



Avis de l'AAE sur

# Exploration spatiale : maintenir l'élan

# Avis

# Les

ISBN 978-2-913331-98-3



ISSN 2426 3931

2023

AAE Avis n° 19

10€

# EXPLORATION SPATIALE : MAINTENIR L'ÉLAN

**Avis n° 19**

Novembre 2023



© Académie de l'air et de l'espace, novembre 2023. Tous droits réservés.  
Dépôt légal janvier 2024

ACADÉMIE DE L'AIR ET DE L'ESPACE

Ancien observatoire de Jolimont

1 avenue Camille Flammarion

31500 Toulouse – France

[contact@academieairespace.com](mailto:contact@academieairespace.com)

Tél : +33 (0)5 32 66 97 96

[www.academieairespace.com](http://www.academieairespace.com)

Imprimé par :

Equinox

Parc d'Activités Industrielles de Gabor

81370 Saint-Sulpice – France

ISBN 978-2-913331-98-3

ISSN 2426 3931

Crédits images couverture © ESA

# RÉSUMÉ

Du 10 au 12 mai 2023, l'Académie de l'air et de l'espace (AAE), soutenue par l'Associazione Italiana di Aeronautica e Astronautica (AIDAA), Space Generation Advisory Council (SGAC) et le Politecnico di Torino, a organisé à Turin un colloque international sur "L'Exploration spatiale", axé sur les motivations, les missions et les technologies clés de l'exploration du système solaire. Le colloque a réuni plus de 350 personnes de 15 pays, dont 75 orateurs.

Le présent avis en découle directement.

Sept thèmes particuliers ont été abordés dans le colloque et sont repris dans le présent avis : l'analyse des motivations culturelles de l'exploration spatiale automatique et humaine ; l'encouragement d'idées innovantes issues de la jeune génération ; l'exploration lunaire et ses aspects environnementaux ; l'utilisation de "machines volantes" sur certaines planètes et lunes ; comment aller plus vite... plus loin ; la recherche de l'eau et son éventuelle utiliza-

tion ; et enfin, la coopération des moyens robotiques et des hommes.

Le premier "mot d'ordre" de cet avis est de **maintenir l'élan** qui s'est manifesté ces dernières années. La "recette magique" pour y parvenir comprend à l'évidence plusieurs ingrédients, notamment la culture, le soutien public, la clarté de la stratégie, la viabilité des coûts, le temps nécessaire pour atteindre l'objectif, l'efficacité des technologies, l'éducation, etc.

La découverte de l'espace, avec son lot d'informations scientifiques nouvelles et leur vulgarisation, alimente l'intérêt et l'implication nécessaires des citoyens – et donc, en fin de compte, leur soutien. Les agences européennes et les gouvernements devraient aborder plus ouvertement les fondements philosophiques et culturels de l'exploration spatiale, ainsi que ses justifications scientifiques, politiques et économiques et son contexte éthique, afin de l'enraciner profondément dans la culture et

les valeurs européennes et d'assurer un tel soutien à long terme.

Un moyen efficace d'assurer la continuité du soutien intergénérationnel à l'exploration serait de créer un cadre pour la mise en œuvre de missions moins coûteuses et plus simples qui pourraient être réalisées par de petites entités ou des universités, largement ouvertes à de jeunes et nouveaux contributeurs. Des appels à propositions appropriés devraient être régulièrement lancés, permettant une fusion "générationnelle" avec l'expertise des seniors.

L'exploration lunaire, et éventuellement l'exploitation (au moins "*in situ*"), qui est récemment revenue en tête de la plupart des agendas, y contribue puissamment, d'autant plus si elle sait faire preuve de son souci de préserver l'environnement lunaire. Pour cela, il est important d'approfondir de façon collective et organisée la compréhension du milieu lunaire, l'utilisation raisonnée de ses ressources et l'atténuation des impacts d'une présence robotique et/ou humaine.

La question de l'eau et du carbone organique dans le système solaire, dans chacun de leurs états physiques et/ou chimiques potentiels, constitue un sujet scientifique d'un intérêt astrophysique majeur, ainsi qu'une ressource potentielle à acquérir. Elle est susceptible d'être à l'origine d'une grande variété de missions spatiales pour

les décennies à venir, associant là encore les engins automatiques et l'homme.

L'élan dont nous parlons ici, au moins pour les sondes automatisées à longue distance, telles que celles destinées aux missions dans le système solaire externe, dépend également de la capacité à "aller plus vite", et donc d'en développer les moyens techniques, à commencer par les modes de propulsion. Bien entendu, "aller plus vite" devrait également inclure des processus de prise de décision plus efficaces et plus rapides, y compris pour la sélection et la mise en œuvre des missions.

Une fois les sondes parvenues sur place, les moyens d'exploration *in situ* sont aussi à améliorer. C'est pourquoi, pour les planètes et lunes disposant de quelque atmosphère, les "machines volantes" telles qu'appareils à voilure tournante, planeurs, ballons, devraient faire l'objet d'études plus systématiques de la part de l'Europe spatiale.

Dans tout cela, la coopération internationale est omniprésente, notamment pour l'Europe. Cependant la part que l'on a dans un partenariat, c'est-à-dire le pouvoir dont on y dispose, dépend de la valeur que l'on apporte. Accroître avec un souci de continuité les atouts de l'Europe est donc une nécessité avant de frapper à la porte de partenaires potentiels.

Cette coopération devrait être considérée comme un objectif en soi, un impératif

politique pour l'humanité, d'autant plus en période de tensions géopolitiques. La coopération est une pratique "*per natura*" profondément ancrée dans les communautés scientifiques fondamentales ; mais l'exploration spatiale, qui, redisons-le, suscite un intérêt particulier chez tous les peuples, apporte une richesse spécifique, bien au-delà du simple objectif de partage des coûts. Avec l'arrivée de nouveaux partenaires dans le cercle spatial à travers le monde, une nouvelle ère peut s'ouvrir,

d'autant plus importante que l'humanité est confrontée à des défis géopolitiques et environnementaux majeurs. Or la (géo)politique est – à long terme – la concrétisation d'enjeux culturels et même civilisationnels plus profonds et plus fondamentaux. Ce ne sont pas seulement des intérêts économiques qui sont en jeu, mais aussi l'interpénétration des cultures et leur alimentation mutuelle : il est particulièrement important de le rappeler en ces temps troublés.

**EXPLORATION SPATIALE :  
MAINTENIR L'ÉLAN**



# TABLE DES MATIÈRES

<b>Avant-propos</b> .....	8
<b>Introduction</b> .....	9
<b>1- Philosophie et motivations culturelles pour l'exploration spatiale</b> .....	13
<b>2- Rêver des missions d'envergure</b> .....	18
<b>3- Aspects environnementaux de l'exploration lunaire</b> .....	21
<b>4- Les machines volantes</b> .....	27
<b>5- Aller plus vite et plus loin</b> .....	29
<b>6- La recherche de l'eau</b> .....	33
<b>7- Humains et robots</b> .....	38
<b>Observations finales : maintenir l'élan et coopérer</b> .....	40
<b>Annexe 1 : Références utiles sur l'exploration spatiale</b> .....	43
<b>Annexe 2 : Membres du comité de programme du colloque à Turin, contributeurs au présent Avis</b> .....	45



# AVANT-PROPOS

Du 10 au 12 mai 2023, l'Académie de l'air et de l'espace (AAE), soutenue par l'Associazione Italiana di Aeronautica e Astronautica (AIDAA), Space Generation Advisory Council (SGAC) et le Politecnico di Torino, a organisé à PoliTo un colloque international sur "L'Exploration spatiale<sup>1</sup>", axé sur les motivations, les missions et les technologies clés de l'exploration du système solaire. Le colloque a réuni plus de 350 personnes de 15 pays, dont 75 orateurs.

Le présent avis, approuvé par l'assemblée générale de l'AAE, fait suite au colloque en adoptant la même structure en termes de thèmes/sessions et en tenant compte des échanges internes ultérieurs au sein du comité de programme.

Il convient de noter que, si le colloque a abordé les missions humaines et robotiques, la question spécifique de l'accès autonome européen de l'homme à l'exploration n'a pas été considérée et ne le sera pas dans le présent avis. Un autre avis de l'AAE ("Recommandations pour une indépendance européenne pour les vols habités<sup>2</sup>") , préparé parallèlement au colloque, est disponible sur le site web de l'AAE.

Compte tenu du succès de ce colloque et du contexte très vivant, évolutif et dense de l'exploration spatiale dans le monde, l'AAE envisagera d'organiser un événement similaire d'ici quelques années.

# INTRODUCTION

L'objectif du colloque n'était pas de parvenir à un consensus sur les questions débattues, mais d'encourager la diversité des participants du monde entier et de toutes les générations, des pionniers aux étudiants, et de bénéficier ainsi de leur large éventail d'expériences et de réflexions. Cet événement, qui constitue une étape importante dans l'échange ouvert, devrait déboucher sur des résultats concrets pour l'exploration du système solaire, en profitant de l'élan qui s'est créé depuis plusieurs décennies dans le monde entier.

Ce n'est pas la première fois que l'on assiste à un tel élan, en particulier pour l'exploration lunaire – à commencer par la “course à la Lune” dans les années 1960 – mais après chaque événement ou déclaration, l'élan s'est essoufflé, pour toute une série de raisons et de priorités changeantes, qu'elles soient politiques, financières ou scientifiques. Les leçons tirées de ces expériences passées ont été utilisées pour élaborer des propositions visant à promou-

voir la viabilité à long terme de l'exploration spatiale.

Le colloque a donc suivi deux grands principes :

- cibler des questions insuffisamment abordées dans d'autres congrès mais essentielles pour maintenir l'élan de l'exploration : la prise en compte de motivations autres que politiques (“tous explorateurs”), la prise en compte de l'environnement dès le départ, la réduction du temps de voyage des missions, l'augmentation de la portée de chaque mission, l'utilisation de ressources *in situ*, l'association d'humains et de robots ;
- assurer la participation active de toutes les générations, des pionniers aux étudiants, afin de créer une dynamique “d'entraînement” qui puisse être maintenue d'une génération à l'autre.

Ces choix, qui ont assuré le succès du colloque, comme en témoignent les échanges qui se sont poursuivis après l'événement,

sont reflétés dans le présent document, dont l'objectif principal est de contribuer à ce processus au cours des prochaines années.

La principale recommandation générale de cet avis de l'AAE est donc de **maintenir l'élan**. La "recette magique" pour y parvenir comprend plusieurs ingrédients, notamment la culture, le soutien public, la clarté de la stratégie, la fiabilité des coûts, le temps nécessaire pour atteindre l'objectif, l'efficacité des technologies, l'éducation —afin de maintenir l'intérêt de la majorité des "explorateurs", des décideurs... et des rêveurs.

Dans un monde de communication, le secteur spatial doit fonder sa communication sur une réalité démontrée : il doit fournir des *résultats* qui ouvrent de nouvelles questions et suscitent l'enthousiasme ; il doit concevoir de nouvelles missions pour répondre à ces questions, avec des technologies habilitantes améliorées et innovantes ; il doit prendre des risques et tirer les leçons des échecs.

Il doit également réduire les délais et les coûts et stimuler un large éventail d'idées et d'activités, en encourageant la concurrence pour promouvoir l'excellence, à l'échelle la plus large possible, en fusionnant les contributions de toutes les institutions et entreprises, en incitant de nouveaux acteurs à entrer dans le jeu...

Cette concurrence, obligatoire pour des raisons d'efficacité et d'émergence de nou-

veaux concepts et de nouvelles technologies, ne doit pas s'opposer à une plus grande coopération mais, au contraire, doit être considérée comme l'un de ses piliers. En effet, le potentiel libéré par la **coopération** doit être considéré comme essentiel à l'objectif de "maintenir l'élan".

Malgré ses inconvénients, la coopération est un facteur important de continuité et de durabilité, comme l'a démontré l'Agence spatiale européenne (ESA) à plusieurs reprises. Il peut être long et pénible de lancer un nouveau programme à l'ESA, mais il est encore plus difficile d'en arrêter un ! Ceci fait de l'Europe (au sens large) le partenaire spatial le plus fiable au monde – et aussi le "champion" de la coopération internationale, sur la base d'expériences passées longues et fructueuses impliquant des États et des organisations européens.

L'espace est un laboratoire unique pour la coopération à tous les niveaux, qu'il s'agisse d'individus, d'équipes, d'instituts, de partenaires industriels ou d'agences et de nations, jusqu'à l'échelle planétaire, avec des bénéfices pour l'activité scientifique et bien plus encore !

L'exploration spatiale, en particulier, offre des modalités multidimensionnelles impliquant des acteurs publics et privés, des entreprises et des institutions spatiales et non spatiales, ouvrant ainsi une large gamme d'interactions et d'avantages

mutuels. Elle est exemplaire en termes de moyens structurels à mettre en place pour servir un certain nombre d'activités sociétales clés dans un calendrier très contraint, tout en faisant face aux grands défis planétaires à venir.

La coopération internationale devrait être considérée comme un objectif en soi, un impératif politique pour l'humanité, d'autant plus en période de tensions géopolitiques.

La coopération est une pratique "*per natura*" profondément ancrée dans les communautés scientifiques fondamentales. Et l'exploration spatiale, qui suscite le vif intérêt de tous les peuples (surtout lorsque leurs drapeaux respectifs sont mis en valeur), est l'un des meilleurs domaines possibles pour une coopération à l'échelle mondiale. Outre le fait qu'elle permet de réduire les coûts pour tous les acteurs, la coopération dans la plupart des programmes, sinon tous, a de très bonnes raisons d'être structurellement conçue pour "faire avancer les choses". À cet égard, l'Union européenne (UE) est particulièrement bien placée pour jouer un rôle stimulant, sa construction visant à encourager le partenariat entre ses États membres (en dépit et en raison de leur diversité).

En gardant ces facteurs à l'esprit, des recommandations ont été rédigées pour chacun des sept thèmes décrits ci-dessous (abordés plus en détail dans les chapitres suivants).

- 1. Philosophie et motivations de l'exploration.** Quelles sont les motivations profondes, au sens anthropologique, de l'exploration automatique et surtout humaine de l'espace ? Quelle est la source de l'intérêt public de cette entreprise ?
- 2. Des missions à rêver.** L'implication de la prochaine génération d'ingénieurs, de scientifiques et de dirigeants est une condition préalable importante pour assurer un avenir durable à l'exploration spatiale. Un concours ouvert aux jeunes pour encourager les idées novatrices a permis de récompenser quatre projets de missions originales qui sont présentés ici.
- 3. Environnement lunaire.** Une nouvelle vague d'exploration robotique et humaine de la Lune est en cours. Afin de développer ces activités de manière sûre, durable et symbiotique, leur impact sur l'environnement doit être systématiquement évalué et les moyens d'atténuation de celui-ci doivent être soigneusement examinés et testés. Après une évaluation des activités à considérer, différents moyens de préserver un environnement lunaire propre pour les générations futures sont explorés.
- 4. Aller plus vite.** La durée des processus d'exploration, depuis la présentation du concept jusqu'à la collecte et l'exploita-

tion des données, est très longue. L'objectif est ici de passer en revue les technologies de propulsion spatiale – qu'elles soient actuellement disponibles ou en phase de conception ou de développement – susceptibles d'accélérer les futures missions robotiques et humaines vers les différentes destinations du système solaire. Les gains potentiels en termes de temps de développement des programmes offerts par la coopération internationale sont également examinés.

5. **Machines volantes.** Les corps du système solaire dotés d'une atmosphère importante ont été explorés à l'aide de ballons ou de parachutes. Les futures missions au-delà des années 2040 visant à explorer ces corps au moyen "d'engins volants" nécessiteraient le développement de diverses technologies et infrastructures orbitales, par exemple des planeurs, des drones et des "aérobots" motorisés.
6. **L'eau.** La recherche d'eau dans le système solaire est une question à la fois scientifique et technique. Elle nécessite une meilleure connaissance de la présence et des propriétés spécifiques de l'eau, ainsi que de nouvelles missions spatiales robotisées. Les machines de collecte d'eau *in situ* et le retour d'échantillons sur Terre sont abordés, en préparation de l'exploration

humaine de la Lune et de Mars, ainsi que la durabilité de la collecte d'eau et de son traitement associé par des moyens robotiques avancés. La présence d'eau a été scientifiquement identifiée comme une étape majeure dans la compréhension de la formation du système solaire et est essentielle pour les questions d'habitabilité et de développement potentiel de la vie sur d'autres mondes planétaires.

7. **Humains et robots.** Les missions et plateformes robotiques et les missions humaines ne s'opposent pas. Les humains et les robots sont et seront complémentaires, en particulier dans leur couverture de différentes destinations (aucune mission humaine à l'intérieur de l'orbite de Vénus ou vers les planètes géantes n'est prévue dans un avenir prévisible). Ce thème examine comment elles peuvent être combinées et optimisées.

# 1- PHILOSOPHIE ET MOTIVATIONS CULTURELLES POUR L'EXPLORATION SPATIALE<sup>3</sup>

Si l'exploration spatiale relève avant tout de la science fondamentale, il est clair que l'envoi de sondes dans l'inconnu, et en particulier l'envoi d'êtres humains dans l'espace, suscite des attentes, des ambitions et des rêves d'une nature très particulière. **Garder cela à l'esprit et agir en conséquence est une condition préalable à tout effort d'exploration durable, à long terme et de grande envergure, partout dans le monde – et en particulier en Europe –, c'est-à-dire pour “maintenir l'élan”, comme le recommande vivement l'introduction de ce document.**

Il est vrai que le principal moteur de la course à l'homme vers la Lune dans les années 1960, et aujourd'hui encore dans un contexte différent, était la concurrence entre différents pays et systèmes politiques. Mais quelles en sont les sources cultu-

relles ? Pourquoi les nations attachent-elles un tel prestige à ces entreprises ?

L'une des raisons pour lesquelles l'aventure Apollo a été interrompue prématurément, par exemple, est peut-être qu'elle n'a pas accordé suffisamment d'attention à ces racines sous-jacentes – tout en faisant grand cas des motivations immédiates et politiques. À l'avenir, un soutien public et politique solide devrait être assuré en abordant ces aspects de manière plus efficace.

Il est donc nécessaire de caractériser l'imaginaire collectif qui sous-tend l'exploration spatiale et son rôle symbolique dans la civilisation actuelle et future, dans ce que l'on pourrait appeler l'aventure humaine.

À la base de cet imaginaire collectif, il y a les mythes religieux, en particulier celui de Prométhée, qui a donné à l'homme non

---

3. *Un document plus détaillé sur cette question, résultant d'un atelier de deux jours organisés par l'AAE avant le colloque de Turin, est disponible sur le site web de l'AAE : <https://academieairespace.com/documents-et-medias/philosophie-et-motivations-de-lexploration-spatiale/>*

seulement le feu, mais le savoir, et plus encore le *désir de savoir*, puis de pouvoir... jusqu'à "*l'hubris*".

Le mythe de Prométhée a été le moteur de l'aventure humaine au fil des siècles, à travers les modèles et paradigmes cosmiques successifs : Prométhée a survécu à Aristote et était encore bien vivant sous Copernic ! Les physiciens modernes, les cosmologistes et, plus tard, les ingénieurs qui déchiffrent, décrivent et utilisent les lois de la nature font de son héritage une réalité.

Bien que Copernic, Galilée, Giordano Bruno, aient dépossédé la Terre, et avec elle l'humanité, de son rôle central, l'exploration spatiale du XX<sup>e</sup> siècle nous a donné maintenant le sentiment que la Terre est unique, notre seule arche de Noé durable, qu'il faut préserver à tout prix. Nous avons tous entendu parler du fameux "*overview effect*" ("effet de vue d'ensemble") ressenti par tous les astronautes, et avons pu observer la beauté de notre planète depuis l'espace.

Mais la beauté du cosmos, l'émerveillement, est certainement aussi un élément fondamental de l'appel des profondeurs. L'émerveillement de l'infini. Même si les voyages planétaires, qu'ils soient robotisés ou habités, ne peuvent se comparer aux dimensions de la galaxie et de l'univers.

Les premières grandes nations spatiales n'ont cependant pas développé les fonde-

ments philosophiques de l'exploration spatiale et de leur propre compétition simplement en se souvenant des mythes classiques et en répondant à l'appel de l'infini. Les États-Unis et l'Union soviétique avaient chacun leur propre "*doxa*", la "Frontière" et la "Destinée manifeste" pour les premiers ; et le "Cosmisme" pour les seconds – un mélange de spiritualité et de foi dans la science et le progrès, proche du transhumanisme actuel.

À cela s'ajoute bien sûr la littérature. La science-fiction, qui a peut-être anticipé certaines réalisations concrètes, mais qui a surtout fait rêver de nombreux jeunes de l'espace. Même si, parfois, il n'y a pas de science dans la "SF", où l'on passe à la "fantasy"... ce qui peut avoir le résultat inverse, une sorte d'attirance pour le magique.

Plus elle progressait, plus l'exploration montrait non seulement l'absence de vie sur d'autres surfaces planétaires (tout en laissant ouverte la possibilité de traces fossiles ou même d'oasis actuelles), mais aussi l'extraordinaire concours de circonstances qui avait permis à la vie de se développer sur Terre, circonstances que l'on n'a pas encore retrouvés ailleurs, dans l'infinie variété des possibles. On est passé de la notion de "pluralité des mondes" de Giordano Bruno (censés présenter de fortes similitudes avec la Terre) à la notion de "diversité des mondes". Certes, les lois de

la physique sont universelles, mais l'évolution n'est pas seulement guidée mécaniquement par ces lois, elle est aussi guidée par le contexte physique, en partie construit par une succession d'événements aléatoires. Il faut considérer ce résultat comme le fruit de l'observation astrophysique d'une part, de l'exploration du système solaire d'autre part – et de la biologie elle-même bien sûr. Ce rôle de l'exploration (et des sciences spatiales en général) mérite d'être mieux mis en évidence.

La nécessité de préserver notre planète (ce "point bleu pâle", pour citer Carl Sagan à l'époque de Voyager), où la vie est apparue et s'est développée grâce à un extraordinaire concours de circonstances, est d'autant plus grande.

Nous sommes des terriens avant d'être des humains.

Espérons cependant que cette récente prise de conscience de la fragilité de notre planète, et la priorité légitime de la préservation de l'environnement, ne se traduira pas par un désintérêt pour l'Univers... et que les générations futures continueront à "lever les yeux vers les étoiles", et pas seulement à "regarder vers le bas pour le bien-être de la Terre". Cette incertitude remet directement en question la durabilité de l'exploration. Pour cela, l'éducation est essentielle.

Lorsqu'il s'agit de vols habités, cette quête est portée par une poignée d'astronautes, envoyés par l'humanité pour que chaque être humain se sente représenté dans cette aventure collective. Chacun explore – par délégation. La présence du corps, pour citer le philosophe français Michel Serres, est essentielle.

Le tourisme spatial, qui concerne également la présence physique, est une question controversée, en particulier en Europe. Certains considèrent que le développement d'un tourisme spatial très ambitieux, de grande envergure et financé par des fonds privés, *étendra* cet "effet de vue d'ensemble" à des milliers de terriens et contribuera fortement à la création d'une humanité plus unifiée. La prise de conscience (*enlightenment effect*) procurée par la célèbre image d'Apollo VIII d'un lever de Terre depuis un endroit éloigné (la Lune) a changé la perception qu'a l'humanité de la Terre et d'elle-même... avec toutefois un impact limité sur les mentalités humaines. La question est la suivante : les vols privés de milliardaires vers la Lune créeront-ils un jour le même sentiment "d'exploration par délégation" que les astronautes, dont le rôle est clairement de représenter au moins leur pays, et plus largement l'humanité ? Laissons cette question ouverte pour l'instant...

Au regard des principales évolutions humaines attendues dans la prochaine décennie, on peut imaginer que ce que l'on



appelle curieusement la “réalité virtuelle” ne vienne un jour ébranler cette fascination pour l’exploration par délégation. Lorsque l’homme sera plongé dans l’attraction d’un “métavers” et de ses merveilles, la présence physique du corps sera-t-elle encore un sujet d’intérêt ?

L’exploitation des ressources du système solaire (Lune, astéroïdes...), qui est véritablement physique, pourrait aussi être une réponse à cette question. Mais ce n’est pas forcément la voie à suivre. Il s’agit là aussi d’un débat intéressant du point de vue de la philosophie et de la civilisation. Si elle peut contribuer à apporter de nouvelles ressources à l’humanité et à préserver notre planète, elle est aussi perçue, par certains, comme une nouvelle manifestation de la démesure humaine (*hubris*), un retour à la colonisation. Nous n’en sommes pas encore là... mais ce n’est pas une raison pour ne pas y réfléchir d’un point de vue éthique.

Il est clair que les questions éthiques sont inhérentes à cette réflexion sur l’exploration. En effet, l’éthique est devenue un sujet important, pour l’Europe en particulier, donnant parfois l’impression que nous préférons réfléchir à ce qu’il faut éviter plutôt qu’à ce qu’il faut entreprendre.

Mais lorsque l’Europe décide d’aller de l’avant, elle doit le faire en accord avec ses principes fondamentaux, sa “philosophie”,

afin de prendre la bonne direction et de la maintenir à long terme. Cela signifie également que, dès le départ, une éthique assez poussée et à grande échelle sur l’empreinte cosmique de l’humanité devrait être envisagée.

La politique d’exploration spatiale, lorsqu’il s’agit d’exploration humaine, devrait être le résultat de ces valeurs européennes, le résultat de la façon dont l’Europe (UE et au-delà) définit sa propre identité. Il est également certain qu’une entreprise commune, visible et ambitieuse d’exploration spatiale devrait être un ciment très efficace pour l’Europe : cela fonctionne dans les deux sens...

Si l’Europe souhaite être un leader, quelque part dans l’espace, cela signifie d’abord reconnaître que la “culture spatiale” (exploration et exploitation) est, ou peut devenir, une valeur européenne, une expression des valeurs phares européennes telles que l’humanisme, la curiosité, la paix, la responsabilité, la solidarité, la diversité... ainsi qu’une expression des programmes phares politiquement acceptés liés à l’environnement, au climat, à la Terre verte et bleue, etc.

Avant tout, comme nous l’avons déjà mentionné dans l’introduction de ce document, la *coopération* fait partie intégrante de la plupart des activités spatiales européennes. L’Europe pratique la coopération mieux que

tout autre pays ou région. Il s'agira sans aucun doute d'une caractéristique forte de cette future politique, qui conduira l'Europe à coopérer non seulement avec ses partenaires traditionnels, mais aussi avec de nombreux autres, y compris les nouveaux venus dans le domaine de l'exploration spatiale. Ces projets de coopération impliqueront, outre les échanges scientifiques et technologiques habituels, un dialogue des cultures et des visions. Ainsi conçue, la coopération sera, dans une certaine mesure, une garantie de viabilité à long terme des programmes concernés.

Il faut construire un "récit" impliquant les populations – et il ne s'agit pas d'une simple opération de communication, *ex post*, une fois la décision prise, mais bien de la perspective *ex ante*, enracinée, d'une marche en avant.

La philosophie et la littérature apportent des éléments de réflexion, pas des réponses, et le débat reste ouvert, peut-être pour toujours... mais y participer éclaire plus intensément les choix futurs qu'une approche purement politique ou technocratique.

## Recommandations

**R1.1** Les agences européennes et les gouvernements devraient aborder plus ouvertement les fondements philosophiques et culturels de l'exploration spatiale – ainsi que ses justifications scientifiques, politiques et économiques – afin de l'enraciner profondément dans la culture et les valeurs européennes et d'assurer un soutien à long terme de la part des citoyens. À cette fin, l'ESA devrait organiser une réflexion spécifique, impliquant des philosophes, des historiens, des sociologues, ainsi que des scientifiques, sur les spécificités, le sens et l'avenir de l'aventure spatiale, à la fois automatisée et humaine.

**R1.2** Les gouvernements européens devraient redoubler d'efforts pour promouvoir les sciences spatiales et l'aventure spatiale dans le cadre d'une plateforme éducative commune destinée aux jeunes, en tant que ciment inégalé du sentiment d'appartenance et appel à la science et au progrès.

## 2- RÊVER DES MISSIONS D'ENVERGURE

L'implication de la prochaine génération d'ingénieurs, de scientifiques, de dirigeants et d'acteurs de la construction européenne est primordiale si l'on veut maintenir l'élan de l'exploration spatiale et lui assurer un avenir durable. Comme l'a indiqué Didier Schmitt, chef du groupe de stratégie et de coordination pour l'exploration robotique et humaine à l'ESA, lors de la table ronde finale organisée dans le cadre du colloque sur l'exploration spatiale de l'AAE :

*« Il est très important pour l'avenir de l'exploration spatiale en Europe que la prochaine génération soit une génération de dirigeants qui n'ont pas peur des grands défis. »*

Sans aucun doute, selon le Space Generation Advisory Council (SGAC) cette génération est très motivée et rêve d'un avenir durable, diversifié et égalitaire pour l'exploration spatiale en Europe.

Au cours de la session "Missions à rêver", quatre étudiants sélectionnés par le SGAC

dans différentes parties du monde ont été invités à raconter leurs rêves d'exploration spatiale. Dans le cadre d'un concours lancé en septembre 2022, 25 participants du monde entier ont fait part de leurs rêves d'exploration spatiale et ont passé trois épreuves de sélection comprenant un essai, des présentations vidéo et des entretiens avec le jury, composé de membres du SGAC, assistés d'experts de l'AAE. Le jury a apprécié les rêves courageux, innovants et multidisciplinaires qui ont été présentés dans cet aperçu des sujets auxquels pense la prochaine génération. Outre les quatre sujets sélectionnés, ils ont examiné des propositions portant sur la production alimentaire dans l'espace, la conception de missions et les nouvelles technologies de lancement. Les quatre présentations sélectionnées, allant des programmes d'exploration de l'espace lointain aux propositions d'organisations juridiques garantissant une coopération mondiale en matière d'exploration spatiale, portaient sur les sujets suivants :

- une mission de retour vers Titan avec équipage ;
- une mission vers Europa avec retour d'échantillons pour explorer l'environnement océanique ;
- une collaboration mondiale en matière d'exploration spatiale : faire d'un rêve une réalité ;
- la cryogénie pour les vols spatiaux de longue durée, posant la question de ce qu'il faudrait résoudre dans le système juridique pour permettre à ces technologies de soutenir l'exploration humaine de l'espace.

Bien entendu, par définition, certains de ces sujets sont très discutables. Aucun n'implique un quelconque soutien de la part de l'AAE à ce stade. Mais rêver de missions d'exploration spatiale qui se situent à la frontière entre la science-fiction et l'exploration spatiale remet en question les développements technologiques pour les vols spatiaux actuels et accroît la créativité pour résoudre les problèmes actuels. Toutes les missions spatiales de l'histoire de l'espace ont commencé par un rêve, une idée folle et/ou une solution à un problème, et la

communauté spatiale doit continuer à encourager les gens à rêver.

Pour assurer une dynamique à long terme à l'exploration spatiale, le secteur spatial européen doit créer un environnement où les étudiants et les jeunes professionnels sont encouragés à rêver d'exploration spatiale et à concrétiser ces rêves. La question n'est pas de savoir si la prochaine génération est suffisamment motivée pour avoir un impact sur la communauté spatiale européenne, mais plutôt de savoir comment elle pourrait s'impliquer davantage. Comment créer un environnement permettant aux jeunes de commencer à développer leurs compétences en leadership dès le début de leur carrière et les rendre responsables de l'avenir de l'exploration spatiale en Europe ?

Les discussions et débats ouverts sur l'avenir de l'exploration spatiale et du secteur spatial en Europe qui auront lieu au cours des prochaines années constituent une occasion unique de commencer à impliquer les jeunes et de les encourager à partager leurs visions et à prendre des responsabilités dans le secteur spatial européen.

## Recommandations

**R2.1 Un groupe de travail/comité de l'ESA devrait être mis en place pour produire des recommandations pour l'ESA et l'ensemble des acteurs du secteur spatial européen sur la façon de mieux impliquer la prochaine génération dans les discussions sur l'exploration spatiale.**

**R2.2** Les équipes de mission et d'exploitation de l'ESA devraient créer des programmes pour les étudiants dans le cadre desquels des étudiants de toute l'Europe pourraient être invités à assister à des réunions/colloques avec le statut d'observateur. Ce système a été testé avec succès à la NASA lors des missions INSIGHT et permet de stimuler les opportunités de carrière pour de nombreux scientifiques et ingénieurs talentueux en Europe.

**R2.3** Afin d'encourager les rêves de missions spatiales, les institutions, agences et autres organisations spatiales européennes devraient collaborer avec les organisations de la prochaine génération (par exemple le SGAC) pour mettre en place une plateforme permettant aux jeunes professionnels et aux étudiants à l'échelle européenne de partager leurs rêves et d'en discuter avec des experts de l'ensemble de l'industrie spatiale.

### 3- ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'EXPLORATION LUNAIRE

Le développement d'une nouvelle vague d'exploration robotique et humaine de la Lune qui caractérise la décennie actuelle est conforme aux objectifs et à la stratégie décrits initialement dans la Feuille de route pour l'exploration mondiale ("*Global Exploration Road Map*") en 2018 par un groupe de 15 agences spatiales et mis à jour en 2022 par un groupe élargi de 27 agences. L'exploration lunaire est la première étape vers les futures missions humaines vers Mars et au-delà. Elle a également ses propres objectifs à moyen terme qui couvrent principalement l'exploration, la science et l'utilisation des ressources lunaires. L'exploration lunaire joue actuellement un rôle important dans la démonstration de nouvelles capacités et du *leadership* d'acteurs publics et privés, et offre de nouvelles opportunités pour le développement de technologies innovantes et la recherche fondamentale et appliquée dans un large éventail de disciplines scientifiques.

Sur la surface de la Lune et en orbites cislunaires, le programme "Artemis" mené par la

NASA, le programme de station de recherche lunaire internationale ("*International Lunar Research Station*") mené par l'agence chinoise (CNSA), d'autres initiatives d'agences spatiales ou privées, ainsi que des concepts intégrateurs tels que le village lunaire, permettront une grande diversité d'activités : recherche scientifique, exploitation des ressources lunaires, services aux astronautes, jusqu'à peut-être de petites entreprises et du tourisme. Ces activités s'appuieront sur un large éventail d'installations et d'opérations : lancements à partir de la Terre, infrastructures de soutien orbital, atterrisseurs et véhicules de transport lunaires, habitats lunaires, installations logistiques pour la production d'énergie, de matériaux structurels et de systèmes de survie... L'objectif de "maintenir l'élan" de l'exploration spatiale en général, présenté dans l'introduction de ce document, implique un développement sûr, durable et symbiotique de ces activités.

À une époque de sensibilisation accrue à l'environnement sur notre propre planète,

où une surveillance étroite de l'impact des activités humaines conduira à des solutions d'atténuation innovantes, les impacts environnementaux de la nouvelle vague d'exploration lunaire doivent être systématiquement évalués et les moyens d'atténuation doivent être soigneusement examinés et testés. En effet, le développement d'activités autour et sur la Lune peut progressivement transformer l'environnement lunaire vierge en un environnement "anthropisé". L'évaluation des menaces que cette transition fait peser sur l'environnement lunaire nécessite une compréhension des éléments suivants :

- les atouts scientifiques et le patrimoine culturel de l'environnement lunaire actuel ;
- la nature, la localisation et l'étendue quantitative des ressources lunaires potentielles ;
- le développement des capacités technologiques au cours des prochaines décennies.

Une évaluation préliminaire de ces menaces permet d'identifier les problèmes les plus critiques :

- la gestion des déchets pour la ou les stations orbitales lunaires (*lunar gateway*

dans le cas du programme Artemis) et les infrastructures basées sur la Lune ;

- les impacts environnementaux des centrales électriques et des installations d'extraction d'eau, d'oxygène et de minéraux ;
- la prolifération des débris spatiaux autour de la Lune ;
- l'impact du développement du trafic Terre-Lune sur la Terre elle-même ;
- et autres...

Les moyens d'atténuer efficacement et durablement ces menaces s'articulent autour de trois axes prioritaires :

- la gestion des orbites lunaires ;
- la gestion des ressources et des déchets à la surface de la Lune et en orbite ;
- le développement de règles et de standards en accord avec la loi spatiale internationale<sup>4</sup>.

**L'exploration de ces différentes voies vers la préservation d'un environnement lunaire propre pour les générations futures a conduit aux recommandations formulées plus bas.**

Des efforts internationaux coordonnés devraient viser à construire un "cercle vertueux de l'exploration de la Lune" dans

4. Actuellement, les activités sur la Lune et les autres corps célestes sont réglementées par le "Traité de l'Espace Extra-atmosphérique". Le cas spécifique de la Lune est régi par l'article IX du Traité, qui définit les "principes" de non contamination nocive des corps célestes et de consultation internationale en bonne et due forme en cas d'interférence potentiellement néfaste.

trois directions complémentaires qui se renforceront mutuellement avec le temps : “Comprendre”, “Utiliser” et “Atténuer”, que nous développons ci-dessous.

## Comprendre

L'environnement lunaire naturel, sa dynamique et son interaction avec l'environnement spatial devraient faire l'objet de recherches fondamentales et d'analyses générales des incidences potentielles des activités robotiques et humaines. Les études devraient porter sur les moyens de préserver les régions présentant un intérêt astrobiologique potentiel pour l'étude scientifique et de les protéger de la contamination par des organismes extrémophiles terrestres susceptibles de se reproduire dans leur environnement.

Un inventaire systématique des ressources naturelles de la Lune, de leur localisation et de leurs limites, devrait être réalisé de manière complémentaire par le biais de missions publiques et privées.

Des règles devraient être établies pour le partage d'informations et de données au niveau international dans les différents domaines liés à la Lune, y compris les données scientifiques obtenues à partir de missions institutionnelles et commerciales, ainsi que la nature, la conduite et la localisation des activités lunaires.

Une liste de sites lunaires (et des orbites spécifiques) présentant un intérêt particulier pour la recherche scientifique devrait être établie en vue d'une préservation au moins provisoire par le biais d'accords internationaux. Elle pourrait inclure, par exemple, certains des “motifs en tourbillon” (“*swirls*”) ou les dépôts de manteaux sombres (“*Dark Mantle Deposits*”), pour leur potentiel en tant que ressources rares ou en tant que patrimoine culturel, sous l'égide d'un organisme scientifique comme le Comité de la recherche spatiale (COSPAR), en tenant compte des lignes directrices établies par le groupe d'experts du COSPAR sur la protection planétaire. Cette identification des “zones préservées” devrait être progressive et évoluer avec le temps, en fonction des progrès des connaissances et des projets scientifiques.

## Utiliser

De nombreux efforts de développement devraient être déployés dans le domaine des connaissances et des outils (ISRU : “*In-Situ Resources Utilization*”) pour les activités lunaires robotiques et humaines. Des programmes conjoints devraient être privilégiés entre le monde universitaire et la recherche industrielle, les PME innovantes et l'industrie spatiale afin de couvrir toute la chaîne de production du savoir-faire, de la recherche fondamentale à la recherche appliquée, à l'innovation et, à plus long terme, au marché.



Une attention particulière devrait être accordée au développement de systèmes potentiellement réutilisables sur Terre, par exemple dans le domaine de l'énergie ou des systèmes de survie en boucle fermée (tels que "Melissa<sup>5</sup>").

Des méthodologies et des normes et standards devraient être adoptées et partagées au niveau international pour une interopérabilité maximale des systèmes et des infrastructures lunaires. Les accords devraient être étendus autant que possible aux architectures des missions afin de permettre des interactions gagnant-gagnant entre les différentes parties prenantes de l'exploration lunaire.

Des principes clés devraient être définis pour une approche globale de la gestion de tous les éléments apportés sur la surface lunaire, considérés comme des ressources potentielles pour les opérations lunaires (réutilisation maximale ou recyclage).

## Atténuer

En complément des études d'impact générales des activités robotiques et humaines, des études d'impact spécifiques sur l'environnement devraient être réalisées au cas par cas, que ce soit sur la surface lunaire ou sur des orbites cislunaires. En particulier les États devraient imposer des études d'im-

pact dans le cadre des planifications des missions sous leur responsabilité, et établir une coordination au niveau international pour l'échange d'information et la consultation en cas de problème éventuel.

L'évolution naturelle à long terme des différents types d'orbites lunaires qui peuvent être utilisées pour des missions opérationnelles ou comme orbites cimetières doit être analysée afin d'élaborer aussitôt que possible des recommandations et des règles pour la gestion des trajectoires des satellites en fin de vie.

Les programmes de R&D sur les technologies de réduction de la logistique devraient être activement poursuivis dans le but de réduire les déchets résiduels sur la Lune (limitation des déchets ultimes).

Sur la base des principes définis par le traité sur l'espace extra-atmosphérique, des lignes directrices et des règles pour des activités lunaires sûres et durables sont en cours d'établissement par des organismes internationaux tels que le COSPAR et le Comité inter-agence de coordination des débris spatiaux (IADC). Plusieurs plateformes privées multipartites travaillent également à l'identification des domaines prioritaires et proposent des règles et des normes associées. Ces organisations sont

5. MELISSA ("Micro-Ecological Life Support System Alternative") est un projet ESA initialisé depuis plus de 25 ans dans le domaine des systèmes de support à la vie pour des missions de longues durées (Lune, Mars...).

connues pour aider le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (COPUOS) des Nations unies, sur les aspects juridiques des activités liées aux ressources spatiales, dans sa tâche d'élaboration de principes directeurs pour une utilisation sûre, pacifique, rationnelle et durable des ressources lunaires. Dans un premier temps, les réflexions devraient porter prioritairement sur l'élaboration des principes éthiques pour des activités responsables sur la Lune, notamment dans les zones qui méritent une attention particulière, telles que la face cachée ou les régions en permanence à l'ombre.

À terme, l'ampleur, la nature et la durée des activités d'exploration et d'utilisation des ressources lunaires nécessiteront une évolution depuis la "réglementation" vers la "gouvernance". Les exemples d'organes de gouvernance terrestres et spatiales (notamment : Antarctique, Haute Mer, fréquences de télécommunications) devraient être utilisés pour promouvoir une approche progressive et pragmatique en vue d'établir une gouvernance mondiale à plusieurs niveaux pour les activités humaines sur la Lune, ainsi qu'un système de régulation pour l'exploitation minière de l'espace.

Dans l'ensemble, les considérations ci-dessus devraient promouvoir des principes clés :

- développement d'efforts conjoints entre les diverses composantes des commu-

nautés scientifiques et technologiques pour relever les défis de la nouvelle vague d'exploration lunaire par le biais d'une recherche interdisciplinaire large et innovante ;

- stimulation des initiatives des PME, de l'industrie et des opérateurs commerciaux pour construire une "économie de l'innovation" qui sera déployée à terme à l'échelle du système Terre-Lune ;
- inspiration des agences spatiales nationales, des organisations internationales et des ONG pour construire ensemble, à terme sous les auspices des Nations unies, une utilisation équilibrée, équitable et durable des ressources lunaires qui préservera pour les générations futures le patrimoine commun de l'humanité sur la Lune.

Ces points peuvent être résumés comme suit par trois recommandations synthétiques, dont le but est d'inspirer les différents acteurs de l'exploration et de l'exploitation de la Lune.

## Recommandations

**R3.1** La communauté scientifique, les organismes scientifiques internationaux, les agences spatiales et les agences de financement, ainsi que les acteurs du secteur du nouvel espace et les investisseurs, devraient **COMPRENDRE** la Lune, son environnement, ses ressources potentielles pour la science et l'exploitation, et l'impact potentiel des activités humaines et robotiques sur l'environnement lunaire, notamment grâce à des analyses, des inventaires et des politiques de partage des données à l'échelle mondiale.

**R3.2** Les agences spatiales, les industries spatiales ainsi que les industries non spatiales pour de nouveaux types d'activités spatiales et les investisseurs devraient **UTILISER** la Lune par le biais d'approches et d'outils innovants (utilisation des ressources *in situ*, ISRU) permettant une utilisation maximale des ressources locales et la réutilisation des produits importés, et dans la mesure du possible des systèmes en boucle fermée pour le maintien de la vie.

**R3.3** Les agences spatiales, les industries et les organisations internationales (ONU, COSPAR, des ONG et tous les groupes de travail dans le domaine de la durabilité des activités sur la Lune) devraient **ATTÉNUER** tous les impacts des activités robotiques et humaines afin d'utiliser durablement les ressources lunaires limitées, sur la base des principes définis par la loi spatiale internationale et en accord avec le futur régime de gouvernance pour l'exploration et l'utilisation de la Lune.

## 4- LES MACHINES VOLANTES

Ce thème concerne les véhicules d'exploration *in situ* qui "volent" dans une atmosphère planétaire et non les sondes qui descendent simplement sous un parachute (jusqu'à présent sur Vénus (plusieurs), Mars (plusieurs), Jupiter (1996) et Titan (2005)). En 1985, deux ballons soviétiques Vega sont devenus, sur Vénus, les premières sondes planétaires à voler dans l'atmosphère d'une planète autre que la Terre. Leur mission a été couronnée de succès, fournissant des mesures uniques tout en dérivant à une altitude d'environ 54 km pendant environ 8 jours. Vénus, Mars, Titan et les planètes géantes sont des corps du système solaire dont l'atmosphère et/ou la surface peuvent être explorées à l'aide d'engins volants. Des ballons pour explorer Mars ont été développés par les Soviétiques, mais la mission Mars 96, puis Mars 98, a été annulée à la fin des années 90. Après un intervalle de près de 40 ans, la mission Ingenuity Mars Helicopter a magnifiquement démontré la nouvelle capacité d'un tel engin volant – un hélicop-

tère – à voler autour de sa base (Perseverance Rover) et à explorer différents endroits de la surface de Mars. Les hélicoptères martiens sont désormais intégrés dans l'architecture des études de la mission de retour d'échantillons de Mars (actuellement prévue au début des années 2030). La prochaine machine volante prévue est le Dragonfly de la NASA, qui devrait être lancé en 2027 et arriver sur Titan en 2034, et la mission DAVINCI+ de la NASA vers Vénus, dont le lancement est prévu à la fin des années 20 ou au début des années 30.

De nombreuses études sur les machines volantes ont été réalisées au cours des 20 dernières années par plusieurs agences spatiales (NASA, ESA, CNES...) dans le cadre de futures missions vers Vénus, Mars, Titan et les planètes géantes. Il est intéressant de noter que les "aérobots" et autres types de machines volantes font également partie des projets d'études des étudiants pour Vénus, Mars et les planètes extérieures (Uranus). Les machines

volantes sont de véritables sources d'inspiration pour les étudiants. Les hélicoptères et les drones combinent des batteries rechargeables et une source d'énergie couplée (actuellement des panneaux solaires pour Mars, un système d'énergie nucléaire à radioisotope pour Titan), ce qui permet d'effectuer de courts vols entre les phases d'atterrissage à la surface pour recharger les batteries et mener des recherches scientifiques à la surface. Il n'est pas possible de descendre à la

surface et d'atterrir sur Vénus, mais des aéroboots à longue durée de vie sont sur le point d'être inclus dans les prochaines étapes de l'exploration de Vénus, à la suite des trois missions en cours de développement par la NASA (DAVINCI+, VERITAS), et l'ESA (Envision). Un grand nombre de concepts différents d'aéroboots vénusiens sont étudiés, en particulier par la NASA au laboratoire JPL. Seules quelques études, peu médiatisées, sont entreprises en Europe.

## Recommandations

**R4.1 Technologie des machines volantes : de nouvelles technologies importantes devraient être développées en Europe pour les hélicoptères et aéroboots martiens, les aéroboots vénusiens et les machines volantes de Titan (drones, ballons pressurisés et à air chaud) afin d'offrir des possibilités de missions européennes autonomes et de collaboration internationale pour les futures missions vers ces corps dans les années 2040 et au-delà.**

**R4.2 Sondes planétaires profondes et planeurs : les avantages d'une exploration scientifique *in situ* approfondie des atmosphères planétaires devraient faire l'objet d'une étude plus approfondie en Europe, en dépassant les limites imposées par la technologie actuelle (10 bars, descente verticale sous parachute). Les ballons ne sont pas viables dans l'atmosphère des planètes géantes, alors que les planeurs peuvent l'être. Pour les planètes géantes, les technologies à développer devraient permettre l'exploration *in situ* par des engins volants autres que des sondes peu profondes parachutées (pour lesquelles la technologie est bien avancée en Europe) ; cela impliquerait des sondes profondes et des planeurs descendant peut-être jusqu'à 100 bars (un tel niveau de pression élevé devant être justifié scientifiquement).**

## 5- ALLER PLUS VITE ET PLUS LOIN

Pour maintenir l'élan de l'exploration, il faut également améliorer le délai de réalisation des missions et le délai d'obtention des résultats. Aujourd'hui, en particulier pour les planètes extérieures ou certains petits corps, il peut s'écouler des décennies entre l'étude du concept et la collecte des données – sans parler de l'analyse – pour une expérience à bord d'une sonde planétaire. Pour maintenir et accroître l'intérêt (non seulement des scientifiques, mais aussi du public et donc des décideurs politiques et financiers), il faut aller plus vite. Certes, cela devrait inclure (dans la mesure du possible) des processus de sélection plus efficaces et plus courts, mais il s'agit aussi d'améliorer les technologies de voyage dans l'espace.

Les premières missions vers les planètes extérieures ont été lancées sur une trajectoire de transfert direct vers Jupiter (Pioneer 10 et 11, Voyager 1 et 2). Plus tard, la suite des missions Voyager et les missions Galileo vers Jupiter ont utilisé la

technique alors nouvelle d'une séquence de manœuvres d'assistance gravitationnelle (GA) sur différentes planètes (Vénus, Terre, Jupiter, Saturne, Uranus). Les manœuvres d'assistance gravitationnelle ont été utilisées par des missions ultérieures (par exemple, Cassini-Huygens vers Saturne, Rosetta vers la comète 67P (également utilisée sur Mars), Bepi-Colombo vers Mercure) et doivent être utilisées par la mission Juice récemment lancée vers Jupiter. Les manœuvres d'assistance gravitationnelle planétaires sont des manœuvres sans propergol qui permettent d'atteindre des planètes qui seraient autrement inaccessibles directement par la seule propulsion chimique et/ou électrique, mais elles augmentent considérablement le temps de transfert jusqu'à la destination. Pour aller plus vite et plus loin dans le système solaire externe, il faut utiliser de nouvelles techniques de propulsion au-delà de la propulsion chimique, de la propulsion électrique solaire et de l'assistance gravitationnelle.

Les systèmes de propulsion dans l'espace se sont améliorés au cours des dernières décennies et de nouveaux concepts tels que la propulsion nucléaire ou la propulsion sans propergol, comme la voile solaire, sont en cours d'introduction. Mais jusqu'où pouvons-nous aller ? Pouvons-nous aller plus loin et plus vite en poussant tous les systèmes de propulsion connus à leurs limites ? Il s'avère que cela nécessitera des avancées significatives ou de nouvelles idées très astucieuses. Mais comme l'histoire nous l'a appris, ce n'est qu'une question de temps et il se peut que nous soyons à deux doigts d'y parvenir.

Les voiles solaires, une technologie qui mûrit lentement, ont le potentiel de redéfinir de manière significative l'exploration de l'espace lointain en fournissant un système de propulsion alternatif et efficace basé sur le transfert de l'élan de la lumière solaire plutôt que sur les méthodes traditionnelles de propulsion chimique ou électrique. Une fois démontrée et validée, cette technologie aurait un impact significatif sur l'avenir de l'exploration de l'espace lointain, bien que sa capacité de poussée relativement faible limite son potentiel.

Dans le même ordre d'idées, la voile solaire électrique (*E-sail*), innovante mais pas encore démontrée en vol, utilise les protons du vent solaire pour la propulsion, au moyen de longs et minces câbles

conducteurs chargés à une haute tension, par exemple +20 kV. Une gaine se forme autour du filin. Le champ électrique du filin chargé disperse les ions du vent solaire de leur trajectoire rectiligne d'origine, ce qui leur donne de l'élan. En s'éloignant du Soleil, la poussée diminue comme  $1/r$  (contrairement à  $1/r^2$  pour la voile solaire) car l'augmentation de la longueur de Debye du plasma (donc la section de la gaine autour du filin) compense partiellement la diminution de la pression dynamique du vent solaire.

La propulsion électrique, qui utilise actuellement l'énergie électrique fournie par les panneaux solaires, ne peut être utilisée efficacement (seule ou combinée à la propulsion chimique) que relativement près du Soleil (jusqu'à quelques unités astronomiques ?). Au début de cette décennie, l'exploration spatiale se trouve à un carrefour sans précédent, à l'aube d'une nouvelle ère de missions d'exploration robotique et humaine ambitieuses et passionnantes pour lesquelles l'utilisation de systèmes d'alimentation à radioisotopes (RTG) ne sera pas suffisante. Des sources d'énergie plus puissantes basées sur des systèmes de fission nucléaire seront nécessaires pour permettre les missions axées sur le développement durable des prochaines décennies. Une propulsion spatiale avancée, efficace et fiable sera nécessaire pour

transporter les systèmes d'exploration et accéder aux destinations de l'espace lointain telles que les astéroïdes proches (NEA) et Mars et, au-delà, aux planètes des systèmes solaires extérieurs. Des programmes sont en cours pour développer de tels systèmes de fission nucléaire : des microréacteurs nucléaires pour fournir de l'énergie en surface sur la Lune ou pour alimenter des sondes robotisées ; des moteurs de propulsion nucléaire thermique et des systèmes de propulsion nucléaire électrique pour fournir une poussée efficace à des véhicules spatiaux réutilisables pour le transport cislunaire et interplanétaire d'êtres humains, de cargaisons et d'instruments.

Mais pour aller plus vite vers la planète cible, il faudra ralentir (freiner) plus efficacement à l'arrivée. Les technologies d'aérocapture et d'assistance par l'aérogavitité peuvent apporter une solution.

L'aérocapture est une manœuvre atmosphérique qui utilise les forces aérodynamiques pour transférer un engin spatial d'une orbite hypersonique à une orbite de capture cible. L'aérocapture offre des avantages considérables en termes de masse par rapport aux manœuvres entièrement propulsées généralement utilisées pour atteindre les orbites de capture, car le véhicule est ralenti par les forces aérodynamiques du véhicule dans l'atmosphère, plutôt que par le propergol. L'aérocapture

peut faciliter au moins deux catégories de missions planétaires :

1. les systèmes d'insertion orbitale de petits satellites, un nouveau paradigme pour les futures missions planétaires ;
2. les manœuvres permettant d'atteindre les géants de glace (Uranus, Neptune) et Titan. Il pourrait également offrir de nouvelles capacités pour les missions habitées vers Mars.

L'assistance par aérogavitité (AGA, *Aero-Gravity Assist*), qui consiste à utiliser la traînée atmosphérique et la gravité d'un corps de taille planétaire pour obtenir le  $\Delta V$  et l'angle de virage nécessaires à l'insertion d'une orbite autour d'un autre corps céleste, conviendrait parfaitement aux missions vers le système saturnien, en particulier à la mission Encelade. Des études antérieures ont considéré Titan comme le corps planétaire dont l'atmosphère et la gravité pourraient être utilisées pour réduire la vitesse de la trajectoire interplanétaire afin d'atteindre une orbite de capture autour de Saturne, suivie de survols pour étudier Encelade, bien qu'une aérocapture autour de Saturne puisse donner des résultats similaires.

La collaboration internationale peut prendre plusieurs formes, par exemple Cassini-Huygens, Juice et Europa Clipper, DART et HERA, Mars Sample Return. La collaboration internationale au-delà des



missions phares, en particulier avec la NASA pour les missions de type PI (New Frontiers et Discovery), offrirait davantage de possibilités de vol à la communauté scientifique européenne dans le cadre du

programme d'exploration des sciences spatiales ; de telles collaborations, entre autres, devraient être facilitées. Nous reviendrons plus en détail sur ce point dans notre conclusion.

## Recommandations

**R5.1 Propulsion dans l'espace : les technologies de propulsion spatiale sans ergols (voile solaire et voile électronique), les systèmes avancés d'énergie nucléaire et la propulsion nucléaire sont des technologies clés pour les futures missions d'exploration humaine et/ou robotique. Leur développement devrait être fortement soutenu par les agences spatiales et l'industrie européennes.**

**R5.2 Aérocapture : aller plus vite signifie ralentir rapidement à l'arrivée sur le corps cible. Le développement des technologies d'aérocapture et d'assistance par l'aérogravité devrait être stimulé en Europe. Comme il est peu probable que ces nouvelles technologies soient utilisées avant leur validation, il conviendrait d'envisager une validation sur des planètes proches de la Terre (Vénus, Terre, Mars).**

## 6- LA RECHERCHE DE L'EAU

La recherche de l'eau est un sujet essentiel, mais qui soulève de nombreuses questions, que ce soit en tant que cible scientifique dans le système solaire ou en ce qui concerne ses utilisations techniques à l'avenir. Nous éclairons certaines de ces questions et tentons d'identifier les voies possibles pour l'Europe spatiale dans l'exploration de la présence de l'eau sous ses différentes formes.

### Cibles présentes

La mission Juice est essentielle, avec une attention particulière pour les lunes Ganyède et Europe qui possèdent des océans liquides sous des croûtes de glace très épaisses. Les failles et les fractures à la surface des lunes pourraient en révéler davantage, y compris d'éventuels phénomènes d'eau à la surface, comme ceux découverts sur Encelade, lune de Saturne. Oasis cachées ou non ? Dans quelques années, les instruments scientifiques de Juice fourniront une multitude de données qui permettront d'en savoir plus sur les caractéristiques des lunes glacées, dont

beaucoup sont en interaction étroite avec les énormes champs gravitationnels et magnétiques de Jupiter.

L'eau est aussi clairement l'un des principaux objectifs de l'exploration lunaire (abordée au chapitre 3) et fait partie de la planification de l'ISRU de la NASA. Quel type de ressources *in situ* envisageons-nous pour un premier habitat permanent sur la Lune en vue de préparer l'exploration humaine de Mars ? De l'oxygène provenant de minéraux extraits, de l'eau provenant de traces de glace, des sous-produits diversifiés issus du traitement du régolithe ? Il s'agit d'un nouveau monde spatial fascinant d'activités de recherche impliquant des dizaines d'universités et de nouveaux arrivants industriels.

La chasse aux comètes devrait également permettre de compléter les informations obtenues par la mission Rosetta-Philae sur la composition des glaces et des éléments associés qui pourraient révéler des compositions organiques prébiotiques.

## Technologies

D'un point de vue technique, l'utilisation des techniques de radar à ondes longues pour déterminer ce qui se trouve sous la surface des planètes et des lunes est indispensable. Plusieurs missions l'ont pratiqué vis à vis du sous-sol de Mars, identifiant clairement la présence de glace dans différentes régions. La mission Juice emportera un tel instrument radar pour rechercher l'eau à l'intérieur des lunes joviennes Ganymède et Europe.

Le forage est un autre moyen nécessaire. Le module scientifique d'ExoMars Orbiter a déjà fourni des données intéressantes, mais la mission ExoMars 2 visait à obtenir beaucoup plus de données en faisant atterrir un rover équipé d'une foreuse. L'un des principaux objectifs était de forer jusqu'à une profondeur de deux mètres dans un terrain potentiellement constitué de pergélisol afin d'accéder à la glace. La reprise de la mission, interrompue par la fin du partenariat russe en 2022, a été approuvée pour un lancement en 2028 lors de la dernière réunion ministérielle du conseil de l'ESA.

## Communauté d'intérêts et d'objectifs

La recherche d'eau dans le système solaire permet de progresser sur de nombreuses questions de fond :

- Comment le système solaire s'est-il développé et pourquoi la présence et la diversité de l'eau (rapport isotopique, composition en sels, molécules orga-

niques potentielles) sont-elles un bon indicateur de son évolution ?

- Existe-t-il des "oasis" sur d'autres corps que la Terre, la seule à posséder de l'eau liquide à sa surface (habitabilité et exobiologie) ?
- L'exploration humaine de l'espace pourrait-elle être facilitée par l'utilisation des ressources en eau *in situ* lorsqu'elles sont présentes ? C'est l'un des nombreux défis que pose l'installation de stations temporaires ou permanentes avec équipage sur la Lune et sur Mars.

## Possibilités d'exploration future

Que pouvons-nous raisonnablement accomplir pour tirer parti des réalisations passées et présentes en matière d'exploration spatiale et d'acquisition de connaissances ? Voici quelques suggestions :

- Visites habitées et robotisées de la Lune avec retour d'échantillons en grandes quantités.
- Missions de survol de toutes les planètes, souvent en phase d'orbite (bientôt Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne).
- Nouvelles rencontres de comètes après le succès de la première observation rapprochée du noyau de la comète "Tchouri" 67P/TG.
- Visites d'un certain nombre d'astéroïdes avec retour d'échantillons.

- Missions robotiques vers Mars, prévues avec le projet MSR visant à ramener les échantillons collectés par la mission robotique Persévérance.
- Retour de missions avec équipage et une présence plus longue sur la surface lunaire, prévus au cours de la présente décennie.

Enrichir le thème de l'eau à l'occasion de chacune de ces suggestions de mission est une quête cruciale pour progresser dans l'exploration spatiale du système solaire.

## Rôle de l'Europe

La question qui se pose ici est double :

- Que devrait envisager l'Europe pour faire progresser le thème de l'eau dans le cadre des missions spatiales ?

- Que peut entreprendre l'Europe dans ce domaine en combinant la recherche scientifique avec la récupération et le traitement potentiels de l'eau *in situ* nécessaires aux missions habitées ?

La première question peut être traitée sur la base des capacités européennes déjà démontrées ; la seconde dépend de la vision de l'ESA dans son engagement vers les missions habitées.

Les opportunités pour l'Europe, l'ESA et les agences spatiales nationales doivent être considérées selon plusieurs catégories de possibilités, comme illustré dans le tableau ci-dessous.

Type de mission	Où	Valeurs pour les perspectives de mission
Survols / Atterrissages	Ceinture d'astéroïdes	Approfondissement des connaissances par des survols, atterrissage le cas échéant et retour d'échantillons (présence de glace et/ou contenu hydrique des parties rocheuses).
En orbite	Lunes glacées joviennes et saturniennes	Après des missions de survol bien connues, dont Juice, il serait intéressant de surveiller de plus près les lunes glacées présentant un potentiel de sublimation de la glace. Un retour vers Encelade et les anneaux de Saturne est attrayant.
Poursuite / Atterrissage	Comètes	L'Europe a démontré ses compétences avec la mission Rosetta Philae et vise à préparer une autre mission d'interception en plaçant une sonde en orbite à la position L2. Un atterrissage en douceur plus performant pourrait être tenté sur un noyau de comète avec analyse <i>in situ</i> sinon retour d'échantillon.

Type de mission	Où	Valeurs pour les perspectives de mission
Exploration des terres	Lune / Mars	Accéder à des sources glacées en surface ou sous la surface et effectuer des analyses <i>in situ</i> . La science doit naturellement être associée, dans un cadre de missions combinées, aux premières étapes de l'ISRU. Le développement du rover Exomars justifie d'être adapté et poursuivi pour manifester la présence européenne alors que toutes les autres nations spatiales qualifiées sont déjà présentes sur la Lune et visent également l'atterrissage à la surface de la planète Mars.

## Remarques finales

Lors de l'examen des futures missions, les possibilités de coopération ne doivent pas être négligées : il est primordial de fournir à la communauté scientifique européenne les données d'exploration nécessaires pour poursuivre la recherche au plus haut niveau. Cependant, ces opportunités fructueuses ne peuvent être considérées

comme suffisantes pour satisfaire les ambitions européennes en matière d'exploration spatiale.

Les missions potentielles pour l'eau, comme le montre le tableau ci-dessus, sont abordables compte tenu des capacités de l'Europe. Tout ce qu'il faut, c'est une volonté d'agir et de combler certaines lacunes techniques auxquelles l'Europe doit s'attaquer.

## Recommandations

**R6.1 Les agences européennes devraient chercher à accéder à la Lune et à Mars au moyen de missions robotiques d'atterrissage en douceur sans le soutien obligatoire des principaux partenaires internationaux.**

**R6.2 Les agences et l'industrie européennes devraient acquérir les techniques de collecte d'échantillons et de retour sur Terre, en s'inspirant des succès étonnants des missions japonaises, chinoises et américaines.**

**R6.3** Les agences européennes devraient améliorer leur capacité à lancer des sondes loin de la Terre en faisant preuve d'une plus grande créativité dans leurs capacités de lancement. Par exemple, la technique du rendez-vous en orbite pourrait être utilisée pour assembler des étages de propulsion augmentés en orbite terrestre basse afin de fournir des capacités augmentées aux vaisseaux spatiaux d'exploration, les rendant ainsi mieux à même d'atteindre rapidement leurs objectifs.

**R6.4** Pour faciliter les missions d'exploration au-delà de Jupiter, les agences et l'industrie européennes devraient s'efforcer de développer des équipements basés sur l'énergie de radioisotopes tels que RTG (Générateur thermoélectrique) et RHU (réchauffeurs).

**R6.5** L'Europe devrait prendre l'initiative de planifier une ou plusieurs missions d'exploration portant sur la recherche et la capture d'eau dans le système solaire. Une attente claire est la poursuite de l'objectif précédent d'Exomars de pénétrer le pergélisol de Mars, mais d'autres missions pourraient être envisagées dans la même intention, à commencer par la visite de dépôts de glace sur la Lune.

## 7- HUMAINS ET ROBOTS

La collaboration homme-robotique n'est pas l'apanage de l'espace. On la rencontre chaque fois qu'il s'agit de repousser les limites de nos connaissances et de notre maîtrise d'un environnement extrême. "L'exploration" sur Terre, qu'elle soit sous-marine ou aéronautique, est porteuse de nombreux enseignements utiles pour l'exploration spatiale. La complémentarité cruciale de la collaboration homme-robotique est essentielle en matière de sécurité, de science et d'objectifs audacieux. Plus que jamais, les progrès technologiques ouvrent la voie aux possibilités humaines. C'est notre meilleure option pour servir les intérêts de la science et inspirer les nouvelles générations.

Le progrès scientifique et la création de connaissances constituent un moteur permanent de l'exploration humaine et robotique. Participer à la quête de notre place dans l'univers est une noble tâche. Elle peut être accomplie en premier lieu par des robots en tant qu'éclaireurs de substitution

dans des endroits où il n'est pas sûr ou réaliste d'envoyer des personnes aujourd'hui. L'ingéniosité humaine sur place, lorsqu'elle est possible, demeure toutefois d'une richesse considérable.

Même si aucun astronaute n'accompagne les missions robotiques au-delà de Mars, par exemple pour visiter de petits corps, les robots et les humains forment toujours une équipe. Un certain degré d'autonomie est nécessaire et souhaitable pour les opérations de vol, mais un niveau de contrôle humain reste essentiel, en particulier pour les opérations relatives aux charges utiles. Le compromis entre le maintien du contrôle humain et la réduction des délais d'exécution grâce à l'automatisation est un équilibre constant à améliorer. La contribution des petits satellites, y compris les cubesats, à l'exploration future des petits corps est un autre sujet d'intérêt actuel pour la relation homme-robot dans l'exploration des petits corps. Avec les développements actuels en matière d'intelligence artificielle, il est

possible de progresser vers des engins spatiaux entièrement "autopilotés", y compris l'adoption à bord des opérations de la charge utile, avec le traitement des données à bord, au point de transmettre des "résultats" au lieu d'images ou de spectres.

Mars est un endroit fascinant et si les missions humaines vers Mars ne sont pas encore à portée de main, les missions robotiques de surface les plus difficiles sont en cours de préparation, ce qui nécessite la mise en place à long terme de vastes capacités en matière de technologie et d'innovation. L'autonomie locale plutôt que la dépendance centralisée est essentielle, comme c'est le cas sur Terre. La recherche et le développement dans ce domaine sont à l'origine d'inventions qui ont des retombées dans la vie quotidienne dans de nombreux secteurs, comme les véhicules autonomes ou la robotique collaborative pilotée par l'IA.

Atterrir et rester sur la Lune est un objectif mondial indéniable. Il est nécessaire de trouver un juste équilibre entre la préservation d'un lieu vierge et la nécessité d'une présence humaine pour l'étudier plus avant. La proximité de la Lune permet d'évaluer les partenariats et les synergies entre l'homme et la robotique dans un environnement planétaire hostile. Une approche synergique entre les robots et les humains sera un facteur clé dans l'exploration efficace de la Lune. Elle ouvrira la voie et

établira la norme pour l'exploration robotique de Mars, des astéroïdes et d'autres sites du système solaire.

Aujourd'hui, l'envoi de femmes et d'hommes en orbite terrestre basse est devenu une routine, même pour les "astronautes" non professionnels. La maintenance des installations spatiales en orbite terrestre a été (et est toujours sur l'ISS) assurée par des humains (par exemple, le télescope spatial Hubble, l'ISS). Pour les grandes applications, la maintenance à long terme des infrastructures peut nécessiter des opérations entièrement robotisées. Les technologies nécessaires ont été validées au fil des ans sur l'ISS, y compris la livraison et l'assemblage robotisés dans l'espace.

Le rôle de plus en plus important de la télérobotique est un thème transversal à toutes les destinations. Au cours de la dernière décennie, des missions expérimentales de télérobotique ont été menées entre la Station spatiale internationale (ISS) et la Terre, combinant différents modes de commande de ressources robotiques sur la surface de la planète afin d'offrir une expérience immersive à l'utilisateur grâce au retour visuel et à la réflexion de la force, ou de gérer l'équipe robotique comme des collaborateurs intelligents grâce à la commande au niveau des tâches. Ces technologies et concepts de téléopération ont également été transposés sur Terre, dans nos maisons et nos usines.



# OBSERVATIONS FINALES : MAINTENIR L'ÉLAN ET COOPÉRER

Dans l'introduction de ce document, nous avons mis l'accent sur deux questions générales : comment maintenir l'élan et comment faire de la coopération internationale une pratique structurelle (de type épine dorsale). Dans quelle mesure ces objectifs sont-ils réalistes à la lumière des sept thèmes examinés ci-dessus ?

En ce qui concerne l'élan récemment pris par l'aventure de l'exploration – et en particulier par l'exploration humaine – nous avons vu comment il devrait être ancré plus explicitement et plus fermement dans des motivations philosophiques ; la découverte de l'espace serait alors essentielle pour attirer, maintenir et améliorer l'intérêt, l'excitation et l'implication nécessaires du public – et donc, en fin de compte, son soutien. Nous avons également souligné que l'exploration lunaire, et éventuellement l'exploitation (au moins au niveau de l'ISRU), qui est récemment revenue en tête de la plupart des agendas politiques, devrait, par sa nature même, préserver l'environnement

lunaire. Nous avons insisté sur la nécessité d'établir un cadre juridique approprié.

Un thème moteur spécifique est lié à la question de l'eau et du carbone organique dans le système solaire, dans chacun de leurs états physiques et/ou chimiques potentiels. Il s'agit d'un sujet scientifique d'un intérêt astrophysique majeur, d'une ressource potentielle à acquérir et d'une question "technique" (ou d'une réponse à une question technique). Il est susceptible d'être à l'origine d'une grande variété de missions spatiales pour les décennies à venir : il ne faut pas perdre l'élan, car chaque nouvelle découverte renforcera à son tour l'élan global de l'exploration spatiale.

Il a été souligné que cet élan, au moins pour les sondes automatisées à longue distance, telles que celles destinées aux missions dans le système solaire externe, dépend également de la capacité à "aller plus vite", afin d'obtenir un délai raisonnable pour le retour des résultats pour les chercheurs

scientifiques, de faciliter le maintien des connaissances par le biais des missions, et d'intégrer ces programmes dans une vision et un effort généraux et partagés. En effet, l'exploration planétaire devrait combiner de grandes missions-phares automatisées à long terme et des missions habitées (comme sur la Lune) de manière complémentaire et stratégiquement liée. Bien entendu, "aller plus vite" devrait également inclure des processus de prise de décision plus efficaces et plus rapides, y compris pour la sélection et la mise en œuvre des missions.

Un moyen efficace d'assurer la continuité du soutien intergénérationnel à l'exploration serait de créer un cadre pour la mise en œuvre de missions moins coûteuses et plus simples, tout en conservant un intérêt scientifique et/ou technologique exceptionnel : ces missions pourraient être réalisées par de petites entités ou des universités, largement ouvertes à de jeunes et nouveaux contributeurs. Des appels à propositions appropriés devraient être régulièrement lancés, avec des budgets plafonnés permettant un processus de sélection séquentiel : une telle activité constituerait une fusion "générationnelle" éducative optimisée avec l'expertise des seniors.

La coopération peut apparaître comme une première solution pratique à la rareté des possibilités de vol. La rareté des appels d'offres pour les instruments spatiaux

menace le maintien et l'amélioration des compétences acquises au cours des dernières décennies, en particulier en Europe où la pérennité d'une communauté dynamique d'instrumentation scientifique constituée dans la plupart, sinon tous les domaines de la technologie, devient très fragile.

De plus, la part que l'on a dans un partenariat, c'est-à-dire le pouvoir dont on y dispose, dépend de la valeur que l'on apporte. Accroître les atouts de l'Europe est donc une nécessité avant de frapper à la porte de partenaires potentiels si l'Europe et son industrie spatiale veulent rester dans le peloton de tête de l'espace. La continuité de l'exploration spatiale est un élément important à cet égard.

Outre la coopération entre la NASA et les agences spatiales nationales européennes, des programmes de collaboration NASA/ESA devraient être développés au-delà des missions phares, avec des processus de sélection suffisamment rapides.

Avec l'arrivée de nouveaux partenaires dans l'arène spatiale à travers le monde, une nouvelle ère de l'exploration spatiale s'ouvre, offrant un avenir passionnant en remplaçant l'ère précédente de la confrontation par un nouveau type de coopération élargie. Chaque partenaire apportera son expertise, sa volonté et sa passion, bien au-delà du simple objectif de réduction du

coût des missions. L'exploration spatiale est en effet exemplaire d'une pratique sociétale dans laquelle la coopération internationale joue un rôle primordial : à ce titre, elle peut et va occuper une place centrale dans ce siècle où l'humanité est confrontée à des défis planétaires majeurs.

Il convient de souligner que la coopération, par opposition à la confrontation, n'exclut pas la concurrence, si elle se développe dans un contexte pacifique, dans le seul souci de l'efficacité globale.

Cette coopération internationale pour l'exploration spatiale implique de la politique. Mais la politique est – à long terme – la concrétisation d'enjeux culturels et même

civilisationnels plus profonds et plus fondamentaux. Ce ne sont pas seulement des intérêts économiques qui sont en jeu, mais aussi l'interpénétration des cultures et leur alimentation mutuelle, au bénéfice de la paix et de l'éducation.

L'exploration spatiale est un espace incomparable pour l'expression de ces motivations, partagées non seulement par les décideurs mais aussi (et surtout) par les citoyens – une condition *sine qua non* pour la robustesse, l'efficacité et la poursuite d'un élan qui exprimerait le meilleur de l'humanité.

# ANNEXE 1

## Références utiles sur l'exploration spatiale

### Études internationales (par date de publication)

- Huntress, W., Stetson, D., Farquhar, R., Zimmerman, J., Clark, B., O'Neil, W., Bourke, R., Foing, B., 2006. The Next Steps in Exploring Deep Space – A Cosmic Study by the IAA. AcAau.58.304H2006/03.
- Science-Driven Scenario for Space Exploration– ESSC-ESF Position Paper, January 2007. [https://www.essc.esf.org/wp-content/uploads/2021/09/Space\\_Exploration\\_01\\_2007.pdf](https://www.essc.esf.org/wp-content/uploads/2021/09/Space_Exploration_01_2007.pdf)
- Ehrenfreund, P., et al., 2012. Toward a global space exploration program: a stepping stone approach – COSPAR PEX Report. Adv. Space Res. 49, 2e48.
- Heinicke, C., Foing, B.H., November 2020. Human Habitats: Prospects for Infrastructure Supporting Astronomy from the Moon. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0568>
- The Global exploration RoadMap – International Space Exploration Coordination Group (2018). [https://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/isecg/GER\\_2018\\_small\\_mobile.pdf](https://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/isecg/GER_2018_small_mobile.pdf)
- The Global Exploration RoadMap Supplement – International Space Exploration Coordination Group (2022). [https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/isecg/GER\\_Supplement\\_Update\\_2022.pdf](https://www.globalspaceexploration.org/wp-content/isecg/GER_Supplement_Update_2022.pdf)

- M. Blanc, P. Bousquet, V. Dehant, B. Foing, M. Grande, L. Guo, A. Hutzler, J. Lasue, J. Lewis, M. A. Perino, H. Rauer, Eds, *Planetary Exploration, Horizon 2061*, Elsevier, 2022. ISBN: 978-0-323-90226-7  
<https://doi.org/10.1016/C2020-0-01626-9>  
<https://www.sciencedirect.com/book/9780323902267/planetary-exploration-horizon-2061>
- Coustenis A., Hedman N., Doran PT., Al Shehhi O., Ammannito E., Fujimoto M., Grasset O., Groen F., Hayes AG., Ilyin V., Kumar KP., Morisset C-E., Mustin C., Olsson-Francis K., Peng J., Prieto-Ballesteros O., Raulin F., Rettberg P., Sinibaldi S., Suzuki Y., Xu K. and Zaitsev M. (2023), Planetary protection: an international concern and responsibility. *Front. Astron. Space Sci.* 10:1172546. doi: 10.3389/fspas.2023.1172546

## ANNEXE 2

# Membres du comité de programme du colloque à Turin, contributeurs au présent Avis

### Président

- Jean-Jacques DORDAIN, AAE

### Membres

- Jean-Pierre BIBRING, IAS, AAE
- Michel BLANC, IRAP, AAE
- Christophe BONNAL, CNES, AAE
- Roger-Maurice BONNET, ISSI, AAE
- Jean BROQUET, AAE
- Jean-François CLERVOY, ESA, AAE
- Erasmo CARRERA, PoliTo, AIDAA, AAE
- Éric DAUTRIAT, AAE
- Jean-Jacques DECHEZELLES, AAE
- Stefaan DE MEY, ESA
- Bram DE WINTER, SGAC
- Jean-Pierre LEBRETON, CNRS, AAE
- Maria-Antonietta PERINO, Thales Alenia Space, AAE, AIDAA
- Davide PETRILLO, SGAC, IAF