

L'exploration spatiale : quelles perspectives et quelle place pour l'Europe ?

Ingénieur Émérite au Centre national d'étude spatiales (CNES¹), Richard Bonneville est président du Conseil Scientifique du COSPAR (« Committee on Space Research ») et expert au ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

1 Qu'est-ce que l'exploration spatiale ?

L'exploration spatiale a pour objectif d'acquérir de la connaissance sur le Système Solaire et sur l'Univers lointain afin d'étendre notre connaissance et d'inspirer de futures

générations. Comment découvrir les exoplanètes et les systèmes planétaires dont on parle dans de nombreux chapitre de cet ouvrage *Chimie, aéronautique et espace* (EDP Sciences, 2018) ? Comme l'indique un rapport de l'Agence Spatiale Européenne (ESA, **Encart : « L'exploration spatiale »**), l'exploration spatiale

1. <https://cnes.fr>

L'EXPLORATION SPATIALE

"[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*" (Advisory Group to the ESA DG on Exploration).

est un projet qui n'a pas de fin, dans lequel on trouve à la fois des activités humaines et des activités robotiques.

Une telle définition est très large dans la mesure où les instruments scientifiques qui prolongent nos sens et permettent par exemple d'étudier une exoplanète à l'aide d'un télescope est aussi de l'exploration spatiale. Deux articles², parus ou à paraître prochainement permettent de faire le point.

En fait l'exploration spatiale telle qu'on l'entend généralement se limite aux objets où l'on peut mener des investigations *in situ*, c'est-à-dire au Système Solaire, et plus précisément aux objets où l'homme pourrait se poser dans un avenir pas trop lointain (dans les prochaines décennies, avant la fin du siècle). Dans cette optique, les cibles sont donc la Lune, Mars ou les astéroïdes géocroiseurs, c'est-à-dire ceux dont l'orbite passe près de la Terre. Par ailleurs, il y aurait des missions purement robotiques vers les planètes géantes et leurs satellites,

vers Mercure, Venus et vers les petits corps (astéroïdes et comètes).

Pourquoi l'homme veut-il explorer l'espace ? Sans parler des motivations irrationnelles, si la science est l'une des motivations importantes de l'exploration, ce n'est ni la seule ni même la principale ; les motivations rationnelles peuvent être de type économique, politique, stratégique, sociétale, scientifique... (**Encart : « Les motivations rationnelles pour explorer l'espace »**).

2 La planète Mars : une destination privilégiée

Il existe différents forums où l'on parle d'exploration, en particulier un groupe de travail entre agences spatiales appelé l'ISECG (« *International Space Exploration Coordination Group* »), qui publie un document mis à jour régulièrement (le « *Global Exploration Road Map* ») pour constituer une feuille de route de ce qui pourrait être un programme d'exploration recueillant l'adhésion la plus large possible.

Dans les versions actuelles, une mission « Habitée vers Mars » (**Figure 1**) est présentée comme l'objectif majeur,

2. What role for Europe within a future global space exploration approach? (2014). *Acta Astronautica*, 104, issue 2 ; A truly international lunar base as the next logical step for human spaceflight, à paraître dans *Advances in Space Research*.

LES MOTIVATIONS RATIONNELLES POUR EXPLORER L'ESPACE

Motivations scientifiques

Formation et évolution des systèmes planétaires, émergence de la vie et sa co-évolution avec les environnements planétaires (ESF workshop, Athens, May 2008 : "Science-Driven Scenario for Space Exploration").

Motivations technologiques

Stimuler l'innovation, allers-retours entre R&D sol et R&D espace.

Motivations politiques

Coopération internationale sur des projets ambitieux, moyen de démontrer ses capacités, souveraineté (accès à l'espace).

Motivations sociétales

Attirer l'intérêt du public et contribuer à son éducation scientifique.



Figure 1

Une mission « Habitée vers Mars », un objectif à long terme de l'exploration spatiale : photo de synthèse d'un homme en combinaison spatiale sur la planète rouge.

Source : Bande annonce du film *Seul sur Mars* (Scott Free Productions, 2015).

avec des étapes intermédiaires vers la Lune et vers les astéroïdes. Dans la déclinaison pratique de cette stratégie, il n'y a pas de chemin unique car les acteurs possibles (les grandes puissances spatiales) poursuivent des objectifs propres qui sont assez divers.

2.1. Les raisons scientifiques

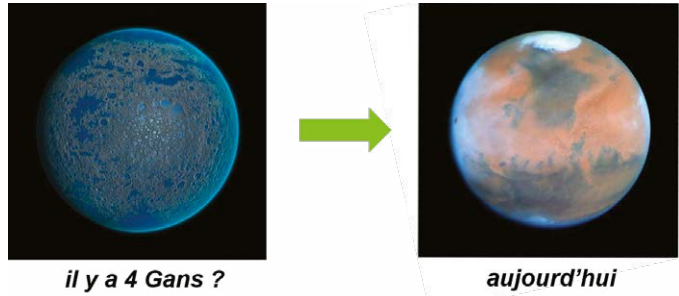
Contrairement à la Terre, où l'érosion et la tectonique des plaques ont gommé tous

les terrains anciens, Mars a gardé toutes les traces de son évolution, de sa naissance il y a environ 4,5 milliards d'années, où elle ressemblait beaucoup à la Terre, jusqu'à la planète froide et sèche d'aujourd'hui (**Figure 2**). C'est aussi la seule planète du Système Solaire avec la Terre où la vie a pu apparaître. Enfin, c'est la seule planète où il semble possible d'envoyer des hommes dans un futur pas trop éloigné, c'est-à-dire avant la fin du siècle.

Figure 2

Simulation de ce à quoi Mars aurait pu ressembler il y a 4 milliards d'années comparée à une vue satellite : Mars aurait pu abriter de la vie dans un passé lointain.

Source : J.-P. Bibring, IAS (CNRS et Université Paris Sud).



2.2. Un vol habité sur Mars est encore un projet à long terme

Cependant, un vol habité sur Mars ne semble pas possible avant longtemps pour de nombreuses raisons :

- une mission martienne est une mission de longue durée (minimum deux à trois ans). De plus, on ne peut pas aller sur Mars ou en revenir n'importe quand, il n'y a des fenêtres d'accès qu'environ tous les deux ans. On peut prévoir soit des missions courtes vers Mars (deux ans) avec un séjour limité à quelques jours, soit des missions longues (trois ans) avec un séjour d'une année environ sur place ;
- une mission de cette durée pose de nombreux problèmes logistiques car pendant ces deux ou trois ans, il faut assurer à l'équipage de l'air, de l'eau, de la nourriture. De plus, pendant ce voyage et pendant le séjour sur Mars, les membres de l'équipage vont être soumis à des doses de radiation extrêmement importantes car ils ne sont pas protégés par l'atmosphère et la magnétosphère terrestres ;
- cela pose aussi des problèmes d'ingénierie car contrairement à la Lune, la gravité martienne est plus

importante, environ deux fois la gravité lunaire. Il faut pouvoir poser un gros véhicule et savoir le faire redécoller.

Toutes ces difficultés ne sont aujourd'hui pas résolues et ne le seront sans doute pas avant un certain temps.

2.3. Les missions robotiques : état des lieux et projets en cours

En attendant ce futur hypothétique, un certain nombre de missions robotiques sont prévues. Après le robot Curiosity en 2012, une mission est prévue 2020 avec ExoMars³ (Figure 3). Ces missions robotiques apporteront pour un coût modéré de nombreuses informations scientifiques sur l'histoire de la planète – son histoire climatique, géologique, et peut-être

3. Mission ExoMars : le programme *ExoMars* regroupe deux missions spatiales à destination de la planète Mars développées par l'Agence spatiale européenne (ESA) avec une participation importante de l'agence spatiale russe Roscosmos. L'objectif de ce programme est l'étude de l'atmosphère de Mars, en particulier la détermination de l'origine du méthane trouvé à l'état de trace ainsi que la recherche d'indices d'une vie passée ou présente sur la planète.

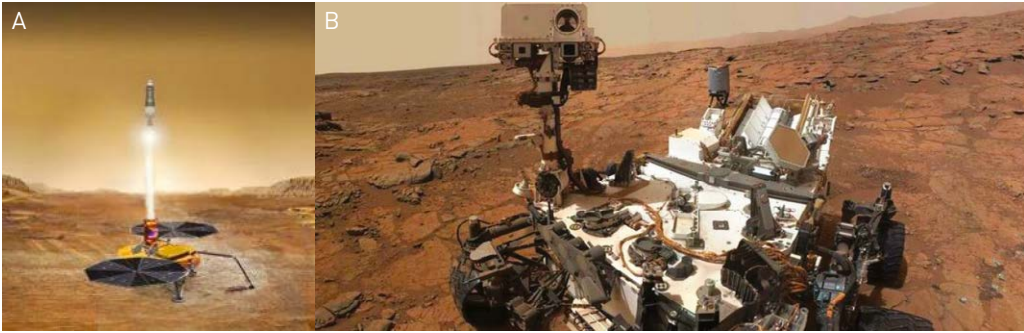


Figure 3

Images de synthèses de robots sur Mars : A) Mars Ascent Vehicle, vue d'artiste ; B) MSL-Curiosity. Sources : A) NASA Science Mission Directorate/Planetary Science Division ; B) NASA-JPL.

biologique –, puis également sur son environnement actuel, voire son habitabilité.

2 L'exploration spatiale habitée

2.1. La Station spatiale internationale (ISS)

Dans le domaine des vols habités, la principale réalisation majeure actuellement

opérationnelle est la Station spatiale internationale (ISS) qui tourne au-dessus de nos têtes à 400 km d'altitude (**Figure 4**). Son assemblage, qui avait commencé en 1998, est en train de s'achever. Il a donc fallu vingt ans pour sa construction, et dans dix ans, il faudra organiser son démantèlement. C'est une entreprise colossale, fort coûteuse, dont on peut essayer



Figure 4

Photo datant de 2001 de la Station spatiale internationale (ISS) avec en arrière-plan la Terre. L'ISS est pour l'instant la seule réalisation majeure en termes de vol habité.

Source : ESA/NASA.

maintenant d'établir un premier bilan.

On présente souvent la Station spatiale internationale comme un grand laboratoire de recherche en microapesanteur. Il y a une vingtaine d'années, beaucoup d'espérances apparaissaient ici et là, en particulier dans la presse, sur les retombées économiques faramineuses qu'on pouvait attendre des « usines de l'espace » pour fabriquer des produits et des matériaux nouveaux. En fait, ces espoirs ont été déçus : il n'y a pas de matériaux de l'espace d'intérêt économique, et les seuls industriels qui en ont retiré un bénéfice sont ceux du secteur spatial, comme à l'époque de la ruée vers l'or, ou les seuls qui tiraient vraiment leur épingle du jeu étaient ceux qui vendaient les pelles !

Cela ne veut pas dire que la recherche en microgravité⁴ n'a pas de valeur : d'excellentes recherches scientifiques sont réalisées à bord de la station spatiale, par exemple sur les fluides critiques⁵ ou sur les sciences de la vie, mais il faut reconnaître qu'aucune percée majeure n'est apparue. On peut dire

4. Microgravité : état d'un corps tel que l'ensemble des forces gravitationnelles et inertielles auxquelles il est soumis possède une résultante très faible par rapport à la pesanteur à la surface de la Terre.

5. Fluide supercritique : fluide dans un état de la matière particulier, ayant des propriétés intermédiaires entre celles de l'état gazeux et celles de l'état liquide. Un fluide devient supercritique lorsqu'il est soumis à une température ou pression élevée (au-delà du point critique de la transition liquide-gaz).

que du point de vue des retombées des applications de la recherche en microapesanteur, c'est surtout le secteur spatial lui-même qui en a profité. Par exemple les études sur le comportement des fluides en apesanteur ont profité aux entreprises qui conçoivent des systèmes spatiaux, des réservoirs, de la propulsion, etc.

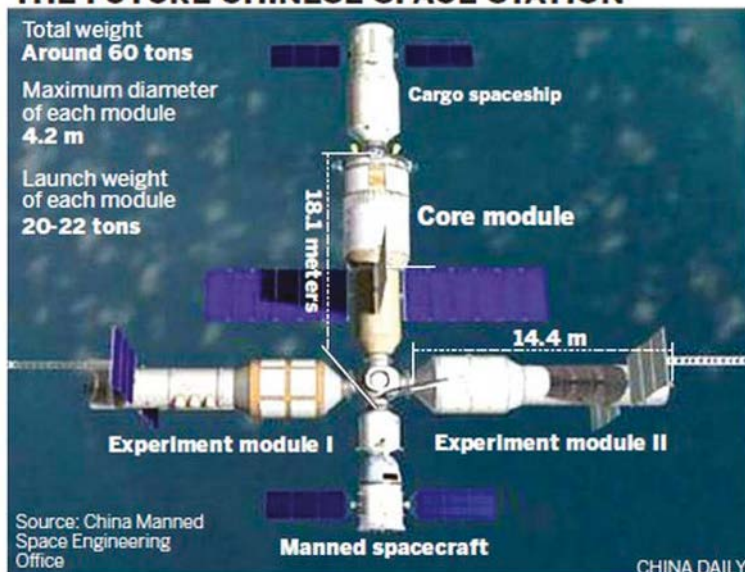
Au sujet des recherches sur la science de la vie, cela permet de mieux suivre médicalement les équipages des missions habitées et de les prémunir contre les effets délétères de l'environnement spatial, de l'apesanteur, des radiations, etc.

En fait, le principal résultat de la construction de cette station spatiale internationale est politique : elle a permis à ses partenaires, c'est-à-dire les Américains, les Russes, les Européens, les Japonais, les Canadiens, de travailler ensemble sur un très grand projet international.

2.2. Les projets chinois

Il ne faut pas oublier les Chinois dans les grandes puissances spatiales. Les Américains avaient refusé aux Chinois l'accès à la Station spatiale internationale ; les Chinois ont donc décidé de développer leur propre système de vol habité, avec les capsules ShenZhou, et ils ont des stations spatiales visitables qui s'appellent TianGong 1 et 2. Ils ont un nouveau projet pour la prochaine décennie de station spatiale qui ressemblera beaucoup à l'ancienne station soviétique Mir (**Figure 5**).

THE FUTURE CHINESE SPACE STATION



2.3. L'intérêt de la coopération internationale

Il est important de souligner à travers l'exemple de la Station spatiale internationale l'importance de la coopération multilatérale dans le domaine spatial, non seulement à cause des coûts très élevés des grands projets spatiaux, en particulier ceux concernant les vols habités, mais aussi parce que les projets coopératifs internationaux sont plus robustes en cas de fluctuation politique ou budgétaire de l'un des pays partenaires.

Un équipage de six personnes tourne actuellement à 400 km au-dessus de nos têtes dans la Station spatiale internationale, et cela fait depuis bientôt un demi-siècle qu'il y a des vols habités en orbite basse. Il faut maintenant concevoir dans le domaine de l'exploration habitée un programme au-delà de l'orbite basse et qui soit bâti dans une

perspective à très long terme. En attendant, l'utilisation de la Station spatiale devra être optimisée de façon à préparer ces étapes ultérieures.

Il faudrait essayer de construire une coopération entre les grands pays spatiaux en vue de définir un tel programme d'exploration, qui fasse intervenir aussi bien des missions robotiques que des missions habitées. C'est un mega-programme, un programme de programmes à très long terme dans lequel tous les partenaires potentiels, toutes les grandes nations spatiales, ne participeront pas à toutes les étapes, mais devront avoir une stratégie commune.

2.4. Le projet d'une base lunaire : un objectif ambitieux à moyen terme

Parce que l'homme est déjà allé sur la Lune et que nous connaissons sensiblement le coût pour y retourner, le

Figure 5

TianGong 3, le nouveau projet spatial chinois : un vaisseau spatial de 60 tonnes, 28 mètres de large, dont la construction commence en 2018.

Source : CNSA et China Daily.

seul objectif ambitieux de vol habité réalisable à moyen terme, c'est-à-dire dans les vingt ans, serait une base lunaire (*Figure 6*).

Cette base lunaire devrait être un programme international comme l'ISS mais beaucoup plus large : avec les Américains, les Russes, les Européens, les Japonais, les Canadiens mais avec aussi avec d'autres partenaires tels que les Indiens ou les Chinois. Le coût élevé d'un tel programme de base habitée sur la Lune n'est pas hors de portée si tous ces pays y participent.

2.4.1. L'intérêt politique

La science, on l'a dit, n'est ni la seule ni la principale motivation de l'exploration spatiale et c'est surtout la politique qui en est le principal moteur, le principal résultat de l'ISS étant d'avoir permis de faire travailler ensemble les grandes puissances mondiales. Cependant, pour faire accepter un énorme effort budgétaire à très long terme,

il est nécessaire que la communauté scientifique y trouve son intérêt et soutienne le projet, ce qui n'était pas le cas du programme de l'ISS.

L'hypothèse d'une base lunaire peut recevoir un soutien scientifique important car on peut mener de très bonnes activités scientifiques sur la Lune. Il y a les « sciences de la Lune », pour étudier par exemple la formation du Système Solaire et l'origine du système Terre-Lune, et les « sciences sur la Lune », celle-ci pouvant être un excellent observatoire ; par exemple, on peut y implanter sur la face cachée un observatoire de radioastronomie, alors qu'il devient de plus en plus difficile d'implanter sur Terre ce genre d'observatoire à cause des perturbations radioélectriques.

2.4.2. Quelques rappels historiques des programmes lunaires

Pendant l'époque de la Guerre Froide, il y avait la course à la Lune entre les Américains, qui

Figure 6

Simulation futuriste de l'aspect que pourrait avoir une base lunaire. Le projet de base lunaire est le seul objectif réalisable à moyen terme.

Source : ESA.



ont développé le programme Apollo, et les Russes, qui avaient développé un certain nombre de missions robotiques, en particulier les missions Lunakhod, qui ont rapporté des échantillons lunaires. Les Russes avaient aussi un programme de vol habité, qui, malheureusement pour eux, a échoué.

Ensuite, après l'arrêt du programme Apollo, il y a eu un désintérêt assez général pour notre satellite, d'où des dizaines de kilos d'échantillons avaient déjà été rapportés tant par les missions Apollo que par les missions Lunakhod.

Depuis les années 1990, on assiste à un regain d'intérêt, un certain nombre de pays ont lancé des missions robotiques vers la Lune : les États-Unis eux-mêmes, l'Inde, la Chine et le Japon. Depuis le lancement de la Station spatiale internationale, les Américains ont initié pendant la présidence Bush un programme lunaire appelé « Constellation », qui a été annulé pendant la présidence Obama. Celui-ci a initié un programme de remplacement qui incluait le développement d'un lanceur lourd et d'un véhicule habité Orion. Dans un premier temps, on ne savait pas trop ce qu'on allait en faire, ensuite Mars a été désignée comme la cible privilégiée. Puis on a imaginé des étapes intermédiaires comme une mission ARM⁶ (« *Asteroid Redirect Mission* »), qui consistait à envoyer un robot chercher un astéroïde ou un

fragment d'astéroïde géocroiseur⁷, à le rapporter au voisinage de la Lune pour le mettre en orbite lunaire puis envoyer un équipage pour faire des prélèvements et l'étudier. Le rationnel scientifique d'une telle démarche est douteux, et finalement la mission a été annulée.

Maintenant, le spatial, ne semble pas être la priorité de la nouvelle administration Trump, qui parle d'une station en orbite lunaire, peut-être d'un retour sur la Lune, mais rien n'est encore décidé.

2.4.3. L'organisation d'une base lunaire internationale

De même que la coopération internationale mise en place pour l'ISS a eu comme retombée une relation apaisée entre ses partenaires, on peut imaginer à travers la construction de cette base lunaire internationale l'établissement d'une relation apaisée entre ces mêmes partenaires et les nouveaux venus en particulier la Chine. Rappelons-nous que la mission Apollo-Soyouz dans les années 1970 a été le début d'une détente entre le bloc américain et le bloc soviétique (**Figure 7**). Dans la mesure où les économies des différents partenaires sont fortement interdépendantes, cela devrait rendre cette coopération beaucoup plus facile. La base lunaire internationale pourrait être organisée comme dans les Bases Antarctiques où les équipes internationales coopèrent entre elles : elles mènent des

6. Mission ARM (« *Asteroid Redirect Mission* ») : mission qui consiste à capturer un astéroïde.

7. Astéroïde géocroiseur : astéroïde dont l'orbite est à proximité de la Terre.

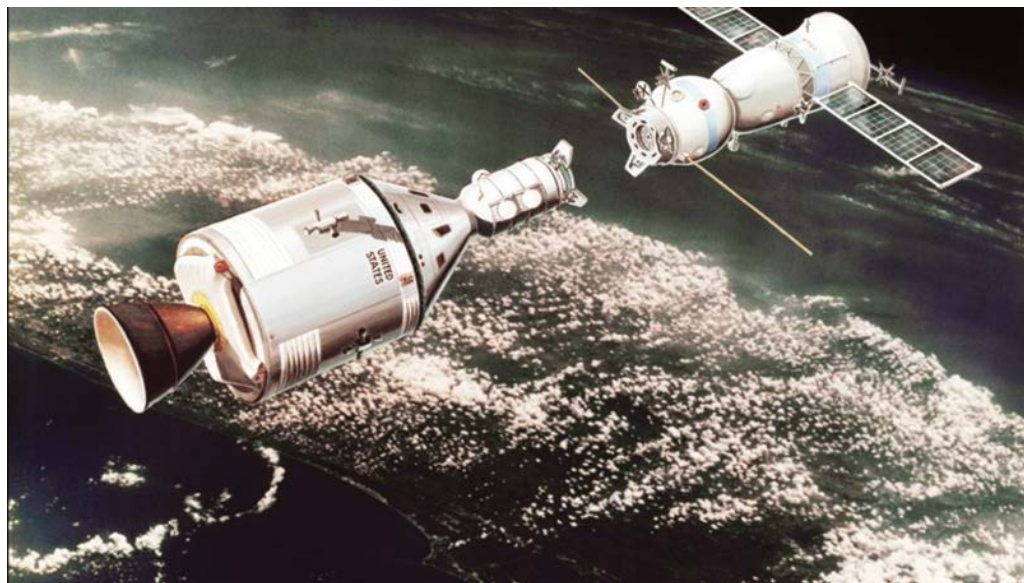


Figure 7

Un satellite russe et un satellite américain se touchent dans l'espace : la mission Apollo-Soyouz est le symbole des retombées politiques apaisées de la coopération spatiale internationale (vue d'artiste).

Source : NASA & AFP.

activités scientifiques, elles sont relevées périodiquement, et il existe un traité de l'Antarctique qui énonce ce qu'il est possible de faire ou ne pas faire. Il existe déjà un traité sur l'activité spatiale signé en 1967⁸ sous l'égide d'un service international dépendant des Nations Unies, le COPUOS⁹, qui encadre les activités dans le domaine de l'espace.

Divers modèles d'organisation peuvent être envisagés, soit une seule base internationale, soit plusieurs bases qui coopèrent et pour lesquelles les différents partenaires pourraient mettre en commun un certain nombre de choses : des servitudes, des moyens de télécommunication, des

protocoles de télécommunication, du transport de fret. Une étape préliminaire pourrait être ce qu'on appelle le « village robotique », projet qui a été développé par un groupe de travail appelé l'« *International Lunar Exploration Working Group* ». Ce projet est actuellement repris par la direction de l'Agence spatiale européenne (ESA) (Figure 8). Il a pour objectif de faire coopérer des missions robotiques lunaires de différents pays pour leur apprendre à travailler ensemble et aller vers ce qui serait une ou des bases lunaires habitées.

2.4.4. La gouvernance d'un programme lunaire international

Un tel programme d'exploration, dans la mesure où il est international, nécessite une gouvernance adaptée sachant que dans un programme d'exploration, il y a des aspects politiques et des aspects programmatiques et techniques.

8. Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies.

9. COPUOS : Comité des Nations Unies pour l'utilisation pacifique de l'espace extra-atmosphérique.

Au niveau programmatique et technique, un certain nombre de groupes de travail existent déjà : l'ILEWG qu'on a évoqué plus haut, l'IMEWG, qui est son homologue pour les affaires martiennes, l'International Space Exploration Coordination Group mentionné précédemment pour sa « *Global Exploration Roadmap* ». Ces groupes de travail sont des forums d'échanges, d'informations, les participants peuvent se mettre d'accord sur des standards de télécommunication communs, ce qui permet par exemple aux missions européennes de pouvoir utiliser les moyens de réception de la NASA par exemple pour leur mission dans l'espace lointain.

Au niveau politique, il existe un forum international, l'*International Space Exploration Forum* (ISEF), qui réunit en principe les ministres chargés de l'espace afin qu'ils échangent et définissent une politique commune. Cette plateforme s'est déjà réunie à deux reprises : une première fois à Lucques en Italie en 2012, une deuxième fois à Washington en 2014, puis en Mars 2018 à

Tokyo. Cette réunion a été précédée par deux réunions préparatoires co-organisées par l'Agence spatiale européenne et la Commission Européenne à Prague et à Bruxelles. Au niveau politique, il existe aussi le COPUOS, qui veille à réfléchir et à légiférer sur tous les aspects légaux du domaine spatial.

Si on développe un programme d'exploration, il faudra mettre en place une gouvernance. La Station spatiale internationale a son propre mode de gouvernance : il y a un « *International Governmental Agreement* », qui est un traité entre les parties prenantes, et un nombre de « *Memorandum of Understanding* » entre agences spatiales, qui précisent qui fait quoi.

Mais un tel schéma ne serait pas directement applicable pour le projet d'une base lunaire dans la mesure où la station spatiale est un objet unique avec une durée de vie limitée, alors que le projet lunaire est un projet à très long terme, peut-être même sans fin, avec de nombreux partenaires. Il faudra donc mettre en place quelque chose de nouveau, et il semble que



Figure 8

Des robots fonctionnent sur le sol lunaire avec la Terre en arrière-plan. La création d'un village robotique lunaire serait le premier pas vers un travail international commun.

Source : ESA.

ce soient les Nations Unies et le COPUOS qui pourraient être les garants des aspects légaux de cette entreprise.

3 L'Europe et l'exploration spatiale

En Europe, le spatial est depuis le traité de Lisbonne une compétence partagée entre l'Union Européenne et ses États membres. L'Europe Spatiale repose sur trois piliers : l'Union Européenne, l'Agence spatiale européenne et leurs États membres (**Encart : « L'Europe spatiale »**).

Le « *Space Council* », qui rassemble les ministres de l'Union Européenne chargés de l'espace, émet un certain nombre de recommandations. Les programmes spatiaux phares de l'Union Européenne sont Galileo pour la navigation et Copernicus pour le suivi de la planète et notamment du suivi du changement climatique. Le programme « *Space Situation Awareness* » concerne les problèmes liés aux débris, aux orages magnétiques, aux perturbations de l'activité solaire

sur les satellites et sur les moyens de communication terrestres. Il doit aussi garantir un accès à l'espace pour les pays européens.

En ce qui concerne l'exploration, il y a peu de choses dans le programme actuel « Horizon 2020 », qui se termine en 2021, et il est vraisemblable qu'il en sera de même dans le futur programme cadre de l'Union Européenne en cours de préparation.

Le budget de l'Agence spatiale européenne pour le programme d'exploration est de l'ordre de 500 millions à 1 milliard par an pour toute l'Europe : avec environ 300 millions pour l'ISS, auxquels il faut ajouter les missions scientifiques robotiques et les contributions des États membres en matière d'instrumentation.

Quelques chiffres sont donnés dans l'**Encart : « Évaluation prévisionnelle d'une participation européenne en matière de vols habités »**.

Un atterrisseur robotique lunaire coûterait environ 500 millions d'euros. La

L'EUROPE SPATIALE

« 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 » (5th Space Council, September 2008).

« the need to assess the possibilities offered by the EU policies to embed space exploration in a wider political perspective and, recognizing that space exploration has the potential to provide a major impact on innovation, looks forward to the Commission proposed High-Level Political Conference on Space Exploration, on the basis previously agreed in the Space Council, as a first step towards the elaboration in due time of a fully-fledged political vision on "Europe and Exploration" encompassing a long-term strategy/roadmap and an international cooperation scheme » (6th Space Council, September 2009).

ÉVALUATION PRÉVISIONNELLE D'UNE PARTICIPATION EUROPÉENNE EN MATIÈRE DE VOLS HABITÉS

- Opération et utilisation de l'ISS : environ 285 M€/an pour l'Europe (2008-2021) et 8 % des droits ;
- *Lunar Lander Mission* (projet d'atterrisseur Européen robotique sur la surface lunaire) : 500-600 M€ (estimation DLR) ;
- ExoMars (deux missions coopératives ESA-Roscosmos en 2016 and 2020) : environ 1 200 M€ pour l'Europe ;
- développement d'une capacité Européenne autonome de vol habité vers l'orbite basse (LEO) : 8 à 12 G€ sur une période de dix ans (estimation CNES) ;
- 1^{re} mission robotique *Mars Sample Return* : 4 à 6 G€ partagés entre l'Europe et les États-Unis ;
- réalisation d'une 1^{re} mission habitée à la surface de la Lune : 60 à 80 G€ (estimation CNES) ;
- réalisation d'une 1^{re} mission habitée à la surface de Mars : 600 à 800 G€ (estimation CNES).

mission robotique européenne sur la surface de Mars, ExoMars, est évaluée à 1,2 milliards. Les estimations établies par le CNES il y a quelques années du coût pour une capacité autonome européenne en matière de vol habité sont de l'ordre de 10 milliards d'euros sur une période de dix ans, soit 1 milliard par an. Une mission robotique de retour d'échantillons martiens coûterait quelques milliards d'euros à partager entre les différents partenaires (Europe et États-Unis). Pour une mission habitée à la surface de la Lune, il faudrait quelques dizaines de milliards d'euros.

Dans la mesure où elle serait possible techniquement, pour une mission habitée à la surface de Mars, il faut prévoir un ordre de grandeur supplémentaire, soit environ 500 milliards d'euros.

Ce sont donc des chiffres qui peuvent faire peur sachant qu'on n'est plus dans une période où les robinets

budgétaires coulent sans limites et que l'exploration spatiale n'est pas une priorité des politiques publiques.

Pour intéresser les Européens à un programme d'exploration internationale, il faudrait se focaliser sur des éléments critiques et ne pas être simplement les soutiens d'autres grands acteurs comme les États-Unis. C'est ce que font par exemple les Canadiens pour la station spatiale : ils ont une spécialité unique, le bras robotique. Il faudrait que les Européens trouvent leur créneau en se basant sur leurs compétences (**Encart « Le savoir-faire européen »**), leurs priorités et la complémentarité avec les autres acteurs afin d'éviter les redondances.

L'Europe pourrait aussi participer à la R&D dans de nombreux domaines de l'exploration spatiale (**Encart « Les technologies pour l'exploration spatiale »**) :

- la propulsion et toutes les technologies pour l'entrée,

LE SAVOIR-FAIRE EUROPÉEN

- Lanceurs : Ariane 5 puis Ariane 6 ;
- Rendez-vous et amarrage automatique : ATV (« *Automated Transfer Vehicle* ») ;
- Rentrée terrestre : ARD (« *Automated Re-entry Demonstrator* ») ;
- Missions robotiques pour l'exploration scientifique : Giotto, Huygens, Mars Express, Venus Express, Rosetta, Bepi Colombo, ExoMars ;
- Vol habité : Spacelab, Columbus, astronautes européens sur MIR et sur l'ISS.

la descente, l'atterrissage, la remontée, ainsi que tout ce qui concerne les rendez-vous en orbite, que ce soit un rendez-vous entre véhicule habité pour les missions Apollo ou un rendez-vous automatique en orbite martienne pour une mission de retour d'échantillons martiens par des robots ;

- la rentrée dans l'atmosphère terrestre à grande vitesse ;
- comment produire de l'énergie, comment la stocker ;
- tout ce qui concerne le support vie. Pour les équipages, le support vie c'est la santé mais c'est aussi tout ce qui a trait au

recyclage de l'air et de l'eau, la gestion des déchets ;

- la robotique, l'automatisme et aussi l'intelligence artificielle. Ce point est important : aujourd'hui, l'exploration associe l'homme et le robot avec un poids relatif de chacun qui sans doute évoluera. On peut penser qu'avec les progrès croissants de l'intelligence artificielle, la place de l'homme va peut-être diminuer. On ne l'utilisera que s'il est vraiment indispensable. Sur Terre, dans les environnements particulièrement dangereux comme le fond des océans ou les cen-

LES TECHNOLOGIES POUR L'EXPLORATION SPATIALE

- propulsion interplanétaire
- technologies EDL (« *Entry, Descent, Landing* »)
- technologies *Planetary Ascent Vehicle*
- rendez-vous automatique et amarrage en orbite/capture
- rentrée atmosphérique à grande vitesse
- production et stockage d'énergie
- support vie : air/eau/recyclage des déchets, nourriture, santé
- automatique & robotique : pour les missions robotiques et en support à l'équipage pour les missions habitées
- intelligence artificielle

LES ASPECTS LOGISTIQUES ET TECHNOLOGIQUES POSSIBLES POUR L'EUROPE DANS UN PROGRAMME INTERNATIONAL D'EXPLORATION SPATIALE

- Éléments de support vie
- Robotique pour des missions inhabitées et pour assister l'équipage des missions habitées
- Systèmes automatiques de rendez-vous et d'amarrage en orbite
- Véhicule automatique de transport de fret
- Deep Space Habitat, module d'habitation dans l'espace lointain
- Landers et rovers automatiques, navigation autonome
- Desserte d'une base lunaire (véhicule de surface, module d'habitation, production et stockage d'énergie).

trales nucléaires, on essaie déjà de limiter au maximum la présence humaine. Or l'espace est un lieu particulièrement dangereux ou il ne faut envoyer les hommes qu'à bon escient.

La participation de l'Europe à l'exploration spatiale représente un gros investissement pour lequel les États Européens ne semblent actuellement pas prêts. On peut imaginer en revanche que les Européens participent à un programme international où ils se spécialiseraient dans les aspects logistiques et technologiques, alors que le transport d'équipage serait assuré par d'autres, par exemple les Chinois, les Russes ou les Américains (**Encart « Les aspects logistiques et**

technologiques possibles pour l'Europe »).

Dans certains documents, on voit apparaître le mot « exploitation » de l'espace Aujourd'hui, certains pensent sérieusement à exploiter les astéroïdes en envoyant des robots pour y faire de la prospection et de l'exploitation minière. Il faut cependant noter qu'aujourd'hui ce projet est peu compatible avec les traités existants, et c'est pourquoi certains pays songent à modifier ceux-ci. Il est nécessaire que ces aspects légaux soient traités de façon sérieuse, et il semble que l'ONU et le COPUOS sont le meilleur théâtre pour discuter de ces aspects.