



L'EUROPE DE L'ESPACE

Dirigé par Florian Gérard-Mercier, directeur adjoint des études

Rédaction par Mathieu L., Armand Léonardi, et Florian Gérard-Mercier



Rapport : l'Europe de l'espace

INTRODUCTION

En ce début d'année 2021, ce ne sont pas moins de trois sondes et rovers qui ont atteint Mars. Si la nationalité des rovers Perseverance et Tianwen-1 pourrait laisser penser qu'il s'agit d'une nouvelle course à l'espace entre les deux grandes puissances du XXIème siècle que sont les USA et la Chine, le fait que la troisième, Hope, soit de nationalité émiratie, et que certains instruments cruciaux de Perseverance ne soient pas américains (notamment sa caméra SuperCam, développée et fabriquée en France), montre que la donne a changé depuis la Guerre Froide.

Dans le même mouvement, le vol spatial habité a aussi été bouleversé depuis la fin du programme Apollo, puis des navettes spatiales américaines. Le vol prochain de Thomas Pesquet vers la Station Spatiale Internationale (ISS) dans une capsule Crew Dragon de Space X, en est peut-être un des meilleurs exemples : après une période creuse où seul le lanceur russe Soyouz permettait aux humains d'accéder à l'espace de manière régulière pour rejoindre ISS, l'envoi avec succès par l'entreprise privée Space X de deux astronautes américains sur ISS le 30 mai 2020 a marqué un véritable changement d'ère dans le monde spatial.

Ainsi, l'espace est aujourd'hui réellement une "nouvelle frontière", où s'activent entreprises privées, agences nationales ou internationales, militaires et civils. Le "New space" américain, composé d'entreprises comme Space X, Blue Origin, et de toute la galaxie de petites startups de l'espace, fait rentrer l'espace dans une nouvelle

ère, celle de l'industrialisation de son accès, et de son exploitation. De ces futures nouvelles "plateformes" (sur le modèle des plateformes internet) permettant l'accès à l'espace orbital, voire à Mars en ce qui concerne les ambitions de Space X, va découler un chamboulement de notre relation à l'espace, qui appelle des changements économiques, institutionnels, et juridiques importants. Un chamboulement qui se voit d'ailleurs déjà dans les chiffres, comme en témoigne l'explosion du nombre de nouveaux objets envoyés en orbite, dont aujourd'hui l'écrasante majorité émanent d'entités non-étatiques, et à vocation commerciale. Nous sommes ainsi passés d'environ 100-150 objets envoyés en orbite par an de 1990 à 2012, à environ 500 ces dernières années, et enfin à plus de 1000 en 2020, malgré la pandémie (Figure 1).



Logiquement, l'espace représente donc aujourd'hui un poids économique de plus en plus conséquent. Les estimations du poids économique du secteur varient entre 300 et 425 milliards de dollars suivant les sources (dont moins de 100 milliards résultant des budgets publics nationaux, reflétant le poids maintenant dominant des activités commerciales civiles). Cet écart reflète d'ailleurs la difficulté d'estimer la taille d'un secteur de plus en plus imbriqué avec tous les autres secteurs de l'économie terrestre, et dont il est donc de plus en plus compliqué de définir précisément les contours.

S'il ne faut néanmoins pas négliger l'aspect militaire de l'espace, notamment face à l'agressivité chinoise qui n'hésite pas à développer des armes pour pouvoir détruire des biens spatiaux (satellites, etc.) "ennemis", l'exploration future de l'espace, reposant sur l'exploitation économique de ses ressources (métaux, eau, oxygène, terres rares, etc.) et des services qu'il rend à la Terre (observation, télécommunication, etc.), sera donc avant tout civile.

Dans cette nouvelle ère, l'Europe, avec ses capacités technologiques de pointe dans le domaine spatial, et ses valeurs pacifiques de développement économique conjoint, a donc toute sa place. Pour autant, elle doit mettre en œuvre une vision stratégique globale pour prendre toute sa place dans cette nouvelle frontière, et ne pas se cantonner au rôle de simple supplétif des États-Unis.

Dans ce rapport, nous nous attacherons à analyser les différents segments de l'économie de l'espace — accès à l'espace (lanceurs, etc.), biens spatiaux (satellites, etc.) et exploration scientifique —, et la place que l'Europe et ses états membres y occupent, avant de proposer une stratégie pour que nos pays se positionnent et trouvent toute leur place dans l'écosystème spatial en devenir.

I. ORGANISATION ACTUELLE DU SECTEUR SPATIAL EN EUROPE

A. L'ACCES A L'ESPACE

Le secteur spatial au sein de l'Union européenne est aujourd'hui essentiellement articulé autour de 2 échelons et institutions : les États-Membres et l'Agence Spatiale Européenne. A ces institutions s'ajoute naturellement le rôle critique de l'industrie, particulièrement dynamique en France, Allemagne et Italie.

Les États-Membres, avec leurs agences spatiales et de R&D respectives, sont au cœur de la coopération spatiale européenne, avec un historique de recherche spatiale fort pour des agences comme le CNES en France ou la DLR en Allemagne, pour n'en citer que quelques-unes. Ces agences, souvent couplées à des départements de R&D qui peuvent leur être indépendants mais avec des partenariats institutionnels forts, comme l'ONERA ou la Direction Générale de l'Armement en France, sont la brique fondamentale de la recherche spatiale européenne. C'est par exemple le CNES en France qui est à l'origine des premiers développements du futur moteur Prometheus qui devrait équiper les futurs lanceurs européens réutilisables THEMIS et les rendre plus compétitifs, ou encore le démonstrateur réutilisable Callisto. Ces agences spatiales nationales collaborent d'ailleurs fréquemment sur des sujets comme l'accès à l'espace avec une coopération sur les réservoirs à hydrogène des futurs lanceurs européens.

Ces agences spatiales et instituts de recherche nationaux sont le ciment sur lequel s'appuie l'agence spatiale européenne (ESA) qui a étendu ses États partenaires au-delà des membres de l'Union Européenne avec la participation notamment du Canada, du Royaume-Uni, de la Suisse ou encore de la Norvège. L'Agence Spatiale

Européenne s'occupe notamment, sur le plan de l'accès à l'espace, de coordonner le développement technologique spatial de ses États partenaires et coordonne également des accords d'envergure internationale. Plusieurs programmes développés par l'ESA soutiennent au premier chef le développement des capacités d'accès à l'espace de ses États partenaires :

- La direction du transport spatial de l'ESA, qui est en charge de la coordination des compétences des États membres de l'ESA pour le développement des lanceurs européens. Il s'occupe notamment de coordonner l'attribution des responsabilités aux différents États partenaires dans le cadre de la politique du retour géographique. Suite au développement d'Ariane 6 et du conseil interministériel de l'ESA de 2014, une place plus grande est allouée au secteur privé dans le design, la détermination des cahiers des charges commerciaux (là où l'ESA s'occupe du cahier des charges de l'exploration spatiale), et l'organisation industrielle des programmes de lanceurs.
- La direction de l'exploration humaine et robotique qui s'occupe notamment de l'implication européenne dans le développement de modules habités Orion et de la future station spatiale circumlunaire Space Gateway, mais aussi de la coopération sur la station spatiale internationale ISS.
- Le centre d'entraînement d'astronautes, le *European Astronaut Center* de Cologne est en charge de sélectionner et d'entraîner les futurs astronautes européens au vol spatial habité. Des coopérations avec la NASA et Roscosmos sont mis en place pour assurer une interopérabilité optimale de la Station Spatiale Internationale.
- Enfin, le développement des initiatives innovantes en matière d'accès à l'espace bénéficie du *Future Launchers Preparatory Programme*, le FLPP. Ce programme permet notamment d'approfondir le développement technologique de démonstrateurs en le faisant passer du niveau de maturité technologique (TRL) 3 à TRL 6, la phase la plus critique sur le plan technologique, afin ensuite d'être développée jusqu'au stade TRL 9 de commercialisation. C'est le programme FLPP qui soutient notamment des initiatives de micro-lanceurs venant de sociétés telles que PLD Space, MT Aerospace, Deimos et Orbex.

100%

100%



100%

100%

spatial de Kourou en Guyane française est actuellement la seule plateforme permettant le lancement spatial sur le sol d'un État européen, d'autres infrastructures semblables sont en développement, dédiées aux micro-lanceurs cette fois-ci.

Ces projets de ports spatiaux sont contraints par leur positionnement géographique. Ainsi, pour les lancements classiques, la proximité de l'équateur (où Kourou est située) est cruciale afin de profiter de la vitesse de rotation de la surface terrestre (maximale à l'équateur). C'est pour cela que les ports spatiaux américains sont dans le sud du pays, et que le port spatial russe est à Baïkonour. Néanmoins, bien que l'Europe continentale ne soit pas la mieux placée géographiquement pour ces lancements classiques, elle peut néanmoins insérer des objets en orbite sur des orbites héliosynchrones ou polaires à condition que ces ports spatiaux soient situés à une latitude suffisamment au Nord (ce qui pénalise *de facto* la France par rapport à certains de ses partenaires européens).

Si historiquement le site de Kiruna en Suède a pu être utilisé pour l'envoi de fusées sondes, des projets de réhabilitation pour transformation en pas de tirs de lanceurs orbitaux est prévue. Dans le même temps, de nouveaux projets ont vu le jour, permettant d'héberger non seulement des lanceurs orbitaux mais aussi des projets de tourisme spatial, et notamment :

- En Espagne, avec un projet de port spatial annoncé aux îles Canaries ou aussi le site de El Arenosillo dédié aux futurs lancements de MIURA ;
- En Italie, avec un projet de spatioport pour tourisme spatial à Tarente-Grottaglie ;
- Au Portugal, dans une des îles des Açores ;
- En Allemagne, avec un projet de plateforme offshore mobile en mer du Nord.

Il est intéressant de noter qu'une grande partie de ces projets de ports spatiaux est directement liée à des projets de micro-lanceurs commerciaux. C'est le cas

notamment pour le lanceur MIURA de PLD Space mais aussi du regain d'intérêt de l'Allemagne pour un port spatial, en lien avec les récentes annonces de développement d'un micro-lanceur par ISAR Aerospace. Il y a donc fort à parier que sur la quantité de projets de ports spatiaux, seul un faible nombre d'entre eux voit réellement le jour.

B. LES BIENS SPATIAUX

L'accès à l'espace est en passe de devenir un marché mature avec les progrès techniques des dernières décennies. Celles plus récentes de la société SpaceX avec ses lanceurs réutilisables tendront à baisser les coûts de mise en orbite. Outre le gain non négligeable qu'une baisse de tels coûts aurait sur la conquête spatiale, ce sont bien les satellites qui profitent le plus de ces progrès pour l'instant.

Face au coût de l'envoi en orbite, les lanceurs ont augmenté leur charge utile (pour diminuer ce coût), et les satellites se sont à la fois complexifiés et allégés, notamment grâce à la miniaturisation de l'électronique. De ce fait, l'envoi de satellites est de plus en plus abordable, et cela s'est traduit par une explosion des mises en orbite (cf Figure 1 dans l'introduction). Le marché des satellites connaissant un essor sans précédent, cela apporte non seulement de nouvelles possibilités, mais aussi des questions voire des tensions géopolitiques.

Un satellite est entendu comme tout « corps qui gravite autour d'un astre de masse prépondérante, en particulier autour d'une planète » (définition Larousse). Les satellites artificiels que nous envoyons dans l'espace peuvent se trouver sur différentes orbites dans l'espace proche de la Terre. Ils gravitent ainsi sur quatre orbites classables en fonction de leurs altitudes.

- L'orbite basse ou Low Earth Orbit¹ (LEO), pour les altitudes inférieures à 1500 km ;
- L'orbite moyenne ou Medium Earth Orbit (MEO), pour les altitudes allant de 1500 km à 20000 km ;
- L'orbite haute, ou High Earth Orbit (HEO), pour les altitudes allant au-delà de 20000 km ;
- L'orbite géostationnaire, située à 35,786 km précisément.

A chaque orbite correspond une vitesse précise, à laquelle le satellite doit tourner autour de la Terre pour rester sur son orbite, et ce indépendamment de la masse dudit satellite. En effet, gravité et force centrifuge sont toutes deux proportionnelles à la masse, ce qui fait que ces forces s'annulent, et la masse n'intervient pas dans le calcul de la vitesse correspondant à une orbite : cette vitesse n'est fonction que de l'altitude de l'orbite considérée. C'est pourquoi l'altitude de l'orbite géostationnaire est précisément fixée : c'est l'altitude à laquelle les satellites en orbite vont à la même vitesse angulaire de rotation que la surface de la Terre. Ainsi, un satellite en orbite géostationnaire sera toujours à la verticale du même point de la surface terrestre, d'où leur intérêt particulier.

Il est important de noter que la majorité (55%) des satellites se trouvent en LEO, la plus basse, car c'est en effet celle permettant la communication et l'observation au plus près de la Terre. Les satellites en LEO mettent typiquement 90 minutes à faire le tour de la Terre. Vient ensuite l'orbite géostationnaire, avec 35% des satellites. La MEO et HEO se partagent les 10% de satellites restants. La MEO permet un entre-deux, avec des délais de communication moindre qu'avec l'orbite géostationnaire, mais avec un angle de vue plus large sur la surface terrestre qu'en LEO.

¹ l'industrie spatiale étant internationalisée, les termes anglais sont la norme pour désigner les concepts techniques.

Cependant, une classification des actifs en fonction de leur usage offre d'autres perspectives. Deux catégories sont alors possibles : les usages civils et les usages militaires.

L'usage civil des actifs en orbites

Principale raison d'être actuelle des satellites, les actifs civils représentent la majeure partie des constellations – ou flottes – en orbite. On distingue principalement :

- les satellites d'observation optique. Les uns, tournés vers la Terre, offrent des images toujours plus précises de la surface terrestre. On peut ainsi observer les surfaces agricoles, les événements particuliers comme les éruptions volcaniques ou les inondations, l'érosion des côtes, l'urbanisation, ou encore le déplacement des masses nuageuses. L'optique dépasse également le spectre visible, avec des satellites permettant de suivre par exemple la température des océans, et ainsi suivre les changements climatiques en cours.

Les autres, les satellites orientés vers l'espace, les télescopes et radiotélescopes, conçus pour observer les astres dans et au-delà du système solaire. Leur présence se justifie par la qualité d'observation possible uniquement hors de l'atmosphère terrestre. Le plus célèbre d'entre eux est le télescope Hubble à qui l'on doit nombre de clichés impressionnants.



La galaxie du Sombrero

- les satellites de télémétrie : équipés de divers capteurs, ils sont en mesures de mesurer nombre de grandeurs physiques dans l'atmosphère, les océans ou encore la surface des sols
- les satellites de communication : présents pour transmettre les communications d'un point à l'autre du globe, ils viennent en complément des réseaux d'antennes. Parmi ces satellites on compte aussi ceux permettant de faire fonctionner la géolocalisation (GPS, etc...)

Les usages militaires des actifs en orbites

Construits souvent avec les mêmes composants et capteurs que les satellites civils, ce sont surtout les cibles observées ou mesurées qui caractérisent la nature militaire de ces actifs. Une classification similaire aux satellites civils est donc possible. Seule la diversité des capteurs utilisés est restreinte (par exemple, la mesure du CO₂ dans l'atmosphère ne représente a priori aucun intérêt militaire).

Ce sont les capacités de nuisance et de collecte des renseignements qui caractérisent les satellites militaires. Cependant bien loin des fictions littéraires et cinématographiques, les premiers affrontements de l'humanité dans l'espace se déroulent dans l'indifférence des peuples et le silence du vide spatial. En effet, atteindre un autre actif avec de l'armement conventionnel reste une tâche ardue. Ainsi, la "destruction" d'un satellite ennemi se limite donc parfois à supprimer, voire détruire, ses capacités d'observation en aveuglant les très sensibles capteurs embarqués sur le satellite avec des lasers puissants ou des émissions d'infrarouges depuis le sol.

Néanmoins, cette réalité risque de ne pas durer longtemps. Du fait de la baisse du coût de mise en orbite, et des progrès technologiques, le risque est maintenant que des satellites espions se rapprochent de satellites civils ou militaires pour en capter

les communications, ou que des satellites militaires furtifs puissent s'approcher d'un actif pour le détruire (ou simplement le rendre inactif) sans que l'on sache qui a mené cette opération. C'est donc dans cette optique que la ministre des Armées, Florence Parly, a renommé en juillet 2020 officiellement *l'arme de l'Air* en y ajoutant le volet 'espace', et a publié dans le même mouvement une véritable stratégie militaire française de l'espace². Ceci marque la prise de conscience de la France quant à la sécurité hors atmosphère, et notamment de la nécessité de développer des moyens d'auto-défense dans l'espace. C'est ainsi que la ministre a annoncé la mise en service de nano-satellites patrouilleurs courant 2023 qui assureront la sécurité des actifs français. Ces satellites, baptisés YODA (pour Yeux en Orbite pour un Démonstrateur Agile) seront le coup d'essai pour l'envoi d'un satellite plus gros et complètement opérationnel en 2030.

C. L'ESPACE AU DELA DES ORBITES TERRESTRES

Le fondement de l'imaginaire autour de l'espace hors de l'orbite terrestre remonte tant à la photo du "point bleu pâle" (la Terre) prise par la sonde Voyager en 1990, qu'au programme Apollo et aux premiers hommes sur la Lune. A ce jour, en ce qui concerne l'espace au-delà des orbites terrestres, seules des missions scientifiques (sondes, rovers, et Apollo) ont été menées par les agences spatiales de différents états. Néanmoins, un foisonnement d'entreprises du New space s'intéressent à présent à cette partie de l'espace. Ainsi, en parallèle d'un regain d'activités d'exploration et de recherche de la part des agences nationales, les années qui viennent devraient voir l'émergence d'une économie spatiale fondée sur l'exploitation *in situ* des ressources spatiales.

²<https://www.defense.gouv.fr/actualites/articles/florence-parly-devoile-la-strategie-spatiale-francaise-de-defense>

a) Les missions scientifiques européennes

Les missions scientifiques dans l'espace au-delà de l'orbite terrestre se font au niveau de l'ESA, aucun État européen n'envoie seul des sondes dans cet espace.

Sans faire un panorama exhaustif des missions européennes, une des plus notables est la mission Rosetta. Cette mission est remarquable à plusieurs niveaux. D'une part, l'ESA a piloté seule cette mission, sans qu'elle soit en partenariat avec un autre agence spatiale non-européenne (comme c'est le cas de la plupart de ses missions). De plus, il s'agissait de la première sonde parvenant à se mettre en orbite autour d'une comète, et l'atterrisseur (Philae) de la sonde a été le premier objet à se poser sur la surface d'une comète.

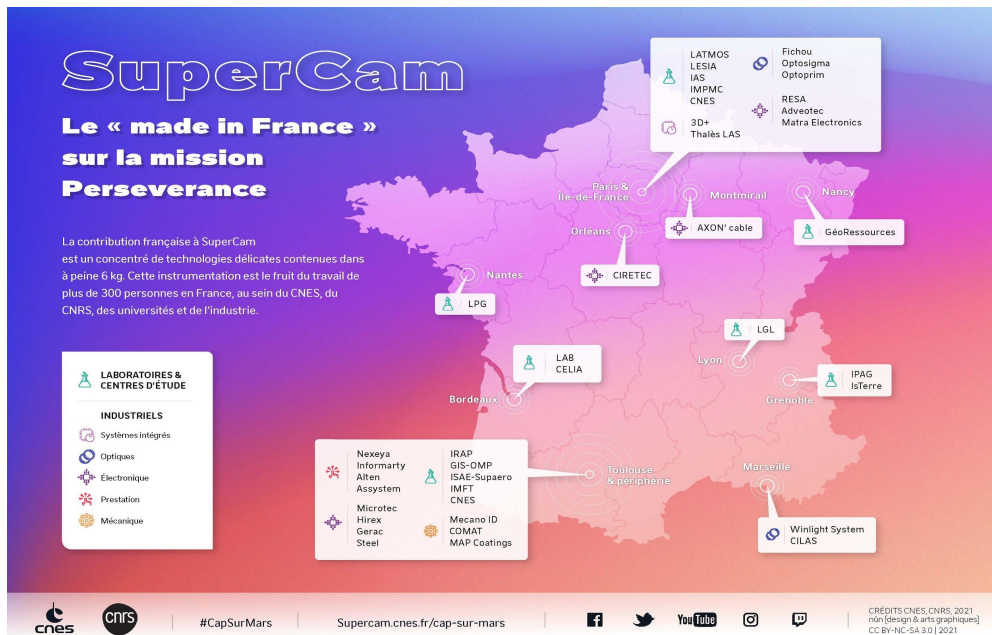
Vue la distance très lointaine de la comète, et donc les temps très longs de communication entre la sonde et la Terre, la sonde se devait d'être autonome pour toutes les phases critiques de la mission. L'ESA a ainsi démontré qu'elle savait maîtriser cette technologie, cruciale pour l'exploration et l'exploitation future de l'espace au-delà de la Lune. En effet, la distance Terre-Lune correspond à un décalage de seulement 3 secondes dans les communications, ce qui permet sans problème un contrôle à distance. A l'inverse, toute mission sur Mars ou à des distances similaires, ne peuvent pas être pilotées de la Terre, car les communications mettent au minimum une minute à parvenir sur place depuis la Terre. C'est pour cela que le rover Perseverance de la NASA, récemment posé sur Mars, a également dû gérer son atterrissage en complète autonomie.

Les futures missions scientifiques européennes sont de deux types. Premièrement, des missions habitées sur la Lune, en partenariat avec le programme Artemis de la NASA, avec des astronautes européens devant aller sur la future station spatiale en orbite autour de la Lune. Cette station spatiale nommée Gateway est développée par

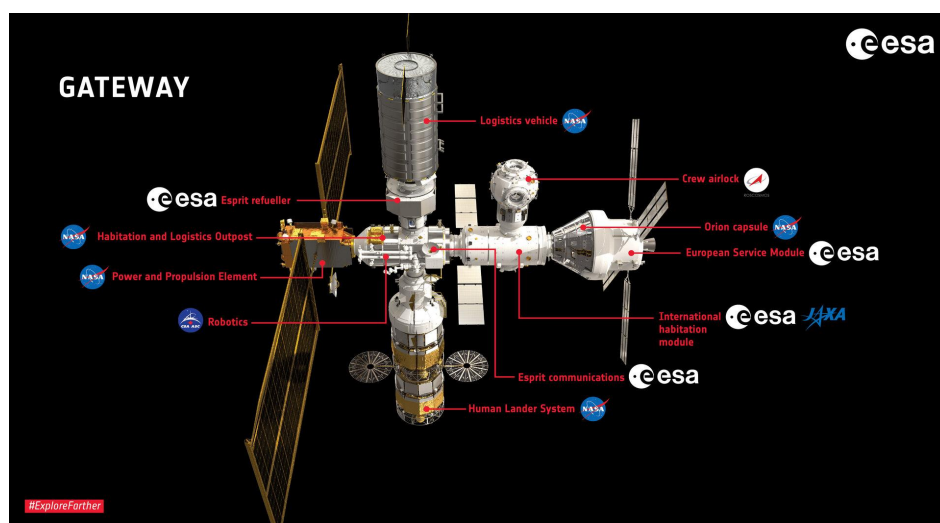
la NASA en partenariat avec trois des partenaires de la Station Spatiale Internationale (ISS): les agences européennes, canadiennes, et japonaises. L'ESA en construira néanmoins quasiment la moitié des modules, elle est donc particulièrement présente sur ce projet. Deuxièmement, un certain nombre de missions scientifiques inhabitées, avec des sondes envoyées sur Europe et sur les autres lunes de Jupiter afin de chercher à y détecter des traces de vie (prévues pour 2022 et 2024 en partenariat avec la NASA), une mission (déjà lancée) en partenariat avec l'agence spatiale japonaise pour explorer Mercure et étudier le Soleil, mais aussi et surtout le programme ExoMars (avec la participation de l'agence spatiale russe), avec une sonde déjà en orbite qui étudie l'atmosphère de Mars, et un futur atterrisseur devant poser le rover Rosalind-Franklin à la surface de Mars à partir de 2022. Après l'échec de l'atterrisseur expérimental Schiaparelli, cela permettrait à l'ESA de démontrer qu'elle aussi a la maîtrise de la technologie de l'atterrissage sur Mars, que seule la NASA maîtrise à ce jour, notamment avec deux rovers en service (Curiosity, et récemment Perseverance).

b) La contribution du secteur privé européen aux missions scientifiques de pointe

L'Europe dispose d'un important secteur industriel spatial. S'il est principalement tourné autour de l'accès à l'espace et des biens spatiaux, il a néanmoins les compétences pour participer à des missions plus lointaines. Ainsi, la caméra ("SuperCam") du rover Perseverance de la NASA et été conçue et fabriquée en France, grâce à des laboratoires et des entreprises d'excellence française :



De même, début janvier 2021, c'est avec Thales Alenia Space que l'ESA a signé un contrat pour la construction du module européen de la station lunaire Gateway. Ce module, "ESPRIT" (pour European System Providing Refueling, Infrastructure and Telecommunications) sera le poste de communication avec la Lune et le lieu pour recevoir les ravitaillements en carburant. Il comportera aussi un observatoire à 360° sur la Lune. Ce module va donc être construit à Cannes pour un lancement en 2024. Par ailleurs, Thales Alenia Space est aussi impliquée dans la construction d'autres modules de la station, dont certains modules américains.



c) L'écosystème européen pour l'exploitation privée de l'espace lointain

Si l'Europe ne compte pas d'acteurs privés équivalents à SpaceX dans sa vision de pouvoir opérer des vols commerciaux jusqu'à Mars, elle a néanmoins certaines infrastructures en place en vue d'incuber et développer un secteur de l'exploitation des ressources spatiales.

C'est le Luxembourg qui a pris l'initiative le premier, en lançant son programme "SpaceResources.lu" dès février 2016³. Il s'agit d'une initiative pilotée par l'agence spatiale luxembourgeoise, et qui consiste en un environnement économique et légal favorable aux investisseurs privés et aux entreprises qui s'intéressent à l'exploration du potentiel et à l'exploitation des ressources spatiales.

Fort de cette avance prise, le Luxembourg a ensuite signé avec l'ESA d'abord un mémorandum de coopération en 2019, puis fin 2020 un partenariat stratégique pour installer un "centre d'innovation" de référence au niveau européen sur le sujet des ressources spatiales⁴. En concentrant les financements, l'expertise scientifique et technique, et l'environnement légal et économique adéquat, ce centre d'innovation devrait permettre l'émergence d'acteurs privés européens dans le domaine de l'exploitation des ressources spatiales.

Ce centre d'innovation s'inscrit dans une stratégie européenne plus générale d'utilisation des ressources spatiales. Cette stratégie est détaillée dans un document publié en mai 2019 par l'ESA, et qui décrit l'approche à suivre en la matière⁵. Elle

³ <https://space-agency.public.lu/en/space-resources/the-initiative.html>

⁴ https://gouvernement.lu/fr/actualites/toutes_actualites/communiqués/2020/11-novembre/18-luxembourg-spaceresources.html

⁵ <https://exploration.esa.int/web/moon/-/61369-esa-space-resources-strategy>

comporte l'articulation nécessaire entre secteur public et privé, les technologies à développer, et le plan d'action, notamment avec une exploration du potentiel, un développement des technologies nécessaires, et leur démonstration d'abord sur Terre, puis en conditions réelles.

C'est ainsi que l'ESA a déjà mené des expériences de production d'oxygène à partir de simulats de régolithe lunaire⁶. Ce processus permet aussi d'extraire des métaux. Elle a aussi mené des expériences d'impression 3D⁷ à partir de simulats lunaire, pour étudier ce qui est faisable et prometteur. Enfin, dans la lignée de sa stratégie d'utilisation des ressources spatiales, l'ESA a récemment ouvert, le 12 Février 2021, un appel à idées sur les scénarios d'applications pratiques de l'utilisation des ressources spatiales⁸.

Ce mouvement est salubre car étant donné le coût très important de l'envoi dans l'espace des ressources nécessaires à l'exploration et à la colonisation de l'espace, l'utilisation in situ des ressources disponibles est une technologie considérée comme particulièrement cruciale pour pouvoir mener à bien ses ambitions dans l'espace au-delà des orbites terrestres⁹. Ainsi, l'utilisation de l'eau présente sous forme de glace sur la Lune sera utile tant pour alimenter les modules de soutien à la vie des astronautes que pour l'oxygène et l'hydrogène produits par son électrolyse. Les métaux et terres rares présents dans son sol pourront être utilisés pour la production de matériaux nécessaires mais aussi pour la construction. De même, le régolithe (la

⁶https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/ESA_opens_oxygen_plant_making_air_out_of_moondust

⁷https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/3D_printing_our_way_to_the_Moon

⁸<https://ideas.esa.int/servlet/hype/IMT?documentTableId=45087631495800637&userAction=Browse&templateName=&documentId=533fb0b1ff9a00fd44f509cd57800897>

⁹ <https://space-agency.public.lu/en/space-resources/faq.html>

“terre” à la surface de la Lune) pourra être utilisé en impression 3D pour construire des abris à la surface lunaire. Plus loin, l'utilisation des ressources disponibles sur les astéroïdes ou sur les planètes explorées sera capitale pour réduire les coûts des missions spatiales et en assurer le succès (pouvoir se reposer sur des ressources locales permet de limiter les risques de manquer d'une ressource). A l'inverse, l'extraction dans l'espace et l'envoi sur Terre de métaux rares ou autres ressources très chères sur Terre pourra également faire partie du modèle économique de l'exploration et de l'exploitation des ressources spatiales.

II. LE SECTEUR SPATIAL HORS UE

A. L'ACCES A L'ESPACE

Le domaine de l'accès à l'espace connaît depuis une décennie un engouement particulier pour le développement de nouveaux lanceurs, en particulier, bien que pas uniquement, dans le secteur privé. Bien que SpaceX soit la société la plus emblématique sur ce marché des lanceurs privés, de nombreux acteurs fort prometteurs se développent avec notamment les programmes de Blue Origin (New Shepard, New Glenn puis New Armstrong) mais aussi Firefly qui devrait mettre en service son lanceur Firefly Alpha en 2021 avant de viser le transport spatial vers la Lune. Cela ne saurait dire que le marché est exempt d'échecs commerciaux : en 2019, la société Vector, pourtant initialement prometteuse, a fait faillite, et est accompagnée dans ce triste destin chaque année par plusieurs projets (certes moins médiatisés). Ce développement de nouvelles capacités d'accès privé à l'espace concerne toutes les classes de lanceurs, avec des lanceurs de type *heavy* (Falcon-9,

Firefly Alpha) ou *super-heavy* (New Glenn, Firefly Beta, Falcon Heavy, Starship, Vulcan) afin de couvrir un pan plus large d'une demande commerciale grandissante.

L'objectif pour ces nouveaux lanceurs est de pouvoir répondre à une demande variée qui est de plus en plus orientée vers des lancements à plusieurs mises en orbite, parfois duales, ou pour le compte de plusieurs *smallsats* (petits satellites) par le biais notamment de partage de lancements, les "*rideshares*" rendus possible par le développement de plateformes de déploiement (*dispensers*). SpaceX et ses lanceurs Falcon-9 et Falcon heavy a ainsi lancé un programme agressif de *rideshare* pour concurrencer le marché de l'accès à l'espace sur de nouveaux marchés. Au total, ces nouveaux projets de lanceurs, variés pour couvrir les différentes exigences du marché, mettent directement à mal les programmes européens Ariane et Vega. Ce d'autant plus que l'avantage dont bénéficiaient ces programmes par le biais de leur grande sécurité (faibles taux d'échecs) se perd de jour en jour en raison de la fiabilité toujours plus grande des initiatives privées.

Le développement de nouvelles capacités de micro-lanceurs à l'échelle internationale est aussi une des grandes tendances du domaine de l'accès à l'espace. Les micro-lanceurs, aptes à mettre en orbite des objets de taille généralement située entre 200kg et 1 tonne, offrent l'avantage d'être plus facilement constructibles et donc de proposer des fenêtres de lancement plus flexibles aux clients. A ce jour, le fabricant le plus connu, car celui ayant démontré une réelle capacité commerciale dans le domaine, est Rocket Lab, société américano-néozélandaise dont les lancements s'effectuent depuis la Nouvelle-Zélande et prochainement depuis la Floride. Rocket Lab innove grâce à de nombreux contrats avec les administrations américaines mais aussi grâce à certaines commandes commerciales, et développe actuellement une capacité de récupération de boosters par un système ingénieux de parachutes. Outre Rocket Lab, de nombreux acteurs sont en cours de développement à des stades fluctuants. Parmi eux, Relativity Space ou autres programmes indiens et chinois se développent avec notamment pour marché les secteurs militaires domestiques. Ces

micro-lanceurs, qui requièrent des infrastructures au sol moins exigeantes que des lanceurs traditionnels, offrent aussi de nouvelles opportunités pour les lancements commerciaux.

Enfin, en matière d'accès à l'espace pour le vol habité, la donne internationale a récemment été rebattue par le lancement réussi des missions volant avec un habitacle Crew Dragon inauguré par SpaceX en 2020. Cette capacité privée replace les Etats-Unis dans la course mondiale du vol habité en dotant le pays d'une capacité autonome de vol habité, qui sera vraisemblablement prochainement jointe par Boeing et ses capsules Starliner. Outre ce retour des Etats-Unis dans le concert des nations disposant d'une capacité d'accès à l'Espace habitée, rejoignant la Russie et la Chine, de nouvelles nations développent leurs propres capacités avec des ambitions fortes pour l'Inde qui a lancé son programme de vol spatial habité, le *Human Spaceflight Program (HSP)* en 2007 et qui prévoit d'être opérationnel d'ici à fin 2021/début 2022. Ce programme consiste principalement à développer une capsule habitée, positionnée sur un lanceur GSLV Mk III adapté au vol spatial habité.

B. LES BIENS SPATIAUX

La précédente partie exposait les usages et fonctions des satellites, ou actifs placés en orbite autour de la Terre. Seront détaillés ici, les acteurs publics et privés possédant les actifs ainsi que les relations qu'ils entretiennent entre eux.

Les acteurs civils

Quatre agences publiques principales occupent une place prépondérante aujourd'hui dans l'espace.

La National Aeronautic And Space Administration (NASA), acteur historique créé en juillet 1958 dans le contexte de la guerre froide, qui verra le premier satellite

occidental, de l'équipe de Wernher von Braun, mis en orbite. L'agence, incarnant à elle seule le romantisme des débuts de l'ère spatiale reste aujourd'hui le plus gros budget mondial avec 22Mds de dollars.

La China National Space Administration (CNSA), fondée en avril 1993 est la plus récente des quatre agences, mais représente le second plus gros budget annuel avec 11Mds\$ de dollars. Indépendante, elle mène ses propres programmes de recherche scientifique et de vols habités. C'est en son sein que sont formés les taïkonautes qui résideront courant 2021 dans la nouvelle station spatiale chinoise.

L'European Space Agency (ESA), créée en mai 1975 est l'organe spatial public du vieux continent. Elle se caractérise par son fonctionnement inhabituel, puisqu'il s'agit d'une organisation internationale, comme l'OCDE ou l'ONU. Ainsi, parmi ses états-membres, on en compte une majorité qui font partie de l'Union Européenne, mais aussi des pays hors UE (Norvège, Suisse, Royaume-Uni), ainsi que des pays associés (comme le Canada). A l'inverse, tous les états-membres de l'UE ne font pas partie de l'ESA. Cette agence a la charge des activités civiles spatiales, notamment de recherche et d'exploration, en coopération avec les agences spatiales nationales des états-membres. Les financements des projets votés en conseil d'administration sont proportionnels au PIB des membres, et sont toujours sur une base volontaire : chaque pays membre a le choix de participer à un programme de l'ESA ou non. Elle est la troisième agence en termes de budget avec un plus de 6Mds€.

Enfin, RosCosMos, l'agence russe spatiale, se doit d'être mentionnée du fait de son histoire et sa place toujours très importante dans l'espace, notamment via sa participation à l'ISS et ses lanceurs. Elle dispose ainsi d'une expertise encore très poussée, ainsi que d'un budget annuel de 2.8Mds\$.

Par ailleurs, de nombreuses autres agences sont des acteurs prenant de plus en plus de place, comme les agences japonaises (2Mds\$ de budget) et indiennes (2Mds\$ également), mais aussi plus récemment l'agence spatiale émiratie ou d'autres encore.

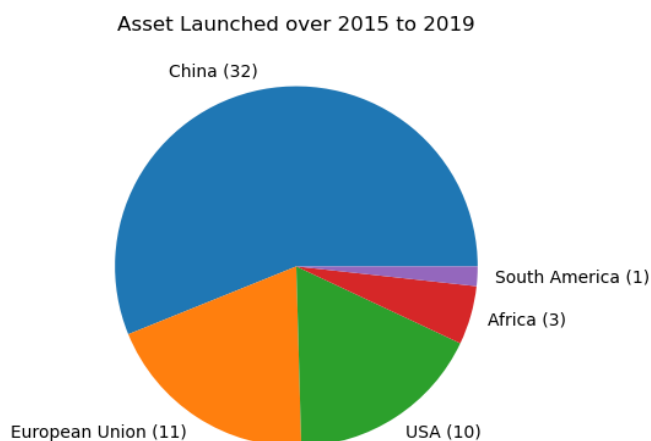
Les acteurs militaires

L'envoi de satellites civils pouvant être assuré par des acteurs privés ou des coopérations entre pays ; le pendant militaire des actifs spatiaux est quant à lui un sujet de souveraineté nationale devenu majeur. C'est pourquoi, les acteurs militaires, de par la nature même de leurs activités, se restreignent souvent à des échelles nationales. Ce phénomène est marquant en Europe notamment, et le cas de la France est un parfait exemple de l'importance de l'autonomie militaire dans ce domaine.

C'est en janvier 1991, au déclenchement de l'opération Tempête du Désert pendant la guerre du Golfe. Que l'État-major Français a pris conscience de son honteux retard en matière de renseignement et de collecte d'information sur le champ de bataille grâce aux satellites. En effet, les Américains affichant une avance considérable en la matière, ils fournirent aux pays coalisés renseignements et objectifs aux pilotes. C'est notamment cette supériorité dans l'observation et la planification des attaques qui offrit une victoire rapide et sans appel.

Suite à cette constatation, l'État-major Français décida de se doter de sa propre flotte de satellites de renseignements. Sont alors lancés, à partir de 1995 les satellites de la série Hélios. S'en suivront les satellites du programme Syracuse (télécommunication) à partir de 1991 (le dernier ayant été lancé en 2020 avec Syracuse 4), Pléiades (imagerie) lancés en 2012. Les lancements à venir concerneront le programme Franco-italien de Composante Spatiale Optique (CSO) dotés d'un matériel capable "d'identifier une arme à bord d'un pick-up".

En comparaison, les autres grandes puissances, et de manière plus récente la Chine, renforcent leurs flottes de satellites militaires, annonçant le déplacement des tensions militaires entre nations au-delà de l'atmosphère, et ce malgré le fait que l'envoi d'armes de destruction massive soit interdit par le traité international de l'espace signé en 1967. Ainsi, entre 2015 et 2019 ce ne sont pas moins de 57 actifs à usage militaire qui ont été placés en orbite, dont une majorité de chinois.



C. L'ESPACE AU DELA DES ORBITES TERRESTRES

Comme on l'a vu, l'Europe est très présente au niveau de l'espace au-delà des orbites terrestres, tant au niveau scientifique, avec des missions démontrant un haut niveau de maîtrise technologique (même si l'ESA doit encore faire la preuve de sa maîtrise d'un atterrissage sur Mars), qu'au niveau de l'écosystème en vue d'une exploitation commerciale de cette partie de l'espace. Elle travaille souvent en partenariat avec les agences partenaires de l'ISS (y compris l'agence russe) sur les missions scientifiques et d'exploration. Néanmoins, elle reste dépendante des capacités américaines (et notamment celles du secteur privé développé sous l'impulsion de la NASA) notamment pour l'accès à l'espace au-delà des orbites terrestres. Par ailleurs, de

nombreux autres pays affirment leurs ambitions spatiales en multipliant les missions scientifiques.

a) Le secteur “NewSpace” privé américain à la conquête de l’espace lointain

Le NewSpace américain comporte principalement deux types d’approches vis-à-vis de l’espace lointain.

D’une part, des entreprises comme Space X ou Blue Origin, sous l’impulsion de la vision de leurs fondateurs (Elon Musk, et Jeff Bezos), souhaitent devenir les “plateformes” de l’accès à l’espace, y compris lointain. Notamment dans le cas d’Elon Musk, il a pour objectif ultime de faire descendre le prix du billet aller-retour sur Mars pour une personne à 200 000\$, à savoir le prix médian d’une maison aux USA. S’il parvenait à concrétiser ce pari, l’aller-retour sur Mars serait alors à la portée de (presque) tous, et la colonisation pérenne de Mars serait alors réalistiquement envisageable. C’est pour cela que ces entreprises sont impliquées dans les missions vers la Lune du programme Artemis, notamment pour les missions de cargo.

D’autre part, une galaxie de start-ups visant explicitement le développement de l’exploitation in-situ des ressources spatiales. A ce stade, elles restent de petite taille, mais la NASA a par exemple sélectionné dix d’entre elles en 2018 pour son programme “Next Space Technologies for Exploration Partnerships-2” (NextSTEP¹⁰). Ce programme vise d’une part à identifier les gaps technologiques à l’utilisation des ressources spatiales, et d’autre part au développement et à la démonstration de ces technologies.

¹⁰<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-selects-us-companies-to-advance-space-resource-collection>

Il est important de noter que certaines de ces technologies sont déjà au stade de la démonstration pour la NASA et les entreprises privées partenaires, notamment avec le rover Perseverance et son module MOXIE (“Mars Oxygen ISRU Experiment”, ou expérience d’utilisation in situ de l’oxygène sur Mars), développé conjointement par la NASA (via le Jet Propulsion Lab), le MIT, et l’entreprise OxEon Energy¹¹. Il s’agit d’extraire de l’oxygène pur à partir du dioxyde de carbone qui compose 96% de l’atmosphère martienne. Obtenir de l’oxygène directement sur place est d’une importance capitale tant pour la consommation humaine sur place, si des humains devaient poser le pied sur Mars, mais aussi et surtout pour la production d’oxygène liquide, qui fait un excellent comburant pour la propulsion des fusées. Produire le carburant pour les propulseurs directement sur Mars permettrait de réduire drastiquement la quantité de carburant nécessaire d’embarquer de la Terre (en effet, chaque kilo de cargo à envoyer dans l’espace nécessite 50 à 100 kilos de carburant pour y parvenir).

b) Les ambitions de la Chine

Le programme spatial chinois a véritablement débuté à partir de l’arrivée au pouvoir de Deng Xiaoping, et l’extension des ambitions chinoises au-delà du simple programme militaire de missiles balistiques intercontinentaux.

Cela s’est matérialisé par une volonté de rattraper et dépasser les autres grandes puissances spatiales. C’est ainsi que la Chine a été le troisième pays à envoyer par elle-même un homme dans l’espace, Yang Liwei, en 2003. Du fait de son exclusion de la Station Spatiale Internationale, elle a ensuite acquis par elle-même les techniques

¹¹ <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/moxie/>

d'amarrage dans l'espace, et a envoyé deux laboratoires en orbite, Tiangong 1 et 2. Sur la base de ces succès, une station spatiale à part entière et permanente est prévue d'être opérationnelle d'ici 2022. Des modules de cette station sont déjà prêts à être lancés en orbite, et de nombreux pays pourraient être intéressés de profiter des opportunités offertes par cette nouvelle station.

En parallèle de cet ambitieux programme spatial habité, la Chine a été la première puissance à poser un alunisseur sur la face cachée de la Lune. Ceci a requis le positionnement d'un satellite de télécommunication autour de la Lune, afin de permettre la communication avec l'alunisseur. Dans la foulée, la Chine est devenue le 16 décembre 2020 le troisième pays à rapporter des échantillons de sol lunaire. La mission suivante, Chang'e-6, avec une collaboration du CNES français, ira prélever et rapporter des échantillons au pôle sud de la Lune, une zone particulièrement prometteuse pour l'exploitation de ressources et l'installation d'une base humaine permanente.

Pour ce qui est de Mars, bien qu'elle ait été devancée par l'Inde en ce qui concerne la mise en orbite d'une sonde autour de la planète rouge, la sonde chinoise Tianwen-1 y a également réussi le 10 février dernier. Après une période d'observation de la surface martienne et d'identification de la meilleure zone d'atterrissage, un rover doit se séparer de la sonde et se poser sur Mars en mai ou juin 2021. Si le rover Tianwen-1 parvenait à se poser avec succès, cela serait une réussite majeure pour le programme spatial chinois, car elle serait alors seulement la seconde nation, après les USA, à avoir montré qu'elle maîtrise la technologie d'atterrissage sur Mars (qui est très nettement plus difficile que l'alunissage, du fait de la présence d'une atmosphère, et du fait de l'impossibilité de contrôler la mission depuis la Terre du fait de la distance, rendant les communications trop lentes).

Pris ensemble, ces éléments démontrent que le programme spatial chinois en ce qui concerne l'espace au-delà de l'orbite terrestre est à la fois très ambitieux, très clair,

et réaliste au regard des moyens consentis par le gouvernement chinois. L'objectif global en est "l'exploitation de l'espace Terre-Lune"¹². Ce concept se décline ainsi: 1) missions habitées dans la station spatiale chinoise, sur la Lune, et établissement d'une base permanente sur la Lune (une "station lunaire internationale de recherche"¹³ qui intéresse déjà la Russie, et potentiellement l'ESA également), 2) exploration de Mars et du système solaire par des missions robotiques, et 3) exploitation industrielle de l'espace Terre-Lune, notamment avec la construction de centrales solaires spatiales (en vue d'alimenter la Terre en électricité en transmettant l'énergie par laser) à partir de ressources spatiales (notamment lunaires)¹².

c) D'autres pays qui se joignent à la course

En plus des nations spatiales historiques, de nouveaux pays se joignent à la course. Parmi les pays que l'on n'attendait pas dans l'espace, se trouvent les Émirats-Arabo-Unis. Si les émiratis se sont reposés de manière très poussée sur des partenariats avec les américains et les japonais pour l'envoi de leur sonde Hope en orbite autour de Mars, ils s'appuient néanmoins sur ces missions pour développer un écosystème industriel de l'espace sur leur sol. C'est probablement l'exemple le plus frappant de la nouvelle donne dans l'espace en cette décennie 2020.

L'Inde fait aussi figure de puissance émergente de l'espace. Ayant été la première puissance asiatique à parvenir à envoyer un orbiteur autour de Mars (après avoir réussi à en faire de même autour de la Lune dès 2008), elle a pour ambition d'envoyer prochainement un second orbiteur autour de Mars, ainsi que de positionner un observatoire spatial du Soleil au point de Lagrange entre la Terre et le Soleil à l'horizon 2025.

¹² http://www.chinadaily.com.cn/china/2016-03/08/content_23775949.htm

¹³ <https://spacenews.com/china-is-aiming-to-attract-partners-for-an-international-lunar-research-station/>

III. UNE EUROPE DE L'ESPACE A LA HAUTEUR DES ENJEUX FUTURS

A. L'ACCES A L'ESPACE

Enjeux

L'enjeu pour l'Union européenne en matière d'accès à l'espace est donc, dans un contexte de compétition accrue, de ne pas se laisser distancer dans le concert des nations spatiales. Là où de nouvelles puissances (Chine, bientôt l'Inde) émergent et développent des capacités propres de vol habité, l'Europe du spatial reste dépendante de ses partenaires américains (par le biais d'une société privée en l'occurrence, SpaceX, mais sous coopération avec la NASA) ou russes. À plus long terme, il sera même question de la capacité pour l'Europe de disposer d'une capacité de vol habité permanente là où les États-Unis et la Chine pourraient avoir à terme des stations spatiales en propre, dénuées de dépendance à des partenariats internationaux. Il s'agit donc de rompre avec l'échec du programme Hermès de vol spatial habité qui s'était soldé par un échec pour l'Europe.

De même sur le plan de l'accès à l'espace commercial, l'Europe souffre de l'absence d'une offre plus complète avec des capacités de micro-lanceurs plus flexibles en termes notamment de fenêtres de lancement. Cette absence met en péril les programmes militaires et de défense car elle les rend moins résilients en cas de défaillance ou de destruction d'un satellite membre d'un système de défense Européen. A contrario, les pays qui maîtrisent un accès à l'espace flexible bénéficieront d'un avantage stratégique sur leurs adversaires. Une logique similaire est applicable à l'industrie privée dans la mesure où une capacité de lancement sur

le sol européen, synonyme de moindres coûts associés au transport des satellites et donc d'une meilleure compétitivité est susceptible de bénéficier à l'ensemble des acteurs du spatial.

Pour une vision européenne

Il est essentiel d'entreprendre une politique qui permettra de maintenir l'Europe à flots pour les décennies à venir. En matière d'accès à l'espace, nous avons pu mettre en valeur certains des enjeux qui se poseront à l'Europe spatiale de demain. L'Union européenne et ses membres doivent être souverains dans leur accès à l'Espace, tant sur le plan du vol spatial habité, que de l'accès commercial à l'espace.

Sur le plan du vol spatial habité, l'Europe doit être en capacité de mettre en place son propre programme de vol habité en consolidant ses composantes actuelles sur le plan des lanceurs et en investissant dans les capsules de vol habité. Sur ces dernières, les acteurs européens ne maîtrisent pas encore l'ensemble des briques technologiques, bien que leur contribution au programme Orion contribue à les rapprocher de cet objectif. A part ces dernières briques technologiques nécessaires pour le vol habité (notamment les capsules), nous disposons de l'ensemble des autres technologies nécessaires, et il n'y a dès lors pas de raison pour que nous restions à la traîne dans le concert des grandes nations spatiales.

Sur le plan de l'accès à l'espace commercial, pour assurer l'avenir de la souveraineté spatiale de l'Union Européenne, il est essentiel d'avoir à disposition une composante de lancement autonome et réactive. Ainsi, le développement d'une vraie capacité de micro-lanceurs autonome est crucial. Elle permet en effet le déploiement d'une offre d'accès à l'espace, certes plus onéreuse que les lanceurs de type heavy ou super-heavy, mais qui facilite le remplacement de satellites militaires en un temps record. Cette grande réactivité sur les lancements permet d'éviter toute compromission des

programmes de sécurité et de défense et favorise également la réactivité sur le plan commercial.

B. LES BIENS SPATIAUX, OUTILS D'INDEPENDANCE DE L'EUROPE

L'Union européenne doit agir afin d'affirmer son autonomie dans le domaine spatial. Ces enjeux se caractérisent par une distinction claire de l'aspect civil d'une part avec les satellites civils (à destination commerciale) et militaires d'autre part (satellites notamment d'observation, de communication et de renseignement). L'aspect scientifique étant le plus souvent international, la notion d'autonomie a dans ce cas moins de sens, mais d'autres enjeux sont à prendre en compte.

L'enjeu du secteur privé s'articule notamment autour de l'émergence d'un internet européen (un "Euronet"). Cela nécessite une constellation dédiée aux télécommunications civiles afin de ne pas dépendre des acteurs américains, SpaceX en tête. Mais aussi de compléter l'offre d'accès à internet en plus de la 5G et de la fibre pour les clients particuliers ou professionnels. En effet l'avantage non négligeable du satellite est l'absence de travaux préalables qui s'avère très utile pour les déserts numériques ou pour l'accès à Internet dans les transports comme les avions.

Cependant, cette autonomie vis à vis de la Chine et des USA passe aussi par la conception et la capacité de production des composants hardware et software des actifs par des entreprises exclusivement européennes, ainsi que par la présence d'acteurs capables d'assurer la gestion du trafic. Sur ces points, l'Europe détient déjà son autonomie, et doit donc veiller à la conserver.

L'aspect militaire, quant à lui, prend son essence dans la sécurité informatique et physique des satellites. En effet, les composants des sociétés industrielles, les entreprises, les particuliers, les objets connectés tels que dans les hôpitaux, les systèmes de gestion des trafics routiers ou les futures voitures autonomes, sont autant de sources de déstabilisations à la portée des nations aux volontés belliqueuses.

Il convient alors à l'Europe de s'organiser et de s'armer afin de faire face à ces menaces. Dans cette optique et de manière indépendante, la nouvelle armée de l'air et de l'espace a mené le premier exercice militaire français dans l'espace, du 8 au 12 mars 2021. Cet exercice baptisé AsterX (en référence au premier satellite français envoyé dans l'espace), qui simulait l'attaque d'un satellite français par un satellite ennemi doté d'un bras articulé, s'est soldé par une réussite. Il avait pour but d'éprouver le commandement spatial basé à Toulouse et d'en évaluer les points faibles afin de conforter l'expertise française dans le domaine de la sécurité spatiale.

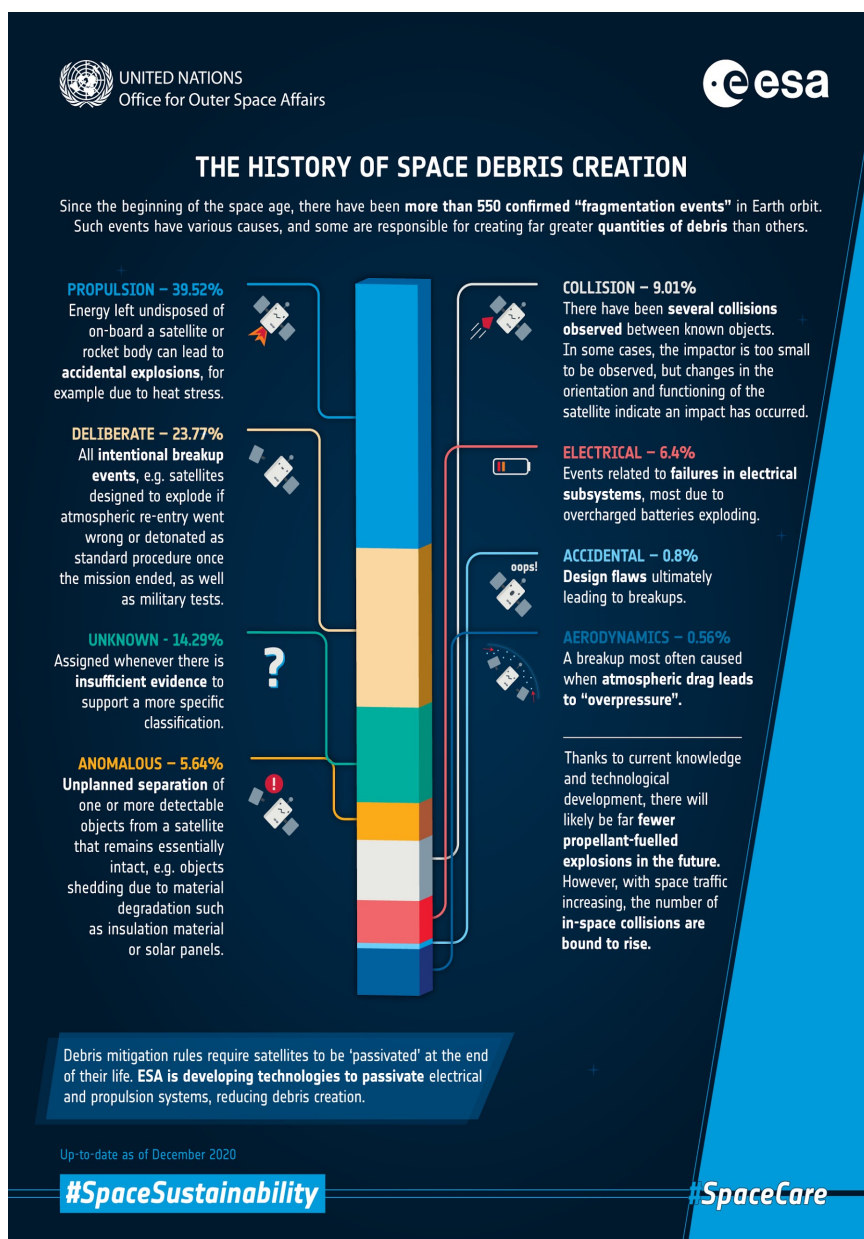
En parallèle, le domaine de la recherche présente une ambivalence. D'une part, la coopération entre nations et acteurs privés de différents pays est indispensable à la réussite de certaines missions ou programmes. Mais d'autre part, afin de prouver aux autres puissances sa maîtrise technique, l'Union européenne se doit d'atteindre les mêmes réussites dans ses missions scientifiques que ses partenaires-concurrents, quitte à collaborer avec eux une fois cela fait.

L'enjeu réside alors dans la formation et le maintien des compétences des scientifiques et ingénieurs spatiaux européens, de qualité et en quantité suffisante pour pouvoir réaliser ses ambitions. Ainsi le caractère éminemment géopolitique de l'espace mérite ouverture et échanges mais aussi vigilance car il reste un domaine où les pays membres de l'Union européenne peuvent rivaliser avec les grandes puissances de par leur maîtrise technique.

C. LE SYNDROME DE KESSLER, UN DANGER REEL

Imaginé à la fin des années 1970 par la NASA, le syndrome de Kessler décrit une situation où, au-delà d'une certaine densité de biens spatiaux en orbite, une collision entre deux biens spatiaux créerait une réaction en chaîne de collision-génération de débris. Les très nombreux débris spatiaux libérés à très grande vitesse par cette collision initiale rencontreraient en orbite d'autres biens spatiaux, les détruisant au passage du fait de leur très grande vitesse (plusieurs km/s), engendrant ainsi encore plus de débris. Cette réaction en chaîne se poursuivrait de manière exponentielle jusqu'à ce que l'ensemble des biens spatiaux sur l'orbite concernée (probablement l'orbite basse, étant donnée la forte densité de biens spatiaux qui y résident, et les vitesses importantes des objets sur ces orbites) soient détruits. Ainsi, l'orbite ne serait plus peuplée que d'une nuée extrêmement dense de débris spatiaux orbitant à très grande vitesse.

Au-delà de la destruction de tous ces biens spatiaux, et des effets sur les activités humaines (plus de prévisions météo, de communication, de géolocalisation, etc.), la conséquence du syndrome de Kessler serait que l'accès à l'espace deviendrait interdit à l'humanité pour plusieurs générations. En effet, tout objet envoyé dans l'espace depuis la Terre serait immanquablement détruit lors de sa traversée de l'orbite concernée par la nuée dense de débris peuplant cette orbite.



C'est pourquoi un cadre de "Space Traffic Management" (STM) pour gérer le trafic spatial est crucial. L'Europe, en tant que puissance spatiale relativement neutre, est à la pointe de ces efforts. Par ailleurs, des efforts pour réduire les incidents conduisant à la destruction de biens spatiaux et à la libération de débris (cf infographie ci-dessus) sont menés au niveau international, de même que l'instauration d'une obligation de désorbiter les biens spatiaux arrivés en fin de vie (cf infographie ci-dessous). Ainsi, les biens spatiaux actuellement lancés devraient être moins "dangereux" (au sens ayant un plus faible risque de dysfonctionner et

libérer des débris) que leurs prédécesseurs, et leur désorbitage en fin de vie permettra également de libérer l'espace et limiter les risques d'un scénario catastrophique à la Kessler.

UNITED NATIONS
Office for Outer Space Affairs

esa

THE ROLE OF REENTRIES

Every mission comes to an end – what then?

Rockets and satellites left in orbit can collide, creating dangerous debris. To comply with international debris mitigation guidelines, those in low-Earth orbits **should be designed to safely reenter Earth's atmosphere.**

As objects reenter at high speed, an enormous amount of **friction and heat is created**, often **causing them to disintegrate** before they reach Earth, although fragments may survive.

Small objects disintegrate entirely, while **larger bodies can stay intact** and so should be **controlled to safely reenter** over uninhabited regions, such as the oceans.

At ESA, work is being done to **design spacecraft that will break-up more efficiently**, increasing the number and type of space objects that can disintegrate entirely.

Larger bodies can stay intact, so they are controlled to reenter over uninhabited regions

Small objects disintegrate entirely

Every year in the last decade saw about 100 satellites and rocket bodies reenter Earth's atmosphere, with a total annual mass of roughly 150 tonnes (similar in weight to a small house!). Managing reentries is a fundamental aspect of ensuring the sustainable use of space.

Up-to-date as of December 2020

#SpaceSustainability

SpaceCare

En parallèle de l'enjeu capital du développement par l'Europe d'une réglementation en matière de STM qui deviendrait la référence mondiale, un enjeu très important demeure le "nettoyage" des orbites basses des débris les plus dangereux. Ces débris ont récemment été identifiés dans un "top 50" élaboré conjointement par des

scientifiques américains, chinois, et européens¹⁴ (une telle publication conjointe représentant une première mondiale étant donné l'antagonisme entre USA et Chine en matière spatiale), bien qu'elle omette pour l'instant les débris américains d'origine militaire. Sur ce sujet du nettoyage, l'Europe possède, là aussi, un véritable coup à jouer en créant une économie du nettoyage des débris spatiaux et en développant les technologies le permettant.

D. L'ESPACE AU DELA DES ORBITES TERRESTRES

Les enjeux pour l'Europe dans l'espace au-delà des orbites terrestres, sont de deux ordres :

- le développement des technologies d'exploitation in situ des ressources spatiales.
- la présence humaine pérenne d'européens dans l'espace, et notamment sur la Lune, puis sur Mars.

Ces deux enjeux se renforcent mutuellement, puisque l'un n'ira pas sans l'autre.

En la matière, l'Europe, via l'ESA, a déjà une vision assez claire, et son plan est à la fois bien conçu, et cohérent, notamment avec sa stratégie pour l'utilisation in situ des ressources d'une part, et sa participation très active au programme Artemis.

Elle devrait néanmoins réhausser son ambition, notamment en ne visant pas seulement la construction d'un "Village lunaire¹⁵" international sur le pôle sud, mais en visant expressément et explicitement de participer à la future colonisation de Mars, après y avoir posé d'abord un rover (Rosalind-Franklin à partir de 2022), puis y

¹⁴ <https://sciences-techniques.cnes.fr/fr/top-50-des-debris-spatiaux-les-plus-dangereux>

¹⁵ https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Un_village_sur_la_Lune

avoir envoyé des européens pour un premier vol habité. Les horizons temporels liés à une présence humaine permanente d'européens sur Mars sont particulièrement à long-terme, mais ils doivent néanmoins être identifiés et planifiés dès maintenant, comme elle le fait déjà pour la future présence humaine européenne sur la Lune¹⁶.

L'enjeu qui restera sera alors principalement budgétaire et politique, avec la nécessité que les états-membres de l'ESA lui donnent les moyens de l'ambition collective européenne, notamment en matière de recherche, et de capacités européennes de lancement de vols habités (cf III. A) sur l'accès à l'espace).

PROPOSITIONS

A. UNE DOCTRINE MILITAIRE EUROPEENNE POUR L'ARMEE DE L'ESPACE

Contrairement au cas du cyber ou de l'IA, les investissements nécessaires au développement d'une armée de l'espace sont très importants, tant au niveau financier que technologique. Si l'on veut développer des capacités militaires dans l'espace, il est donc capital qu'une véritable planification à long terme (plus de vingt ans) soit décidée maintenant, avec un objectif clair et assumé, qui ne risque pas de changer au gré du temps politique. Ainsi, en la matière, ce qui manque le plus à l'Europe, c'est une doctrine militaire européenne assumée en matière d'espace.

La question de l'adoption d'une vision commune en la matière se pose d'autant plus directement que la mutualisation avec les alliés européens devient la norme dans ce

¹⁶https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/CDF/ESA_engineers_assess_Moon_Village_habitat

domaine. Cette question devient un problème politique majeur lorsqu'on touche à l'idée de développer une doctrine offensive. En effet, d'un point de vue politique, il est très difficile pour les européens d'assumer actuellement (contrairement aux Chinois, par exemple) que l'on souhaite être en capacité d'ici dix ou vingt ans de détruire des satellites ennemis.

Nous proposons donc de profiter de l'éloignement actuel des USA de l'Europe et de la montée en puissance de la Chine, pour entamer dès à présent le travail doctrinal sur la défense spatiale dont souhaite se doter l'Europe, y compris en termes de capacités offensives. Ce travail devra être entrepris en parallèle :

- 1) conjointement par les commissions sécurité et défense, et industrie, recherche et énergie du Parlement européen,
- 2) par les armées nationales en lien avec leurs agences spatiales nationales respectives,
- 3) par la commission avec les agences européennes compétentes (ESA 2.0, agence européenne de défense, agence du GNSS européen, et centre satellitaire de l'UE).

Une fois ces réflexions doctrinales menées à leur terme, le résultat devra prendre la forme d'une directive qui fixera les objectifs à atteindre pour les États membres. Cette programmation pluriannuelle, nécessairement adoptée à l'unanimité par les chefs d'États et de gouvernements au Conseil européen, permettra à l'Union européenne d'atteindre ses objectifs à long terme en matière de défense spatiale.. C'est à partir de cette doctrine claire et à l'influence réglementaire forte que l'Union européenne pourra lancer le programme de recherche et la planification industrielle adaptés à la réalisation de d'une défense spatiale européenne efficace.

B. UNIFIER LE COMMANDEMENT DE LA DEFENSE SPATIALE EUROPEENNE.

Forts de cette nouvelle doctrine militaire européenne en matière de défense spatiale, traduite dans la loi européenne via la directive proposée ci-dessus, l'Union européenne devra se doter d'une structure de commandement unique, au circuit de décision rapide, afin de pouvoir réagir rapidement aux menaces et attaques. Cela devrait passer par **l'ajout d'une compétence exclusive en matière de défense spatiale aux prérogatives de l'Agence européenne de défense. L'agence européenne serait ainsi dotée de capacités de défense spatiale propres, gérées en direct par cette agence. La mission de cette agence, serait d'assurer grâce à ces moyens la sécurité des constellations privées et étatiques européennes. Elle serait placée sous l'égide de la Commission Européenne, mais avec un mécanisme de prise de décision rapide, et aurait la responsabilité de l'intégrité informatique et physique des actifs européens en orbite.**

Le commandement de cette agence serait composé, à l'instar des institutions européennes, de personnels militaires issus des pays membres de l'Union. De même pour le financement, il serait inclus dans le budget participatif des pays.

La protection physique serait assurée par la présence, en orbite, d'actifs militaires capables de surveiller les satellites des autres nations et de déployer des moyens de dissuasion en cas de menace avérée. Ces moyens peuvent être le brouillage des communications, l'aveuglement par laser ou encore la destruction effective par l'utilisation d'armement conventionnel (comme l'Inde en mars 2019 qui a détruit un de ses propre satellite avec un missile). Parallèlement, la protection informatique des actifs pourra être assurée par des équipes au sol.

Pour aller plus loin, un volet renseignement pourra être ensuite ajouté via l'envoi en orbite de capacités de renseignement propres à l'Agence européenne de défense, et

se traduire par une distribution des informations collectées vers les états-majors des pays de l'Union concernés en vue de leur utilisation propre.

Ces moyens militaires propres au niveau européen viendront donc en complément des moyens nationaux, notamment en matière de renseignement, qui devrait logiquement rester une prérogative nationale. Par contre, en ce qui concerne la sécurité et la protection des biens spatiaux civils et militaires européens, la création de moyens de défense mutualisés sous le commandement unique de l'Agence européenne de défense serait le plus logique et le plus efficace.

C. CONSOLIDER LES EFFORTS EUROPEENS EN MATIERE D'ACCES A L'ESPACE

Tant pour répondre aux impératifs militaires de défense spatiale décrits ci-dessus, que pour s'insérer avec efficacité dans la compétition mondiale en matière d'accès à l'espace, une politique concertée en matière de véhicules de transport spatial de même que de ports spatiaux serait nécessaire pour mutualiser les efforts des États-membres. Cette politique concertée doit donc se décliner sur deux plans.

D'abord **la construction de ports spatiaux en territoire européen, afin notamment d'accueillir des activités de tourisme spatial et de lancement de micro-lanceurs décisifs pour mettre rapidement en orbite des objets spatiaux civils mais aussi, et surtout, militaires.** Le développement d'un port spatial européen dans le nord de l'Europe deviendrait dès lors un atout pour l'activité européenne d'accès à l'espace.

Ce développement doit néanmoins se faire de manière concertée et par un pilotage européen cohérent avec l'eupéanisation d'une partie des activités spatiales et ne pas être l'initiative individuelle d'États-membres. Ces ports spatiaux pourraient être

placés sous la tutelle opérationnelle de la future agence européenne pour le programme spatial (EUSPA), mais avec une cotutelle de l'agence européenne de défense et de l'ESA, pour s'assurer que leur usage principalement commercial soit également compatible avec les impératifs scientifiques et militaires. Cette cotutelle de l'ESA et de deux agences de l'Union Européenne permettrait notamment la prise en compte de l'ensemble des contraintes techniques dans la construction des infrastructures du port spatial pour assurer une compatibilité large avec plusieurs types de lanceurs. Un tel port spatial pourrait incorporer les infrastructures requises aux activités de tourisme spatial, et donc présenter un modèle de financement hybride sous forme de partenariat public-privé. Il conviendra donc, séquentiellement, d'institutionnaliser cette tutelle européenne sur les futurs ports spatiaux européens puis d'identifier le ou les meilleures localisations pour de telles infrastructures, pour enfin lancer les programmes d'investissement requis.

Ces ports spatiaux seront une brique essentielle de la capacité européenne d'accès à l'espace mais doivent s'accompagner d'un véritable programme de micro-lanceurs européen. Si la mise sous contrôle uniquement public du développement de micro-lanceurs européens semble à la fois impossible compte tenu d'initiatives privées déjà existantes, il semble aussi sous-optimal au regard des solutions qui ont été retenues par les États-Unis qui ont laissé un environnement concurrentiel se développer pour dynamiser l'industrie. Aussi, il semblerait plus judicieux **d'encadrer le développement d'initiatives de micro-lanceurs, à l'instar du programme Future Launchers Preparatory Programme (FLPP) de l'ESA, mais de la placer sous tutelle de la Commission Européenne en raison de ses portées commerciales, et d'en faire un véritable instrument de soutien au financement d'un poignée de programmes européens qui se verraient attribuer, par tournées, des subventions par le biais de commandes de lancements.** Un tel programme serait ainsi similaire aux pratiques du Pentagone qui permettent de financer et faire émerger de nombreux programmes d'accès à l'espace aux États-Unis.

D. CONSOLIDER NOS ATOUTS COMMERCIAUX, ET DEVELOPPER DEUX VOILETS COMMERCIAUX NOUVEAUX

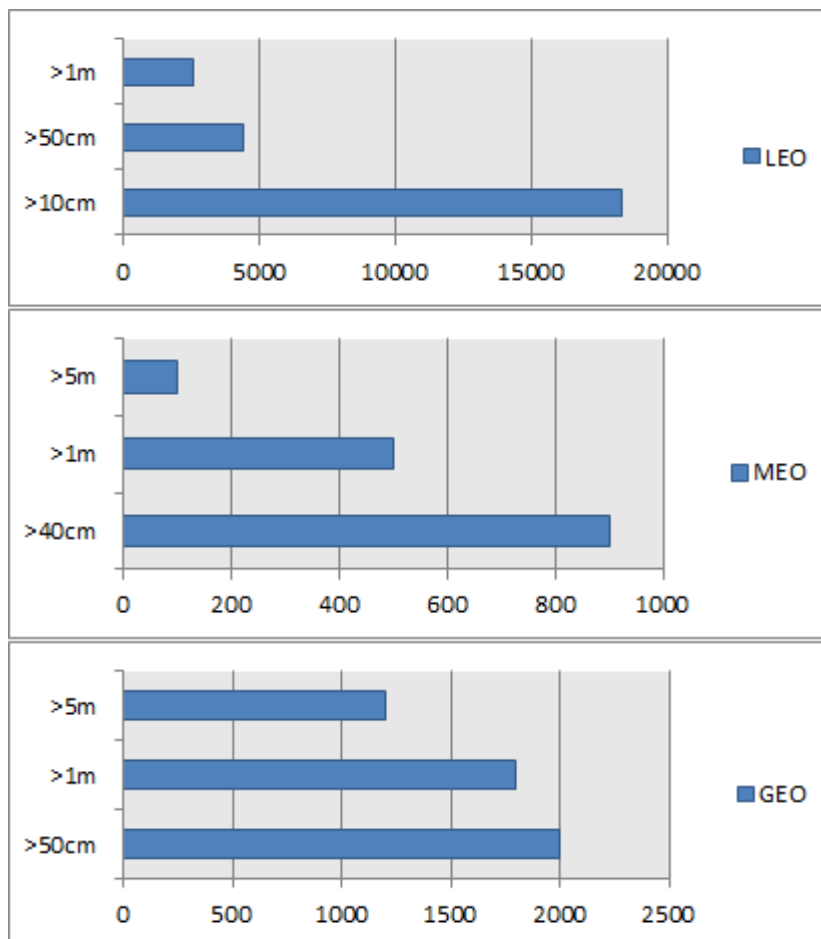
En matière commerciale, nous devrions poursuivre nos efforts sur l'accès à l'espace (comme vu ci-dessus) et les biens spatiaux commerciaux, afin de tenir notre rang. Néanmoins, il nous faut également ouvrir de nouveaux champs. Les deux champs les plus importants pour l'avenir des activités spatiales nous semblent être d'une part la création d'une économie du nettoyage spatial (nettoyage des débris en orbite, désorbitage des biens spatiaux en fin de vie, etc.), et l'exploitation in situ des ressources spatiales.

Tout d'abord, pour tenir notre rang dans la compétition mondiale, et suivant l'ambition d'atteindre l'autonomie en matière de communication, notamment par la création d'un Internet européen, l'Union se doit de favoriser l'environnement économique et juridique afin de faciliter les projets de mise en orbite d'actifs de communication ou d'ouvrir le marché de la location de canaux d'accès aux opérateurs téléphoniques et internet nationaux. Cette facilitation pourrait se traduire par la création d'un super fournisseur d'accès Européen, issu d'un consortium d'acteurs tel que le Luxembourgeois SES (Société Européenne de Satellite).

Le secteur civil privé profitant de la baisse des coûts d'envoi en orbite, il profitera d'une abondance de données exploitables aux usages divers (purement techniques ou marketing). En conséquence, un encouragement de la part de l'administration européenne accompagnée des sociétés détentrices des données via des campagnes d'informations exposant leur utilité dans un cadre industriel sera une étape incontournable vers une maturité du marché des satellites commerciaux. Prenons l'exemple de l'agriculture ou l'exploitation des données relatives à la pollution des sols, la présence d'eau ou plus simplement la météo offrira la capacité de rationaliser la production au niveau Européen de mesurer la qualité des récoltes. Il en va de même

pour la prévention des risques en tout genre, feux de forêt, inondations, incidents industriels.

Cependant, une augmentation du nombre d'actifs en orbite basse (LEO) qui est l'orbite privilégiée des satellites de petits modèles, se verra saturée (voir partie des enjeux III. C) sur le syndrome de Kessler), avec le temps, de débris spatiaux susceptibles d'endommager, voire de détruire les actifs encore en exploitation. Cette problématique qui ne fera que prendre de l'ampleur avec l'intensification de l'exploitation de l'espace marque un tournant dans la politique de l'ESA, qui, pour la première fois de son histoire (fin 2020), achète un service à un acteur privé, ClearSpace. Cette startup Suisse sera chargée de nettoyer les débris spatiaux, notamment les étages supérieurs des lanceurs, qui sont les plus gros.



Nombre de débris recensés par orbites en fonction de leur taille

Le caractère encore très expérimental de ce marché annonce une opportunité pour l'Europe de prendre les devants face aux USA, en créant une véritable économie du nettoyage spatial. Ainsi, l'ESA ayant choisi de ne pas financer la totalité de ce projet, des investisseurs privés devront se joindre à ce projet. **Il revient donc à la Commission européenne d'encourager des initiatives dans ce sens en développant le cadre législatif et financier permettant de financer ces missions de nettoyage par le marché. Ainsi, l'Europe pourra être pionnière d'une nouvelle économie du nettoyage de l'espace orbital terrestre.** A plus long-terme, l'Union européenne pourrait également se fixer comme objectif d'œuvrer à la mise en place d'une norme au niveau international stipulant que tout envoi d'un nouvel actif spatial doive être compensé par la récupération, ou le décrochage de son orbite, d'un actif de même dimension.

Enfin, un second volet commercial qu'il convient de développer de manière prioritaire, du fait de son caractère "premier arrivé, premier servi", est l'exploitation in situ des ressources spatiales. En la matière, la stratégie de l'ESA et le cadre législatif développé par exemple par le Luxembourg mettent l'Europe sur la bonne voie. Néanmoins, **l'Union européenne devrait rehausser la priorité de ces projets d'exploitation in situ des ressources spatiales, en augmentant les financements publics permettant le développement des technologies nécessaires, et en établissant le cadre juridique et financier permettant l'éclosion d'une industrie minière spatiale.** Cela pourrait par exemple passer par la signature de concessions minière sur certaines ressources, moyennant le paiement futur de redevances (reversées au budget de l'agence des programmes spatiaux de l'Union européenne) sur la valeur des ressources extraites dans l'espace par les compagnies minières exploitantes.

E. RATIONNALISER LE CADRE INSTITUTIONNEL EUROPEEN EN MATIERE D'ESPACE.

L'écosystème institutionnel européen actuel se caractérise par sa grande complexité et son imbrication de diverses structures. Ainsi, cohabitent et coopèrent ensemble les agences spatiales nationales, l'ESA, et les agences de l'UE ayant compétence dans l'espace, comme l'agence du GNSS européen, et le centre satellitaire de l'UE.

En premier lieu, en vue du développement majeur et explosif qui est attendu en matière d'exploitation commerciale de l'espace, tant en termes de lanceurs que de satellites, **il conviendrait de doter une agence séparée de l'ESA** (qui n'est pas une agence de l'Union européenne, mais une organisation internationale) **de la seule prérogative du pilotage des programmes de lanceurs et des satellites commerciaux.** Cette transformation est déjà prévue, avec la création prochaine d'une agence européenne pour le programme spatial (EUSPA), qui sera construite à partir de l'actuelle agence du GNSS (système de radionavigation par satellite, à savoir principalement Galileo). **Cette agence de l'UE pourrait ainsi avoir la charge d'accélérer le développement de lanceurs européens réutilisables, sur le modèle de SpaceX.**

D'autre part, afin de renforcer l'ESA dans son rôle capital à la pointe du développement technologique, scientifique, et humain en matière spatiale, l'UE devrait rejoindre l'ESA en tant que membre. Elle pourrait ainsi contribuer directement aux programmes qui sont dans l'intérêt de l'ensemble des membres de l'UE, comme le développement des technologies d'exploitation in situ des ressources spatiales. De plus, cela s'inscrirait dans la logique qui a émergé avec l'émergence du New Space : comme l'exemple du Luxembourg le montre, aujourd'hui, même les "petits" Etats membres de l'UE ont pleinement un rôle à jouer dans l'écosystème spatial européen, et chacun sera bénéficiaire à plein d'une Europe spatiale ambitieuse.

Ainsi, l'écosystème institutionnel serait davantage rationalisé, avec les agences spatiales nationales et l'ESA qui auraient la charge exclusive des activités de recherche et d'exploration spatiale, et une agence européenne de l'UE, l'EUSPA, en charge de tous les programmes spatiaux à vocation commerciale. Ce dispositif serait complété par l'agence européenne de défense, qui aurait prérogative sur le volet militaire spatial. **Ainsi, la politique spatiale de l'Union européenne serait mise en œuvre par seulement trois agences, aux rôles bien définis et complémentaires : deux agences de l'UE, une pour le civil commercial, et une pour le militaire, et une agence internationale, en charge des coopérations scientifiques et de la recherche et du développement technologique pour l'exploration et les nouvelles activités dans l'espace (nettoyage et exploitation de ressources in situ).**

F. METTRE EN PLACE UN AMBITIEUX PROGRAMME SPATIAL EUROPEEN DE VOL HABITE

En dernier lieu, une des conditions nécessaires les plus importantes à la réalisation de cette vision et des ambitions pour l'Europe de l'espace est que l'Europe développe ses propres capacités de vol habité. En effet, si l'Europe, du fait de ses technologies et son industrie de pointe dans le secteur du spatial, tient toujours son rang au niveau mondial, son absence de capacités propres de vol habité est un de ses plus grands manques aujourd'hui. Cela ternit fortement son rayonnement diplomatique, en la rendant dépendante de ses partenaires pour l'accès à l'espace de ses astronautes.

En développant un véritable programme spatial de vol habité propre aux européens, l'UE disposerait du dernier grand levier d'influence diplomatique en matière spatiale. En plus de disposer ainsi de son autonomie sur son programme d'exploration humaine, elle pourrait également permettre à des non-européens d'utiliser ses moyens propres de vol habité moyennant certains partenariats, sur le modèle de ce

que fait actuellement l'ESA avec RosCosMos sur Soyouz et plus récemment la NASA avec les vols SpaceX.

Le fait que l'Europe n'ait pas encore fait sauter ce dernier verrou pour ses ambitions que représente le vol spatial habité est d'autant plus surprenant que le spatial européen dispose aujourd'hui de l'essentiel du savoir-faire nécessaire pour disposer d'un programme spatial habité autonome. C'est le cas d'abord de l'accès à l'espace, avec des versions adaptées au vol spatial habité des fusées Ariane 5 et 6 qui ont un temps été envisagées. Avec la coopération européenne au programme Artemis, les industriels du secteur et notamment Airbus auront développé des capacités importantes sur les modules habités en contribuant au module de service de la capsule Orion.

Étant donné par ailleurs que l'ESA dispose également de son propre centre d'entraînement d'astronautes à Cologne en Allemagne, il ressort alors que l'Europe n'a pas à construire un programme de vol habité à partir d'une feuille blanche, mais plutôt qu'il reste une série limitée de briques supplémentaires à développer pour permettre à l'Union Européenne de disposer d'un programme de vol spatial habité en un laps de temps relativement court. **L'Europe doit donc développer ses capacités propres de vol habité le plus rapidement possible. Cela réduirait la dépendance européenne à ses partenaires américains et russes tout en intégrant le continent dans le cercle des puissances spatiales ayant une capacité de vol habité, cercle que rejoindront prochainement de nouvelles puissances comme l'Inde. Cela lui permettrait également de pouvoir se projeter de manière autonome vers la Lune puis vers Mars.**

CONCLUSION

C'est en se dotant d'une défense spatiale de pointe, en devenant la pionnière d'une économie du nettoyage spatial et de l'exploitation in situ de ressources spatiales, et en développant un programme de vol habité ambitieux, que l'Europe réalisera son plein potentiel dans l'espace et pourra prendre toute sa place dans la course à l'espace du XXIème siècle.

Moyennant une organisation institutionnelle efficace, et des moyens légaux et financiers adéquats, mis au service d'une vision claire et ambitieuse —tels que proposés dans ce rapport—, l'Europe aura toutes les cartes en main pour conquérir cette "nouvelle frontière" aux côtés de ses partenaires, et réaliser les espoirs dont l'espace est porteur pour l'humanité.



Le Millénaire est un groupe de réflexion spécialisé sur les questions de politiques publiques. Il porte un projet gaulliste, réformateur, disruptif et guidé par l'intérêt national. Il est composé d'une cinquantaine de contributeurs de divers horizons - cadres du privé, du public, chercheurs, chefs d'entreprises - et chacun expert dans son domaine.

Président : William THAY

Vice-Président : Gilles BÖSIGER

Secrétaire générale : Marion PARISSET

Directeur des études : Jean-Claude BERNARDON

Directeur des affaires publiques : Emeric GUISET

Directrice de la communication : Alexandra MONET

Communication : communication@lemillenaire.org

Presse : presse@lemillenaire.org

Et pour suivre toutes les actualités du Millénaire :

<http://lemillenaire.org>



***Mentions légales :** L'ensemble de ce rapport relève de la législation française et internationale sur le droit d'auteur et de la propriété intellectuelle. Tous les droits de la reproduction sont réservés à l'association « Le Millénaire », la reproduction de tout ou partie de ce rapport sur quelque support que ce soit est formellement interdite sauf autorisation expresse du Président de l'association.*