



Perspectives d'exploration du système solaire

DE MULTIPLES DOMAINES
D'APPLICATION

On rappellera d'abord la problématique et les enjeux de l'exploration robotique et humaine du système solaire. L'exploration de Mars présente un intérêt particulier par son intérêt scientifique et par la perspective, encore lointaine, d'une exploration habitée. Plusieurs voies complémentaires se dessinent à moyen terme l'exploration robotique de Mars, avec un programme de retour d'échantillons comme étape majeure, l'exploration humaine de la Lune et des astéroïdes proches, précédée par des missions précurseurs automatiques, des missions automatiques vers les planètes géantes et leurs satellites. Etant donné l'importance des ressources à mobiliser, une large coopération internationale est essentielle, en particulier pour les missions habitées. On examinera ensuite les atouts de l'Europe pour contribuer à un tel programme.

Par Catherine CÉSARSKY* et Richard BONNEVILLE**

PROBLÉMATIQUE

Au sens le plus large, l'exploration est le prolongement de la présence humaine de manière soit directe (par des missions habitées) soit indirecte (par des missions automatiques) au-delà des limites de notre planète (1).

Tout dispositif d'observation ou de mesure, considéré comme une extension de nos sens, est *de facto* un outil d'exploration. En ce sens, la recherche au moyen des observatoires astronomiques de planètes extra-solaires habitables se rattache à la problématique de l'exploration. Mais celle-ci est généralement restreinte aux endroits qui pourraient dans un avenir raisonnable (2) être effectivement visités par l'Homme, ce qui limite son domaine au système solaire, qui sera pour très longtemps le seul système planétaire que nous pouvons envisager d'étudier *in situ* (3), et sans doute aux objets proches : la Lune, les astéroïdes géocroiseurs, Mars et ses satellites naturels.

* Haut Commissaire à l'Energie Atomique, présidente du Comité des Programmes Scientifiques du CNES.

** Directeur adjoint des Programmes, de la Stratégie et des Relations Internationales du CNES.

(1) « *Space exploration is an "open-ended project relying on both human and robotic activities to extend access to unknown terrains and environments, by means of direct (humans) and/or indirect (automated missions and robots) presence through a systematic approach, including preparatory activities, to open new frontiers for the progress and acquisition of new knowledge, and to present options to extend the range of human actions and inspire future generations.* ». Rapport du groupe de travail chargé de conseiller le Directeur général de l'Agence spatiale européenne (ASE - ESA : European Space Agency) sur l'exploration.

(2) Avant la fin de ce siècle.

(3) Pendant longtemps encore les humains (en fait, une poignée d'entre eux !) ne pourront s'aventurer en dehors de la Terre que pour d'assez brèves périodes, et sans voyager bien loin dans le système solaire. Les robots ne prolongeront guère la présence humaine au-delà des limites de ce système. La « colonisation » de la Lune ou de Mars évoquée par certains n'est guère crédible, et la vie des occupants d'éventuelles bases lunaires ou martiennes devrait ressembler à celle des occupants des bases antarctiques : le séjour temporaire d'une poignée d'individus en milieu confiné se protégeant d'un environnement hostile.



Les motivations et les enjeux d'un programme d'exploration sont multiples :

- enjeux scientifiques : accroître nos connaissances et notre compréhension de notre univers ;
- enjeux technologiques et industriels : stimuler l'innovation ;
- enjeux politiques : développer la coopération internationale à travers un effort commun ou, pour un Etat, démontrer sa capacité technologique ;
- enjeux sociétaux : encourager l'éducation scientifique et attirer l'intérêt du public.

Bien que nous reconnaissons que la science n'est pas la seule motivation d'un programme d'exploration, nous considérons qu'un soutien fort de la communauté scientifique la plus large est essentiel (4), qui ne peut être acquis que si ses intérêts sont pris en compte dès la conception du programme.

QUELLES DESTINATIONS ?

La question scientifique majeure qui sous-tend l'exploration est celle de « l'émergence de la vie » dans le système solaire et les systèmes planétaires, puis « la co-évolution de la vie avec les environnements planétaires » (5). La vie est-elle apparue dans le système solaire ailleurs que sur Terre ? Si oui, y est-elle encore présente aujourd'hui ? Pour tenter de répondre à ces questions, la première cible est évidemment Mars, la seule planète du système solaire, en dehors de la Terre, qui ait peut-être présenté au début de son histoire les conditions propres à l'émergence de la vie. Mais contrairement à la Terre, dont la surface a sans cesse été remodelée par l'activité tectonique, Mars a conservé les traces de toutes les étapes de son évolution, depuis une jeunesse tumultueuse où les conditions permettaient la présence stable d'eau liquide en surface, jusqu'à la période présente froide et sèche.

C'est aussi la seule planète où il semble possible dans un futur pas trop éloigné, bien qu'encore indéterminé, d'envoyer un jour des hommes. Cependant aujourd'hui, la réalisation à court ou moyen terme de missions habitées vers Mars n'est pas crédible car les difficultés à surmonter sont énormes : la durée du voyage (6 à 9 mois dans chaque sens, dans le meilleur des cas), les contraintes des fenêtres de lancement, les radiations subies durant les longues croisières aller et retour, la logistique nécessaire (air, eau, nourriture).

En conséquence, le programme d'exploration de Mars doit être robotique à moyen terme. En particulier, la réalisation d'un programme de retour d'échantillons visant à rapporter des échantillons choisis avec soin provenant de divers sites (*Mars Sample Return, MSR*) est un objectif majeur à tous points de vue (intérêt scientifique, ambition technologique, contexte coopératif, visibilité du public). L'étude en laboratoire des échantillons martiens rapportés sur Terre devrait permettre des avancées considérables sur la connaissance

de Mars, en utilisant les techniques d'analyse les plus innovantes et les plus sensibles (que l'on ne saurait pas mettre en œuvre avec la même précision *in situ* à la surface de Mars) et aussi en pouvant bénéficier de leurs améliorations ultérieures.

Il s'agit donc à travers un ensemble de missions automatiques et la réalisation d'une première mission de retour d'échantillons comme étape importante, de :

- retracer l'histoire géologique, climatique et éventuellement biologique de Mars ;
- caractériser l'environnement martien présent.

Bien entendu, les autres objets du système solaire présentent également un intérêt scientifique significatif : par exemple, les petits corps du système solaire, astéroïdes et comètes, qui sont les reliques de la formation du système solaire (6) ; les planètes géantes et leurs satellites, dont l'étude est nécessaire pour comprendre la formation du système solaire.

Il semble par ailleurs raisonnable au regard des difficultés d'un programme de missions habitées vers Mars de le préparer par des étapes préalables moins ambitieuses : des missions habitées vers la Lune ou les astéroïdes pourraient être des étapes utiles pour valider certaines étapes technologiques préparant un éventuel futur programme d'exploration habitée de Mars :

- la Lune, pour préparer des séjours de longue durée sur une surface planétaire (se poser, se déplacer, vivre et travailler, repartir) ;
- les astéroïdes et les satellites naturels de Mars, pour préparer des voyages de longue durée dans l'espace lointain.

Ces missions habitées devront être préparées par des missions de reconnaissance robotiques.

Si l'on se limite aux programmes envisagés dans l'ensemble de la communauté spatiale mondiale à l'horizon 2030, deux axes majeurs possibles, non exclusifs l'un de l'autre, semblent ainsi se dessiner :

- l'exploration habitée de la Lune et/ou des astéroïdes proches, ainsi que des satellites naturels de Mars, Phobos et Deimos, préparée par des missions robotiques de reconnaissance ;
- l'exploration automatique de Mars et la réalisation d'un programme de retour d'échantillons martiens.

En parallèle, des missions robotiques seront mises en œuvre vers d'autres corps du système solaire, notamment vers les planètes géantes et leurs satellites.

La réalisation éventuelle de missions habitées vers Mars est un objectif encore lointain, au-delà de 2030, aussi

(4) Le programme de station spatiale internationale (ISS) n'avait pas ce soutien !

(5) Voir le rapport du comité spatial de l'European Science Foundation : « *Science-Driven Scenario for Space Exploration* » [http://www.esf.org/index.php?eID=tx_ccdamdl_file&p\[file\]=15721&p\[dl\]=1&p\[pid\]=238&p\[site\]=European%20Science%20Foundation&p\[t\]=1330161810&hash=4a8f284574e184bc32356520b265feec&l=en](http://www.esf.org/index.php?eID=tx_ccdamdl_file&p[file]=15721&p[dl]=1&p[pid]=238&p[site]=European%20Science%20Foundation&p[t]=1330161810&hash=4a8f284574e184bc32356520b265feec&l=en)

(6) Les analyses minéralogiques et isotopiques des météorites collectées sur Terre suggèrent qu'une part importante de l'eau et de la matière organique terrestre a été apportée par le bombardement intense des premiers âges du système solaire.

Encadré 1**Les petits corps**

Certains astéroïdes dit géocroiseurs, parce que leur orbite les amène à passer périodiquement non loin de la Terre, peuvent constituer un péril majeur pour l'humanité en cas de collision. Le suivi de ces objets et leur caractérisation est nécessaire et la réalisation de missions destinées à les dévier ou à les détruire si la probabilité de rencontre n'est plus négligeable doit être sérieusement envisagée.

Le retour d'échantillons d'un astéroïde peut constituer une bonne préparation à MSR, en particulier en ce qui concerne les moyens d'analyse et de conservation des échantillons rapportés avec l'installation sur Terre d'un laboratoire européen de « curation » des échantillons.

Le commentaire ci-dessus s'applique à des missions vers Phobos et Deimos ; comprendre l'origine de ces deux objets, astéroïdes capturés (par quel mécanisme ?) ou fragments de Mars éjectés à la suite d'un impact, aidera à reconstituer le passé martien.

mûrement réfléchi et des effets désastreux de décisions politiques et budgétaires « *stop and go* ».

C'est l'Agence spatiale européenne qui porte aujourd'hui la plus grosse part des efforts européens en matière d'exploration ; l'exploration spatiale n'a pas jusqu'à présent bénéficié du levier communautaire. Or selon le traité de Lisbonne, désormais en vigueur, l'espace est une compétence partagée de l'Union européenne (UE) et de ses Etats-membres, l'Union devenant un acteur majeur du secteur spatial européen. La résolution du 22 mai 2007 du Conseil Espace, qui réunit les ministres chargés de l'espace à l'ASE et à l'UE, a initié l'élaboration d'une politique spatiale européenne, et le Conseil Espace de septembre 2008 a identifié plusieurs thèmes dans lesquels l'UE, après Galileo et GMES, entend jouer un rôle, parmi lesquels l'exploration. Associer l'Union européenne à l'orientation et à la définition des projets d'exploration spatiale pourrait permettre l'émergence d'une ambition européenne clairement définie et partagée et donner à ce programme une base politique solide, qui lui manque aujourd'hui.

Mais pour que l'exploration puisse devenir un lieu privilégié de coopération scientifique et technique, une vision politique partagée et une gouvernance claire sont nécessaires. A la suite de réunions préparatoires tenues à

convient-il sans se hâter d'identifier les étapes indispensables et de valider les technologies nécessaires (voir les encadrés 1 et 2).

EXPLORATION ET COOPÉRATION

Nous sommes convaincus que le programme d'exploration doit être envisagé comme une entreprise internationale à travers une coopération équilibrée entre partenaires où l'apport de chacun est réellement indispensable aux autres, sans exclusivité ni appropriation par l'une ou l'autre des nations, dans laquelle chaque participant apporte ses propres capacités, ses atouts et ses choix privilégiés (7).

Au regard de la taille des autres partenaires internationaux, au premier rang desquels les USA, et des sommes qu'il convient d'engager dans les programmes d'exploration spatiale pour y jouer un rôle majeur et visible, aucun pays européen ne peut jouer cavalier seul. Les conséquences des orientations initiales pouvant être ressenties sur plusieurs décennies, les partenaires doivent être conscients du besoin d'un engagement sur le long terme, de la nécessité de partir sur une stratégie

(7) « *Space exploration is a political and global endeavour and Europe should undertake its action within a worldwide programme, without any monopoly or appropriation by one country, the different actors taking part with their own capacities and priorities.* » (Conclusions du 5^e European Space Council, comité qui rassemble les ministres européens en charge de l'espace dans les Etats membres de l'ASE et de l'Union européenne, septembre 2008)

Encadré 2**La Lune**

On constate en ce moment un engouement pour la Lune de nombreux pays spatiaux, notamment de pays émergents (Inde, Chine), initiatives dont la science n'est pas la motivation principale. Si en tant qu'objet scientifique, son intérêt est estimé moindre par la communauté scientifique que celui de Mars, des petits corps, ou des planètes géantes et de leurs satellites, l'exploration robotique ou habitée de la Lune peut procurer des opportunités d'investigations scientifiques intéressantes, en particulier, concernant l'étude de sa structure interne.

La mise en œuvre à la surface de la Lune d'un laboratoire automatique mobile, capable de parcourir de grandes distances, figurerait une présence humaine permanente virtuelle avec une possibilité d'interaction en temps quasi réel.

Un tel engin serait doté de moyens d'imagerie et d'instruments analytiques pour étudier la surface et la sub-surface, ainsi que d'une liaison directe Terre-Lune et d'équipements de génération de puissance.

Un préalable serait le développement d'un atterrisseur lunaire automatique, capable de se poser en douceur et avec précision.

Prague (Octobre 2009) et à Bruxelles (Octobre 2010), la première réunion d'un forum international sur l'exploration spatiale, co-organisé par l'UE et l'ASE, a eu lieu à Lucques (Italie) en novembre 2011. L'ambition de ce forum est de constituer une plateforme politique de haut niveau permettant aux partenaires internationaux de présenter leurs points de vue sur leurs objectifs et leurs stratégies, et d'élaborer une vision commune et des modalités de coopération.

En effet, un futur programme global d'exploration doit être considéré à deux niveaux distincts : un niveau technique et programmatique, d'une part, un niveau politique, d'autre part. Au niveau technique et programmatique, il existe divers groupes de travail internationaux auxquels participent certaines des principales agences spatiales mondiales ; les participants y échangent de l'information et coordonnent leurs activités (par exemple, bases de données partagées, standards et protocoles communs). Parmi ces groupes de travail, l'*International Space Exploration Coordination Group* (ISECG), groupe de travail rassemblant 14 agences spatiales s'est donné pour tâche d'élaborer une stratégie globale en matière d'exploration. Les agences membres de l'ISECG ont adopté en avril 2007 une déclaration commune qui souligne le besoin de coordination tout en reconnaissant l'autonomie de chaque pays (8) et l'ISECG, qui était invitée à la réunion de Lucques, a récemment publié la première édition d'une possible feuille de route (9). Une stratégie à haut niveau qui aurait vocation à être endossée au niveau politique pourrait être basée sur une future édition de cette feuille de route.

QUELLES PRIORITÉS ?

Au cours des trente dernières années, l'Europe, au travers de l'Agence spatiale européenne (ASE) et des agences spatiales nationales, a réalisé le lanceur Ariane 5 et s'est placée parmi les tout premiers acteurs de l'exploration spatiale dans le monde. La compétence européenne est reconnue dans les missions d'exploration scientifique du système solaire, telles que Giotto, Huygens, Rosetta, Mars Express, Venus Express, et dans le domaine des vols habités à travers des réalisations, comme l'ARD (*Automatic Re-entry Demonstrator*), l'ATV (*Automated Transfer Vehicle*) qui dessert l'ISS, le laboratoire Columbus amarré à l'ISS et les vols effectués depuis trente ans par les astronautes européens sur la station Mir et dans Spacelab, puis sur l'ISS.

Avons-nous les moyens de dépenser et, si oui, combien sommes-nous prêts à dépenser à l'avenir pour l'exploration ? Pour commencer, citons quelques chiffres :

- ExoMars (1^{ère} mission robotique européenne au sol de Mars) : de l'ordre de 1 G d'euros ;
- capacité européenne autonome en vol habité (estimation CNES : 10 à 15 G d'euros) ;
- utilisation de l'ISS : de l'ordre de 300 M d'euros/an pour la part européenne, soit environ 8 % du total ;

- 1^{ère} mission automatique de retour d'échantillons de Mars : 3 à 4 G d'euros ;
- mission habitée à la surface de la Lune : 60 à 80 G d'euros ;
- 1^{ère} mission habitée au sol de Mars : 500 à 1000 G d'euros (?).

On peut se demander si l'Europe doit se doter d'une capacité autonome de vol habité, et dans quelle perspective. En cas de réponse positive, il faut prendre en compte à la fois le lanceur et le véhicule de transport d'équipage ; développer un seul de ces deux moyens n'aurait guère de sens dans un premier temps, même si ultérieurement se met en place une division du travail entre partenaires internationaux. Il faut aussi être conscient qu'il s'agit là d'un engagement à long terme (voir l'ISS), qui ne concerne pas seulement le coût de développement mais aussi le coût de maintien (filrière industrielle de production, infrastructures sol et moyens de lancement), pour un plan de charge de l'ordre d'une mission par an.

L'acquisition d'une capacité autonome de vols habités n'est pas hors de portée de l'Europe, ni techniquement ni financièrement, mais exigerait une augmentation considérable du budget spatial civil européen, avec au minimum un doublement des budgets consacrés annuellement à l'exploration robotique et humaine, par l'ASE, par l'UE (10) et par leurs Etats-membres. Une telle augmentation ne semble pas réaliste à court terme, particulièrement dans la période actuelle. Nous supposons donc la mise en place d'une politique de transport globale, où d'autres partenaires seraient responsables du transport des équipages.

Avec un budget spatial civil total six fois moindre que celui des Etats-Unis, les activités européennes en matière d'exploration doivent être ciblées. Le contenu du programme européen d'exploration doit permettre à l'Europe de poursuivre ses priorités par ses propres moyens si d'aventure le partenaire américain changeait ses plans en cours de route (et nous savons par expérience que ce n'est pas impossible) ou si la coopération ne répondait pas aux attentes européennes, afin de ne pas reproduire la situation de dépendance du programme de station spatiale.

Les Européens disposent d'un élément majeur, le lanceur Ariane 5, et d'une compétence prouvée dans des systèmes automatiques en orbite basse, ainsi que dans

(8) « A global exploration strategy », avril 2007.
http://www.globalspaceexploration.org/c/document_library/get_file?uuid=119c14c4-6f68-49dd-94fa-af08ecb0c4f6&groupId=10812

(9) « Global Exploration Roadmap », septembre 2011.
http://www.globalspaceexploration.org/c/document_library/get_file?uuid=bd0428e8-9163-4483-976f-57208dc6507f&groupId=10812

(10) En ce qui concerne particulièrement l'UE, la Commission européenne a adopté en avril 2011 la communication « Vers une stratégie spatiale de l'Union européenne au service du citoyen » dans laquelle l'exploration figure bien parmi les thèmes prioritaires d'une politique spatiale européenne ; elle n'apparaît cependant pas dans ses perspectives financières 2014-2020.
http://ec.europa.eu/enterprise/policies/space/files/policy/comm_pdf_co_m_2011_0152_f_communication_fr.pdf



© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

© ESA/DLR/FU Berlin/G. Neukum

« La compétence européenne est reconnue dans les missions d'exploration scientifique du système solaire, telles que Giotto, Huygens, Rosetta, Mars Express, Venus Express, et dans le domaine des vols habités à travers des réalisations, comme l'ARD (*Automatic Re-entry Demonstrator*), l'ATV (*Automated Transfer Vehicle*) qui dessert l'ISS, le laboratoire Columbus amarré à l'ISS et les vols effectués depuis trente ans par les astronautes européens sur la station Mir et dans Spacelab puis sur l'ISS ». *Cliché pris sur Mars par la sonde Mars Express de l'Agence spatiale européenne, qui témoigne de la présence de glace d'eau au fond d'un cratère dans la région Vastitas Borealis.*

les sondes d'exploration scientifique et des technologies comme la rentrée atmosphérique ou l'énergie nucléaire. Dans un programme d'exploration spatiale en coopération internationale, l'Europe doit viser des créneaux qui correspondent à ses domaines d'excellence scientifique et technologique (11). Il conviendra de trouver dans la coopération internationale le bon équilibre entre complémentarité et redondance. On peut penser, par exemple, à des dispositifs robotiques et/ou télé-opérés, des systèmes de support vie et de recyclage (déchets, air, eau), des véhicules interplanétaires de transport de fret, des modules d'habitation, des *landers* et *rovers* planétaires automatiques, des dispositifs de production et de stockage d'énergie.

L'UTILISATION DE L'ISS

L'utilisation de l'ISS jusqu'en 2020, au moins, a été récemment décidée. Une exploitation adaptée de la

Station spatiale internationale, en privilégiant les vols de longue durée des astronautes européens, peut constituer un élément de préparation de phases ultérieures de l'exploration. Les résultats des recherches scientifiques réalisées à bord de l'ISS, bien que tout a fait honorables, ne sont cependant pas à la mesure de l'investissement. L'utilisation scientifique de l'ISS devrait être orientée en priorité vers la médecine spatiale (préparation des vols humains de longue durée au-delà de l'orbite basse) et l'exobiologie pour ce qui concerne les sciences de la vie et à la physique des fluides en micropesanteur (recherche de base et applications à la gestion des fluides spatiaux) en ce qui concerne les sciences de la matière. L'ISS pourrait aussi servir de banc d'essai pour des démonstrations de systèmes ou de technologies visant l'exploration humaine au-delà de l'orbite basse.

(11) Un bon exemple est le bras robotique de l'ISS, fourni par le Canada, grâce auquel les Canadiens ont développé un savoir-faire reconnu et qui leur permet d'avoir régulièrement des vols d'astronautes.



QUELLES TECHNOLOGIES ?

Les fonctionnalités principales auxquelles les activités d'exploration doivent satisfaire peuvent se décliner comme suit :

- aller en orbite terrestre et en revenir ;
- rendez-vous / amarrage / capture / assemblage autour de la Terre, d'un corps céleste ou d'un point virtuel ;
- aller vers un corps céleste (ou un point virtuel) ;
- descendre sur un astre autre que la Terre (avec ou sans atmosphère) ;
- déployer des activités à la surface d'un astre autre que la Terre ;
- décoller depuis un astre autre que la Terre ;
- rentrer sur Terre depuis l'espace lointain.

En résumé, la réalisation d'un programme d'exploration suppose la maîtrise de nombreuses techniques et technologies telles que les systèmes EDL (*Entry, Descent, Landing*), le rendez-vous en orbite, la production et le stockage d'énergie (y compris nucléaire), le support vie (santé, nourriture, recyclage des déchets, de l'air et de l'eau), et la propulsion (voir ci-dessous).

Les contributions européennes à un programme international d'exploration devraient être basées sur les priorités et les compétences de l'Europe. En novembre 2010, le 7^{ème} Space Council, qui regroupe les ministres européens en charge de l'espace à l'ASE et à l'UE, a identifié en priorité quatre secteurs :

- automatique et robotique ;
- propulsion avancée ;
- gestion de l'énergie (production et stockage) ;
- support vie.

Certaines de ces technologies comme la propulsion sont essentiellement spatiales tandis que celles relatives à l'énergie ou au support vie présentent un caractère dual spatial / non spatial et peuvent déboucher sur des applications non spatiales.

En ligne avec les priorités citées ci-dessus, une attention particulière doit être donnée aux techniques et technologies associées au rendez-vous automatique et à l'amarrage ou à la capture en orbite d'objets coopératifs ou non coopératifs. Ces techniques sont essentielles pour une large variété de missions, telles que :

- le retour d'échantillons de Mars ;
- l'assemblage en orbite ;
- la desserte d'infrastructures orbitales ;
- le transfert de module de l'ISS ou la désorbitation de celle-ci ;
- l'enlèvement de débris spatiaux.

Un véhicule dérivé de l'ATV, tels que les concept APEX (*Advanced Platform for EXploration*) du CNES ou le VAC (*Versatile Autonomous Concept*) de l'ASE pourrait, dans un premier temps, desservir l'ISS et, ultérieurement, associé par exemple à une propulsion électrique,

évoluer vers un module de croisière interplanétaire automatique.

La question de la propulsion est en effet particulièrement importante. Il est possible qu'au-delà de 2025, lorsque la future Ariane 6 sera opérationnelle et assurera l'essentiel des besoins de lancement institutionnels et commerciaux vers l'orbite géostationnaire et les orbites terrestres d'application, l'exploration demeure le domaine réservé d'Ariane 5, avec un plan de charge dédié de l'ordre d'un tir par an. Cela impliquerait de financer le maintien de la filière Ariane 5 et éventuellement le coût d'entretien en parallèle de deux sous-filières, l'une consacrée aux vols habités et l'autre aux missions inhabitées.

Il faut cependant souligner que la problématique d'accès à l'espace est très différente si on se limite à l'orbite basse ou si on vise des missions au-delà de l'orbite basse. Pour quitter l'orbite terrestre, les moyens de propulsion conventionnels (chimiques) resteront probablement irremplaçables, et, de même, pour se mettre en orbite planétaire ou quitter la surface des planètes. Par contre, les phases de croisière interplanétaire, aujourd'hui essentiellement balistiques, pourraient utiliser des dispositifs à poussée continue, solaires électrique ou nucléo-électrique afin de raccourcir la durée des transits et s'affranchir dans une large mesure des contraintes des créneaux de lancement interplanétaires.

On aboutirait ainsi à une propulsion mixte, combinant les avantages de la propulsion conventionnelle, dans les phases de mise en orbite ou d'échappement, et de la propulsion électrique, dans les phases de croisière, réalisant une véritable rupture technologique dans l'exploration.

PERSPECTIVES POUR L'EUROPE

Actuellement, sous l'égide de l'Agence spatiale européenne, plusieurs missions d'exploration sont à l'étude ou en cours de décision :

- Exomars, avec deux missions vers la planète Mars, une en 2016 et l'autre en 2018.
- Juice, une mission vers les satellites glacés de Jupiter, soumise à la sélection prochaine des grandes missions du programme Cosmic Vision.
- Marco Polo, mission de retour d'échantillons d'un astéroïde géocroiseur, qui sera soumise plus tard à la sélection des missions moyennes M3 du programme Cosmic Vision.

Par la suite, la priorité des scientifiques français demeure une mission qui pourrait ramener des échantillons de matière de la planète Mars (MSR).

A plus long terme, si elle s'en donne les moyens, l'Europe pourrait développer quelques-unes des composantes robotiques de la branche « missions habitées », au sein d'une large coopération internationale.