

Les satellites

Par Valérie FOIX et Jean-Philippe TAISANT

Centre national d'études spatiales (Cnes)

Apparus à la fin des années 1960 sur fond de guerre froide, les satellites artificiels ont progressivement couvert de nombreux secteurs applicatifs, civils et militaires, tels que les télécommunications, l'observation de la Terre et la navigation, pour compter environ 2 000 objets en orbite à la fin des années 2010. Depuis une dizaine d'années, des ruptures technologiques comme la numérisation des charges utiles, la miniaturisation des équipements et des satellites ainsi que l'utilisation de composants commerciaux, ont accéléré la démocratisation de l'espace et le déploiement de constellations, modifiant l'écosystème existant et les modèles économiques traditionnels. Cette accélération de l'occupation de l'espace consécutive à la multiplication des usages et des services, dans un contexte de commercialisation accrue de l'orbite, ainsi qu'au renforcement de la militarisation du secteur, pose en toile de fond la question de la pérennité de son utilisation.

UNE HISTOIRE QUI DÉMARRE IL Y A UN PEU MOINS DE 70 ANS

L'aventure spatiale commence en 1957, en pleine guerre froide, avec le lancement par l'Union soviétique du premier satellite artificiel de la Terre, Spoutnik. Même si ses fonctions se limitaient à l'émission d'un « bip-bip », il est l'ancêtre commun de tous les satellites qui sont aujourd'hui en orbite autour de la Terre et qui permettent de rendre des services quotidiens aussi bien à destination de divers secteurs économiques, stratégiques et/ou scientifiques qu'à destination du grand public.

L'enjeu initial autour de la maîtrise des technologies spatiales et notamment de l'utilisation de l'orbite terrestre était avant tout un enjeu de souveraineté. L'accès à l'espace ouvrait des perspectives pour assurer la surveillance et le contrôle de n'importe quelle zone de la planète sans avoir recours à des moyens terrestres potentiellement neutralisables. Durant la guerre froide, l'Union soviétique et les États-Unis ont été les premiers à développer une capacité d'observation de la terre en orbite basse à vocation militaire, avec des capteurs à la fois optiques et radiofréquences, pour des missions de renseignement électromagnétique, permettant de détecter les installations militaires, les radars, les déplacements de matériels et de troupes, etc. L'utilisation de l'orbite terrestre permettait également d'envisager des liaisons de communication grande distance « souveraines », ne s'appuyant pas sur des réseaux terrestres traversant des pays tiers et ne nécessitant pas d'infrastructures radiofréquences lourdes et peu efficaces¹.

Très rapidement, cet enjeu régalien s'est doublé d'enjeux commerciaux et scientifiques avec le développement des satellites de télécommunication et des satellites de télédétection à

¹ Les communications longues distances sans fil étaient initialement assurées par des antennes de très grande taille émettant des bandes de fréquence inférieures aux MHz (grandes ondes et au-delà) avec des capacités en nombre et largeur de canaux très limitées.

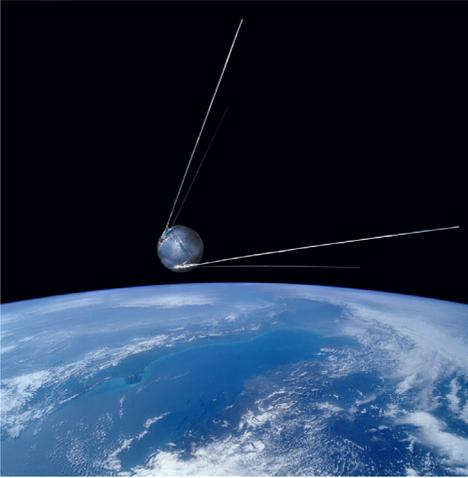


Figure 1 : Satellite Spoutnik
(© Cnes/Photon/Girard Sébastien, 2008).

vocation civile au service de la météorologie, de la connaissance de l'atmosphère, de la géodésie, de la surveillance du climat, etc. Ces derniers embarquent toute une diversité d'instruments allant de la caméra visible aux radars en passant par les spectromètres, les radiomètres, les caméras hyperspectrales, les lidars, les accéléromètres, les magnétomètres, etc. Ces instruments n'ont eu de cesse de se perfectionner dans l'objectif de gagner en résolution, en sensibilité mais également en compacité afin de baisser le coût d'emport de la mission ou afin de pouvoir embarquer plusieurs capteurs sur un même satellite (cf. satellite Envisat de l'ESA lancé en 2002 qui embarque 9 instruments permettant de disposer de la mesure simultanée des principaux paramètres environnementaux de la Terre).



Figure 2 : Satellite Envisat (© ESA).

Le programme SPOT, initié par le CNES en 1977, a été un précurseur en Europe pour l'observation de la Terre dans le domaine optique. Il a été réalisé en synergie avec le programme Helios à vocation militaire.

L'Europe s'est également dotée d'un vaste programme d'observation de la terre à vocation scientifique, le programme Copernicus lancé en 1998.

Le portefeuille des applications spatiales en orbite terrestre s'est complété depuis la fin des années 1970 de services de navigation qui se sont appuyés sur des infrastructures originales, dont en premier lieu le GPS (Global Positioning System) américain, déployées sur des orbites intermédiaires autour de 20 000 km d'altitude. Le nombre d'applications utilisant les données de radio navigation ne cessant de croître aussi bien dans le domaine civil que dans le domaine militaire, la plupart des grandes puissances dont la Russie (Glonass), l'Europe (Galileo), la Chine (Beidou), et dernièrement l'Inde et le Japon ont souhaité ou



Figure 3 : Satellite Spot 4 (© Cnes/ill./Ducros David, 1998).

souhaitent se doter d'un système souverain afin d'être maître de leurs signaux. De nouvelles infrastructures en orbite basse sont également à l'étude pour fournir des services de navigation par satellite plus résilients, plus immunes au brouillage ou permettant des performances accrues. Ces infrastructures nécessiteront le déploiement de plusieurs centaines de satellite pour assurer un service opérationnel.

Enfin, les vols habités vers les stations orbitales telles que MIR, la station spatiale

internationale ou la station chinoise Tiangong, au-delà de leur apport à la recherche scientifique et technologique, contribuent à la promotion de l'espace auprès du grand public. La popularité de Thomas Pesquet et de ses publications sont là pour en témoigner.



Figure 4 : Constellation Galileo (© Cnes).

La mise en œuvre de ces différents services et des infrastructures associées ont conduit à une colonisation progressive de l'orbite terrestre avec un nombre de satellites en orbite autour de la Terre estimé à environ 2 000 à la fin des années 2010. Le processus s'est accéléré, surtout depuis 2020². En mai 2022, on comptait 5 465 satellites opérationnels (3 433 pour les États-Unis, 541 pour la Chine, 172 pour la Russie, 1 319 pour le reste du monde). 2 664 ont été lancés en 2023 ; la constellation Starlink de la société SpaceX d'Elon Musk pourrait comprendre à terme 42 000 satellites en orbite basse).

² <https://ourworldindata.org/grapher/yearly-number-of-objects-launched-into-outer-space>

DES ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES MAJEURES

En tout premier lieu, il faut noter que les évolutions technologiques qui ont lieu dans le secteur des satellites ne sont pas uniquement dictées par les besoins de la mission mais sont intimement liées, et de fait contraintes, par la disponibilité des offres lanceurs. En particulier, les grandes structures ne peuvent être que déployables et les enjeux de masse restent majeurs notamment dans une perspective de compétitivité des systèmes commerciaux ou de soutenabilité des systèmes institutionnels.

Les applications et technologies déployées en orbites sont trop nombreuses pour qu'il soit possible de décrire les évolutions de chacune d'entre elles. Néanmoins de grandes orientations technologiques ont été prises dans le domaine des satellites, certaines issues d'innovations provenant des applications terrestres, d'autres spécifiques au secteur spatial. Sur les quatre grandes évolutions qui suivent, les trois premières ont profité des évolutions des



Figure 5 : Falcon 9 : retour du premier étage (© SpaceX).

technologies terrestres alors que la dernière est spécifique au secteur spatial.

Les COTS (Commercial Off The Shelf)

Les premières technologies utilisées dans le secteur spatial visaient avant tout à garantir le bon fonctionnement et la durée de vie des équipements dans des environnements hostiles, que ce soit lors de la phase de décollage, avec des niveaux de charges mécaniques et de vibrations très élevés, ou dans la phase opérationnelle avec des plages de température pouvant dépasser plusieurs centaines de degrés (par exemple les panneaux solaires d'un satellite géostationnaire sont qualifiés sur une plage de températures pouvant aller de - 200°C à + 100°C) et des niveaux de radiations très élevés. Afin de relever ces défis, un ensemble de normes de conception, de fabrication et de vérification a été progressivement mis en œuvre (cf. les normes ECSS pour l'Europe). Ces normes ont conduit à développer des composants et des procédés spécifiques aux applications spatiales, garantissant le succès des missions spatiales, mais avec des coûts induits significatifs. Afin de pallier cette situation, ces dernières années ont vu la mise en œuvre d'approches alternatives passant par l'évaluation en environnement spatial d'un grand nombre de composants utilisés en particulier dans l'industrie automobile afin d'identifier ceux qui seraient compatibles d'un emport en orbite. Cette pratique a permis de réduire les coûts composants même si des activités de qualification par lots restent indispensables pour acter de l'aptitude au vol des composants COTS sélectionnés, ce qui renchérit leur coût par rapport à l'usage terrestre³.

³ BAUMANN R. (2014), "From COTS to Space - Grade Electronics: Improving Reliability for Harsh Environments", communication à l'IEEE International Integrated Reliability Workshop, Octobre, South Lake Tahoe, CA, USA ; PIGNOL M., MALOU F. & AICARDI C. (2019), "COTS in Space: Constraints, Limitations and Disruptive Capability", in *Radiation Effects on Integrated Circuits and Systems for Space Applications*, Springer, pp. 301-327.

La miniaturisation

Les enjeux de miniaturisation sont intimement liés aux contraintes des lanceurs. La recherche de gain de masse et d'encombrement est devenue d'autant plus prégnante que l'aspect compétitivité a pris de l'importance. Sont apparues ces dernières années des solutions très innovantes aussi bien au niveau équipement que satellite complet. Au titre des équipements, on peut noter des instruments optiques et radiofréquences beaucoup plus compacts avec une recherche d'intégration toujours plus grande. Est également apparue toute une gamme de nano/micro satellites d'une masse inférieure à 100 kg permettant de réaliser des missions de surveillance, de télécommunication bas débit pour l'Internet des Objets, de validation fonctionnelle ou technologique en orbite et bien d'autres⁴. L'intérêt de ces solutions est leur coût de développement et de lancement, qui reste très bas comparé aux satellites conventionnels. Même si les missions remplies ne sont pas exactement les mêmes, ces solutions contribuent à diversifier les offres de service comme l'amélioration du temps de revisite pour les systèmes d'observation de la Terre.

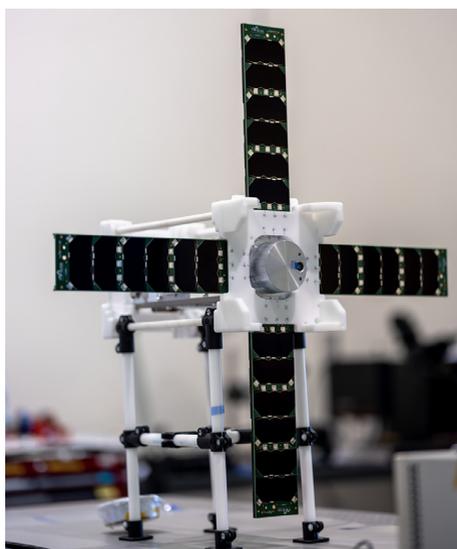


Figure 6 : Satellite Ness
(© Cnes/De Prada Thierry, 2022).



Figure 7 : Viseur d'étoiles Auriga-CP
(© Sodern – 05/2019).

Ces satellites s'appuient sur de nouvelles générations d'équipements, extrêmement compacts et bas coûts, qui ont vocation à être déclinés sur les gammes de satellites plus capacitifs afin de réduire leur coût et celui de leur lancement.

Les technologies numériques

L'arrivée des technologies numériques a particulièrement touché les satellites de télécommunication. Alors que la plupart d'entre eux, hormis ceux utilisés pour les applications militaires et les applications bas débits (en particulier pour les communications maritimes), étaient basés jusqu'au milieu des années 2010 sur des charges utiles transparentes analogiques, une véritable révolution s'est opérée ces dernières années. La disponibilité de circuits intégrés de forte capacité et de faible consommation, basés sur des nœuds

⁴ www.nanosats.eu



Figure 8 : Digital Transparent Processor NG
(© Thales Alenia Space).

technologiques de la classe UDSM (Ultra Deep Sub Micron) a permis d'envisager des charges utiles numériques de grande capacité qui sont en passe de devenir la norme dans le secteur).

Cette arrivée du numérique dans le spatial permet de proposer des systèmes agiles, reconfigurables en orbite, intégrant, dans le secteur des télécommunications, des fonctions équivalentes à celles des réseaux terrestres avec des capacités embarquées de routage, de gestion des ressources et demain de gestion de la qualité de service. L'exemple le plus marquant est celui de la constellation Starlink qui a déployé un réseau maillé de milliers de satellites proposant des services de connectivité Internet haut-débit. L'Europe dispose aussi de solutions très performantes avec notamment le satellite Konnect VHTS d'Eutelsat qui met en œuvre le processeur numérique le plus capacitif actuellement en opération.

La propulsion électrique

La masse d'ergol à embarquer pour assurer la mise et le maintien à poste des satellites peut s'avérer, pour certaines missions, du même ordre de grandeur que la masse sèche du satellite. Un facteur de réduction important des coûts de lancement passe alors par la réduction de cette masse d'ergol, rendue possible par l'utilisation de systèmes de propulsion à forte impulsion spécifique. C'est le cas des systèmes à propulsion électrique⁵, qui se développent depuis une dizaine d'années, permettant d'atteindre des impulsions spécifiques de quelques milliers de secondes contre quelques centaines pour un système à propulsion chimique. La faiblesse de ces systèmes est leur faible poussée qui les rend incompatibles avec des manœuvres rapides. Une mise à poste de satellites géostationnaires prend quelques jours avec un système de propulsion chimique mais quelques mois avec un système électrique. Un autre handicap vient du coût des ergols utilisés en propulsion électrique. Ce sont en général des gaz rares tels que le xénon ou le krypton dont le coût a fortement augmenté ces dernières années du fait de la demande croissante, notamment du secteur spatial, mais également du fait d'instabilités géopolitiques.

⁵ MAZOUFFRE S. (2018), « Propulsion électrique pour les systèmes spatiaux », Techniques de l'ingénieur.

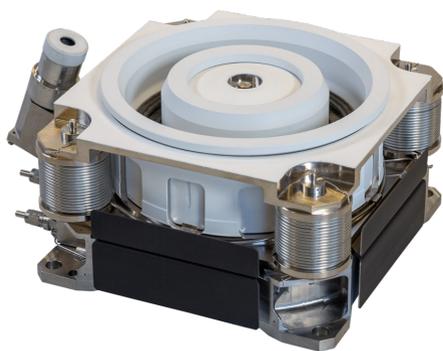


Figure 9 : PPS@5000
(© Safran Aircraft Engines).



Figure 10 : Essai au banc du moteur
PPS@5000 (© Safran Aircraft Engines).

Des systèmes utilisant des ergols alternatifs tels que l'iode atomique (I2) ou l'argon sont arrivés récemment permettant d'envisager une généralisation et une pérennisation de cette technologie.

LEUR IMPACT SUR L'ÉCOSYSTÈME SPATIAL

L'arrivée des mégaconstellations

Les innovations mentionnées ci-dessus, une fois combinées entre elles et associées à la baisse importante des coûts de lancement impulsée par Space X, ont contribué à l'accélération de la colonisation de l'orbite terrestre due notamment à l'arrivée des mégaconstellations dédiées au service de connectivité. Les constellations Starlink et Oneweb sont à elles seules à l'origine du déploiement respectif de plus de 5 350 et 636 satellites en orbite basse depuis 2019 (situation au 31/10/2023). Cette accélération exponentielle du nombre de satellites en orbite pourrait encore s'accroître si on se réfère aux nombreux projets de mégaconstellations déposés auprès de l'UIT qui prévoient le déploiement d'ici la fin de la décennie de centaines de milliers de satellites supplémentaires.

Du côté gouvernemental, plusieurs nouvelles infrastructures sont également en cours de développement, la plus connue étant certainement l'initiative PWSA (Proliferated Warfi-



Figure 11 : Official Space X Starlink mission
(© Starlink - Mission-cc-Flickr).

ghter Space Architecture) de la Space Development Agency (SDA) aux États-Unis qui vise à fournir des capacités spatiales en soutien des missions terrestres *via* une constellation multicouche résiliente et interconnectée en orbites basses.

La démocratisation et la militarisation de l'espace

Cette colonisation s'accompagne d'une « démocratisation » de l'espace qui voit l'arrivée dans tous les pays de nouveaux acteurs. Alors que jusqu'ici le secteur spatial était concentré autour d'un petit nombre d'industriels disposant de compétences et de moyens spécifiques, l'intérêt croissant pour le spatial et ses applications a attiré ces dernières années de nouveaux entrants dont de nombreuses *start-up* mais aussi de grands groupes issus de secteurs économiques non spatiaux, disposant d'importantes capacités d'ingénierie, de développement, de production et de déploiement de systèmes orbitaux. La meilleure illustration est le projet de constellation Kuiper du géant Amazon.

Cette démocratisation favorise également l'émergence d'une palette de nouvelles applications et en particulier celles regroupées au sein de l'appellation « services en orbite » qui vont du ravitaillement en ergols à l'assemblage de structures complexes en passant par l'inspection, la maintenance, le changement d'orbite et la désorbitation en fin de vie, la récupération des débris, etc.

D'autre part, l'intégration intensifiée des systèmes spatiaux dans les dispositifs de défense renforce la militarisation de l'espace qui voit l'arrivée de systèmes d'attaque et de défense en orbite permettant soit de surveiller, soit d'endommager voire détruire des systèmes spatiaux considérés comme ennemis⁶.



Figure 12 : La militarisation de l'espace (© Le Monde de Demain).

Des modèles économiques en mutation

Les modèles économiques des systèmes orbitaux sont majoritairement dépendant de la commande publique qui porte les investissements répondant aux besoins gouvernementaux, militaires et scientifiques. Représentant en 2022 plus de 70 % des investissements relatifs aux infrastructures⁷, ils sont et restent supérieurs aux investissements privés.

⁶ PASCO X. (2021), « Évolution des stratégies d'utilisation de l'espace à des fins militaires », *Vortex*, n°1, juin, pp. 77-89.

⁷ EUROCONSULT (2023), "Space Economy Report 2022".



Figure 13 : Marché de l'espace, en milliards de dollars (© Euroconsult).

revenus du secteur des infrastructures⁸, peuvent s'appuyer sur des systèmes orbitaux financés par les États.

Les investissements privés se concentrent jusqu'ici dans le secteur des télécommunications par satellites, secteur marchand historique du spatial. Cette réalité reste vraie, y compris dans la période actuelle, avec une concentration des investissements privés dans le secteur des mégakonstellations de connectivité telles que Starlink de Space X, Oneweb d'Eutelsat, Kuiper d'Amazon, Lightspeed de Telesat, les projets d'AST Mobile ou de Rivada.

Des investissements privés sont aujourd'hui observés dans les secteurs des services en orbite, de l'observation de la Terre, de la navigation ou de la surveillance aérienne et maritime, mais ils sont encore sans commune mesure avec les investissements privés réalisés dans le secteur des télécommunications. Cependant, y compris dans son volet marchand, le secteur spatial n'obéit pas à un schéma économique purement privé.

En effet, les revenus du secteur aval, qui sont d'un ordre de grandeur supérieur aux

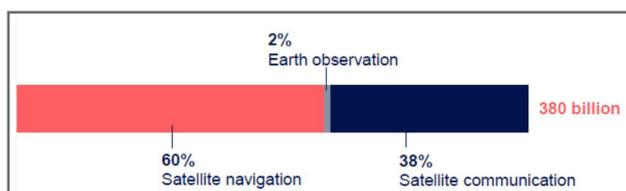


Figure 14 : Marché mondial de l'espace par application en 2022, en milliards de dollars – aval (© Euroconsult).

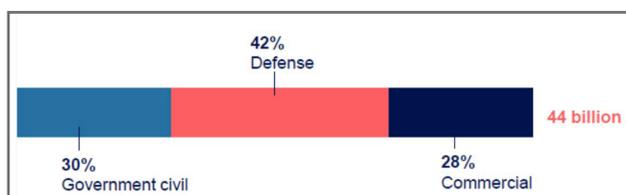


Figure 15 : Marché mondial de l'espace par types de clients en 2022, en milliards de dollars – amont (© Euroconsult).

⁸ EUROCONSULT (2023), "Space Economy Report 2022".

Le meilleur exemple est celui de la navigation, dont les revenus du secteur aval sont désormais les plus élevés devant ceux des télécommunications par satellite, sans que cela ne nécessite d'investissements privés dans les infrastructures GNSS (Global Navigation Satellite System) qui restent totalement financées par la puissance publique.

D'autre part, la question du partage de la valeur ajoutée est particulièrement sensible dans le secteur spatial. Alors que les revenus du secteur aval ne cessent de croître, la période actuelle de forte innovation et de compétition accrue voit une dégradation des marges des industriels en charge du développement et de la fourniture des infrastructures, ces derniers portant la majorité des coûts de R&D et les risques associés. Cette situation interroge un modèle économique qui pourrait se diriger vers davantage de verticalisation, comme c'est déjà le cas avec le géant Space X qui est à la fois opérateur de service, maître d'œuvre système, intégrateur satellite, équipementier charge utile / plateforme / terminaux utilisateurs et opérateur de lancement de la constellation Starlink.

VERS UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ORBITE TERRESTRE

Ces évolutions, si elles se confirment, constituent une nouvelle donne pour l'espace, qui interroge l'avenir. La démocratisation de l'utilisation de l'orbite terrestre pose notamment la question de la pérennité de son utilisation, la multiplication des satellites et des débris entraînant une augmentation substantielle des risques de collisions qui pourraient la rendre difficilement utilisable. Elle questionne également le partage de l'orbite entre les différents utilisateurs, en n'oubliant pas les enjeux de protection lumineuse pour la radioastronomie.

Alors que depuis la fin de la guerre froide l'espace était davantage considéré comme une ressource à protéger et à valoriser dans une logique de coopération et de progrès au service du bien commun, la marchandisation et la militarisation de l'orbite sont de nature à remettre en question cette approche.



Figure 16 : Orbite terrestre (© Nasa).

Dans ce contexte, le rôle du législateur pourrait être clé pour déterminer le futur de l'orbite terrestre.