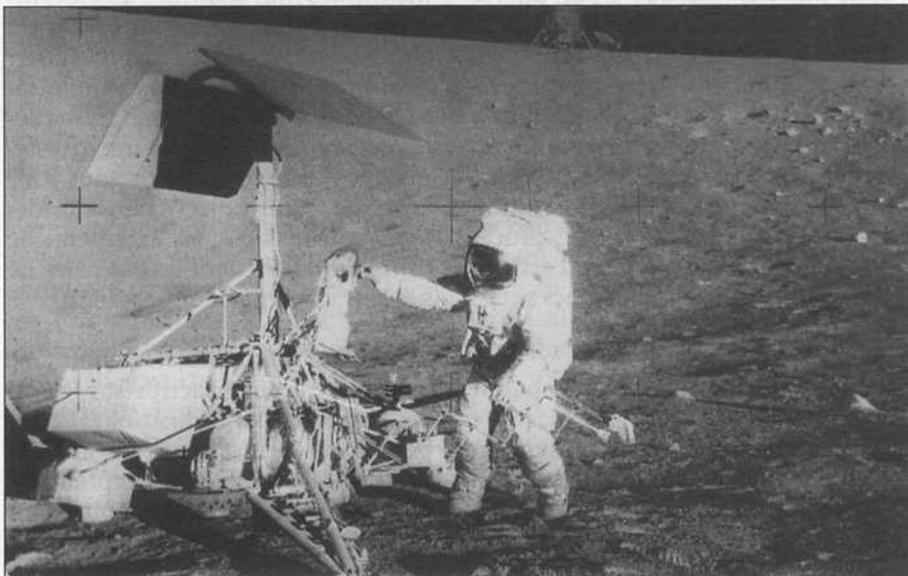
de projet. En attendant il faudra nous contenter de concepts moins ambitieux dont certains sont déjà en cours de développement.

## Une coopération internationale

Malgré l'évolution peu encourageante des programmes spatiaux, le cap fut pourtant en partie maintenu pour les programmes scientifiques planétaires. Mars, notamment, fait l'objet d'une intense coopération internationale, dont le premier élément devait être la sonde américaine Mars Observer, qui sombra corps et biens il y a quelques mois. Nombre des données qu'elle était censée apporter auraient en effet été bien utiles pour les missions suivantes.

Heureuse surprise, il faut constater que les Français et le CNES ne se sont pas laissés distancer en s'accrochant, comme ils l'avaient déjà fait au moment du programme Phobos, au bon wagon du programme spatial de la CEI. Parallèlement l'ESA, elle aussi, affiche quelques ambitions en ce qui concerne l'exploration scientifique de la Lune au moyen de véhicules automatiques (et même de systèmes de collecte d'échantillons avec un retour sur Terre pour analyse).\*

Que ce soit au niveau de la Lune que de Mars, agences et industriels travaillent. Même si le projet euro-



Lors de la mission Apollo 12, l'astronaute Alan Bean a pu récupérer les caméras du véhicule automatique Surveyor 3 lancé en avril 1967. Les sondes américaines Surveyor (au nombre de sept, lancées de mai 1966 à janvier 1968), et soviétiques Lunakhod peuvent être considérées comme les ancêtres de la future robotique mobile planétaire.

péen Marsnet (consistant en un dépôt de petites stations de mesure automatiques à la surface de Mars), a été abandonné au profit d'un autre projet, il n'en est pas de même du programme américain MESUR (Mars Environmental Survey) du Ames Research Center. Ce projet consistait à placer sur Mars plusieurs ensembles scientifiques intégrés (pour des raisons budgétaires 8 au lieu des 16 prévus), composés de systèmes d'analyses chimiques, de systèmes d'imagerie, de sismomètres, d'un système de mesure des vents et des températures. A cause de la distance par rapport au Soleil (Mars ne reçoit que 40% de la densité de puissance transmise par celui-ci au niveau de l'orbite terrestre), les stations MESUR seront équipées, pour leur alimentation électrique, de petits générateurs radio-isotopiques de type RTG, comme ce fut le cas pour les stations Viking. La NASA compte lancer ces stations sur une fourchette de temps étalée sur les années 2001-2005.

De plus, la coopération étroite qui s'est instaurée depuis de nombreuses années dans le domaine spatial entre l'ex-URSS et la France devrait déboucher, en 1996, sur le lancement d'un extraordinaire module martien par une Super-Proton. Il contiendrait à la fois un ballon français (né des idées de Jacques Blamont), et un petit véhicule robotique dénommé Marsokhod. Après sa mise en place en orbite martienne notre module, de façon tout à fait classique, se séparera en un Orbiter et un module de descente, qui devrait être injecté dans l'atmosphère martienne en septembre 1997. A ce moment-là, et au-dessus du site Arcadia Planitia (situé entre 30° et 45° de latitude nord dans le prolongement des chaînes montagneuses, proches du volcan géant Olympus Mons), on assiste à une nouvelle séparation. Alors que le Marsokhod plonge vers la surface soutenu par d'énormes parachutes spécifiquement adaptés à l'atmosphère martienne, l'aérostat du CNES (d'une



*Essais en Californie du véhicule martien Marsokhod. Emportant une charge utile scientifique de 17,5 kg, ce robot russe, à participation française au niveau du logiciel, est en fait un véhicule téléguidé opérant en temps non réel à cause de l'éloignement entre la Terre et Mars. Toutefois l'acquisition des technologies impliquées peut être considérée comme une étape intermédiaire devant conduire au concept de véhicule automatique planétaire.*

capacité de près de 6000 m<sup>3</sup>), supportant une nacelle équipée de caméras, d'instruments pour l'étude de la composition chimique de la surface, d'un magnétomètre et d'un spectromètre infrarouge, commence alors une bien curieuse odyssee : à la manière d'un « yo-yo » géant, il rebondit lentement entre la surface de Mars et un opérateur invisible manipulant avec dextérité, le tout à une altitude de quelques kilomètres.

Même si nous ne partageons pas les idées restrictives de Jacques Blamont concernant le principe de la présence de l'homme dans l'espace, reconnaissons-lui au moins la qualité de scientifique imaginatif et obstiné n'hésitant pas à « défourailler » le sabre pour défendre ses projets contre ce qu'il nomme la « crapeautaille » acharnée à sa perte... L'aérostat martien du CNES lui doit en effet presque tout, de même que les aérostats vénusiens du programme VEGA, et comme il le dit lui-même : « *La voie d'accès aux volcans de Mars passe par les stations flottantes de Vénus* ». « *Principe de Blamont* » oblige... comme il le dit « modestement » lui-même dans

son livre *Vénus dévoilée* paru il y a quelques années chez Odile Jacob.

Le principe de cet aérostat n'est en effet qu'une application dérivée du principe du « ballon pressurisé ». D'un diamètre de 13,5 mètres pour une longueur de 42 mètres, le ballon utilise la contraction et la dilatation des gaz provoquées par des écarts thermiques élevés dus à l'alternance des jours et des nuits. Pendant le jour, la montée de la température propulse notre aérostat, au gré des vents, à une altitude variant entre 2 et 4 kilomètres. Dès que la nuit se profile et que la température baisse, notre ballon redescend lentement vers le sol, alors qu'un « guiderope », servant à la fois de lest et de plate-forme scientifique, stabilise l'aérostat en glissant sur le sol alors que celui-ci est encore suffisamment léger pour planer à quelques mètres de la surface... avant de repartir dès que le jour martien se lève ! Ce « guiderope », d'une longueur de 13 mètres pour un poids terrestre de 13,5 kilos, est équipé, outre un spectromètre à neutrons, d'un radar « géophysique » conçu pour la détection des eaux souterraines.

\*Lire le rapport de l'ESA, *Mission to the Moon*, rédigé par son « Lunar Study Steering Group », présidé par H. Balsiger, dont on connaît le rôle qu'il joua dans le projet de sonde cométaire Giotto.

Mais revenons à notre véhicule robot. Ce Marsokhod se faufile entre les roches à la vitesse d'une « chenille » et continuera son petit bonhomme de chemin sur Arcadia Planitia. Cependant, il n'a rien de bien curieux « insectes » dont nous avons parlé au début de cet article. En effet, la masse de sa charge utile scientifique ne dépasse pas 17,5 kilos pour un total de 100 kilos. Toutefois, notre Marsokhod russe peut être considéré comme l'ancêtre des futurs VAP. Équipé de capteurs sophistiqués qui lui permettent de « reconnaître le terrain », notre engin n'est en fait qu'un véhicule téléguidé à distance en temps non réel, à cause de l'éloignement entre la Terre et Mars. Dans les meilleures conditions de rapprochement des deux planètes, il faudra au minimum 20 minutes pour envoyer et autant pour recevoir les signaux. De ce fait, le robot ne progresse que par « soubresauts » ponctués de longues périodes d'immobilité, au cours desquelles les scientifiques analysent à la fois les résultats des expériences entreprises au cours de la période d'activité précédente, et déterminent le programme à venir en fonction des informations sur le terrain et l'environnement.

Pendant ce temps, Marsokhod ne reste pas inactif et ses caméras stéréo auscultent de tous côtés l'étrange terrain martien sur lequel il va opérer, dès que les ordres lui seront venus de la Terre via la station d'Evporatoria. Alors qu'il vient de terminer sa seconde émission d'informations vers la Terre, l'Orbiter martien commence à lui envoyer le programme qui lui a été concocté pour la journée depuis Moscou et Paris. Parcourant entre 50 et 100 mètres par jour de travail, le Marsokhod emportera un système de prélèvement d'échantillons, des spectromètres gamma, alpha-X et neutrons, un instrument de sondage électromagnétique et peut-être un spectromètre Mossbauer.

Aujourd'hui, nous savons combien ce programme sera handicapé par l'absence de Mars Observer, et ce d'autant plus que le niveau technologique se situe encore bien en dessous de ce que sera le concept de « véhicule automatique planétaire » martien.

## Le grand pari des VAP

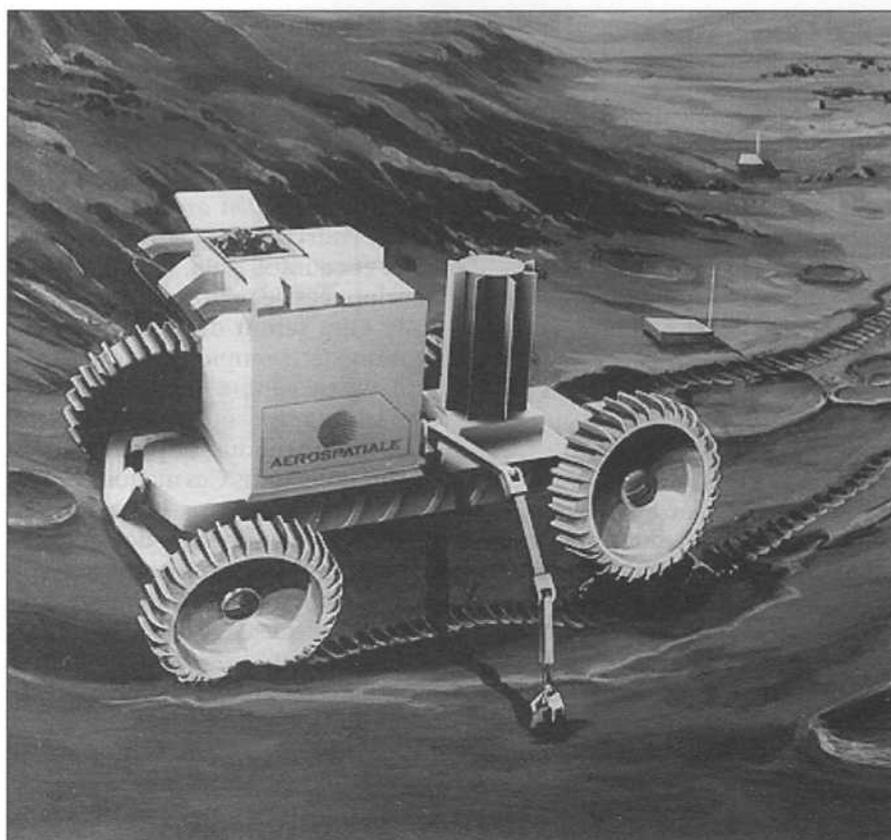
Si le problème de la conduite et du contrôle en temps réel ne se pose pas pour des véhicules automatiques lunaires du type envisagé par le CNES ou le groupe d'étude ESA-LLSG (à cause de la faible distance Terre-Lune), le problème est évidemment différent pour un véhicule martien dont nous avons défini le type idéal plus haut. Que ce soit aux Etats-Unis, dans l'ex-URSS ou au Japon (programme d'étude de robots mobiles de l'Université de Tsukuba), des équipes d'ingénieurs s'activent, depuis de nombreuses années, pour franchir progressivement les étapes permettant

l'émergence du véhicule parfaitement autonome.

Pendant très longtemps les Etats-Unis ont dominé les recherches dans ce domaine avec leur projet « Robby », étudié par le Jet Propulsion Laboratory dans la perspective de missions automatiques martiennes. Robby, véhicule à 6 roues placées sur trois axes insérés dans une structure d'ensemble non rigide, était équipé de systèmes robotiques expérimentaux complexes destinés à valider les technologies impliquées, d'un bras télémanipulateur permettant de creuser le sol, de soulever des roches, et de ramener des échantillons pour analyse. Il était aussi équipé de caméras stéréos montées sur la structure centrale de l'engin. Celles-ci permettaient



*Disposant de 6 roues motrices non orientables, et d'une masse de 600 kilos pour une longueur de 2,30 mètres et une hauteur d'un mètre, le concept Adam a été développé par la société Matra. Il a été conçu dans le cadre du programme robotique européen Eurêka/AMR, pour permettre le développement de robots en matière d'intervention en « milieux hostiles ». Grâce à l'acquisition des technologies du programme AMR, la firme spatiale franco-britannique se positionne en leader dans le domaine des recherches sur les véhicules automatiques planétaires. Elle a ainsi été désignée par le CNES comme maître d'œuvre du programme I-ARES, ayant pour objectif le développement d'un démonstrateur de faisabilités de futurs robots mobiles autonomes martiens.*



*Tout comme Matra Marconispace, Aerospatiale s'est vu confier par le CNES des études de faisabilité de prototypes pour des sondes mobiles robotisées et autonomes martiennes. La firme des Mureaux, dans le cadre de ces études, a imaginé plusieurs types possibles de véhicules (allant du quatre aux six roues), de façon à pouvoir comparer les avantages et les inconvénients respectifs des diverses solutions envisagées.*

*Des projets comme I-ARES et VAP représentent un défi technologique important. Le CNES, les entreprises françaises industrielles et les laboratoires publics présentent des compétences qui permettront, peut-être, de résoudre un certain nombre de mystères martiens.*

la mise au point d'une carte de l'environnement et la navigation de façon autonome autour des obstacles afin d'atteindre un but prédéterminé. Ces études ont été considérablement ralenties au début des années 80 pour être reprises quelques années plus tard, sous la présidence de Ronald Reagan, à l'initiative de la division DARPA du département de la Défense et de la Strategic Defense Initiative Organization.

Même si ces recherches n'avaient pas pour seul but de mettre au point des sondes mobiles robotisées planétaires, elles ont néanmoins réussi à mettre au point un dérivé du « Robby ». Il était capable d'une réelle autonomie en milieu planétaire, simulant dans des conditions proches, en durée de travail et déplacement, ce que l'on pourrait demander quotidiennement aux premiers véhicules martiens autonomes. Ultérieurement, et dans le cadre des programmes Ambler (Robotics Institute de l'Université Carnegie-Mellon), et Tooth (associant le JPL de la NASA au Caltech), les Américains ont pu développer d'autres technologies impliquées par ces concepts de véhicules automatiques. Ils progressèrent no-

tamment dans le domaine de la coordination des fonctions perception et reconnaissance de l'environnement, et planification ultérieure des tâches. Comme le souligne l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (INRIA), il existe une réelle disproportion de moyens entre les Etats-Unis et la France, qui a pour conséquence d'obliger notre pays à une plus grande rigueur dans le choix des procédures et processus caractérisant les programmes de recherche. Cette rigueur semble avoir payé puisqu'aujourd'hui, force est de constater que les Européens ont fait des progrès tels que dans ce domaine ils deviennent inévitablement des partenaires à prendre en considération, dans le cadre de programmes internationaux. Cette constatation est particulièrement valable pour la France, où le CNES a su habilement fédérer des compétences où sont impliquées, en plus des laboratoires publics, près de 30 firmes françaises comme le montre un rapport, publié par le secrétariat d'Eurêka en 1992.

Pourquoi cette compétence européenne, et particulièrement française, dans un domaine de la conquête de l'espace aussi pointu alors, que

d'une façon générale, sur le plan des techniques spatiales, notre continent reste encore loin des Etats-Unis et de la CEI ? Tout simplement grâce à l'acquis du programme technologique Eurêka pour l'Europe et, pour la France, des programmes de recherche en robotique entrepris en collaboration par le CNRS, l'INRIA et le CEA : comme quoi les techniques du nucléaire en milieu « hostile » peuvent avoir des retombées civiles dans tous les azimuts, et combien il est indispensable de se préserver contre tout démantèlement d'un tel outil de recherche.

Etonnant mais vrai, les projets de robotique mobile planétaire ont également des synergies, au niveau d'un certain nombre de fonctions de base, avec les robots de sécurité civile, ceux chargés de l'inspection des centrales nucléaires, de la surveillance, de l'inspection et des interventions sous-marines. Tout cela nécessite localisation de l'environnement en mode absolu ou relatif, l'avancée et l'optimisation de la trajectoire, la gestion des connaissances du milieu dans lequel le robot évolue, actions tactiles, de préhension, de contournement et de franchissement des obstacles,...

Dans ces domaines on ne louera jamais assez l'acquis permis par le programme Eurêka (dont l'objectif officiellement défini pour ce domaine était officiellement de faire tomber « l'impossible technologique ») et des projets qu'il permit en partie de financer, à savoir AMR (Advanced Mobile Robot) et Mithra. Ce dernier a considérablement fait progresser l'association des systèmes de vision stéréoscopique en temps réel aux représentations de l'environnement permises par un système intégré de données venant de capteurs de nature différente (laser, vision 3D, ultrasons). Le programme Eurêka-AMR a, de son côté, notamment ouvert la voie à la réalisation d'un imageur-laser à trois dimensions permettant des mesures de déplacement de l'ordre d'un dix millième de seconde ! Utilisé avant tout pour des applications civiles, AMR offre également l'opportunité d'établir des cartes en profondeur à haute résolution permettant la détermination par le robot appelé à les utiliser des secteurs les plus intéressants à « fréquenter » pour les déplacements sur les sites où il est appelé à opérer.

Le CNES a su réunir tous ces atouts dans des programmes mobilisateurs ayant un seul objectif : la réalisation de prototypes fiables de VAP permettant ultérieurement à la France de pouvoir se positionner en partenaire majeur et inévitable, aux côtés de la CEI et éventuellement des Etats-Unis, pour des programmes de véhicules sophistiqués lunaires ou martiens.

Actuellement, et dans certains cas en coopération avec les équipes russes de VNII Transmach (qui ont déjà travaillé sur les Lunakhod et développent actuellement le véhicule Marso-khod), pour la partie mécanique, les sous-systèmes de locomotion et la plate-forme du véhicule, le CNES, dans le cadre du même programme, cofinance deux projets complémentaires visant au développement de prototypes expérimentaux de VAP. Le projet I-ARES (Illustrateur autonome de robotique mobile pour l'exploration spatiale), dont le maître d'œuvre est Matra-Marconi Space (chargé du logiciel décisionnel informatique d'ensemble, de l'ingénierie

et de l'intégration du véhicule), en association avec le CEA, l'INRIA et les centres de recherche CERT-ONERA et LAAS-CNRS, et le projet VAP, sous maîtrise d'œuvre d'Aérospatiale avec les mêmes opérateurs publics auxquels sont associés cette fois Alcatel Espace, Alcatel Alsthom et Sagem.

Les Français ne partent pas toutefois en aveugles dans cette aventure, grâce aux recherches effectuées auparavant par le groupement RISP (Robotique d'Intervention sur Site Planétaire) qui associait le CNRS, le CEA, l'ONERA et l'INRIA.

Préfigurant des robots mobiles capables d'effectuer à la surface de Mars des déplacements allant de quelques centaines à un millier de kilomètres, les véhicules expérimentaux développés sous la direction d'Aérospatiale et de Matra devront passer de rudes tests de fiabilité. Un des défis technologiques les plus durs auquel est confronté le concept de VAP est de doter celui-ci d'une grande autonomie de façon à lui permettre d'intervenir dans le milieu partiellement connu qu'est l'environnement martien, et dont le logiciel ne possède que des données incomplètes, obtenues au cours des missions de cartographie précédentes effectuées en orbite. Il devra en permanence comparer les données qui lui ont été fournies sur l'environnement (à partir de capteurs vidéo et 3D, d'ultrasons et de systèmes couleurs), alors qu'il est en mouvement, à celles qu'il possédait auparavant, afin de pouvoir rectifier ou compléter les informations nécessaires pour la poursuite de sa tâche.

Selon la plupart des spécialistes, en dépit des progrès apportés par le programme européen Mithra, un des points les plus difficiles à réaliser dans le concept de VAP vient de la nécessité d'obtenir une réponse immédiate aux informations complexes et intégrées, par le système multicapteurs. Une autre difficulté tient au passage à la vision en trois dimensions qui implique la prise en compte, selon les spécialistes, de 6 paramètres sur un terrain accidenté et infesté d'aspérités, alors qu'un déplacement en deux dimensions, sur un terrain

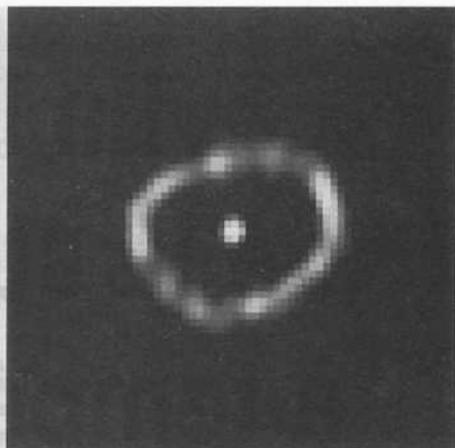
plat, n'implique que l'intégration de trois paramètres.

Selon M. Gagalowitz, un chercheur de l'INRIA, « d'énormes progrès restent à faire concernant l'articulation des systèmes de perception avec la planification ». Pourtant, dès la fin de l'année 1994 et courant 1995, devraient être développées de petites maquettes du VAP. Elles seront dotées d'une perception stéréoscopique leur permettant de construire une représentation tridimensionnelle de la planète Mars et d'un module de planification de leur trajectoire. Ces maquettes resteront peut-être dans l'histoire des techniques comme un des apports français les plus significatifs à la robotique mobile planétaire. Il ne faut pas oublier que ces véhicules auront également la lourde tâche de préparer la cartographie exhaustive des sites privilégiés où s'effectueront les futurs débarquements humains ! Avec peut-être, parmi ces pionniers, un spationaute français ayant malicieusement emporté en fraude dans le vaisseau martien les indispensables spécialités culinaires du Sud-Ouest que ne devraient jamais oublier les planificateurs de voyages spatiaux habités lointains... ■

## Bibliographie

1. Intervention de Nathalie Cabrol devant le C2F, octobre 1992.
2. René Battistini, Nathalie Cabrol, François Costard et J.F. Touzeau, « L'eau sur la planète Mars » in *Journal des astronomes français*, octobre 1989.
3. C. Bank, D. Kassing, « Technologies for Automatic Lunar Exploration Mission », in *ESA Bulletin*, 74
4. « Mission to the Moon », ESA SP-1150 Lunar Study Steering Group.
5. Annual Report 1988, NASA-Office of Exploration.
6. Exploring the Moon and Mars, Congress of the United States -Office of Technology Assessment, 1991.
7. Philippe Jamet, « L'ambitieuse mission Phobos vers la conquête de Mars », *Fusion* N° 24, mars 1988.
8. INRIA, *Robotique, Image et Vision*, Rapport d'activité, 1992.
9. CNES, La mission Mars 94-96.

# Hubble voit clair !



*Symbole de la victoire de l'association homme-robot, la mission de maintenance du télescope spatial (STS-61 Endeavour), qui s'est déroulée au mois de décembre dernier, voit chaque jour qui passe son succès se transformer en triomphe ! Les premiers clichés transmis par un Hubble désormais revigoré au-delà de toute espérance, et diffusées par la NASA et l'ESA, viennent prouver que les extraordinaires sorties extravéhiculaires, effectuées le mois dernier, ne l'ont pas été pour rien.*

*Fusion est aujourd'hui heureux de présenter à ses lecteurs deux de ces chefs d'œuvre photographiques de la nouvelle astrophysique spatiale pour laquelle, grâce à Hubble et à ses « mécanos de l'espace », plus rien ne sera désormais comme avant.*

*Sur le premier cliché (en haut), pris par la caméra européenne à objets faibles FOC, apparaît désormais clairement autour de la Nova Cygni 1992 un nuage de gaz et de poussières formé après la phase éruptive terminale de cette étoile, située dans un système double. L'efficacité du système correcteur Costar mis en place est ici saisissante en comparaison des images « irisées » auparavant par le défaut d'aberration sphérique du miroir primaire de Hubble.*

*Même chose et même image tout aussi stupéfiante pour ce qui concerne le cliché du noyau de la Galaxie M100 (en bas) pris par la nouvelle caméra planétaire grand champ américaine dotée, elle, de son propre système correcteur.*

*De quoi retourner complètement ceux qui, par aveuglement, sont hostiles au principe même de l'intervention de l'homme en orbite. Ayons l'optimisme de croire que le magnifique travail réalisé par les ingénieurs et les astronautes américains et européens ne restera pas sans conséquences pour la relance des grands projets spatiaux. Demain la Lune, et plus tôt que prévu, par le biais d'un programme scientifique et sur la lancée dynamisante et euphorisante de « l'effet Hubble » ? Pourquoi pas...*

