

L'empreinte environnementale des activités spatiales et lunaires

Dessiner la feuille de route européenne sur Terre et dans l'espace

anRT
ASSOCIATION NATIONALE
RECHERCHE TECHNOLOGIE

 **FUTURIS**

OCTOBRE / 2024

Note exploratoire

Présidente du GT Objectif Lune : Claudie Haigneré

Directrice de publication : Clarisse Angelier

Coordinateur de la note : Alban Guyomarc'h.

L'empreinte environnementale des activités spatiales et lunaires

Dessiner la feuille de route européenne sur Terre et dans l'espace

Note exploratoire

Ces travaux sont soutenus financièrement par les souscripteurs FutuRIS :

AIR LIQUIDE - AMPIRIC-AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ - ANR - BERGER-LEVRULT - BNP PARIBAS BOUYGUES - CEA - CNRS - DECATHLON - EDF - ENGIE - FRANCE UNIVERSITÉS - GENERAL ELECTRIC INRIA - INSTITUT MINES TELECOM - INSTITUT PASTEUR - MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE LA JEUNESSE ET DES SPORTS - MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE RÉGION PAYS DE LA LOIRE - RENAULT - SCHNEIDER ELECTRIC - SNCF - TOTAL ENERGIES - UDICE VINCI

Le contenu n'engage que la responsabilité de l'ANRT en tant qu'auteur et non celle des institutions qui lui apportent son soutien.



Life Is On

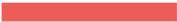


Avec la relecture de Claudie Haigneré, ancienne ministre et présidente du Groupe Objectif Lune.
Directrice de publication : Clarisse Angelier, Déléguée générale de l'ANRT.
Coordinateur de la note : Alban Guyomarc'h, coordinateur du GT Objectif Lune.

Contributeurs

- Yann Arnaud - Ingénieur de recherche et développement, doctorant Cifre, Talan
- Alain Brillard - Professeur émérite, Laboratoire Gestion des Risques et Environnement, Université de Mulhouse
- Jules Coeuillet - Etudiant, ISAE SupAero
- Liliana Cucu-Grosjean, INRIA et StatInf
- Marlene De Bank – Présidente, AéroDécarbo
- Julien Doche - Ingénieur aérospatial, membre AéroDécarbo
- Clément Goujon - Architecte systèmes spatiaux, Thales Alenia Space
- Pierre-Alexis Joumel - Directeur International & New Business, Airbus Defense and Space
- Stéphanie Lizy-Destrez - Professeur en ingénierie des systèmes spatiaux, ISAE SupAero
- Laurence Monnoyer-Smith - Directrice du développement durable, CNES
- Estelle Moraux - Professeur en astrophysique, Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, Université Grenoble Alpes - Directrice du Centre Spatial Universitaire de Grenoble
- Antoinette Ott - Environmental performance engineer, Maïaspace
- Régis Plateaux - Maître de conférence, responsable du parcours Mécatronique et Systèmes Complexes, membre de l'équipe IS2M du laboratoire QUARTZ, SupMeca
- Gilles Rabin - Conseiller spatial, Ambassade de France à Berlin
- Delphine Roma - Vice-présidente Big Science Space & Defense Markets - Global Markets & Technologie, Air Liquide
- Isabelle Tisserand - Anthropologue
- Andrea Vena - Chief Climate and Sustainability Officer, ESA
- Jérôme Vila - Deputy CEO et Chief Program Officer, Maïaspace
- Laurent Zenou - Chief Strategy and performance Officer, Maïaspace

Note éditoriale



Dans le cadre de sa programmation 2023-2024, le GT Objectif Lune de l'ANRT propose des feuilles de route stratégiques et opérationnelles sur des thématiques spatiales et lunaires. Les axes stratégiques proposés dans le Livre blanc d'Objectif Lune, publié en février 2022, sont ainsi déclinés autour de grands domaines. Une note sur le droit est déjà parue, à laquelle s'ajoute cette note sur l'étude de l'empreinte environnementale, et une étude sur l'énergie paraîtra dans les prochains mois.

Ces notes sont divisées en deux parties. Après un exposé des principaux enjeux dans une partie « **panorama stratégique** », une série de « **recommandations opérationnelles** » sera proposée.

Cette publication est dédiée à la seconde thématique, c'est-à-dire à l'étude de l'empreinte environnementale.

Sommaire



Synthèse exécutive	1
Panorama stratégique	3
Introduction	3
Partie 1 / L’empreinte environnementale des activités spatiales : vue d’ensemble	5
A. Le volet éthique et politique	5
B. Le volet technique	8
Intermède : les politiques environnementales au sein des agences spatiales, cas de l’ESA et du CNES	12
Partie 2 / L’empreinte environnementale des activités lunaires : exploration	16
A. Le volet éthique et politique	16
B. Le volet technique	18
Recommandations opérationnelles	21
Axe 1 / Planification stratégique	21
Axe 2 / Pour une politique européenne de durabilité spatiale	21
Axe 3 / Favoriser la coopération spatiale de l’Europe et pour l’Europe	22
Axe 4 / Europe et influence	22
Le levier juridique	22
Le levier économique	23
Le levier diplomatique	23

Synthèse exécutive

Que ce soit sur Terre, en orbite ou vers et sur la Lune, **les activités spatiales ont une empreinte environnementale. Le constat est factuel et indiscutable.** À l'heure de la prise de conscience d'une nécessaire mise en adéquation de nos technologies avec les exigences d'un monde qui se détériore du fait des changements climatiques, les décideurs et les acteurs du spatial doivent impérativement prendre en considération l'ensemble de l'empreinte environnementale de l'activité.

L'étude de l'empreinte environnementale des activités spatiales se déploie sur **deux dimensions** :

- **Un volet éthique et politique**, qui interroge les nouveaux modèles d'accès, d'utilisation et d'exploitation de l'espace à l'aune des impératifs environnementaux et de légitimité sociale.
- **Un volet technologique** qui cherche à réduire l'empreinte environnementale des activités spatiales par une amélioration des techniques utilisées et de la durée de vie des objets spatiaux. Cela passe par un chantier préalable et toujours en cours, à savoir l'étude de l'empreinte environnementale des activités spatiales, notamment s'agissant des effets hors CO2 de ces activités.

En matière environnementale, **les agences spatiales jouent un rôle majeur en tant qu'acteurs structurant des filières spatiales.** Elles sont la plupart du temps les autorités centrales dans l'autorisation des opérations spatiales, et le financement de programmes spatiaux par appel d'offres.

Activités spatiales d'exploration, **les programmes lunaires ne peuvent s'affranchir de se confronter à leurs impacts climatiques et sociaux.** Une réponse à ces interrogations peut se déployer sur deux axes : une formalisation de la stratégie européenne pour l'exploration de la Lune centrée exclusivement sur la science spatiale d'une part ; une politique de réduction de l'empreinte environnementale des activités spatiales en général, d'autre part.

L'Europe doit se focaliser sur le développement de systèmes robotiques autonomes et intelligents pour l'exploration lunaire ; ce qui n'exclut pas le vol d'astronautes européens sur des programmes conjoints :

- L'Europe doit prioriser des missions lunaires robotisées, frugales et scientifiques, en particulier dans les champs de la cartographie, de l'analyse géologique, de l'observation et de l'exploration.
- Service contre service, et au moyen du développement de compétences clés à mettre dans l'échange, l'Europe peut envoyer avec des partenaires internationaux de différents bords géopolitiques, ses astronautes vers la Lune.
- En outre cette priorisation des missions robotisées vers la Lune doit être accompagnée d'une réflexion quant à la médiation avec le grand public, inspirée des communications menées s'agissant des rover martiens et de missions robotisées récentes (personnification du rover, publication réseaux sociaux, etc.).

Panorama stratégique

Introduction

Depuis 2019, le groupe de travail Objectif Lune de l'ANRT réunit des acteurs mobilisés sur l'étude et la promotion des opportunités offertes pour la science, la recherche et l'innovation par **une ambition lunaire européenne à vocation scientifique**. Le groupe fonde son action sur trois piliers : une intersectorialité spatial-non spatial, une ambition européenne et une ambition responsable.

Au cours des années 2010, **la Lune est revenue à l'agenda stratégique des États spatiaux**. Dominant le paysage, le programme Artémis de la NASA annonce le retour d'astronautes sur le sol de notre satellite naturel pour le début de la prochaine décennie. Parallèlement, le programme lunaire chinois suit son cours et vise, lui aussi, à établir une présence humaine via son programme conduit avec la Russie et quelques États partenaires, l'ILRS (pour *International Lunar Research Station*). Portés par l'engouement des deux grandes puissances spatiales du moment, d'autres pays se sont lancés dans la nouvelle course à la Lune : parmi eux le Japon, ou encore l'Inde, et sa mission réussie *Chandrayan-3* en août 2023. On compte également toute une série de missions lunaires privées, parfois liées au programme Artémis, incarnées notamment par les missions des start-ups *iSpace* ou *Intuitive Machines*.

Dans ce contexte, **l'Europe spatiale n'est pas absente – mais pourrait être davantage présente**. Des coopérations existent avec le programme *Artémis*, ainsi qu'avec le programme du *Lunar Gateway* (la future station orbitale lunaire), tandis qu'une assistance technique est parfois fournie aux autres missions lunaires. L'Europe spatiale apporte également sa contribution via le module *Orion* et s'est engagé au développement du lander *Argonaut*. L'ESA et le CNES ont également participé à la dernière mission chinoise vers la face cachée de la Lune, *Chang'e-6*, au printemps 2024.

La particularité des nouveaux programmes lunaires réside dans la **volonté affichée** d'y établir des bases en expansion durable, c'est-à-dire **une présence permanente et habitée**. On retrouve également le pro-

jet d'utiliser les ressources présentes sur la Lune à des fins d'utilisations locales au service des missions lunaires dans une dynamique d'**In-situ Space Resources Utilisation (ISRU)**. Ces programmes lunaires sont envisagés comme des programmes de long terme, avec un **déploiement progressif** qui devrait se pérenniser. Dans sa configuration actuelle, le programme Artémis a pour objectif huit missions qui se dérouleront sur la décennie 2030. Il faut toutefois considérer avec prudence cette ambition d'un déploiement au long cours. Outre que les programmes lunaires passés portaient déjà cette ambition, le maintien sur le temps long de programmes lunaires aussi coûteux supposera soit l'engagement permanent des États (surtout dans une dynamique post-ISS), soit le développement d'un modèle économique permettant une autre répartition des coûts.

Cette incertitude prise en compte, la course à la Lune a en tout état de cause repris et bat son plein. Toutefois, elle a la particularité de se déployer dans une époque particulièrement marquée par les bouleversements environnementaux, le changement climatique d'origine humaine et le dépassement des limites planétaires. **Les images de lancement occupent désormais l'espace médiatique en même temps que les images de catastrophes environnementales**. Un parallèle qui interroge le grand public comme les acteurs du monde spatial, et ce tandis que ces derniers s'inscrivent dans une dynamique de décarbonation de leurs activités. **Les programmes lunaires ne peuvent s'affranchir de se confronter à leurs impacts climatiques et sociaux. Un questionnement qui doit tenir compte des stratégies humaines pour atténuer le changement climatique et s'y adapter à court et moyen terme**. Une réponse à ces interrogations peut se déployer sur deux axes : une formalisation de la stratégie européenne pour l'exploration de la Lune centrée exclusivement sur la science spatiale d'une part ; une politique de réduction de l'empreinte environnementale des activités spatiales en général, d'autre part.

Comme tous les grands systèmes et infrastructures techniques (toutes proportions gardées), **le spatial**

a une empreinte environnementale et des conséquences sur le plan écologique. De l'extraction de ressources pour la fabrication des composants spatiaux en passant par les pollutions liées aux sites de lancement jusqu'aux lancements eux-mêmes avec leurs effets sur l'atmosphère et enfin l'importante question des débris spatiaux, **les points à étudier sont nombreux ; et ce tout au long du cycle de vie.** Pour autant, comme le soulignent de nombreuses sources, **l'étendue exacte de l'empreinte environnementale en matière spatiale demeure encore inconnue et reste à quantifier.** Les acteurs publics et privés du secteur ont commencé à réfléchir sur des méthodes de quantification et de limitation de cette empreinte¹. Un travail sur le volet technique est donc en cours, comme en témoignent les politiques du CNES et de l'ESA². En matière spatiale néanmoins, les véhicules, les combustibles et les procédés sont divers et sont produits unitairement ou en petite série, ce qui pourra demander **des logiques de réduction d'impact adaptées.**

En plus d'être technique, le problème est aussi éthique et politique. Le grand public s'interroge sur la légitimité et sur les usages en matière spatiale. Le questionnement n'est pas nouveau : on pense notamment, déjà, aux critiques sévères à l'encontre du programme Apollo en son temps. Elles portaient notamment sur la légitimité sociale du programme lunaire américain, notamment son coût, dans un contexte politique marqué par les inégalités sociales.

La question éthique et politique se renouvelle à l'heure d'une intensification massive des activités spatiales en lien avec le *New Space*³. Ce phénomène, qui se traduit notamment par une accélération des rythmes de lancement, a lieu alors que d'année en année, les effets de l'anthropocène se déploient et que les évaluations des investissements importants mais nécessaires pour atténuer les changements climatiques se confirment. L'investissement public en matière spatiale peut alors se retrouver mis en concurrence avec d'autres postes de dépenses plus prioritaires. Dans un contexte de restriction budgétaire et de forte demande sociétale de réduction des inégalités, la question de la légitimité sociale des projets spatiaux devra faire l'objet d'arbitrages politiques.

Aussi, sous ce terme de « **légitimité sociale** », plusieurs éléments sont questionnés :

- **Le coût financier des programmes lunaires,** supportés collectivement alors que des investissements dans la lutte contre le changement climatique trouvent parfois difficilement leurs budgets. D'où une interrogation à mener quant à la priorisation des programmes spatiaux.

- L'empreinte environnementale des activités spatiales comme **externalité négative supportée la collectivité, sans que celle-ci ne bénéficie toujours complètement des externalités positives liées à son développement**⁴. L'exemple caricatural, quoique marginal pour l'instant, est alors celui du tourisme spatial.

C'est de la confrontation entre les nouvelles ambitions lunaires et les exigences environnementales de l'époque que traite cette note. Elle dresse un panorama des enjeux, mais n'a pas pour ambition de fournir une étude quantifiée de l'empreinte environnementale en matière lunaire. Son objectif est davantage de **souligner des points d'attention,** à l'heure où l'Europe et ses États dessinent leurs engagements lunaires et inscrivent leurs activités spatiales dans une trajectoire de décarbonation.

Nous procéderons en deux temps : après avoir présenté les enjeux environnementaux en matière spatiale en général, tant sur le volet technique que le volet politique (PARTIE 1), nous traiterons plus particulièrement des ambitions lunaires (PARTIE 2).

Deux raisons justifient ce choix d'aborder en premier lieu la question environnementale des activités spatiales dans leur globalité, avant d'aborder le cas plus spécifique de la Lune. D'une part, les activités lunaires sont des activités spatiales, et les objets et charges utiles qu'elles utilisent quittent la Terre par le même biais que tout objet spatial⁵. D'autre part, l'étude de l'empreinte environnementale des ambitions lunaires ou de l'exploration spatiale *per se*, est un champ moins développé que l'étude de cette même empreinte du secteur spatial *en général*. **Mais il y a fort à parier que des leçons du général, le secteur spatial, trouvera un intérêt majeur pour le cas particulier, la Lune.**

1 La première empreinte carbone du secteur spatial français sera publiée en novembre prochain dans le cadre de la feuille de route de décarbonation de la filière française (réalisation Carbone4).

2 Voir Intermède, *infra*.

3 Deux phénomènes aisément mesurables par l'augmentation importante du nombre de lancements et *ipso facto* d'objets lancés, quoique du fait de quelques acteurs seulement

4 Hormis les cas d'applications devenues indispensables au quotidien des citoyens : météo, géolocalisation, connectivité, etc.

5 Une nuance toutefois : si, certes, les engins lunaires sont avant tout des systèmes spatiaux lancés à l'instar d'autres depuis la Terre, les efforts énergétiques pour les amener sur leur trajectoire puis à destination sont bien supérieures à ceux nécessaires pour une mise en orbite terrestre.

Partie 1 / L’empreinte environnementale des activités spatiales : vue d’ensemble

A. LE VOLET ÉTHIQUE ET POLITIQUE

Les bénéfices apportés par les activités spatiales sont nombreux. De l’observation de la Terre, des évolutions de son climat et de sa géophysique, aux connexions satellitaires et à la géolocalisation, les applications spatiales connaissent une accélération de leur utilisation et une diversification croissante. « *Les systèmes spatiaux tiennent une place de plus en plus importante dans la vie quotidienne des sociétés modernes* »⁶, au point d’ailleurs qu’on puisse caractériser une certaine **dépendance à ces applications et services**. Cette dépendance est d’autant plus critique qu’elle repose pour l’essentiel sur des infrastructures particulièrement fragiles, les satellites.

Un contexte de transformation

Au tournant du 21^e siècle, le secteur spatial a connu une intensification majeure de ses activités, caractérisée à la fois par une augmentation du nombre d’acteurs et du nombre de lancements. Cette nouvelle économie spatiale, dont le *New Space* est une des composantes, a ainsi participé à l’augmentation du nombre d’objets en orbite. D’une centaine d’objets par an lancés en moyenne jusqu’aux années 2010, le nombre s’établit désormais à quelques milliers, avec plus de deux mille objets lancés pour la seule année 2022⁷. Corrélativement, **cette intensification des activités du secteur spatial se manifeste aussi par une augmentation du nombre d’applications développées grâce aux satellites : chaque mois apporte son lot de nouveaux usages du spatial, liés à la connectivité, à l’observation de la Terre et à la géolocalisation**. Enfin, le secteur spatial s’engage vers de nouveaux champs de développement technologique à l’instar du service en orbite et de la fabrication en orbite (*in orbit servicing* et *in orbit manufacturing*). Si le constat n’est pas homogène, la transformation du secteur est structurelle, et sa croissance est dynamique et prometteuse, **même s’il convient d’appréhender avec beaucoup de précautions⁸ les perspectives économiques annoncées⁹**.

6 Brachet Gérard, « Les enjeux d’un développement durable des activités spatiales : », in *Géoéconomie*, no 2, n° 61, 1 avril 2012, p. 95-106.

7 l’essentiel de cette augmentation étant lié au lancement de méga-constellations de satellites, en particulier de la constellation *Starlink* de Space X.

8 Notamment du fait de périmètres et d’outils d’analyse variant grandement d’une étude à l’autre.

9 On peut se référer, par exemple, au rapport PwC Space Practice 2024 qui compare différentes estimations de banques et de cabinets de conseil. Voir : *Main Trends and Challenges in the Space Sector*, PwC, 2024.

Le thème du questionnement des usages

Le débat récent sur l’empreinte environnementale des activités spatiales est marqué par un thème récurrent : le questionnement des usages. Sous cette rubrique, se trouve la double interrogation de l’utilité sociale et du coût environnemental des nouveaux projets spatiaux. Les acteurs et les observateurs du secteur spatial, notamment au sein du groupe de travail, font état de la pression accrue de la part de la société civile sur la question de l’utilité sociale des activités spatiales. Le thème gagne également la Station spatiale internationale et ses astronautes quand, dans une interview récente, Thomas Pesquet s’interroge : « *quand on a une activité comme la mienne, avec un impact environnemental certain, on se demande si c’est acceptable* ». Le tourisme spatial et sa médiatisation, ainsi que la polarisation du débat autour de la figure archétypale du « *space milliardaire* » tend à cliver davantage encore le débat occultant ainsi les applications jugées plus utiles du secteur spatial ; mises sur le même pied que des projets qui le seraient l’être moins.

Un rapport récent, mené par l’association *Pour un réveil écologique*¹⁰ accorde une place importante au questionnement des usages et fournit des pistes pour le conduire. Le rapport commence par affirmer qu’« *au vu des conséquences à venir du changement climatique et de l’urgence à l’atténuer, il est primordial de réorienter dès à présent le secteur spatial* », et les auteurs de poursuivre : « **pour amorcer cette réorientation, toute décision de développement de projet doit intégrer, au même titre que sa dimension financière et économique, son impact environnemental et son utilité sociétale.** Pour cela, il faut généraliser l’usage des études coût bénéfiques (...). Cet outil doit être utilisé aussi bien pour les investissements publics que par les entreprises lors du choix de nouveaux marchés ». **Ce questionnement des usages doit aussi s’étendre au secteur aval des activités spatiales – c’est-à-dire les activités menées au moyen des données obtenues par les objets spatiaux, ou développées à partir d’eux.** Pour le rapport précité, questionner les usages en la matière suppose de « *mesurer les émissions des quantités astronomiques de données satellitaires dont le traitement et le stockage consomment énormément d’énergie* » et « *au-delà des données, les satellites rendent possibles des applications nécessitant un grand nombre de terminaux qui n’auraient pas vu le jour autrement : il est grand temps de considérer l’usage final qui peut changer du tout au tout l’ordre de grandeur de l’impact d’un projet* ». Plus largement, **l’analyse socio-économique (dont l’analyse coûts-bénéfices est un outil) est une mé-**

10 *Secteur Spatial : Rapport complet*, op. cit.

thodologie à solliciter pour consolider l'adéquation entre des projets d'envergure et l'évolution de la société.

Les enjeux du questionnement des usages portent aussi sur sa conduite institutionnelle. Les grandes orientations stratégiques des États en matière spatiale sont généralement prises par les acteurs eux-mêmes, sans consultation ou presque des citoyens ou des politiques ; les décisions étant généralement prises au sein des ministères et des agences concernées. En France, la gouvernance institutionnelle du spatial s'est renouvelée à la faveur de la réorganisation des tutelles ministérielles du secteur en juillet 2020 ; dans un double mouvement de soutien à la souveraineté économique (via le ministère de l'économie) et à l'autonomie stratégique (via la création du Commandement de l'espace¹¹). Toutefois, le spatial demeure peu présent dans le débat public. Récemment, un rapport parlementaire sur l'avenir de l'industrie spatiale française préconisait l'instauration d'un *Conseil National de l'Espace*. Sur cette idée, s'en est greffée une seconde, celle d'associer à ce futur conseil un organe de consultation démocratique sur les ambitions spatiales, pouvant s'inspirer des modalités de la Convention Citoyenne sur le Climat. **Un travail récent souligne l'importance d'associer au questionnement des usages, cinq composantes de la société civile : les gouvernements, l'industrie, les acteurs environnementaux (associations, cabinets, ONG, etc.), la société civile et le monde académique¹².** Il faut également noter le rôle majeur que peuvent jouer les consultations démocratiques : **elles constituent aussi un levier de sensibilisation et d'acculturation majeur**, deux éléments d'importance capitale à l'heure où les activités spatiales prennent une importance grandissante dans la vie des citoyens ; et où la culture scientifique et technique semble faire de plus en plus défaut.

Géopolitique environnementale, géopolitique spatiale

Ce questionnement sur les usages est d'autant plus important dans un monde aux ressources naturelles et budgétaires de plus en plus contraintes. À mesure que le changement climatique déploie ses effets, intensifiant la pression financière pour les États¹³, et que la demande en ressources naturelles (métaux rares, lithium, etc.) croît en lien avec la transition énergétique, chaque orientation, chaque nouveau projet technologique, fait

véritablement figure d'arbitrage. **Dans ce contexte, et face à l'intensification des activités spatiales, ces dernières vont se retrouver mise en concurrence avec d'autres dépenses, et d'autres besoins en ressources naturelles ; et ce d'autant plus que les chaînes d'approvisionnement et de valeur des activités spatiales sont mondiales.** C'est là que la géopolitique environnementale rejoint la géopolitique spatiale ; et ce d'autant plus que la pression accrue sur les ressources va également contribuer à tendre le contexte actuel et à impacter les grandes coopérations technologiques.

Par ailleurs, **la géopolitique spatiale se reconfigure avec l'arrivée de nouveaux acteurs, qu'ils soient étatiques ou privés. L'Europe est mise au défi de se maintenir à niveau : la crise récente des lanceurs l'a très bien montré.** L'engagement spatial continental existe : l'Europe demeure un acteur majeur du spatial, aux compétences et savoir-faire historiques et reconnus, ainsi qu'au tissu de coopération fourni. Mais du point de vue géopolitique, l'Europe spatiale est défiée par ses partenaires internationaux. Économiquement d'abord par les États-Unis, dans le cadre de la nouvelle économie spatiale. Technologiquement ensuite par les États-Unis et la Chine, dont les agendas spatiaux sont des plus fournis. L'Europe spatiale est en cours de recomposition, dans une période post sommet de Séville en novembre 2023, dont l'écho devrait se faire entendre lors de ministérielle de 2025.

Nous sommes face à une compétition nouvelle pour l'accès à l'espace. **Dans un monde multipolaire qui n'est pas complètement coopératif, l'espace est (re)devenu un terrain d'expression de la puissance, aussi bien civile que militaire.** Or, les ambitions spatiales et leur réalisation sont prioritairement fondées sur une série de capacités techniques. Certes, la nouvelle économie spatiale vient quelque peu modifier les façons dont un État devient un État spatial : il est désormais plus facile de faire lancer, par des acteurs divers et avec un coût par kilo réduit, des objets spatiaux achetés sur étagère, sans nécessairement avoir à développer en autonomie un programme spatial complet¹⁴. **Mais les fondements techniques de la puissance spatiale demeurent et seule la compétence compte.**

Dès lors que des États puissants en matière spatiale décident d'axer leurs politiques spatiales sur certaines grandes ambitions, il est important que les autres puissances spatiales le prennent en compte ; non pas nécessairement pour s'aligner entièrement, ni lancer des programmes par pur mimétisme, mais pour ajouter à leurs politiques spatiales un ou plusieurs volets liés aux dites ambitions. Appliqué au cas de la Lune, le constat serait le suivant : **partant du principe que Chinois et Américains visent notre satellite naturel pour y développer des**

¹¹ Le Commandement de l'espace est à la fois un commandement de l'Armée de l'Air et de l'Espace et un commandement interarmées, créé en 2019 et qui renforce la défense spatiale française en fédérant et en coordonnant tous les moyens consacrés au domaine spatial de défense.

¹² Pulsiri Nonthapat et Paulino Victor Dos Santos, « The green path to space sustainability: Twenty years of research », in *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*, no 3, vol. 22, 1 janvier 2024, p. 299-318.

¹³ Voir, à ce titre, le dernier rapport public annuel de la Cour des comptes. : *L'action publique en faveur de l'adaptation au changement climatique*, Cour des comptes, « Rapport public annuel », 2024.

¹⁴ Gaillard-Sborowsky Florence, *Géopolitique de l'espace : à la recherche d'une sécurité spatiale*, Paris, le Cavalier bleu, « Géopolitique de... », 2023, 205 p. Page 75s.

programmes et des compétences nouvelles¹⁵, il est important pour l'Europe d'avoir la Lune dans son champ programmatique. De là, libre à elle d'y développer un programme aux dimensions et au contenu propre, à la condition d'y avoir un accès autonome dans le futur. L'idée n'est pas de copier les programmes lunaires concurrents, ni même d'ailleurs d'avoir un engagement d'un niveau égal. Il s'agit plus simplement d'être présent et actif, et donc d'avoir accès à la Lune pour y réaliser un certain nombre de missions, et de développer quelques applications permettant de coopérer avec d'autres puissances, service contre service afin de ne pas obérer l'avenir lunaire de l'Europe.

La question qui se pose alors est celle de la mise en balance des impératifs géopolitiques et des exigences environnementales. Les avis divergent au sein du groupe de travail car figure également la possibilité d'une mise en adéquation des deux pôles du débat, espace et environnement, par des choix programmatiques assumés pour les ambitions spatiales : focus scientifique des missions, programmes sobres, bénéfiques Terre-Espace comme principe de toutes les missions, amélioration de la durée de vie des objets spatiaux, engagement dans des proportions raisonnables ; voire, le choix assumé de ne pas s'engager sur certaines voies d'exploration.

Il faut avoir un regard honnête sur le résultat d'une telle équation ; qui penche presque toujours du côté de l'impératif géopolitique au détriment des trajectoires de diminution de l'empreinte du secteur.

Pour autant, une autre voie reste envisageable. Tout en servant des intérêts géopolitiques immédiats, l'exigence environnementale peut être l'occasion pour notre continent de réfléchir à un modèle européen des activités spatiales plus conforme aux ambitions environnementales mises en exergue par l'UE, notamment dans les champs de la responsabilité des entreprises et d'une réduction de l'empreinte environnementale de l'industrie européenne en général.

L'Europe pourrait s'investir dans un grand projet autour de l'amélioration de l'empreinte environnementale des objets spatiaux, ainsi que de nettoyage des orbites ; conjuguant alors ses ambitions environnementales avec un levier d'innovation différenciant, à même d'accroître sa compétitivité économique. **Cette invention d'un modèle spatial différent positionnerait sans doute mieux l'Europe dans un futur marqué par l'atteinte des limites planétaires dans tous les domaines.** La loi spatiale européenne (EU Space Law), attendue ces prochains mois¹⁶ qui

15 Il faut aussi constater que la « course » sino-américaine vers la Lune est immanquablement marquée par la rivalité terrestre actuelle de ces deux puissances. La géopolitique terrienne teinte alors les ambitions lunaires d'une dimension militaire et sécuritaire incontournable, en particulier autour de la protection des infrastructures stratégiques qui seront présentes sur la Lune.

16 À l'heure où cette note est finalisée, début octobre 2024, le texte du projet d'EU Space Law n'est pas encore paru.

devrait comprendre un volet durabilité, pourrait marquer une première étape.

In fine, le croisement entre le questionnement des usages spatiaux et les perspectives géopolitiques inclut une composante d'autonomie stratégique européenne. Dans un contexte spatial compétitif, l'Europe spatiale doit s'assurer de pouvoir servir ses besoins fondamentaux en matière d'accès à l'espace et de technologies orbitales et d'exploration. Cette autonomie est la seule à même de garantir à l'Europe la mise en œuvre autonome d'une politique spatiale propre.

La culture et les imaginaires spatiaux

Le spatial mobilise aussi les imaginaires ; et cette question n'est pas anodine dans la mesure où ces imaginaires imprègnent à la fois le secteur spatial, mais aussi ses dirigeants les plus charismatiques. La question est toute aussi importante si l'on prend en compte le fait que les imaginaires spatiaux sont aussi des lieux d'appropriation et d'acculturation au spatial.

Porté par les figures du *New Space*, un nouvel imaginaire occupe le devant de la scène. Il est imprégné par les idées d'évasion planétaire, d'espèce à plusieurs planètes, de déplacement d'une quantité substantielle de population hors de la Terre, pour faire de celle-ci au mieux un havre naturel préservé, au pire une usine à ciel ouvert. Les déclarations tonitruantes des deux figures majeures de la nouvelle économie spatiale, Elon Musk et Jeff Bezos, vont dans ce sens. Cet imaginaire spatial, et plus particulièrement le thème de la planète B et du long-termisme¹⁷ entre en contradiction frontale avec l'idée de protéger aujourd'hui et pour les dizaines d'années à venir les plus de huit milliards d'humains déjà présents sur la planète A. **Plus largement, la rupture semble consommée entre ceux favorables à la protection de la Terre et de ses habitants face aux effets du changement climatique et ceux pour qui l'espace permet de s'affranchir des limites planétaires¹⁸.**

A contrario, pourtant, le spatial, et en particulier le spatial européen, pourrait être le lieu de l'expression de nouveaux modes de rapports à l'espace et à la planète, dans la droite ligne de l'*overview effect*¹⁹ ; à condition toutefois de mettre suffisamment de moyens sur la table pour la mise en œuvre des projets porteurs de ce nouvel imaginaire.

17 Le long-termisme est une théorie philosophique qui priorise l'amélioration du bien-être de l'humanité future, sur le long-terme, plutôt que l'accompagnement du bien-être de l'humanité du temps présent.

18 dont celles quantifiables en tonnes de CO₂eq admissibles dans notre atmosphère et dont les limites sont imposées par l'Accord de Paris.

19 On désigne par cette expression l'effet de surplomb produit par la mise en perspective de la situation de la Terre vue depuis l'espace, notamment via les premiers clichés pris en orbite. Notre planète est alors perçue dans son ensemble, dans sa fragilité et dans sa position solitaire dans l'espace, à peine protégée par une fine atmosphère.

Ces nouveaux imaginaires pourraient s'incarner dans la promotion **d'une technologie spatiale orientée autour de la connaissance scientifique, de notre planète et de l'espace, de la préservation de l'environnement, terrestre et spatial**. Ce serait aussi le cas avec une promotion, et une mise en œuvre effective du point de vue politique et juridique, du concept d'espace comme bien commun. L'Europe y aurait un terrain de singularité, et un fort facteur d'attractivité pour ses coopérations internationales.

Tandis que les ambitions lunaires américaine et chinoise s'érigent en pôle de coopération spatiale internationale – il suffit, pour s'en convaincre, de regarder la carte répartissant les partenaires Artémis et les partenaires ILRS – l'Europe spatiale pourrait s'ériger en troisième pôle de coopération, en regardant vers d'autres partenaires pour l'exploration spatiale : des partenaires tels que l'Inde, ou des Etats africains. La science spatiale est un outil de diplomatie reconquise et d'avenir.

Au fond, ce qui est ici en jeu, c'est la question d'un narratif différenciant et positif autour de la place de l'Europe et de son identité particulière dans l'écriture et la construction du futur. Car l'espace est aussi une fenêtre ouverte sur le *demain* européen : le spatial est parmi les grands projets de construction d'un imaginaire continental, mobilisant les valeurs, la fierté et l'attractivité européenne. **Dans l'espace, l'Europe écrit aussi son propre récit.**

B. LE VOLET TECHNIQUE

La rencontre entre les activités spatiales et les exigences environnementales est aussi une affaire de technique. **Malgré des spécificités indéniables, le secteur spatial se retrouve confronté à des enjeux similaires aux autres secteurs industriels concernant sa décarbonation, son utilisation des ressources et sa dépendance aux énergies fossiles.** C'est ce qu'a rappelé le précédent ministre de l'Économie et des finances dans une lettre qu'il a envoyé à Philippe Baptiste, PDG du CNES, le 17 novembre 2023. Le secteur spatial se voit désormais pressé d'améliorer son empreinte environnementale, à la fois par les gouvernants et par la société civile : **alors que la nouvelle économie spatiale s'enrichit d'innovations techniques importantes, l'amélioration de l'empreinte environnementale du secteur spatial est aussi un défi d'ingénierie dont les retombées pourraient aller au-delà de ce seul secteur.**

Mieux évaluer l'empreinte terrestre, environnementale et climatique

Encore faut-il **connaître l'étendue de l'empreinte environnementale des activités spatiales ; or c'est un chantier encore en cours.** Pour reprendre une nouvelle fois la lettre ministérielle précitée, il pouvait être dit, l'année dernière encore que « *l'impact envi-*

ronnemental terrestre des activités spatiales n'a pas, à ce jour, fait l'objet d'une évaluation à l'échelle de l'ensemble de la filière » ; et la lettre de poursuivre « *dans un contexte de croissance sans précédent des activités de lancement, il est également urgent de mieux connaître la pollution, notamment de la haute altitude, générée par ces phénomènes* ». **Les activités spatiales sont en effet parmi les seules à avoir un impact environnemental dans les hautes couches de l'atmosphère**, et à ce titre, ont des effets spécifiques encore mal connus. Mais au-delà de ces effets hors CO2, le reste de l'empreinte environnementale du secteur spatial relève du relativement connu. En son sein sont regroupés différents éléments :

- L'extraction des ressources nécessaires à la fabrication des composants et systèmes spatiaux.
- Les émissions liées aux activités industrielles d'installations, de conception, développement, production, assemblage et test des systèmes spatiaux.
- Les émissions liées à la logistique.
- La pollution des milieux, en particulier : la pollution de l'eau lors de la retombée océanique de certains composants, la pollution des sites de lancement (v. notamment, le bras de fer entre SpaceX et les autorités environnementales américaines), la pollution des hautes couches de l'atmosphère, au décollage ou lors de l'érosion thermique des matériaux lors de la rentrée atmosphérique, etc.
- L'impact sur la biodiversité aux abords des sites de lancement, dont l'artificialisation de sols se trouvant généralement dans des zones reculées et parfois préservées.
- La pollution électromagnétique.
- La pollution atmosphérique : à travers, notamment, des particules émises lors du décollage des fusées.
- La pollution lumineuse : notamment due aux méga constellations, et qui brouillent les observations astronomiques.
- L'impact sur l'évolution climatique *per-se* qui se décompose en deux volets : les effets des gaz à effets de serres émis dans toutes les couches lors du lancement, mais aussi, en amont, lors de la production ; les effets "non-CO2", non assimilables aux gaz à effet de serre, incluant l'émission de particules en haute atmosphère comme l'alumine, la suie, les oxydes d'azote, etc.

Les spécificités du secteur spatial

Le secteur spatial comporte quelques spécificités notables, qui compliquent l'analyse de son empreinte environnementale. Dans d'autres industries, la production en série de centaines de composants identiques facilite l'évaluation de leur impact sur l'entière durée de leur cycle de vie (ACV, pour analyse cycle de vie). Ce type d'analyse prend en compte les impacts de l'objet lors de : l'extraction des matières premières, la conception de l'objet, sa fabrication et tous les effets collatéraux, son transport, son usage et sa fin de vie avec son potentiel recyclage. **En plus d'être**

multi-étapes, l'ACV est également multicritères : différents points seront analysés, comme l'impact sur l'ozone, la santé humaine, le bilan radiatif, etc.

Comme le souligne un rapport récent²⁰, les ACV connaissent des limites en matière spatiale, du fait de certaines spécificités du secteur²¹ :

- *Spécificité des impacts* : le secteur spatial est le seul qui émet dans toutes les couches de l'atmosphère.
- *Spécificité des composants* : produits en très petite quantité, et avec des compositions qu'on ne trouve pas dans d'autres secteurs. Les composants de lanceurs et des objets spatiaux doivent en effet fonctionner sous des contraintes assez uniques, ce qui nécessite de développer des matériaux, des technologies et des architectures adéquates, dont l'impact est difficilement sérialisable.
- *Spécificité des chaînes de valeur* : une fois qu'un satellite est lancé, les moyens d'intervention sont limités (possible sur les modifications de logiciels, mais à un coût prohibitif pour une intervention technique directe). Le développement de services en orbite plus abordable pourrait toutefois permettre d'améliorer la durée de vie des objets spatiaux.
- *Spécificité des milieux* : l'espace est un milieu unique, notre impact sur ce dernier est en cours d'appréhension – cette spécificité des milieux se retrouve notamment dans la thématique des débris spatiaux.

Historiquement, à cause de ses spécificités et de sa faible intensité alors, l'industrie spatiale a été « omise » des protocoles contraignants comme celui de Montréal, signé en 1987 face à un alarmant constat de dégradation de la couche d'ozone. De ce fait, le problème de manque d'outils est resté latent, faute d'incitations à développer ces derniers²².

Aujourd'hui, **le New Space apporte des changements**, dans les cadences et dans les échelles (avant Starlink, la plus grande constellation contenait 95 satellites, pour 42000 prévus chez la première), mais aussi parfois sur des plans plus *structurels* : **le développement des micro/minisatellites et des composants sur étagère utilisés dans leur fabrication, apportent un semblant de fabrication « à la chaîne » qui devrait faciliter l'ACV de ces objets.** En outre, le pilier environnemental de la future *EU Space Law* devrait comprendre une méthodologie d'ACV spécifique au secteur spatial. C'est en tout cas, pour l'instant, l'ambition affichée²³ ; qui permettrait d'avoir un cadre unifié d'analyse de l'empreinte.

20 *Secteur Spatial : Rapport complet, op. cit.*

21 Ces spécificités mises à part, le secteur spatial a des impacts normaux d'un fonctionnement standard d'une activité industrielle (chauffage, eau, électricité, logistique, etc.)

22 Miraux Loïs, Wilson Andrew Ross et Dominguez Calabuig Guillermo J., « Environmental sustainability of future proposed space activities », in *Acta Astronautica*, vol. 200, novembre 2022, p. 329-346.

23 https://defence-industry-space.ec.europa.eu/newsroom/consultations/targeted-consultation-eu-space-law_en

Deux cas emblématiques de pollution spatiale

Deux cas emblématiques de pollution spatiale méritent une attention particulière : l'empreinte environnementale en haute atmosphère, les débris spatiaux.

Avant de les aborder, il faut noter que d'autres cas de pollution spatiale auraient pu être évoqués ; parmi lesquels deux ressortent davantage. Il y a d'abord la pollution générée par les sites de lancement spatial et leur impact sur leur environnement immédiat. L'enjeu avait été particulièrement souligné lors des premières tentatives de lancement du vaisseau Starship de Space X depuis le site de Boca Chica. Il avait alors fallu attendre l'autorisation des autorités américaines pour poursuivre les opérations, les dommages sur la faune et la flore environnant étant avérés. Le second cas, pour lequel nous disposons de moins de documentation vise l'extraction de ressources naturelles, et notamment minières, pour la fabrication de composants et d'objets spatiaux. C'est une piste importante à explorer dans la mesure où une pression accrue est constatée ces dernières années sur les chaînes d'approvisionnement en minerais, minéraux et terres rares²⁴.

Empreinte environnementale en haute atmosphère

— L'impact sur la couche d'ozone

L'un des éléments importants de l'empreinte environnementale des activités spatiales mais également le plus complexe à évaluer, se situe dans l'appréciation des effets sur la haute atmosphère, et en particulier la couche d'ozone.

La couche d'ozone, située entre 15 et 35 kilomètres d'altitude, protège des rayons ultra-violet du soleil, et partant, les conditions de vie sur Terre. Son importance est telle que sa dégradation constitue l'une des neuf limites planétaires définies par l'Institut de Stockholm. La couche d'ozone avait déjà été menacée jusqu'aux années 1970, période à partir de laquelle ont été bannies les *Ozone-Depleting Substances* (ci-après, les ODS). Mentionner le cas de ces substances dépasse le seul intérêt historique puisque, schématiquement, la façon dont les résidus de combustion des fusées dégradent la couche d'ozone peut se comparer aux effets des ODS.

Un rapport de l'association météorologique internationale estimait en 2018 que les lancements de fusées seraient responsables de 0,1% (rapportées aux émissions totales) de la dégradation de la couche d'ozone. D'autres études partent plutôt sur une contribution plus importante de 0,78% pour Wilson, par exemple²⁵.

24 Voir par exemple : Izoard Celia, *La ruée minière au XXIe siècle: enquête sur les métaux à l'ère de la transition*, Paris, Éditions du Seuil, « Écocene », 2024.

25 L. Miraux, A.R. Wilson et G.J. Dominguez Calabuig, « Environmental sustainability of future proposed space activities », art cit.

Toutefois, le nombre de lancements de 2018 est incomparable avec celui de 2024 ; l'intensification des lancements laissant présager un impact plus important aujourd'hui. Certains estiment qu'il pourrait être jusqu'à dix fois plus grand en 2050²⁶. Il pourrait atteindre jusqu'à 6% de la contribution totale²⁷.

Sans apporter complètement de solutions pour l'instant, les conséquences de l'augmentation des lancements, **des évolutions techniques pourraient réduire les effets sur la haute atmosphère**. Les ergols liquides, par exemple, émettent moins de réactifs chimiques que les ergols solides et pourraient réduire l'impact atmosphérique jusqu'à un facteur 10²⁸. Se pose alors la problématique de plus faible coût et de simplicité de la solution ergols solides par rapport aux avantages environnementaux et à l'impulsion spécifique plus grande des ergols liquides.

À côté des lancements, se pose à l'autre extrémité de l'opération spatiale, la question des conséquences de la désorbitation des satellites. Celle-ci entraîne une augmentation de la teneur en particules métalliques dans la stratosphère ; le CNES commence à financer des thèses sur le sujet.

— L'impact des particules en haute atmosphère

Les hautes couches de l'atmosphère sont en général beaucoup plus stables chimiquement que la troposphère. Une particule comme un gaz à effet de serre émis dans ces couches y ont donc un impact davantage prolongé. Les ergols consommés pendant le lancement d'un satellite émettent différents types de particules résiduelles : de l'alumine (Al₂O₃), de la suie (BC, pour *black carbon*) ou encore des oxydes d'azote²⁹. L'alumine a un effet à la fois refroidissant en bloquant les rayonnements du soleil et réchauffant, en absorbant les rayonnements des couches plus basses. Mais le second effet l'emporte.

Il faut par ailleurs noter que les lancements produisent des niveaux d'émission de particule fortement variables selon la technologie utilisée³⁰.

En tout, on estime que les émissions de fusées contribueraient à un forçage radiatif, c'est-à-dire un surplus d'énergie emmagasinée par la Terre, de l'ordre

de 16+/-8 mW/m²³¹. Le CO₂ est négligeable quant à l'impact climatique atmosphérique des lancements³².

Les débris spatiaux

Bien plus encore que les effets atmosphériques, ce sont les débris spatiaux qui focalisent l'attention au sujet du spatial durable. **Car les orbites sont une ressource finie. En orbite, les satellites y évoluent selon les lois de la mécanique spatiale, et une fois sur leur trajectoire, ils sont susceptibles d'entrer en collision entre eux ou avec des débris lorsqu'aucun des deux objets ne peut effectuer de manœuvre d'évitement, ou lorsqu'un débris et sa trajectoire n'a pas été identifié.** Avec environ 9000 satellites actifs orbitant autour de la Terre, dont la majorité ont été lancés très récemment dans le cadre des projets de méga constellations, et plusieurs millions de débris spatiaux, l'occupation orbitale commence à être tendue. Les scénarios dignes du film hollywoodien *Gravity*, ou la procédure d'urgence récemment activée à bord de l'ISS à la suite d'un tir de missile antisatellite ayant lui-même généré son lot de débris sont emblématiques, même si leur probabilité reste faible... pour l'instant. **D'ailleurs, les moyens importants déployés pour cartographier et suivre ces débris jouent un rôle majeur dans la sécurisation du trafic spatial.** Mais un événement de collision qui générerait à son tour de nouveaux débris en chaîne n'est pas une issue improbable. D'ailleurs, l'hypothèse est connue depuis longtemps : c'est le syndrome de Kessler. Ainsi, ce sont une série d'orbites qui pourraient alors devenir inexploitable pendant longtemps. Un tel événement aurait des conséquences majeures et la perte importante de capacités satellitaire désorganiserait des pans entiers de la société, de la finance aux transports, de la sécurité nationale à la météorologie en passant par les chaînes logistiques.

S'agissant de la mitigation des débris spatiaux, les champs d'action se déploient tant au passé qu'au futur, avec la réduction des débris existant et la réduction des débris futurs. Les solutions du premier champ sont particulièrement coûteuses et l'approche pollueur/payeur pour les actions passées est difficile à faire passer. Pour les débris futurs, une amélioration du cycle de vie des satellites, leur réparabilité, leur recyclage, et le fait de lancer moins d'objet pourraient améliorer la situation. Cet aspect comporte également un volet cybersécurité, afin d'augmenter la résilience des satellites en cas d'attaques et d'améliorer leur durée de vie et leur continuité d'activité en cas de crise. L'effort est aussi juridique, les lois spatiales nationales pouvant conditionner davantage encore leurs autorisations de lancement à un cahier des charges exigeant en matière de durée de vie des satellites. La passivation des satellites en fin

26 Miraux Loïs, « Environmental limits to the space sector's growth », in *Science of The Total Environment*, vol. 806, février 2022, p. 150862.

27 L. Miraux, A.R. Wilson et G.J. Dominguez Calabuig, « Environmental sustainability of future proposed space activities », art cit.

28 Ross Martin, Toohey Darin, Peinemann Manfred, et al., « Limits on the Space Launch Market Related to Stratospheric Ozone Depletion », in *Astropolitics*, no 1, vol. 7, 5 mars 2009, p. 50-82.

29 Ross Martin, Mills Michael et Toohey Darin, « Potential climate impact of black carbon emitted by rockets », in *Geophysical Research Letters*, no 24, vol. 37, décembre 2010.

30 L. Miraux, « Environmental limits to the space sector's growth », art cit.

31 Ross Martin N. et Sheaffer Patti M., « Radiative forcing caused by rocket engine emissions », in *Earth's Future*, no 4, vol. 2, avril 2014, p. 177-196.

32 Ross Martin N. et Sheaffer Patti M., « Radiative forcing caused by rocket engine emissions », in *Earth's Future*, no 4, vol. 2, avril 2014, p. 177-196.

de vie, pour éviter les explosions intempestives (extinction des batteries, vidange des réservoirs, etc.), la libération des orbites (rentrée atmosphérique ou placement sur une orbite cimetièrre) et la limitation de certains matériaux autorisés au lancement pourraient être exigées.

L'ESA peut se targuer d'être précurseur en matière de gestion des débris spatiaux. Elle avait lancé dès 2008 des lignes directrices sur la réduction des déchets spatiaux, et publie tous les ans un *Space environment report*, qui est une référence en la matière. Elle compile ainsi des données sur les objets spatiaux en orbite et les risques associés. Ainsi, on remarque que le nombre d'événements de fragmentation, ces événements générant des débris, augmente ces dernières années à onze par an en moyenne ; le risque principal venant à 65% des étages de lanceurs en orbite, et le reste du temps de charges utiles inactives (ESA, 2023). En outre, l'ESA, aux côtés d'autres agences nationales et d'acteurs du monde spatial, a signé une *Charte Zero Débris* lors du Salon Aéronautique du Bourget 2023.

Des trajectoires d'amélioration

De nombreux acteurs œuvrent à l'amélioration de leur empreinte environnementale en se lançant dans des trajectoires de décarbonation. Tel est le cas du CNES, mais aussi de l'ESA dont les deux politiques sont détaillées dans des encadrés à la partie suivante.

Les efforts se situent également du côté de la RSE et le reporting en la matière. **Certaines entreprises du secteur spatial sont en effet incluses dans le champ d'application de la *Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD)*³³**, entrée en vigueur à l'échelle européenne le 5 janvier 2023. Ce texte fixe de nouvelles normes et obligations pour le reporting extra-financier, afin d'encourager le développement durable des entreprises. Les informations collectées selon les exigences de la directive permettront de mieux évaluer l'impact des entreprises sur l'environnement. Plusieurs facteurs sont pris en compte, parmi lesquels les facteurs environnementaux, les facteurs sociaux et les facteurs de gouvernance. Les premiers reportings sont attendus pour 2025, s'agissant des entreprises déjà soumises précédemment à la SFRD. L'entrée en vigueur de la directive s'étale jusqu'en janvier 2026 (premier reporting 2027) pour les PME cotées en Bourse. **Avec le reporting extra-financier, la responsabilité sociale et environnementale des entreprises spatiales va donc être scrutée à la loupe.**

Mesure de l'empreinte environnementale terrestre

Le développement d'indicateurs de mesure de l'empreinte environnementale en matière spatiale est un enjeu majeur. L'indicateur le plus emblématique est celui du *Space Sustainability Rating (SSR)*. A la suite d'une initiative lancée lors du Forum Économique Mondial (WEF), il encourage la durabilité des opérations spatiales en attribuant un score aux missions spatiales en fonction de leur conception, mais aussi de leur gestion, avec un accent particulier sur la minimisation des débris spatiaux, et l'optimisation de l'utilisation de l'espace orbital. L'indicateur a été lancé dans l'idée de promouvoir des pratiques responsables dans un environnement spatial de plus en plus encombré. Toutefois, il reste assez récent, et encore à éprouver. Son succès se mesurera à l'aune de sa visibilité et de sa capacité à faire changer les comportements autant que par une avancée technologique concrète.

Sur le plan de mesure toujours, le pilier environnemental de la *EU Space Law* aurait pour objet d'intégrer le secteur spatial à la taxonomie européenne, et donc de qualifier de manière très précise les segments de production de biens et de services spatiaux contribuant à la lutte contre le changement climatique.

33 Le champ d'application de la directive élargit considérablement le nombre d'entreprises concernées par le reporting extra-financier jusqu'alors prévu par la SFRD. Elle concerne donc toutes les entreprises cotées en Bourse, et celles qui remplissent deux des critères suivants : plus de 250 salariés, 50 M€ de chiffre d'affaires ou 25M€ de total de bilan, soit près de 50 000 entreprises contre près de 12 000 précédemment.

Intermède : les politiques environnementales au sein des agences spatiales, cas de l'ESA et du CNES

Par leur centralité dans les écosystèmes spatiaux nationaux et continentaux, **les agences spatiales ont un rôle majeur à jouer pour engager le secteur sur une trajectoire de dé-carbonation**. Lors d'une conférence organisée par le GT Objectif Lune de l'ANRT, Andréa Vena, Chief Climate and Sustainability officer de l'ESA et Laurence Monnoyer-Smith, Directrice du Développement Durable au CNES sont venus exposer les politiques menées dans leurs agences.

Les deux textes qui suivent, de leurs plumes, décrivent lesdites politiques.

La politique environnementale du CNES Par Laurence Monnoyer-Smith

Le dérèglement climatique, l'effondrement de la biodiversité et l'épuisement des ressources constituent les principaux facteurs d'origine anthropique des phénomènes environnementaux extrêmes constatés aujourd'hui dans le monde. Alors que les scénarios du GIEC nous inscrivent potentiellement sur une trajectoire à +4°C, l'ensemble des acteurs industriels doivent contribuer à la diminution des émissions de gaz à effet de serre et à la réduction de leur empreinte environnementale.

Si le secteur spatial contribue à la connaissance de l'état de notre planète, en observant et en mesurant des variables climatiques avec une grande couverture, répétabilité, fidélité et précision, il doit néanmoins se transformer afin d'ancrer son activité dans les limites planétaires. Il est communément admis qu'actuellement le secteur spatial ne participe qu'à un faible pourcentage de l'empreinte environnementale mondiale anthropique. Pour autant, d'une part sa croissance exponentielle, notamment avec l'émergence du *newspace*, laisse entrevoir une augmentation significative de sa contribution à l'échelle planétaire dans un futur proche ; d'autre part, le secteur spatial constitue, par nature, la seule activité humaine affectant directement toutes les couches de l'atmosphère et au-delà, tout en contribuant à la pollution des terres émergées et des océans.

La position particulière du CNES au sein de l'écosystème spatial français l'oblige : entreprise publique et agence nationale, elle doit à la fois mettre en œuvre les politiques publiques de transition écologique et accompagner l'écosystème spatial dans sa trajectoire de réduction de son empreinte environnementale.

Le CNES, entreprise, prend toute sa part dans la lutte contre le changement climatique et s'inscrit dans les limites planétaires.

Pour entamer sa transition, le CNES s'est doté d'un certain nombre d'outils structurants. Il y a quelques années déjà, il s'est engagé dans une démarche d'amélioration continue de sa performance environnementale, illustrée par la certification ISO 14001³⁴ de son système de management intégré couvrant tous les sites et activités du CNES. Conscient de son rôle d'exemplarité demandé par l'Etat, il s'est engagé dans un plan de transformation écologique³⁵ à travers des politiques structurantes. Récemment, le CNES a réorganisé l'ensemble de sa politique environnementale afin

34 Système de management environnemental.

35 La circulaire « plan de transformation écologique de l'Etat » complète le dispositif administration exemplaire qui engage l'ensemble des administrations centralisées et déconcentrées ainsi que l'ensemble des agences d'Etat, Etablissements publics et entreprises, sur une trajectoire rigoureuse de diminution de leur empreinte environnementale, et les incite à des comportements socialement vertueux.

d'accélérer sa transition : désormais elle couvre 11 secteurs distincts³⁶ pour lesquels doivent être élaborés et mis en œuvre des feuilles de route spécifiques, comprenant à chaque fois un plan d'action, des indicateurs d'avancement, une gouvernance.

Ainsi, la stratégie bas carbone du CNES, adoptée en décembre 2022, en lien avec le plan de sobriété de l'Etat, décline un plan comprenant 53 actions visant à atteindre une contribution au zéro émission nette dès 2045. Des étapes importantes en 2030 prévoient une réduction des émissions des scopes 1 et 2 (S1 et S2) de 50% et de 30% pour le scope 3 (S3). Afin de suivre au mieux sa trajectoire, le CNES a décidé de réaliser un bilan d'émissions de gaz à effet de serres (BEGES) complet tous les 2 ans, et un bilan S1 et S2 tous les ans.

La politique énergétique du CNES vise à la fois la sobriété (diminution de la consommation), l'efficacité énergétique (amélioration des performances actuelles) notamment des bâtiments, et la sortie du fossile, en particulier en Guyane, qui représente près de 80% des émissions du S2. La construction en cours de 2 champs photovoltaïques et le lancement du projet Hyguane avec l'ESA visant à produire de l'hydrogène vert sur la base spatiale, traduisent la volonté du CNES d'en faire la première base spatiale à faible empreinte du monde.

La politique de mobilité professionnelle du CNES constitue également un axe fort de sa stratégie bas carbone : en réduction de 38% par rapport à 2019, les émissions liées aux déplacements professionnels sont compensées à 100% depuis 2023, et une contribution carbone de 100€ la tonne de CO2 permet également de financer des projets de transition internes³⁷. Le premier appel à projet récemment réalisé a permis de faire remonter une trentaine de projets dont 18 sont financés.

Par ailleurs, le CNES, responsable du patrimoine remarquable que constitue la biodiversité Guyanaise, a à cœur de la préserver, et s'efforce de limiter au strict nécessaire l'impact des infrastructures de tirs sur les 650 Km2 de la base dont il a la responsabilité, et au-delà sur l'ensemble de ce territoire d'outre-mer. Ainsi, le CNES est non seulement la seule entité publique à être reconnue « Entreprise engagée pour la nature »³⁸, mais également la première à créer une Obligation Réelle Environnementale³⁹ en territoire d'outre-mer, au centre spatial de Kourou.

Enfin, le CNES est également proactif : sans attendre d'être soumis à la CSRD (qui ne s'applique pas, pour l'instant, aux EPIC), il a décidé de s'engager dans le reporting dès 2025, avec la réalisation, dès cette année, d'une analyse en double matérialité qui en constituera le socle. De même, bien que non soumis à la loi PACTE, le CNES s'est doté d'un organe de gouvernance de niveau Conseil d'Administration, la Commission de durabilité, présidée par le PDG de l'IFREMER François Houllier, afin de rendre compte annuellement de la performance de sa politique RSE. Elle pourra s'appuyer sur sa « raison d'être » en cours de finalisation.

Le CNES, animateur d'un écosystème qui doit réduire son empreinte environnementale.

Le CNES a parfaitement conscience du rôle spécifique qui lui est dévolu pour accompagner son écosystème, ainsi que lui demande l'Etat dans le cadre de sa politique de planification.

Les achats publics du CNES (environ 1Md€ par an) constituent un levier important de la décarbonation du secteur spatial. La refonte de la politique achat du CNES, la publication de son Schéma de Promotion des Achats Socialement et Écologique-

36 Energie et carbone, mobilité, bâtiments et infrastructures, économie circulaire, eau, alimentation, achats, projets spatiaux, numérique, communication responsable, biodiversité.

37 Par exemple, pour X teq CO2 émis en déplacement professionnels, une somme de 100X€ est donc provisionnée pour les compenser et financer des projets de décarbonation. Cette incitation s'accompagne d'un objectif de diminution des émissions qui compte comme critère d'intéressement dans la rémunération des salariés.

38 Label d'Etat attribué par l'Office Français pour la Biodiversité

39 L'obligation réelle environnementale (ORE) est un dispositif foncier de protection de l'environnement. Ce dispositif permet à tout propriétaire d'un bien immobilier de mettre en place une protection environnementale à travers des actions en faveur de la biodiversité.

ment Responsable (SPASER) et la mise en place de formations visent à engager l'ensemble du secteur dans la transition. Tous les segments d'achats sont concernés par des spécifications qui doivent atteindre au minimum 15% de la note globale.

En outre, le CNES souhaite contribuer à la production de connaissances spécifiques au secteur spatial. L'outil OASIS permet ainsi d'établir, en un temps très limité, une première évaluation de l'empreinte d'un satellite, à partir d'une base de données de facteurs d'émissions enrichie régulièrement. Partagé et en libre d'accès, il sera complété par des outils sol et lanceurs en cours d'élaboration.

Les connaissances nécessaires à la réalisation d'Analyses de Cycles de Vie restent encore à produire, il a donc été décidé de démarrer des travaux de thèse sur les effets de la ré-entrée dans l'atmosphère, et nous assistons actuellement à une vraie mobilisation internationale des agences pour répondre aux questions touchant au forçage radiatif et à la pollution marine par exemple. Très complexes, ces travaux nécessitent beaucoup de temps, et sont indispensables pour affiner les modèles.

Rassemblés au COSPACE, les représentants du secteur spatial français ont également entamé cette année un travail d'ampleur visant d'une part à quantifier son empreinte carbone, mais également à définir l'ensemble des leviers permettant d'atteindre une contribution au zéro émission nette en 2050. Animé par le CNES à la demande du Ministre Bruno Le Maire, cette démarche conduira à la production d'une feuille de route qui devrait être remise au Ministre à l'automne 2024. Il s'agira d'un point d'étape dans une trajectoire plus globale de réduction de l'empreinte du secteur afin de l'inscrire dans les limites planétaires.

Pour cela, nul doute qu'il sera nécessaire de faire intégrer le secteur spatial dans la taxonomie européenne au titre des activités éligibles et de définir ainsi les domaines industriels du spatial considérés comme contribuant à la transition écologique.

Enfin, la durabilité des activités spatiales s'évalue également dans la capacité du secteur à générer le moins de débris possible. Le développement du secteur industriel doit ainsi se réaliser de la manière la plus raisonnable possible en fonction des enjeux de souveraineté définis par l'Etat, et en privilégiant les activités bénéfiques aux citoyens. Dans ce cadre, les exigences de RSE sont désormais imposées à tous les nouveaux entrants, partenaires et acteurs du secteur auxquels le CNES attribue une subvention, ou apporte une expertise.

La politique environnementale de l'ESA

Par Andrea Vena

« Dans le cadre de son Agenda 2025, l'ESA a défini des objectifs concrets visant à renforcer la contribution des projets spatiaux au développement durable de la société. Un des principaux axes de cet agenda est de garantir que l'ESA et les programmes spatiaux européens soutiennent pleinement la mise en œuvre de l'Accord de Paris et du Pacte vert pour l'Europe. Cela se traduit par des engagements précis, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Dans cette optique, l'ESA s'est fixé des cibles quantifiables. D'ici 2030, l'objectif est de réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'ESA de manière significative. Concrètement, l'ESA vise à une réduction de 46,2 % pour les scopes 1 et 2 (émissions directes) et de 28 % pour les scopes 3 (émissions indirectes) par rapport à l'année de référence 2019. Cette démarche s'inscrit dans une volonté plus large d'améliorer la gestion socialement et écologiquement responsable des activités du secteur spatial. L'ESA reconnaît ainsi la nécessité d'agir de manière proactive pour réduire son empreinte environnementale et contribuer à la neutralité climatique de l'Europe.

Ces objectifs chiffrés fournissent un cadre clair et mesurable pour évaluer les progrès dans la réalisation des engagements pris par l'ESA dans le cadre de son Agenda 2025. En poursuivant ces objectifs, l'ESA s'affirme comme un acteur engagé dans la lutte contre les effets du changement climatique et la promotion du développement durable, tout en renforçant son leadership dans le domaine spatial.

Pour atteindre ses objectifs, l'ESA a mis en place un nouveau programme nommé l'ESA Green Agenda (EGA) – l'agenda vert de l'agence – qui se décline en 5 domaines d'action.

Le premier domaine concerne la stratégie, dans laquelle l'ESA s'engage à assurer l'évaluation systématique des objectifs de durabilité dans la préparation et la mise en œuvre de ses projets et activités spatiales. Il est question de maximiser leur contribution positive au développement durable de la société et de minimiser leurs impacts destructifs. Dans le domaine des infrastructures, l'accent est mis sur la réduction des répercussions environnementales des actifs de l'ESA. Pour les systèmes spatiaux, l'objectif est de réduire l'empreinte écologique tout au long de leur cycle de vie.

L'achat responsable est également au cœur des préoccupations avec pour objectif, la mise en place d'une politique d'approvisionnement répondant aux exigences en matière de responsabilité. Cette politique vise à encourager les entreprises à exercer leurs activités de manière responsable sur le plan social et environnemental.

Pour mesurer et garantir le respect de ces objectifs, l'ESA a développé un Code de Conduite (CdC) approuvé par ses pays membres. Ce code établit des normes et des directives auxquelles les fournisseurs de l'ESA sont encouragés à adhérer. Pendant une phase pilote de deux ans, les fournisseurs de l'ESA qui l'ont accepté sont évalués à l'aide d'un questionnaire d'auto-évaluation (SAQ) intégré dans le processus d'enregistrement des fournisseurs.

Outre ces initiatives, l'ESA promeut un profond changement culturel dans son organisation et chez ses parties prenantes. Le cinquième domaine a donc pour objet la sensibilisation des acteurs clés à l'importance de l'EGA pour encourager leur participation. Des activités de gestion du changement ont été lancées dans tous ses établissements grâce, aussi, au fort engagement de la communauté de ses jeunes actifs, et de bénévoles.

L'ESA a également organisé les Journées de la Terre ou le premier concours interne Greenovation (Innovation Verte) en 2023, afin de renforcer la sensibilisation et l'engagement de ses employés à l'EGA. Le concours Greenovation leur a donné l'occasion de présenter des projets et des initiatives pour une ESA plus durable sur le plan environnemental. Des actions concrètes sont prévues, avec la mise en œuvre de propositions sélectionnées dans le cadre de l'EGA. Les Journées de la Terre 2024 ont eu lieu du 22 au 26 avril sur le même format qu'en 2023.

L'ESA s'engage résolument dans une démarche de durabilité, de responsabilité sociale et environnementale, tant au niveau de ses opérations internes que de ses partenariats et initiatives externes. »

Partie 2 / L’empreinte environnementale des activités lunaires : exploration

Pour partie, les programmes lunaires sont concernés par l’ensemble des développements qui précèdent. Une mission vers la Lune est pour une large part identique aux autres missions pour les orbites basses. Elle se distingue néanmoins par la masse de charge utile, le plus souvent par la quantité de carburant nécessaire pour se placer sur une trajectoire lunaire, sa longueur et son éventuel alunissage. Mais *mutatis mutandis*, les défis sont les mêmes. **Ce faisant, la plupart des enjeux soulignés dans les parties précédentes, tant sur le plan politique et éthique que sur le plan technologique, leur sont applicables.**

L’étude de l’impact environnemental des activités menées sur des corps célestes est encore relativement exploratoire ; et un article récent, datant de 2014, notait non sans inquiétude : « *Alors que les nations et les entreprises privées décrivent de plus en plus leurs intentions d’entreprendre des actions majeures sur des planètes, des lunes, des astéroïdes et même des comètes, il est déconcertant de constater qu’il n’existe pas de processus global requis par les États-Unis, d’autres États ou groupes d’États, ou les Nations unies pour évaluer l’impact de l’homme sur ces environnements extraterrestres. L’accent a plutôt été mis sur la réduction de la contamination biologique à terme et sur les dangers et responsabilités inhérents aux objets lancés dans l’intention de revenir sur Terre ou de se mettre en orbite autour de la Terre, et non sur les missions qui atterrissent sur d’autres corps célestes, tels que Mars* »⁴⁰. Quoique les développements les plus récents des ambitions spatiales aient permis des études nouvelles, le constat reste d’actualité.

Aussi et dans cette seconde partie, il s’agira donc essentiellement de **mettre en avant quelques points saillants à considérer lorsque l’on réfléchit à l’impact environnemental des activités lunaires**. À l’instar de ce qui a été fait pour les activités spatiales en général, la réflexion est à nouveau divisée entre volet éthique et politique et volet technique.

A. LE VOLET ÉTHIQUE ET POLITIQUE

Les ambitions lunaires et le questionnement des usages

Les acteurs du monde spatial sont questionnés sur la légitimité de leurs activités dans un contexte de

dépassement des limites planétaires et de fortes incertitudes géopolitiques. **C’est à ce titre que tout programme lunaire, et plus particulièrement le programme européen, doit être interrogé à l’aune du thème global du questionnement des usages.** Ce thème n’est pas totalement absent du champ de l’exploration spatiale, champ qui comprend l’exploration de la Lune⁴¹.

Le programme phare des ambitions lunaires contemporaines, *Artemis*, comprend plusieurs paramètres : le vol habité, l’installation pérenne sur la Lune, l’utilisation/l’exploitation de ses ressources, une forte logique commerciale dans le cadre du *New Space*. Il est perçu par l’écosystème spatial comme le lieu d’opportunités technologiques (comme le *Starship*) et économiques nouvelles, et **de nombreuses entreprises et start-up se sont lancées dans la course à la Lune, stimulées par le programme Artemis** ; si bien qu’au programme d’exploration, se sont ajoutées des annonces d’exploitation. D’où des interrogations sur le sens à donner à l’ambition lunaire du 21^e siècle, ainsi que sur le rapport qu’entretiennent les sociétés humaines, et plus particulièrement occidentales, à l’espace : retourne-t-on sur la Lune pour poursuivre son exploration, entamer son exploitation, ou pour ces deux activités ? La question mérite d’être posée car selon certains agendas spatiaux, à l’instar de ceux portés par les États-Unis ou le Luxembourg, **la frontière entre l’exploration et l’exploitation semble poreuse quand bien même il faut prendre avec beaucoup de précautions les perspectives des projets d’exploitation lunaire, qui relèvent encore pour beaucoup de la prospective**. Et ici aussi, la montée en puissance du secteur spatial privé dans le développement des activités lunaires pose la question de l’appropriation privée de ressources communes au détriment d’externalités positives qui étaient celles du secteur spatial traditionnel via la production de connaissances scientifiques et de données ouvertes.

Géopolitique lunaire et feuille de route européenne

Sur le plan géopolitique, doivent être mis en regard les coûts environnementaux et budgétaires des programmes lunaires et les exigences géopolitiques. Il a été fait état plus haut des paramètres et limites d’une telle mise en balance. Chinois et Américains, Luxembourgeois et Indiens, et au-delà, tout État aujourd’hui intéressé par la Lune, y acquerront

40 Kramer William R., « Extraterrestrial environmental impact assessments – A foreseeable prerequisite for wise decisions regarding outer space exploration, research and development », in *Space Policy*, no 4, vol. 30, novembre 2014, p. 215-222.

41 Traditionnellement, on distingue l’exploration spatiale des autres domaines d’activité du secteur spatial, tournés vers les activités satellitaires, et plus particulièrement économiques.

des connaissances et savoir-faire utiles à la suite de l'exploration spatiale. Plus particulièrement, il s'agira d'apprendre à utiliser un corps céleste en soutien aux missions spatiales de longue durée, ainsi que la maîtrise d'une chaîne logistique qui s'installera entre la Terre et les corps célestes. **Un accès indépendant non habité à la Lune, dès lors, permet le développement de tels savoir-faire, mais mène, plus encore, à l'autonomie stratégique – autonomie étant pris ici dans son sens premier, la possibilité de fixer sa propre ligne.** En somme, dans un contexte géopolitique incertain, l'Europe ne peut pas faire comme si la Lune n'avait pas été mise à l'agenda d'autres puissances spatiales : **un nouveau rendez-vous est fixé avec de nouvelles compétences spatiales.**

Si elle s'engage sur la voie lunaire, l'Europe spatiale doit mener deux chantiers : dessiner une feuille de route précise pour ses ambitions vers et sur la Lune, et réfléchir à ce qu'est un modèle d'exploration spatiale compatible avec les exigences du 21^{ème} siècle ; que ce soient les exigences environnementales et de justice sociale, ou celles d'un siècle, ponctué de conflits géopolitiques qui mobilisent prioritairement l'attention politique et financière, au détriment de la recherche scientifique.

Ainsi que l'exposait le Livre Blanc du GT Objectif Lune en février 2022, **deux modèles spatiaux dominant actuellement le débat lunaire** : d'un côté, une ambition spatiale **planifiée** avec pour moteur le **prestige national** et idéologique – le modèle chinois⁴² – de l'autre, une ambition spatiale portée par les agences spatiales et mise en œuvre par des acteurs privés incarnés par le New Space – le modèle américain. **Entre la volonté de domination et la volonté d'exploitation, l'Europe peut opter pour une troisième voie**, celle d'une ambition lunaire européenne plus conforme aux exigences de notre époque et qui pourrait :

- *Se concentrer sur des objectifs scientifiques* : il y a une part importante de science nouvelle sur la Lune. Notamment, nous n'avons qu'une connaissance parcellaire de sa géologie et du comportement chimique et physique de son sol. De plus, la Lune offre une véritable opportunité d'observer l'univers pour la première fois dans un environnement libre de toute pollution radio. **C'est dans la large part ce qui reste à découvrir que l'Europe peut trouver une feuille de route pour ses ambitions lunaires : sur des programmes sobres, essentiellement robotisés, aux objectifs scientifiques ciblés et ouverts à la coopération internationale** ; par exemple en coopération ouverte avec les autres régions spatiales que sont l'Afrique, l'Asie et l'Amérique du Sud. Un programme prioritairement scientifique prend avec beaucoup de précautions l'idée du développement d'une économie cis-lunaire pour orienter les investissements vers le développement d'infrastructures et d'applications dédiées à la recherche plutôt qu'à l'exploitation de

la Lune. Ces infrastructures et application dédiées peuvent aussi être élaborées puis déployées par le secteur privé, dans une logique d'abaissement des coûts. Il faut néanmoins souligner qu'une telle approche se heurte à deux contraintes très fortes que sont le manque de financement public comme privé dans le spatial européen (dans un contexte de forte fragilisation des grands industriels et opérateurs et de faible disponibilité du capital risque), et le manque de substance des business cases lunaires pour le moment.

- *Tout en œuvrant à la préservation d'un espace extra-atmosphérique comme bien commun* : il y a, dans cette exigence, un réel effort diplomatique pour préserver l'esprit des traités et conventions internationales axés sur la liberté d'exploration et la science spatiale, tout en optant pour une politique internationale véritablement multilatérale et pacifiste.
- *Et en optant pour une politique internationale, réellement multilatérale.*

Le débat sur le vol habité

Un débat contemporain met en tension les parties prenantes du spatial, en particulier en Europe et aux États-Unis. **Il oppose partisans et opposants au vol habité et interroge l'utilité, sinon la nécessité, d'envoyer des humains dans l'espace.**

Les doutes sur l'utilité du vol habité augmentent en même temps que le développement du tourisme spatial. Celui-ci génère un questionnement légitime chez les citoyens, compte tenu de leur sensibilisation à la dégradation environnementale et même s'il n'est pas question d'amalgamer tourisme spatial et vol habité. L'imaginaire de l'astronaute est aujourd'hui fortement questionné.

Un tel débat a aussi occupé le groupe de travail ayant élaboré cette note, sans qu'une réponse tranchée ne semble se dégager. On peut résumer, quoique grossièrement, les arguments des opposants et des partisans du vol habité.

- **Argumentaire synthétique des opposants au vol habité** : l'envoi d'astronautes sur la Lune multiplie les besoins à satisfaire (support de vie, charge utile plus importante, etc.) pour un bénéfice supplémentaire marginal par rapport à une présence seulement robotique. Les missions robotisées sont par ailleurs plus agiles, plus légères et souvent plus efficaces. Aussi, la Lune n'étant qu'à quelques secondes de signal, le contrôle de missions robotisées pourrait se faire en quasi-temps réel. Au surplus, le vol robotique permet de supprimer la gestion du risque humain posé par le vol habité, simplifiant les missions et atténuant une partie des questionnements éthiques.
- **Argumentaire synthétique des partisans du vol habité** : l'envoi d'astronautes permet, bien au-delà du seul aspect symbolique et philosophique, la réalisation d'expérimentations sur la vie dans l'espace et certains travaux de recherche ou activités

⁴² La définition peut se prêter, dans une certaine mesure, au modèle indien.

à haute valeur ajoutée uniquement réalisables par des astronautes, au bénéfice des enjeux terrestres et de ceux de l'exploration spatiale. De même, la technicité particulière des missions en vol habité, et le prestige associé à ces missions, est un terrain stimulant pour les coopérations internationales. Ce prestige est aussi un facteur en faveur de l'inspiration de talents du spatial, à mesure que les promotions d'astronautes se diversifient du point de vue de leurs formations, de leurs profils et de leurs sociologies. Parce que notre siècle est aussi celui de l'hybridation et de l'interface Homme-Machine/ Intelligence humaine et Intelligence Artificielle, la présence simultanée d'humains et de robots pourraient être une plus-value du point de vue expérimental et scientifique.

Toutefois, une opposition franche entre ces deux positions ne traduit pas la pleine réalité du débat.

D'abord, parce qu'une mission habitée repose en partie sur une collaboration entre des segments robotisés et des interventions humaines. Ensuite parce qu'au-delà d'un choix manichéen entre deux modèles d'exploration, l'épaisseur du tissu de coopération européen en matière spatiale permettrait au continent, service contre service, de faire embarquer ses astronautes auprès de missions lunaires d'autres puissances spatiales. **Ainsi, du fait du levier de coopération, le développement de programmes et d'applications lunaires robotiques européennes autonomes ne semble pas exclusif d'un engagement en coopération sur le champ du vol habité.**

Les deux programmes lunaires phares de ce début de 21^e siècle, sont porteurs d'une ambition d'envoi d'astronautes sur la Lune. Le programme Artémis de la NASA souhaite envoyer ses premiers humains sur la Lune d'ici la fin de la décennie. Le programme sino-russe ILRS, pour la décennie 2030. Du côté des États-Unis, la Lune et plus particulièrement la station orbitale lunaire *Lunar Gateway* sont vues comme les successeurs directs de l'ISS, qui devrait prendre sa retraite sur la même temporalité. Par ailleurs, les ambitions lunaires sont encore marquées par l'imaginaire des missions Apollo et des premiers pas de l'homme sur la Lune. Ainsi, ce sont tant les programmes que les imaginaires des missions lunaires qui mettent en leurs centres le vol habité.

Du point de vue environnemental, les interrogations portent sur deux champs. Le premier rejoint le champ du questionnement des usages, dans lequel il faut aussi inscrire le vol habité. Le second rejoint le champ de la technique, les missions habitées supposant tout un dispositif autour du support vie des astronautes, et *in fine*, un réapprovisionnement des bases lunaires. Les missions habitées sont donc à la fois plus lourdes, supposent davantage de lancements et coûtent dans l'ensemble plus cher que des missions entièrement robotisées. On le voit bien en comparant le coût unitaire estimé d'un lancement Artémis sur un lanceur SLS – avoisinant les deux milliards de dollars – et le coût annoncé des dernières missions lunaires robotisées ; on peut mentionner par exemple la mission d'*Intuitive Machines* ayant

coûté moins de cent millions de dollars. Ceci n'empêche pas des agences spatiales et leurs États de juger intéressant d'envoyer des astronautes et décider, à l'instar des États-Unis, d'en supporter le coût ; **à la fois pour des raisons de prestige, mais aussi pour des raisons scientifiques.**

B. LE VOLET TECHNIQUE

Nous exposons ici trois dimensions techniques de l'empreinte environnementale des activités lunaires : les lancements vers la Lune, la pollution lunaire et les activités d'ISRU. D'autres dimensions existent mais ne sont pas traitées du fait d'un manque de données, à l'instar de l'empreinte environnementale lié à la construction terrienne des infrastructures lunaires et des lanceurs utilisés pour les placer dans l'espace.

Les lancements vers la Lune

Les lancements sont les premiers postes à étudier pour appréhender l'empreinte environnementale des programmes lunaires. **Les lancements vers la Lune sont, en effet, autant de lancements spatiaux qui viendront s'ajouter à un nombre de lancement déjà croissant à l'échelle internationale.** Un article récent a estimé à 4 le nombre moyen de lancements vers la Lune par an de 2022 à 2035⁴³. Avec l'intensification des activités lunaires permise par la première vague de mission, le même article pose que ce chiffre devrait doubler de 2035 à 2050⁴⁴. **C'est toutefois peu en comparaison du nombre actuel de lancement par an, supérieur à deux-cent.**

La pollution lunaire

Depuis les années 1960 jusqu'à aujourd'hui c'est plus de 200 tonnes de déchets et débris divers qui ont été laissés sur la Lune. Ces derniers vont de quelques dizaines de sacs de déchets organiques humains, en passant par des objets variés laissés au cours des différentes missions, jusqu'aux restes d'objets spatiaux s'étant écrasés sur la Lune, ou qui ont été volontairement laissés sur place⁴⁵. Si 200 tonnes ne sont rien en comparaison de la quantité de débris orbitant autour de la Terre, une telle quantité peut être importante au vu du nombre finalement réduit de missions lunaires sur la période concernée. Alors que le nouvel engouement pour la Lune bat son plein, la question de la pollution de notre satellite naturel par des déchets et des débris va devenir cruciale. Il suffit d'avoir en tête les dernières missions lunaires emblématiques de 2023-2024 pour le réali-

43 L'estimation semble juste au regard du nombre de lancements lunaires opérés en 2023, avec quatre missions : Hakuto-R M1, Chandrayan-3, Luna 25 et SLIM.

44 L. Miraux, « Environmental limits to the space sector's growth », art cit.

45 <https://theconversation.com/space-junk-in-earth-orbit-and-on-the-moon-will-increase-with-future-missions-but-nobodys-in-charge-of-cleaning-it-up-212421>

ser, *Chandrayan-3* pesait 1,7 tonne (pour le déploiement d'un rover de 26 kilogrammes), *Luna-25* pesait 1,8 tonne et, dernier exemple, *Intuitive Machine-1* pesait près de 2 tonnes.

Mais la plupart des missions lunaires conduites jusqu'à présent, étaient des missions pionnières et **leur réussite primait sur la gestion de leur fin de vie. Or, pour les programmes futurs qui nécessiteront nombre deancements dans la perspective d'un établissement pérenne sur la Lune, la gestion de fin de vie des dispositifs et des infrastructures ne pourra pas être contournée.** Rappelons ici que la plupart des programmes lunaires visent l'occupation de la zone restreinte du pôle Sud. Or, dans un espace géographique aussi contraint, la gestion de la fin des programmes doit laisser la place à d'éventuelles missions suivantes, en particulier sur les points stratégiques d'ensoleillement plus favorable, ou proche de cratères ou de zones souterraines d'intérêt particulier. Pour autant, la protection contre la pollution lunaire n'est pas qu'une question de place : elle doit devenir une obligation en vertu d'enjeux éthiques, scientifiques et de sécurité, en évitant des risques de détérioration du terrain et de contamination.

La pollution lunaire concerne également directement les sites d'alunissage, car à leur arrivée sur la Lune, **les landers viennent soulever une quantité non-négligeable de poussière, dont la retombée est ralentie du fait de la faible gravité.** Ces sites pourront également être pollués par des **résidus d'ergols.** Aussi, la présence de *landers* désaffectés sur des sites clés (illumination, lieu de passage) peut représenter un obstacle au futur de l'exploration (pas d'atterrissage lunaire possible dans les environs, besoin de les contourner lors de voyages en rover).

Dans la lignée de ce qui a été dit précédemment à propos de la pollution orbitale autour de la Terre, il convient d'évoquer les orbites lunaires, compte tenu des projets en cours du positionnement de constellations de satellites autour de la Lune (voir la note consacrée à la constellation *Moonlight* (ESA) par l'ANRT⁴⁶). La pollution des orbites lunaires concerne en premier lieu la gestion des débris spatiaux, et de la fin de vie des objets orbitant autour de la Lune. En l'absence d'atmosphère lunaire, il n'y aurait pour ces objets que quatre choix : rejoindre une orbite poubelle autour de la Lune, s'écraser sur le sol lunaire ou être renvoyés vers la Terre afin de brûler dans son atmosphère, mais dans les limites environnementales précédemment évoquées, ou réutiliser ces composants en les démantelant. En tous les cas, il n'y a pas de « *burning re-entry* » sur la Lune. La pollution des orbites lunaires concerne également la pollution électromagnétique de notre satellite naturel, pour l'instant préservé, qui pourrait diminuer par la même occasion l'intérêt de projets de radiotélescopes placés sur sa face cachée.

Sur ce plan, la recherche de solutions permettant d'atténuer la pollution lunaire incombe aux États de lancement. **Ces derniers autorisant les missions sur le fondement de l'article VI du Traité de l'espace (1967) et de leurs lois spatiales nationales respectives, charge à eux d'ériger en condition de l'autorisation de lancement vers la Lune la présence d'une ACV complète, incluant une gestion satisfaisante de la fin de vie des missions.** Une note récente de l'ANRT préconisant certaines évolutions du cadre juridique spatial français propose ainsi d'insérer de telles considérations environnementales au cahier des charges qui pourrait être imposé aux autorisations lunaires⁴⁷. Partant d'une obligation qui leur serait ainsi imposée, les acteurs du spatial lunaire se verraient contraints de développer des objets spatiaux lunaires satisfaisants sur le plan de leur fin de vie.

Au-delà de la seule fin de vie, c'est la durée de vie elle-même des infrastructures lunaires qui est en jeu. Si le recyclage ou la réutilisation de certaines infrastructures (voire des débris spatiaux) peut être une piste à étudier, plusieurs éléments sont importants à prendre en considération.

Le premier d'entre eux est technique : la réutilisation de composants d'une infrastructure ancienne vers une infrastructure nouvelle suppose une relative interopérabilité entre composants. De plus, les composants ayant subi des gammes de températures plus grandes que ce que leur fabricant peut garantir, ne peuvent avoir qu'une utilité limitée. Il est aujourd'hui impensable de pouvoir réutiliser un composant pour une fonction critique (c'est-à-dire la mise en péril d'une mission spatiale, et de la vie d'astronautes).

Le second élément est juridique : il faut prendre garde à la propriété des infrastructures spatiales considérées, ainsi que les États les ayant sous leur contrôle et juridiction en vertu de l'article VIII du Traité de l'espace. Au vu de la criticité stratégique de certaines infrastructures spatiales, leur réutilisation ne pourra se faire que par leur État d'origine, ou en tout cas avec son aval.

L'ISRU

Les ressources spatiales sont au cœur des nouvelles ambitions lunaires. Après ses paramètres astrophysiques particuliers, le pôle Sud de la Lune est particulièrement visé pour la présence avérée d'eau gelée au fond de ses cratères. Le régolithe lunaire fait l'objet d'importantes études et pourrait s'avérer utile en tant que matériaux, ou une fois extrait et traité, comme source possible d'oxygène. La preuve de cet intérêt pour la géologie lunaire se démontre aisément lorsque l'on note que presque toutes les missions lunaires des années 2022-2024 comportaient un volet géologie. Ce fut par exemple le cas avec *Chandrayan-3*, qui avait relevé la présence de

46 Pour une constellation lunaire européenne, ANRT, Septembre 2022.

47 Préparer le droit spatial français aux nouvelles ambitions lunaires, ANRT, 2023.

souffre grâce à son rover Pragyan ; ce fut encore le cas de la mission Chang'e-6 en charge de ramener des échantillons de la face cachée.

Cet intérêt pour les ressources spatiales sert une ambition prospective d'utiliser localement les ressources spatiales, en support aux missions lunaires. C'est ce que l'on appelle l'ISRU, pour *In Situ Space Resources Utilisation* ; à distinguer d'autres cas d'usage de ressources spatiales comme l'utilisation terrestres de ressources extraites puis ramenées de l'espace. En l'état actuel de nos connaissances technologiques, et dans l'état de notre connaissance très limitée de la géologie lunaire⁴⁸, il reste encore de nombreux défis à relever pour arriver à cette utilisation des ressources lunaires.

D'ores et déjà, l'utilisation des ressources spatiales est interrogée dans une perspective prospectiviste. Un article récent⁴⁹ propose ainsi un cadre d'analyse de l'impact environnemental de l'exploitation des ressources spatiales. En premier lieu, les auteurs préconisent **l'application d'un principe de précaution**, en application du principe n°15 de la Déclaration de Rio en 1992 : « *Le principe de précaution est particulièrement applicable dans le cas des opérations minières spatiales, où il existe de nombreuses inconnues et un potentiel important de dommages irréversibles aux environnements extraterrestres qui pourraient se produire avant que les implications environnementales ne puissent être pleinement explorées* ». Ils proposent ensuite de réaliser une analyse d'impact environnemental classique quant à l'utilisation des ressources spatiales. **Dans leur matrice d'impact environnemental pour les opérations minières dans l'espace, ils identifient, sans être exhaustif, plusieurs points de vigilance :**

- La production de **déchets** issus de l'extraction et du traitement de la ressource.
- La génération importante de **poussière** par l'extraction de ressources ; un élément majeur à prendre en compte quand on connaît la nature abrasive de la poussière lunaire pouvant porter atteinte aux installations et à la santé des astronautes.
- **Les changements physiques et chimiques du régolithe lunaire.**
- La contamination et les déversements, dont on connaît les effets sur Terre.
- **La modification du paysage géologique du corps céleste exploité**, alors même que sa géologie et sa morphologie sont au cœur d'une étude scientifique.
- **La contamination de l'eau gelée du corps céleste**, supposant une étude scientifique préalable de l'eau avant toute exploitation.
- **La contamination microbienne de formes de vie extra-terrestres.** L'article note que la problé-

matique avait été étudiée dans le cadre de l'exploration de la planète Mars : « *Des mesures ont été prises par le passé pour prévenir la contamination biologique de Mars. Par exemple, les premiers engins spatiaux à avoir réussi à se poser et à opérer sur Mars, les atterrisseurs Viking, ont été soumis à des processus de décontamination rigoureux avant de quitter la Terre, y compris le nettoyage et le traitement thermique. Le COSPAR a établi des « régions spéciales » sur Mars, c'est-à-dire des zones qui « ont un potentiel élevé pour l'existence de formes de vie martiennes existantes ». Ces « régions spéciales » de Mars sont soumises à des protocoles de protection planétaire plus stricts que les autres zones de la planète.* »

Un autre article, précité, fait état de préoccupations liées à la modification de l'environnement lunaire par les extractions minières, mais aussi par toutes les autres activités menées à la surface de la Lune : « *si des entreprises publiques et privées devaient établir des habitats extra-terrestres permanents, il est probable que les terrains naturels seraient très souvent modifiés par une série d'actions similaires à celles que nous avons connues sur Terre. Les projets pourraient inclure des excavations et des forages profonds, la construction de routes, l'installation de moyens de communication et de production d'énergie, ainsi que l'élimination des déchets. D'autres infrastructures (...) devraient être installées à la fois à la surface et sous terre. En l'absence d'une évaluation environnementale et d'un processus de contrôle, il peut être de plus en plus difficile de différencier les caractéristiques humaines des caractéristiques naturelles. La présence d'une crête rocheuse à l'embouchure d'une vallée est-elle le signe d'une ancienne moraine ou d'un autre processus géologique, ou est-elle le résultat d'une mission de prospection minière ? Les roches ont-elles été fracturées en raison de facteurs géologiques ou l'ont-elles été dans le cadre d'un projet de recherche mené des décennies plus tôt ?* »⁵⁰. On comprend bien, à la lecture de cet extrait, **qu'aux enjeux de modification du paysage lunaire, répondent des enjeux de protection de l'intégrité naturelle et scientifique de notre satellite naturel** ; et qu'avant de mener des activités minières même à échelle réduite, des prospections scientifiques devraient être préalablement menées. Une telle préoccupation concernant la protection de l'intégrité du paysage lunaire a été exprimée au sein du groupe ; qui plus est si la stratégie lunaire européenne se concentre sur des ambitions scientifiques.

Enfin, l'ensemble de ce qui précède ne traite même pas de ce en quoi l'utilisation des ressources spatiales mobilise également le droit. Une précédente note du GT Objectif Lune de l'ANRT avait tout de même fait état des préoccupations juridiques associées à toutes ces perspectives et proposé des aménagements utiles en droit français⁵¹.

48 Cilliers Jan, Hadler Kathryn et Rasera Joshua, « Toward the utilisation of resources in space: knowledge gaps, open questions, and priorities », in *Npj Microgravity*, no 1, vol. 9, 25 mars 2023, p. 22.

49 J.A. Dallas, S. Raval, S. Saydam, et al., « An Environmental Impact Assessment Framework for Space Resource Extraction », art cit.

50 W.R. Kramer, « Extraterrestrial environmental impact assessments – A foreseeable prerequisite for wise decisions regarding outer space exploration, research and development », art cit.

51 *Préparer le droit spatial français aux nouvelles ambitions lunaires*, op. cit.

Recommandations opérationnelles

Que ce soit sur Terre, en orbite ou vers et sur la Lune, les activités spatiales ont une empreinte environnementale. Le constat est factuel et indiscutable. À l'heure de la prise de conscience d'une nécessaire mise en adéquation de nos technologies avec les exigences d'un monde qui se détériore du fait des changements climatiques, les décideurs et les acteurs du spatial doivent impérativement prendre en considération l'ensemble de l'empreinte environnementale de l'activité.

Nous proposons quatre axes de recommandations opérationnelles. Certaines de ces recommandations concernent au premier chef l'exploration lunaire, d'autres les activités spatiales en général et parfois les deux domaines à la fois :

Axe 1 / Planification stratégique

- **Élaborer une vision claire pour une feuille de route européenne pour l'exploration lunaire prenant en compte le volet environnemental :** le préalable indispensable demeure une planification des activités lunaires européennes. Si des engagements ponctuels de l'Europe vers notre satellite naturel existent, une stratégie coordonnée et d'ensemble de ces engagements fait défaut. La planification des programmes spatiaux au temps long, et la coordination des différentes missions constituent un levier indispensable d'étude et de réduction de l'empreinte environnementale desdits programmes. Il faut définir clairement une stratégie européenne pour l'exploration lunaire à 2040.
- **Toutefois, l'idée même d'une feuille de route continentale suppose de restaurer l'unité européenne en matière spatiale :** les dissensions à l'œuvre depuis quelques années en matière spatiale, laissent transparaître une fragmentation politique et économique, dégradant l'image de l'Europe spatiale sur la scène internationale et nuisant à ses performances tant en matière d'innovation, que de conduite de ses transitions spatiales. Il s'agit d'agir à nouveau ensemble, avec

une concertation européenne et en confiance : des éléments clés d'une politique spatiale fondée sur des besoins stratégiques spécifiques et correctement financés, diluant les logiques exclusivement nationales pour favoriser un développement réellement européen et faisant primer l'autonomie stratégique sur la seule rentabilité. À ce titre, le sommet ministériel de l'Agence spatiale européenne, qui aura lieu fin 2025, sera crucial.

- Il faut aussi rappeler dans les communications institutionnelles autour du spatial le rôle important des agences comme autorité régulant de façon indispensable les opérations dans l'espace ; atténuant la rhétorique actuelle d'une privatisation dérégulée du secteur spatial.

Axe 2 / Pour une politique européenne de durabilité spatiale

Poursuivre les efforts et les chantiers en cours sur l'étude et la réduction de l'empreinte environnementale des activités spatiales

- **Poursuivre les efforts en cours sur l'étude de l'impact environnemental des activités spatiales déjà existantes,** ainsi que les travaux en cours sur les indices de durabilité en matière spatiale (notamment le SSR). *Cf. Partie 1 et encadrés des politiques menées par les agences.*
- **Encourager une réflexion européenne sur le questionnement des usages en matière spatiale.** Il s'agira tant de considérer la notion « d'espace utile » que de réfléchir aux modalités institutionnelles d'une telle réflexion (consultations citoyennes, etc.)
- **S'agissant de la Lune, encourager les études de l'impact environnemental potentiel des activités lunaires, et ce dès la phase de conception des programmes.** Il s'agit d'éviter une pollution, une radiation ou une congestion des zones d'intérêt par simple méconnaissance, hypothé-

quant alors les futures activités sur la Lune. Ainsi, chaque projet vers la surface lunaire ou l'orbite lunaire doit justifier de son impact environnemental à travers l'étude de la contamination du site d'atterrissage lunaire ou d'orbite et l'ACV de l'ensemble de ses segments spatiaux.

- Une concertation internationale pourrait avoir lieu afin de classer et protéger certains sites lunaires à raison de leur intérêt scientifique potentiel.

Tisser des liens Terre-Espace

- **Identifier durant la phase de *design* des programmes, les champs technologiques susceptibles de retombées terrestres** pour inclure un développement commun Terre-Espace dès le début. Ceci pourra s'effectuer à partir d'une revue prudente et substantielle des transferts de technologies passés, et de la façon dont des technologies spatiales ont été adaptées aux circonstances Terrestres et réciproquement. Le développement de programmes lunaires pourrait permettre le développement de technologies utiles pour la transition énergétique : batterie, décentralisation de la production énergétique, etc. Le développement de bases lunaires habitées pourrait également être le lieu de développement de savoir-faire et de compétences technologiques bénéfiques pour des applications terrestres : recyclage de l'eau, habitat circulaire, santé, éducation, cybersécurité, etc.
- **Favoriser l'enseignement visant à sensibiliser les ingénieurs** de la filière aérospatiale sur les questions d'éthique et d'engagement face aux enjeux de protection de l'environnement terrestre et de la préservation des environnements spatiaux, et ce au cours de l'ensemble du cursus.

Axe 3 / Favoriser la coopération spatiale de l'Europe et pour l'Europe

Tisser des coopérations internationales renouvelées dans un contexte de nouvelles explorations spatiales

- Dans un contexte de recomposition de la géopolitique spatiale mondiale, **l'Europe spatiale doit interroger à nouveau son tissu de coopération, en le diversifiant** : c'est-à-dire continuer à s'appuyer sur les coopérations historiques (Etats-Unis, Inde, etc.) tout en regardant vers les nouveaux Etats spatiaux, et les futures aires de développement du secteur.
- **La coopération internationale est un levier clé pour rationaliser les coûts environnementaux et budgétaires de l'exploration spatiale en général, et de l'exploration lunaire en particulier** : logique de répartition de l'empreinte environne-

mentale et de réduction des redondances, mutualisation des efforts et coopération technologique, interopérabilité et amélioration des cycles de vie des systèmes, partage des retombées scientifiques et techniques dont les données critiques, etc.

Les programmes lunaires européens doivent se focaliser sur le développement de systèmes robotiques autonomes et intelligents pour l'exploration lunaire :

- **L'Europe doit prioriser des missions lunaires robotisées, frugales et scientifiques**, en particulier dans les champs de la cartographie, de l'analyse géologique, de l'observation et de l'exploration.
- En outre cette priorisation des missions robotisées vers la Lune doit être accompagnée d'une réflexion quant à la médiation avec le grand public, inspirée des communications menées s'agissant des rovers martiens et de missions robotisées récentes (personnification du rover, publication réseaux sociaux, etc.).
- Au travers du développement de compétences et de programmes lunaires européennes, **notre continent pourrait, service-contre-service, s'ouvrir vers d'autres compétences spatiales en coopération dont le vol habité** : l'Europe pourrait obtenir d'autres programmes lunaires des places pour ses astronautes vers la Lune – en reprenant la logique de ce qui a été fait pour l'ISS.

Axe 4/ Europe et influence

L'Europe, dont la France, dispose de trois leviers d'influence importants permettant la mise en œuvre d'une politique favorable à la durabilité des activités spatiales et lunaires : un levier juridique, un levier économique et un levier diplomatique :

LE LEVIER JURIDIQUE

Trois champs juridiques concernés :

- **Le droit international et son élaboration multilatérale.** Le 18 juin 2024, le COPUOS a conduit une journée d'étude dédiée à la durabilité des activités lunaires⁵², insistant sur l'importance de préserver l'esprit des traités spatiaux et une coordination des programmes afin d'assurer une exploration de la Lune au bénéfice de toute l'humanité. Il faut être vigilant quant aux incertitudes juridiques qui pèsent en partie sur le statut de cer-

⁵² Voir : <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/moon-mars-and-beyond/sustainable-lunar-activities-conference-2024.html>

taines activités lunaires (dont l'extraction et l'utilisation de ressources), et les débats en cours au sujet d'interprétation disruptant certains grands principes du droit de l'espace. Il faut également encourager un dialogue réellement multilatéral sur le droit qui régira l'exploration de la Lune, face aux risques de fragmentation posés par des initiatives régionales (Accords Artémis, accords ILRS, etc.).

- **Les lois spatiales nationales**, avec l'inscription des obligations environnementales des acteurs spatiaux et la normalisation des ACV.
- **Les normes techniques applicables au secteur spatial.**

LE LEVIER ÉCONOMIQUE

Conditionnalité du soutien public :

- Les États bénéficient d'un pouvoir important sur les évolutions des comportements et voies d'innovation empruntés par les industriels au travers de deux leviers : les financements publics importants du secteur spatial⁵³, les autorisations de lancement. Les deux leviers peuvent être assortis d'une conditionnalité environnementale reposant sur ces analyses de cycle de vie et des critères de RSE à satisfaire.

LE LEVIER DIPLOMATIQUE

Impact et rôle de la France à l'échelle internationale :

- La France, en produisant la première feuille de route bas carbone de la filière spatiale (v. supra) peut inciter l'UE et l'ESA à s'engager sur la même voie.
- La France doit soutenir et contribuer à l'effort de la communauté scientifique et diplomatique pour élaborer des recommandations à l'égard des nations spatiales et de leurs industries visant à préserver l'environnement terrestre et lunaire.
 - Terrestre : par exemple limiter la génération des débris spatiaux, incorporer la fin de vie du satellite dans sa conception, préserver le ciel nocturne
 - Lunaire : par exemple éviter la pollution des orbites lunaires, limiter la pollution radioélectrique, considérer la gestion des déchets et le recyclage.

Et ce, à travers des entités scientifiques représentatives internationales telles que, par ex., le COPUOS⁵⁴ ou le COSPAR (via par ex le PEDAS, panel sur les activités spatiales potentiellement dommageables pour l'environnement) comme cela est déjà fait avec succès pour la protection planétaire.

53 Les particularités du financement européen via l'ESA prises en compte.

54 Qui a publié en 2021 ses « Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space » : https://www.unoosa.org/documents/pdf/PromotingSpaceSustainability/Publication_Final_English_June2021.pdf



33, RUE RENNEQUIN - 75017 PARIS
TÉL. : 01 55 35 25 50
WWW.ANRT.ASSO.FR