

OPTION ÉCONOMIE INDUSTRIELLE



Le fordisme spatial et l'Europe

Élèves :

Cynthia BALECH
Damien CAPERAA
Paul DELBOUVE
Najib EL BECHERAWY
Emmanuel GARDIN
Hadrien HERVIER
Thomas LABRO
Violette LAUNEAU
Bruno LE CORFEC
Flore MARONI
Alex MORAIS PENSO
Guillaume RAMOS
Alban REVEL
Georges SAMAHA
Yinuo ZHANG

Enseignants :

Olivier BOMSEL
Pierre FLECKINGER
Margaret KYLE

Coordinatrices :

Alice DAGICOUR
Juliette GATIN
Aida ZAHIRI

2022 – 2023

Remerciements

Nous remercions le Commandement de l'Espace pour son accompagnement tout au long de ce projet. Merci à Aerospace Valley pour la fourniture des contacts ayant rendu possible le déroulement de notre enquête et au B612 pour nous avoir accueilli dans leurs locaux. Nous remercions aussi les 34 entreprises et leurs dirigeants qui nous ont reçus avec bienveillance et curiosité. Ils nous ont fait confiance en divulguant des données internes essentielles à l'élaboration de ce rapport. C'est pourquoi nous avons choisi de ne pas les citer nommément lorsque nous les évoquons dans ce document.

Merci également à l'ensemble des intervenants, chercheurs et représentants d'institutions publiques qui ont partagé avec nous leur vision et leur connaissance du sujet lors du démarrage du projet.

Enfin, merci à nos professeurs pour leur disponibilité et leur aide tout au long de l'enquête et durant l'écriture de ce rapport.

Sommaire exécutif

1) La révolution fordiste

Sous l'impulsion d'Elon Musk, SpaceX a métamorphosé l'industrie spatiale. En vingt ans, le segment des lanceurs est passé d'une industrie de prototypes à une production en série réduisant fortement le coût d'accès à l'espace. La quête d'économies d'échelle s'est appuyée sur une refonte de toute l'organisation industrielle : intégration verticale, nouveaux modes de management, innovation par processus itératif, etc. La baisse des coûts a stimulé l'usage de lanceurs réutilisables permettant la mise en orbite de satellites plus légers et beaucoup plus nombreux. Ceux-ci amplifient et diffusent les effets de la production en série. Les institutions américaines ont soutenu ce processus en assumant les risques. Faute de quoi, il n'aurait pas atteint son but, en tout cas pas aussi vite. Ce qu'on appelle communément le *New Space* est le produit de cette révolution industrielle.

2) Dualité civil - militaire

Né de la guerre froide, l'espace est un domaine stratégique dont les dépenses militaires soutiennent l'activité civile. Dans le *New Space*, la dualité civil - militaire joue un rôle plus critique encore car elle est au service des économies d'échelle. Aux Etats-Unis, l'ambition de saturer l'orbite basse et de reprendre des vols habités s'est traduite par des réorganisations institutionnelles et la relance des dépenses publiques en direction du secteur. Depuis quinze ans, les investissements militaires américains ont concouru à financer les coûts fixes de la production en série. SpaceX a ainsi bénéficié d'une dualité qui a dopé ses économies d'échelle.

3) L'espace : continuité naturelle du numérique et des communications

En élargissant l'accès à l'espace, Elon Musk poursuit la dynamique de la numérisation. Les États-Unis ont perçu très tôt les enjeux des "autoroutes de l'information". Ils ont équipé de *Satcoms* l'orbite géostationnaire autant que les accords internationaux les y autorisaient. Le déploiement numérique des années 1990 a intensifié cette démarche, l'espace prenant alors le relais des nouvelles infrastructures de communication.

4) Du GEO au LEO

Après l'orbite géostationnaire, l'intérêt des Américains se porte sur les orbites basses (LEO). La profusion de nouveaux usages et de nouveaux marchés lance la colonisation de cette ceinture par des acteurs publics et privés. Mais l'orbite basse, aux nombreux atouts techniques, requiert des myriades de satellites pour raccourcir les délais de balayage des ellipses polaires. La croissance exponentielle du nombre de satellites et d'objets spatiaux dans cette zone entraîne déjà sa congestion : au-delà des risques de collision, la limitation des bandes de fréquence utilisables crée une concurrence féroce. Face à cette "guerre des fréquences", nombreux sont ceux qui réclament un cadre législatif adapté. En attendant, les Américains privilégient le fait accompli. Pour les opérateurs de satellites en concurrence sur l'accès à l'internet, l'enjeu est d'assurer des communications denses, continues et sans latence sur l'ensemble du globe. Certains acteurs se tournent désormais vers des architectures nouvelles, mixtes et hybrides, cherchant à profiter des atouts de chaque orbite au meilleur coût.

5) L'ouverture du spatial à de nouveaux marchés

La numérisation – smartphones, objets connectés, etc. – tire de nouveaux services le long de la chaîne de valeur. Ils entraînent un essor de l'entrepreneuriat, des investissements ainsi qu'un foisonnement de nouvelles firmes. Les nouveaux entrants sur les marchés aval se consacrent au traitement des données satellitaires et au renforcement de la connectivité numérique. Mais le déploiement d'infrastructures en orbite basse attire aussi de nouvelles firmes s'interfaçant aux grands

acteurs industriels. Côté financement, ces entreprises combinent aides publiques et capitaux privés. Enfin, une dynamique de concentration, essentiellement par rachats, est à l'œuvre chez ceux qui, à l'image de SpaceX, cherchent à renforcer leur intégration verticale.

6) Les trois dimensions du retard européen

Confrontée à la dynamique du secteur spatial, l'Europe accuse un retard qui s'est accentué ces derniers mois. Ce retard se ressent dans trois grands domaines. Le premier est le segment des lanceurs centré autour d'ArianeGroup. Cette entreprise qui assurait l'indépendance spatiale de l'Europe avec ses fusées Ariane et plus récemment Véga accumule les déboires en raison de mauvais choix stratégiques. ArianeGroup a raté le train des économies d'échelle, et avec lui celui des lanceurs réutilisables. Par ailleurs, l'Europe est distancée sur les constellations de satellites en orbite basse. Ce type d'infrastructure visant à assurer des communications souveraines depuis l'espace, a été initié par SpaceX et son projet Starlink, suivi par le britannique OneWeb et l'américain Blue Origin. Le rachat de OneWeb par Eutelsat permet à l'Europe de rester timidement dans la course. La décision de la Commission européenne de se doter d'une constellation, IRIS², annoncée pour 2027, ne rattrapera pas le retard. Enfin, l'Europe manque d'investissements. Qu'il s'agisse de fonds privés estimés 20 fois moindres qu'aux États-Unis ou de commandes publiques, en légère hausse, mais hélas, saupoudrées, ce retard limite l'essor de nouveaux entrants et maintient des cycles industriels bien trop longs.

7) Comparaison des contextes institutionnels américains et européens

Les États-Unis se sont dotés dès la fin de la Seconde Guerre mondiale d'institutions spatiales fonctionnant en synergie. Les coopérations entre la NASA et le *Department of Defense* ou le *National Space Council* ont été nombreuses, permettant à ces institutions d'orienter la recherche et de soutenir l'essor d'entreprises innovantes. L'avènement du *New Space* a dopé cette synergie. Le cadre institutionnel européen a, quant à lui, été conçu pour répartir entre États membres les efforts et les compétences d'une industrie de prototypes. Ce faisant, il est inadapté à la promotion des économies d'échelle. La règle du juste retour géographique de l'ESA va à l'encontre de l'organisation intégrée requise par la baisse des coûts et la production en série. Enfin, l'absence d'une défense européenne souveraine inhibe la dualité civil – militaire pourtant vitale à l'économie spatiale. Le caractère purement civil de l'ESA et le manque de coopération militaire entre États européens privent le secteur spatial des bénéfices de la dualité.

8) Bilan de l'enquête

L'enquête industrielle menée à Toulouse auprès d'entreprises françaises fait ressortir des traits du *New Space* en France et Europe. Certains acteurs ont intégré le changement de paradigme et tentent de s'insérer dans le nouvel écosystème industriel. Ils s'inscrivent dans la dynamique de baisse des coûts et visent des économies d'échelle dans les nouvelles infrastructures. D'autres cherchent à s'insérer sur les marchés aval du traitement de l'information. Ces marchés sont encore émergents et les modèles d'affaires instables.

D'autres acteurs, enfin, tardent à s'adapter : il s'agit surtout de sous-traitants historiques des grands intégrateurs et du CNES. Ces petites entreprises supportaient la baisse des coûts dans un régime de prototypes profitant aux intégrateurs. Elles sont aujourd'hui en faible croissance, peinent à retenir leurs compétences et à trouver des financements. Certaines n'ont d'autre recours que d'être soutenues par le secteur de la défense qui redoute de perdre ces fournisseurs.

Sommaire

Remerciements	2
Sommaire exécutif	3
Sommaire	5
Figures	7
Glossaire	8
Introduction	9
L'enquête : présentation et méthodologie	11
I. À l'origine : économies d'échelle et dualité	12
A- La révolution fordiste : production en série et économies d'échelle	12
B- La dualité civil - militaire.....	17
II. L'émergence de nouveaux marchés	22
A- Vers un espace de l'information.....	22
B- Le passage du GEO au LEO	23
C- L'ouverture du spatial à de nouveaux marchés.....	29
III. Les causes institutionnelles du retard européen	35
A- Les trois dimensions du déphasage	35
B- Comparaison des contextes institutionnels américain et européen	38
IV. Bilan de l'enquête industrielle	44
A- Entreprises innovantes visant les économies d'échelle	44
B- Des marchés de services en plein essor	45
C- Un secteur qui peine à prendre la vague	46
D- L'importance de la demande militaire.....	47
Conclusion	49
Annexe 1 – Acteurs rencontrés	51
Annexe 2 – Historique de SpaceX	53
Annexe 3 - L'organisation disruptive de SpaceX	54
Annexe 4 – Falcon 9, calcul de coûts	57
Annexe 5 - Miniaturisation et standardisation des satellites	58
Annexe 6 - Structure du marché spatial	59

Annexe 7 - Principaux clients des entreprises interrogées en fonction de leur date de création et de leur chiffre d'affaires (1970-2022).....	62
Annexe 8 - L'empreinte environnementale et climatique du secteur spatial	64
Annexe 9 - La problématique des débris spatiaux	66
Annexe 10 – Typologie des principales constellations	68
Annexe 11- Le cas des ressources lunaires	70
Annexe 12 – Cartographie des acteurs rencontrés	71
Bibliographie.....	72

Figures

Figure 1 - Évolution du coût d'accès à l'espace par type de lanceurs.....	15
Figure 2 - Caractéristiques du bloc 5 du Falcon 9	16
Figure 3 - Évolution du nombre de satellites en orbite basse par secteur	24
Figure 4 - Évolution du nombre de satellites en orbite basse par type d'activité.	25
Figure 5 - Évolution du nombre de satellites en orbite géostationnaire par type d'activité....	25
Figure 6 - Évolution du nombre de satellites en orbite basse appartenant ou pas à des constellations.	25
Figure 7 - Évolution du nombre d'objets dans l'orbite basse par typologie.....	26
Figure 8 - Évolution du nombre de start-ups spatiales créées depuis les années 2000.	30
Figure 9 - Mix des types d'investissement dans les entreprises du spatial, de 2012 à 2021. ..	30
Figure 10 - Taille des investissements privés et nombre de mega-deals dans le secteur spatial de 2012 à 2021.	33
Figure 11 - Évolution du cours d'entreprises ayant eu recours aux SPACs.....	33
Figure 12 - Nombre d'acquisitions de startups (2013-2021).	34
Figure 13 - Nombre annuel de lancements d'Arianespace (1980-2021).	36
Figure 14 - Évolution des budget spatiaux militaires américain et mondiaux (2014-2021).	42
Figure 15 - Frise Chronologique de l'histoire de SpaceX.....	53
Figure 16 - Evolution du lanceur Falcon.....	54
Figure 17 – Test de développement et de qualité (Falcon 9).	55
Figure 18 - Exemples du “Design par processus itératif” : unité de contrôle du moteur	55
Figure 19 - Processus de conception, de manière traditionnelle et chez SpaceX	56
Figure 20 - Segmentation du marché du spatial.	59
Figure 21 - Répartition des marchés amont et aval par application.....	60
Figure 22 - Répartition des marchés amont et aval par type de client.....	61
Figure 23 - Répartition des marchés amont et aval par région.	61
Figure 24 - Représentation du syndrome de Kessler (2025-2225)	66
Figure 25 - Nombre de satellites et de débris produits par pays en 2022.....	67

Glossaire

AID	Agence de l'innovation de défense
CCS	Système de contre-communication
CNES	Centre national d'études spatiales
COTS	Service de transport commercial orbital
CRS	Services commerciaux de ravitaillement
DARPA	Agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense
DGA	Direction générale de l'armement
DoD	Département de la défense américain
ESA	Agence spatiale européenne
EUSPA	Agence de l'Union européenne pour le programme spatial
FAR	Règlementation des acquisitions fédérales américaine
FCC	Commission fédérale des communications
GAFAM	Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft
GEO	Orbite géostationnaire
GES	Gaz à effet de serre
GPS	Système de positionnement global
GNSS	Système de positionnement par satellite
GSaaS	Stations au sol en tant que service
IBCM	Missile balistique intercontinental
ISS	Station spatiale internationale
LEO	Orbite basse (<i>Low earth orbit</i>)
LOS	Loi du 3 juin 2008 relatives aux opérations spatiales
LPM	Loi de programmation militaire
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OT	Autre transaction (<i>Other Transaction</i>)
NASA	Administration nationale américaine de l'espace et de l'aéronautique
NSC	Conseil national américain de l'espace
PME	Petite et moyenne entreprise
POC	Preuve de concept
RMA	Révolution dans les affaires militaires
R&D	Recherche et développement
SDA	Agence américaine de développement spatial
SPAC	Société cotée dédiée à des acquisitions
SSA	Surveillance de l'environnement spatial
UIT	Union internationale des télécommunications
5G	Cinquième génération de norme de réseau de téléphonie mobile

Introduction

2022 a été une année record pour le secteur spatial, avec un décollage en moyenne tous les deux jours¹. Sur 180 lancements effectués dans le monde, 85 l'ont été depuis le sol américain – le lanceur réutilisable superstar de SpaceX Falcon 9 étant responsable à lui seul de 60 d'entre eux. Alors qu'Arianespace prévoyait d'effectuer 17 lancements, le leader européen finit l'année avec seulement 5 lancements réussis à son actif, contre 15 en 2021. En cause, le retrait du lanceur russe Soyouz de son offre commerciale, conséquence de l'invasion russe en Ukraine, l'échec du vol inaugural du nouveau lanceur Vega-C, et le retard pris par le fleuron européen Ariane 6 dont la mise sur le marché a été repoussée par l'Agence spatiale européenne à la fin de l'année 2023.

Ce bilan, certes conjoncturel, est symptomatique de nombre de facteurs qui fragilisent désormais le spatial européen. Tout d'abord, le retard d'Ariane 6 dont le vol inaugural était prévu pour juillet 2020, prive durablement l'Europe de capacité d'emport². Les deux dernières fusées Ariane 5 doivent être lancées début 2023, et le plan de charge d'Ariane 6 est déjà rempli : sur 28 lancements prévus par ArianeGroup, 18 lanceurs ont déjà été achetés par Amazon pour sa constellation Kuiper dans les trois prochaines années³. Avec Ariane 6, l'Europe reste très loin de l'agilité de lancement d'un SpaceX, capable de relancer sous 21 jours⁴ ; malgré les capacités d'emport du lanceur lourd, ses moyens de production sont limités à 11 lanceurs par an. S'ensuit un risque majeur pour le spatial européen : faute de moyens de lancement disponibles, les acteurs vont se tourner vers les concurrents agiles tel SpaceX qui domine largement le marché, et de nouveaux entrants comme l'Inde⁵. La constellation européenne OneWeb a dû recourir à la firme indienne *New Space India Limited* pour reprendre le lancement de ses satellites en octobre 2022⁶.

L'Europe est aussi en retard sur les constellations en orbite basse où se livre en ce moment la bataille pour le contrôle de l'internet par satellites. Elon Musk vient d'obtenir l'autorisation de déployer la nouvelle génération de sa constellation Starlink qui compte déjà 3 300 satellites en orbite, et Jeff Bezos prévoit le lancement de sa constellation Kuiper à partir de début 2023⁷. Si 80 % de la constellation OneWeb – qui vient de fusionner avec l'opérateur de satellites européen Eutelsat – est à

¹ Eric Bottlaender, « Le bilan spatial 2022, des astronautes et des fusées comme s'il en pleuvait », *Clubic*, 31 décembre 2022, <https://www.clubic.com/mag/sciences/conquete-spatiale/actualite-451686-le-bilan-spatial-2022-des-astronautes-et-des-fusees-comme-s-il-en-pleuvait.html>.

² Eric Bottlaender, « Ne ratez pas le décollage de l'antépénultième Ariane 5 ! », *Clubic*, 13 décembre 2022, <https://www.clubic.com/arianespace/actualite-450000-ne-ratez-pas-le-decollage-de-l-antepenultieme-ariane-5.html>.

³ Liberation et AFP, « Internet haut débit: Arianespace tope avec Amazon pour 18 lancements de satellites », *Libération*, 6 avril 2022, sect. Espace, https://www.liberation.fr/sciences/espace/internet-haut-debit-arianespace-tope-avec-amazon-pour-18-lancements-de-satellites-20220406_ZDIBWO3MYFDY3O3EREXZDHGJBY/.

⁴ Martin Clavey, « SpaceX : la réutilisation, ça marche », *Next Inpact*, 3 novembre 2022, <https://www.nextinpact.com/article/70281/spacex-reutilisation-ca-marche>.

⁵ Florian Maussion, « Le retard des nouvelles fusées géantes complique le lancement des satellites », *Les Echos*, 3 janvier 2023, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/le-retard-des-nouvelles-fusees-geantes-complique-le-lancement-des-satellites-1893396>.

⁶ Namrata Goswami, « Le programme spatial indien et ses déterminants : implications possibles pour le marché spatial mondial », *Ifri*, 28 janvier 2022, <https://www.ifri.org/fr/publications/notes-de-lifri/programme-spatial-indien-determinants-implications-possibles-marche>.

⁷ Carlo Pires, « Project Kuiper : les premiers satellites début 2023 », *Télé Satellite & Numérique*, 13 octobre 2022, <https://www.telesatellite.com/actu/61077-project-kuiper-les-premiers-satellites-debut-2023.html>.

présent déployé avec 542 satellites en orbite⁸, l'Union européenne en est pour sa part aux prémices de son projet de constellation IRIS², censé venir sécuriser les communications européennes⁹.

Les fragilités du secteur spatial européen témoignent d'un retard industriel croissant vis-à-vis des autres puissances spatiales, à commencer par les Etats-Unis. Ce dont les acteurs français et européens, mais aussi l'opinion publique de l'Union ne semblent pas encore avoir pris la mesure. L'objet initial de ce rapport, né d'une demande du Commandement de l'Espace, portait sur les mutations de l'écosystème spatial français et européen à l'aune de la révolution du *New Space*. Au fil de notre enquête, nous nous sommes rendu compte que l'enjeu, pour la filière spatiale française et européenne, allait bien au-delà de la simple émergence d'un secteur commercial aval.

Il semble donc que la façon dont a été formulée la question traduise une perception des enjeux encore insuffisante. Comment peut-on expliquer un tel décalage ? Que peut-on en déduire sur la situation européenne ?

Le *New Space*, nouvel écosystème surgi au début du siècle, traduit la mutation de l'industrie spatiale et de son organisation. Les initiatives privées viennent y suppléer les acteurs institutionnels, engendrant de nouvelles dynamiques industrielles. Le pari de SpaceX aux États-Unis et sa réussite dans les domaines civil et militaire témoignent d'un changement de paradigme tiré par la production en série et les économies d'échelle. Comme l'automobile il y a cent ans, le spatial découvre le fordisme et ses effets sur la demande de lanceurs et de satellites. Cette révolution s'opère dans des contextes institutionnel et législatif favorables, où la dualité civil - militaire joue à plein. Dès lors, le projecteur sur le *New Space* en Europe ne serait-il pas un arbre qui cache la forêt ? Un moyen de faire oublier les retards dont elle souffre et son incapacité institutionnelle à s'adapter.

L'objet de notre rapport est de donner, à partir de données publiques et d'éléments rassemblés dans le cadre de notre enquête, des clés d'interprétation pour expliquer de tels écarts et comprendre l'impasse dans laquelle se trouve l'Europe. Rappelons que si les situations européenne et française forment deux cas distincts, leur trajectoire et leur évolution actuelles restent encore très dépendantes. Ajoutons que la quête d'économies d'échelle ne se prête pas, à court terme du moins, au cas des vols habités ni à celui de l'exploitation des ressources lunaires, deux segments de marché pour lesquels le paradigme de l'industrie de prototypes est encore d'actualité. Aussi l'analyse qui suit ne tient-elle pas compte de ces deux segments particuliers.

⁸ Yann Cochenec, « Déploiement réussi de 40 satellites OneWeb lancés avec SpaceX », *Air&Cosmos International*, 11 janvier 2023, <https://air-cosmos.com/article/deploiement-reussi-de-40-satellites-oneweb-lances-avec-spacex-63960>.

⁹ Euractiv France et AFP, « L'UE lance Iris, une constellation de satellites pour sécuriser ses communications et internet – EURACTIV.fr », *Euractiv*, 18 novembre 2022, <https://www.euractiv.fr/section/avenir-de-lue/news/lue-lance-iris-une-constellation-de-satellites-pour-securiser-ses-communications-et-internet/>.

L'enquête : présentation et méthodologie

Ce rapport a été produit par 18 élèves-ingénieurs dans le cadre de l'option Économie Industrielle proposée aux élèves de 3^{ème} année du cycle ingénieur civil de l'École des Mines de Paris. Il est le fruit d'une collaboration entre l'École des Mines et le Commandement de l'Espace du ministère des Armées. L'étude s'appuie sur une enquête industrielle menée à Toulouse du 10 au 14 octobre 2022 auprès d'une trentaine d'entreprises du secteur spatial français, positionnées sur différents segments de marché et de tailles variées. L'enquête a été complétée par une quinzaine d'entretiens réalisés à Paris avec des acteurs privés, académiques et institutionnels au cours du dernier trimestre 2022. Les professeurs Olivier Bomsel et Pierre Fleckinger ont supervisé l'ensemble du projet. Au total, nous avons rencontré 44 institutions publiques, entreprises et organismes de recherche ou de financement.

I. À l'origine : économies d'échelle et dualité

A- La révolution fordiste : production en série et économies d'échelle

En 2001, Elon Musk s'engage dans le secteur spatial avec l'ambition à long terme d'établir une présence humaine sur Mars. Pour son premier envoi dans l'espace, il se tourne vers les Russes afin de se procurer des missiles balistiques (IBCM). Il se heurte alors à la réalité du marché et des prix : ses rêves martiens mis de côté, il décide de produire ses propres lanceurs à un coût plus compétitif.

Quand Elon Musk crée *Space Exploration Technologies Corporation* (SpaceX) le 6 mai 2002 (voir Annexe 2), il anticipe la demande induite par la numérisation de l'économie. Sa vision de l'industrie spatiale table sur l'émergence de nouveaux marchés de services et de recherche dès lors que le prix du déploiement des satellites sera réduit. Il faut pouvoir effectuer des lancements à intervalles raccourcis. La mission effective de SpaceX va être de démocratiser l'accès à l'espace et de faire advenir ce nouveau marché spatial en abaissant les barrières à l'entrée avec des lanceurs *low-cost*.

« Musk's rocket would be aimed at the lower end of the satellite market, and it could end up as ideal for an emerging class of smaller payloads that capitalized on the massive advances that had taken place in recent years in computing and electronics technology. »¹⁰

a) Vers une nouvelle organisation industrielle au service des économies d'échelle

Pour minimiser les coûts et les temps de production, SpaceX développe une organisation industrielle en rupture avec ce qui existait jusqu'alors. L'accroissement de la production et l'intégration verticale permettent à l'entreprise d'opérer un changement de paradigme : passer d'une industrie de prototypes, où chaque unité est conçue avec de forts investissements de R&D pour un usage quasi-unique, à une production en série profitant au maximum des économies d'échelle. La maîtrise intégrée de la chaîne de production, outre des séries plus longues, favorise l'économie de nombreux coûts de transaction et de délais. Combinée à une méthode d'innovation dite « incrémentale », l'intégration des activités rend possible des tests industriels, plus fréquents et à coût moins élevé. Or, la capacité à développer le plus rapidement de nouvelles solutions techniques est le fondement de la réussite de l'entreprise. C'est elle qui va inciter et parvenir à la réutilisation partielle des lanceurs. SpaceX opère ainsi une révolution à l'image du fordisme dans le secteur automobile, fondant un nouveau modèle d'organisation industrielle au service de la production en série.

L'intégration verticale de la chaîne de la production

On estime que SpaceX fabrique 80 à 90 % des pièces de ses fusées en interne¹¹, la majorité provenant du site de Hawthorne en Californie, gigantesque complexe industriel de 50 000 m², où les ingénieurs travaillent en *open-space* près des machines. L'usine tient une telle place symbolique qu'elle héberge le siège social de l'entreprise. En plus de construire ses propres moteurs, corps de fusée et capsules, SpaceX conçoit ses propres cartes-mères et circuits, ses capteurs pour détecter les vibrations, ses ordinateurs de vol et ses panneaux solaires. Cette maîtrise de la quasi-totalité de la chaîne de production permet l'accélération des processus de conception et de test. L'intégration verticale est source d'agilité.

¹⁰ Ashlee Vance, *Elon Musk: Tesla, Paypal, SpaceX : l'entrepreneur qui va changer le monde*, trad. par Michel Le Séac'h, Edition enrichie (Paris: Eyrolles, 2017).

¹¹ Vance.

La réussite de SpaceX tient aussi aux progrès techniques du début du XXI^{ème} siècle transférant au spatial des méthodes d'industrialisation issues de secteurs plus productifs. Les chaînes d'assemblage robotisées et automatisées dédiées à un produit standardisé sont au cœur des usines automobile et aéronautique. La numérisation des procédés industriels induit l'accroissement des volumes de production, de la qualité, ainsi qu'un gain de temps notable¹². Ainsi, l'utilisation d'imprimantes 3D-métal permet la fabrication de pièces plus légères assorties d'une grande flexibilité de production. Autre exemple, une machine de soudage par friction-malaxage guide la conduite automatique d'une soudure plus longue et plus robuste entre les feuilles de métal formant le corps des Falcon¹³. Si l'entreprise n'a pas développé elle-même le procédé, son application à des structures aussi longues est, quant à elle, novatrice.

D'autre part, les progrès de l'électronique élèvent les performances des composants pour des prix plus faibles. Les progrès du secteur encouragent aussi à utiliser du matériel issu de l'électronique grand public au détriment de l'électronique de pointe dédiée au spatial. Ce matériel s'avère de plus en plus capable de résister aux contraintes du rayonnement cosmique. En internalisant la production d'une radio, les ingénieurs de SpaceX ont réduit le poids de l'appareil d'environ 20 % et produit une version artisanale pour 5 000 dollars la pièce contre 50 000 à 100 000 pour une radio fournie par un équipementier du spatial¹⁴. À l'inverse de l'équipement traditionnel homologué par une agence, la radio estampillée SpaceX est construite à partir de composants grand public abondants et bon marché, puis validée en vol.

Un management au service d'une innovation par itération

Pour développer ses solutions le plus rapidement possible, SpaceX a recours à des innovations dites itératives. Cette approche est disruptive dans un secteur habitué aux cycles longs. Elle se fonde sur le test par expérimentation et itération, s'exposant ainsi à l'échec. Les corrections nécessaires se font a posteriori par tests successifs. Dans un document interne, l'entreprise estime que « parce que nous pouvons concevoir, construire et tester à faible coût [...], nous pouvons nous permettre d'apprendre par l'expérience plutôt que de perdre du temps à tenter d'anticiper toutes les interactions possibles entre les systèmes »¹⁵. Des précisions sur l'innovation itérative sont détaillées en Annexe 3. Les cycles brefs assurent un *time-to-market* plus court, mieux adapté au rythme de progression imposé par la loi de Moore¹⁶.

SpaceX a su, dès sa création, recruter et profiter de l'expérience d'ingénieurs passés par Boeing, Lockheed Martin et d'autres historiques du spatial américain. Pour encadrer l'innovation itérative, l'entreprise a adapté ses pratiques managériales. L'objectif étant l'optimisation du temps, elle veut décroiser un maximum les départements pour supprimer les délais de médiation hiérarchiques et favoriser la circulation des idées. En témoignent les bureaux de Hawthorne, véritable ruche industrielle où les plateaux d'ingénieurs se retrouvent au cœur de l'usine. L'entreprise responsabilise d'autant plus les employés qu'ils sont invités à résoudre leurs problèmes en cherchant des solutions intuitives, pas

¹² OECD, « The Space Economy in Figures: How Space Contributes to the Global Economy », *OECD Publishing*, 2019, <https://doi.org/10.1787/c5996201-en>.

¹³ Vance, *Elon Musk*.

¹⁴ Vance.

¹⁵ Space X, « System Engineering: A Traditional Discipline in a Non-traditional Organization », http://sewiki.ru/images/0/00/CASE2012_2-4_Muratore_presentation.pdf?fbclid=IwAR3Ih0ftHM2UvRraYn_8sauavUESVd_5S7Kkbt2yNbvRq-CGCBmwLKzALU.

¹⁶ « Leur durée est aussi plus adaptée à la durée de vie des satellites LEO qui est plus courte. », s. d.

forcément efficaces. En bref, SpaceX cherche à conserver le tâtonnement et l'initiative d'une start-up dans une entreprise se muant en acteur industriel majeur.¹⁷

Le soutien institutionnel

Si Elon Musk a pu initier son aventure spatiale grâce à un apport personnel de 100 millions de dollars, le succès de SpaceX tient aussi en grande partie à sa capacité à capter la manne étatique américaine en contractant avec les deux moteurs de la commande publique, la NASA et le *Department of Defense* (DoD).

En 2008, alors que l'entreprise subit de plein fouet la crise financière, la NASA vole à sa rescousse. L'agence signe avec SpaceX le *Commercial Resupply Services* (CRS)¹⁸, un accord de 1,6 milliard de dollars pour effectuer 12 vols de ravitaillement vers l'ISS¹⁹. C'est grâce à ce contrat qu'est produit le premier Falcon 9 qui reste encore aujourd'hui le produit phare de l'entreprise. Une prorogation du contrat en 2015 prévoit 8 vols supplémentaires moyennant 1,1 milliard de dollars. L'actualité des dernières années montre que l'intérêt de la NASA pour SpaceX via des contrats de prestation ne se tarit pas : en août 2022, un énième contrat de 1,4 milliard de dollars est passé avec l'entreprise pour mener 5 vols habités vers l'ISS.²⁰

En fait, SpaceX a su s'afficher comme un partenaire crédible à un moment où la NASA cherchait à se recentrer, autrement dit à se désengager de l'opérationnel, pour se concentrer sur l'exploration et la recherche²¹. Cette stratégie de spécialisation a permis à l'agence américaine d'abaisser ses coûts –les contrats de service épargnent à l'utilisateur les coûts d'entretien et de maintien en exploitation²²– tandis qu'elle offrait à SpaceX l'occasion d'accumuler des ressources et de l'expérience.

b) La baisse du coût d'accès à l'espace et ses conséquences sur le reste du secteur spatial

Le prix d'accès à l'espace n'a jamais été aussi bas

Vingt ans après la création de SpaceX, la démocratisation de l'accès à l'espace est une réalité. Grâce à sa fusée réutilisable Falcon 9, SpaceX a réussi la totalité de ses 60 lancements en 2022, soit un tiers de tous les lancements de l'année²³. Sur les vols commerciaux, sa domination a été totale et contraste avec les difficultés rencontrées par les lanceurs européens. Avec un revenu commercial de

¹⁷ Vance, *Elon Musk*.

¹⁸ John Yembrick, « NASA Awards Space Station Commercial Resupply Services Contracts », NASA, décembre 2008, https://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/dec/HQ_C08-069_ISS_Resupply.html?fbclid=IwAR320XNaXwz2IEl2QqIZfo0OpY-aPdSGXBJVkcTsTugydwRJaEK-RIw7KvEY.

¹⁹ scr00chy, « List of SpaceX Contracts », *ElonX.Net* (blog), 11 juillet 2019, <https://www.elonx.net/list-of-spacex-contracts/>.

²⁰ Michael Sheetz, « NASA Taps SpaceX for 5 More Astronaut Missions Worth \$1.4 Billion », *CNBC*, 31 août 2022, <https://www.cnbc.com/2022/08/31/nasa-awards-spacex-1point4-billion-in-contracts-for-5-more-astronaut-missions.html>.

²¹ « Le programme Artemis, qui regroupe le développement d'un véhicule spatial, nommé Orion, d'un lanceur (Space Launch System) mais aussi d'une station spatiale en orbite lunaire (Lunar Gateway), a l'ambition de vouloir ramener des humains sur le sol lunaire en 2025. », s. d.

²² Diane Zajackowski et Nicolas Maubert, « L'émergence et le développement du New Space aux États-Unis » (Bureau du CNES et Service Spatial de l'Ambassade de France à Washington, juin 2022), https://france-science.com/wp-content/uploads/2022/07/Note-th%C3%A9matique_Emergence-et-developpement-du-New-Space-americain.pdf?fbclid=IwAR2JjS4fK-apj2qqfD8fz_5p68i-jY7RbSTf6Ny4wP_UZyhTtrSUzDKpW38.

²³ « 59 Falcon 9 et un lancement de Falcon Heavy », s. d.

67 millions de dollars (augmentation de 62 à 67 millions en 2022) pour une charge utile de 22,8 tonnes en orbite basse, c'est-à-dire un prix de \$2 930/kg, l'accès à l'espace n'a jamais été aussi bon marché²⁴.

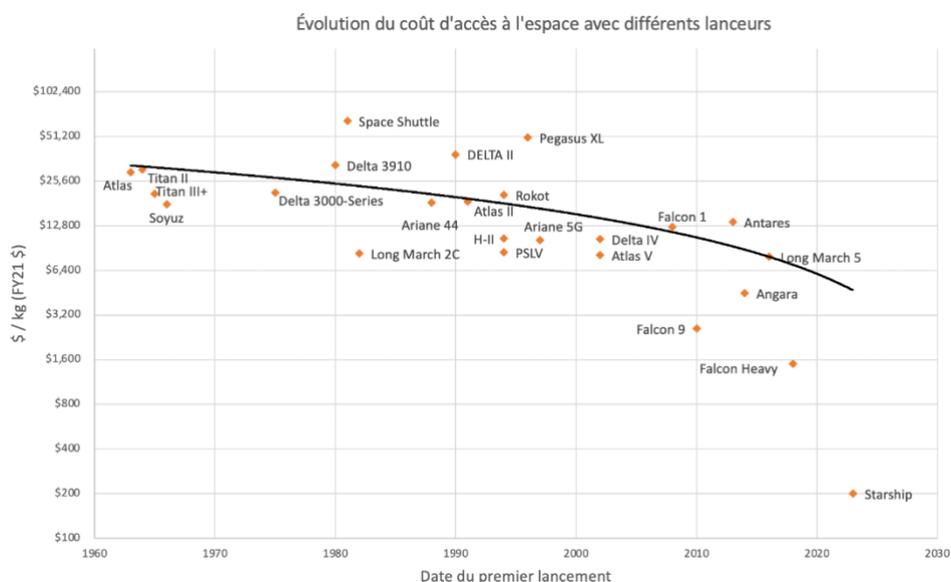


Figure 1 - Évolution du coût d'accès à l'espace par type de lanceurs

Source: *The Conversation* ([Space Launch to Low Earth Orbit: How Much Does It Cost?](#)) / *The Conversation* ([Spaceplanes vs reusable rockets – which will win?](#))

S'il est vrai que SpaceX propose aujourd'hui des prix largement inférieurs à ceux de la concurrence (trois fois moins cher qu'Ariane 5)^{25,26}, il n'en reste pas moins que les contrats publics de la NASA et des militaires américains subventionnent les services aux acteurs privés. En effet, le secteur public paie son billet pour l'espace plus cher, ce qui finance en partie les dépenses de développement. Cependant, les réductions de coûts de lancement sont trop importantes pour n'être justifiées que par les subventions. Les gains induits par l'organisation industrielle et ses modes de financement induisent de vraies économies d'échelle dans les lanceurs. Dans une note datant de 2011²⁷, la NASA estimait le coût de développement de Falcon 9 entre 1,7 milliard et 4 milliards de dollars, alors qu'il aura suffi de 400 millions de dollars à SpaceX pour valider la version initiale de la fusée en 2010. Ce dernier chiffre est confirmé par l'agence américaine.

Étude de cas : Le pari du réutilisable avec Falcon 9

Le lanceur Falcon 9 (voir Annexe 4) est aujourd'hui le produit phare de SpaceX : il concourt à 60 des 61 lancements de l'entreprise en 2022. Si celle-ci peut soutenir une cadence si élevée, c'est parce que son premier étage est réutilisable et qu'il revient se poser verticalement au sol après chaque séparation. Cette prouesse technique est le résultat d'un pari risqué pris dès l'origine par Elon Musk. En effet, la volonté de réutiliser certaines parties des fusées a toujours été au cœur de la stratégie de SpaceX puisque même le premier étage de la Falcon 1 était prévu pour être réutilisé. L'objectif est d'une part, l'amortissement des coûts fixes de production sur de nombreuses utilisations et, d'autre part, un gain de temps dans l'assemblage visant à lancer de plus en plus de fusées.

²⁴ « Capabilities & Services - Space X », https://www.spacex.com/media/Capabilities&Services.pdf?fbclid=IwAR0WgBFFR8dfZTXKBD4hoUW6HZ30iGURpKdUoAMkloKzLvtJ6cG82C_MJQ.

²⁵ « Ariane 5 », Arianespace, s. d., 5, <https://www.arianespace.com/vehicule/ariane-5/>.

²⁶ Rich Smith, « Europe's New Space Rocket Is Incredibly Expensive », *The Motley Fool*, 10 novembre 2020, sect. investing, <https://www.fool.com/investing/2020/11/10/europe-space-rocket-incredibly-expensive-airbus/>.

²⁷ Edgar Zapata, « An Assessment of Cost Improvements in the NASA COTS/CRS Program and Implications for Future NASA Missions » (NASA, s. d.).

Le développement du ré-usage a été très capital-intensif, plus d'un milliard de dollars à date de 2017 selon Elon Musk. Il a aussi été long à réaliser : développée depuis le milieu des années 2000, Falcon 9 n'a pu être partiellement réutilisée qu'au début de 2017. Mais avec la dernière version de son premier étage « Block 5 » en service depuis 2018, SpaceX semble avoir trouvé une solution fiable et efficace. Si la réutilisation de la coiffe n'est pas encore maîtrisée, le « Block 5 » le plus utilisé en est déjà à quinze réfections²⁸. En avril 2022, SpaceX battait son propre record en récupérant, reconditionnant et relançant un block 5 en seulement 21 jours²⁹.

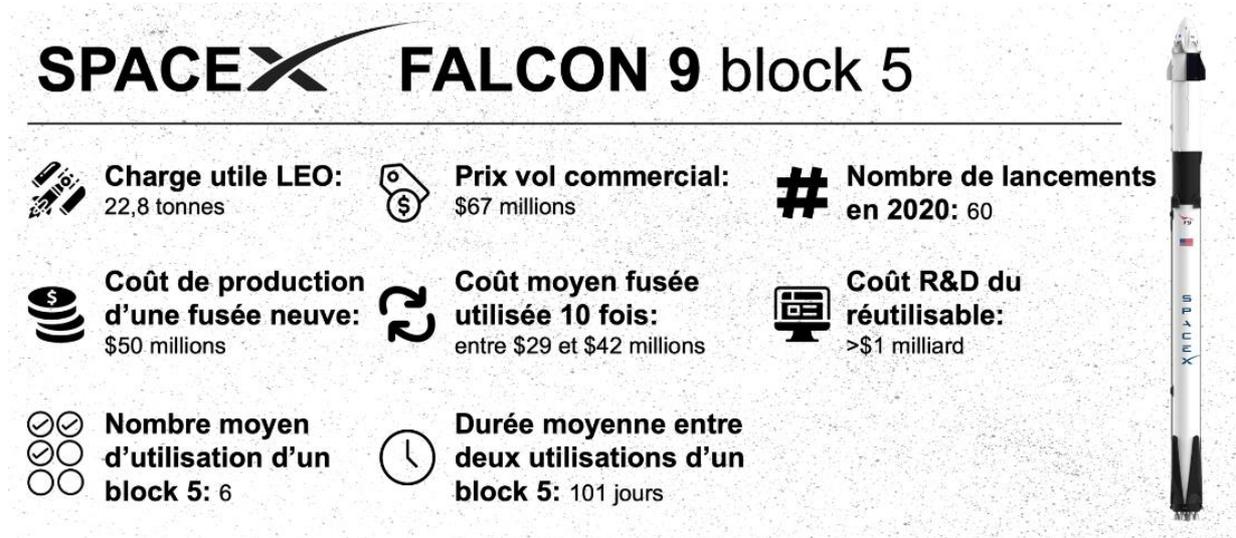


Figure 2 - Caractéristiques du bloc 5 du Falcon 9

(pour plus d'informations sur les montants indiqués, se référer à l'annexe 4)

Source : SpaceX ([Capabilities & Services](#)) / SpaceNews ([SpaceX gaining substantial cost savings from reused Falcon 9](#))

Des Falcon à Starlink : s'étendre sur le marché aval

En 2015, Elon Musk annonce sa volonté de "révolutionner le secteur des satellites comme il l'a fait pour le secteur des fusées"³⁰. Avec Starlink, il va devenir un géant des télécommunications. Ayant rendu crédible, grâce à ces lanceurs, le volet spatial de l'économie numérique, il entend lui-même être le premier à l'exploiter. À l'intégration des lanceurs s'ajoute alors celle vers le secteur aval. Des pièces détachées des Falcon 9 au service après-vente de Starlink, en passant par les terminaux utilisateurs, SpaceX est présent sur toute la chaîne de valeur. Sa présence en aval justifie en passant la cadence des Falcon : en 2022, la moitié des 61 lancements de SpaceX emporte une charge Starlink. L'activité en aval permet en outre de s'ajuster plus finement à la demande et de mener en interne les réorganisations nécessaires.

²⁸ Stephen Clark, « SpaceX booster launches for record 15th time on Starlink mission – Spaceflight Now », 25 janvier 2023, <https://spaceflightnow.com/2022/12/17/falcon-9-starlink-4-37-launch/>.

²⁹ SpaceX [@SpaceX], « Falcon 9's First Stage Has Landed on the Just Read the Instructions Droneship – Completing This Booster's Second Flight in 21 Days <https://t.co/8jreRAApsX> », Tweet, *Twitter*, 29 avril 2022, <https://twitter.com/SpaceX/status/1520155013661659137>.

³⁰ Todd Bishop, « How Elon Musk Plans to Get to Mars, via Seattle: What the SpaceX Founder Said at That Private Event », *GeekWire*, 19 janvier 2015, <https://www.geekwire.com/2015/elon-musk-plans-get-mars-via-seattle-spacex-founder-said-private-event/>.

SpaceX transforme l'ensemble du secteur

SpaceX est l'archétype d'une culture industrielle du spatial – le *New Space* : ses innovations industrielles et organisationnelles essaient depuis une dizaine d'années dans le reste du secteur³¹. Ces changements touchent aussi bien les lanceurs que les satellites.

Dans le sillage de SpaceX, on voit surgir des entreprises en quête de rendements d'échelle. La révolution des satellites en série est patente : si SpaceX est loin devant avec 120 satellites par mois³², d'autres acteurs comme OneWeb, et ses 2 satellites par jour³³, produisent à des cadences jamais observées jusqu'alors. Les économies d'échelle ont pour conséquence un abaissement significatif des coûts de production. Le coût de production d'un satellite de télécommunication est passé d'1,5 milliard d'euros³⁴ dans les années 1970-80 à 300 millions d'euros aujourd'hui³⁵, et l'arrivée des petits satellites spécialisés des constellations bouleverse le marché (900 000 euros environ pour produire un des minisatellites de la constellation OneWeb³⁶).

On observe aussi une plus grande intégration verticale. Ceux qui ne disposent pas des capitaux nécessaires ont de plus en plus recours aux produits sur étagère, profitant notamment du dynamisme du secteur électronique³⁷.

Côté lanceurs, après avoir longtemps douté des fusées réutilisables, ArianeGroup a annoncé fin 2021, soit quinze ans après Falcon, le développement de son premier micro-lanceur réutilisable, Maia.

B- La dualité civil - militaire

Au cours de la guerre froide, l'espace a été un terrain d'affrontement technique entre l'URSS et les États-Unis. On le considérait alors comme un support aux opérations terrestres. La première guerre du Golfe a démontré l'existence de vastes synergies entre le spatial civil et militaire. En effet, les technologies spatiales – notamment le GPS – ont concouru à la démonstration de force américaine. De nombreux satellites militaires ont été employés, relayés bien souvent par des satellites civils. Les

³¹ Xavier Pasco, « L'évolution du contexte spatial américain », *Annales des Mines - Réalités industrielles*, F.F.E, mai 2019, 21-24.

³² Michael Sheetz, « SpaceX Is Manufacturing 120 Starlink Internet Satellites per Month », *CNBC*, 20 août 2020, <https://www.cnbc.com/2020/08/10/spacex-starlink-satellite-production-now-120-per-month.html>.

³³ Rick Neale, « OneWeb Satellites Cranking out Two Satellites per Day at Kennedy Space Center Factory », *Florida Today*, consulté le 24 janvier 2023, <https://www.floridatoday.com/story/tech/science/space/2022/01/21/oneweb-satellites-look-inside-sci-fi-factory-kennedy-space-center-florida/6172817001/>.

³⁴ « Satellites Espions », in *Encyclopædia Universalis*, consulté le 24 janvier 2023, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/satellites-espions/>.

³⁵ Vincent Lamigeon, « Satellites SES: le gros coup de Thales Alenia Space », *Challenges*, 18 novembre 2021, sect. Aéronautique, https://www.challenges.fr/entreprise/aeronautique/satellites-ses-le-gros-coup-de-thales-alenia-space_789569; Olivier TASCH, « La facture du nouveau satellite militaire s'alourdit », *Virgule*, 1 avril 2020, sect. Économie, <https://www.wort.lu/fr/economie/la-facture-du-nouveau-satellite-militaire-s-alourdit-5e84a294da2cc1784e35a804>; « La France lance un satellite militaire dernière génération », *Challenges*, octobre 2021, https://www.challenges.fr/entreprise/aeronautique/la-france-lance-un-satellite-militaire-derniere-generation_786162.

³⁶ Christain Devenport, "The revolution in satellite technology means there are swarms of spacecraft no bigger than a loaf of bread in orbit", *The Washington Post*, 6 avril 2021 ; <https://www.washingtonpost.com/technology/2021/04/06/small-satellites-growth-space/> ; Chris Forrest, « The Forrester Report: OneWeb's "Valley of Death" », *SatMagazine*, novembre 2018, <http://www.satmagazine.com/story.php?number=1452687289>.

³⁷ OECD, « The Space Economy in Figures ».

Américains ont tiré les leçons de cette campagne, donnant naissance à une nouvelle doctrine militaire nommée RMA (*Revolution in Military Affairs*), ouverte aux partenariats entre acteurs spatiaux civils et militaires. Ces partenariats sont encouragés par la baisse du budget du DoD résultant de la fin de la guerre froide, ainsi que par le recul du spatial au sein de celui-ci. La RMA pose la base des économies d'échelle ouvertes par la dualité des systèmes spatiaux.

a) *L'existence de synergies historiques fortes*

Conscient des nouveaux besoins de l'armée, le président américain George W. Bush a adopté la doctrine de « *Space dominance* » après la fin de la deuxième guerre du Golfe. Il a pris acte de l'intérêt vital de l'espace pour les États-Unis et a souhaité garantir à l'armée un accès à l'espace en cas de conflit. Les nombreuses restructurations du DoD et de l'administration américaine de ces dernières années visant à intégrer pleinement les activités spatiales reflètent cette doctrine. En 2018, le *National Space Council* (NSC), dissous en 1993 puis rétabli en 2017, a publiquement déclaré considérer l'espace comme un nouveau champ de bataille. La *Space Development Agency* (SDA) est créée en mai 2019³⁸. En août 2019, le US Space Command est rétabli après 17 ans d'interruption de service, avec des prérogatives doctrinales, opérationnelles et de dissuasion en synergie avec les autres commandements des trois armées. Enfin, une nouvelle et sixième branche des Forces Armées dédiée au spatial est créée en décembre 2019, sous le commandement conjoint du *US Space Command* et de l'*US Space Force*³⁹.

Néanmoins, les nombreuses collaborations entre le DoD et la NASA témoignent du fait que la souveraineté spatiale des États-Unis ne peut s'obtenir sans une exploitation des synergies industrielles entre civil et militaire. Ainsi, la NASA répond-elle aux besoins du DoD. Un mémorandum de 1966 formalise les relations entre la NASA et le DoD pour les lancements, le suivi, les télécommunications, l'acquisition et le traitement des données, et organise les canaux d'échange administratifs entre les institutions. Le projet Landsat de satellites de télédétection lancé en 1972 illustre les synergies entre les deux organismes⁴⁰ : projet civil à l'origine, celui-ci a été repris en charge par la NASA après la seconde guerre du Golfe du fait des besoins militaires en images. L'annonce en janvier 2023 d'une collaboration entre la NASA et le DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*, agence du DoD) pour le développement d'une fusée à propulsion nucléaire pour atterrir sur Mars démontre l'actualité du partenariat civil - militaire⁴¹.

Tenu pour stratégique, le spatial a bénéficié de dépenses publiques élevées aux États-Unis⁴². La répartition égale de ce budget entre le civil et le militaire illustre le caractère dual des activités spatiales : en 2020, les institutions américaines ont dépensé 24,3 milliards de dollars dans la défense spatiale et 23,4 milliards dans le spatial civil. Côté militaire, on constate actuellement un regain d'intérêt des armées pour le spatial : de 4 % en 1995, la part des dépenses du DoD consacrée au spatial est remontée à 6,9 % en 2019. Le budget de l'*US Space Force* a presque doublé en trois ans :

³⁸ Alessandro Marrone et Michele Nones, « The Expanding Nexus between Space and Defence », *Istituto Affari Internazionali*, 2022.

³⁹ « Our Forces », U.S. Department of Defense, s. d., <https://www.defense.gov/About/Our-Forces/>.

⁴⁰ « Landsat Science », NASA, s. d., <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.

⁴¹ NASA, « NASA, DARPA Will Test Nuclear Engine for Future Mars Missions », *PR Newswire*, janvier 2023, <https://www.prnewswire.com/news-releases/nasa-darpa-will-test-nuclear-engine-for-future-mars-missions-301729418.html>.

⁴² Dwayne A. Day, « Invitation to Struggle: The History of Civilian-Military Relations in Space », in *Exploring the Unknown: Selected Documents in the History of the U.S. Civilian Space Program II: External Relationships*, 1996, 233-81.

Année	Budget de la <i>US Space Force</i>
2021	15,4 milliards de dollars ⁴³
2022	17,4 milliards de dollars ⁴⁴
2023	26,3 milliards de dollars ⁴⁵

La dualité civil - militaire s'applique à la fois à la conception et à l'utilisation des systèmes spatiaux. Côté conception, les satellites militaires ont tiré profit des avancées réalisées dans le domaine civil. En France par exemple, le développement conjoint de plusieurs couples de satellites civils et militaires, comme Spot 4 et Hélios 1 qui partageaient une même plateforme et un même enregistreur magnétique, a permis au pays d'économiser entre 150 et 200 millions d'euros grâce aux économies de conception⁴⁶. Inversement, les lanceurs civils ont historiquement bénéficié des recherches militaires (propulsion à propergol solide et développements des systèmes). Ainsi, Alain Charneau – ex-PDG d'Airbus Safran Launchers – déclarait « qu'aucun pays au monde n'a fait de lanceurs civils sans faire des missiles balistiques »⁴⁷.

La guerre est, de manière générale, un catalyseur des synergies duales. La guerre du Vietnam fournit un exemple des retombées technologiques du spatial civil sur le domaine militaire. Des innovations dues à la NASA ont, en effet, été mises en application par les Américains au cours du conflit (localisation acoustique de mortier, développement d'antennes et de circuits miniaturisés permettant de diviser par deux le poids de l'équipement radio, etc.)⁴⁸. Alors qu'au cours de l'opération *Enduring Freedom* menée en 2001 en Afghanistan, 60 % des communications avaient transité par des satellites commerciaux, ce chiffre s'élève à 80 % pendant l'opération *Iraqi Freedom* menée en 2003⁴⁹.

Enfin, les avancées technologiques réalisées dans le spatial militaire peuvent avoir des applications industrielles dans le civil, y compris hors du secteur spatial. Citons la poudrerie de Saint-Médard-en-Jalles, appartenant au groupe Safran Ceramics et spécialisée à l'origine dans le propergol pour missiles et lanceurs spatiaux. Elle trouve aujourd'hui de nouveaux débouchés dans la fabrication d'airbags et d'extincteurs. C'est là un exemple de dualité civil - militaire dès l'étape de la conception industrielle.

Plus récemment, le conflit en Ukraine a renforcé la dualité des usages du spatial. La constellation d'Elon Musk Starlink a été plébiscitée par les militaires et les civils ukrainiens : Elon Musk avance que

⁴³ Mike Wall, « Space Force Gets \$15.4 Billion in 2021 Budget Request », *Space*, 10 février 2020, <https://www.space.com/space-force-2021-budget-request.html>.

⁴⁴ Charles Pope, « FY22 Budget Gives Air & Space Forces the Strength to Meet Threats, Roth, Brown, Raymond Tell Senate », *United States Space Force*, juin 2021, <https://www.spaceforce.mil/News/Article/2651197/fy22-budget-gives-air-space-forces-the-strength-to-meet-threats-roth-brown-raym/https%3A%2F%2Fwww.spaceforce.mil%2FNews%2FArticle%2F2651197%2Ffy22-budget-gives-air-space-forces-the-strength-to-meet-threats-roth-brown-raym%2F>.

⁴⁵ Sandra Erwin, « Congress Adds \$1.7 Billion for U.S. Space Force in 2023 Spending Bill », *SpaceNews*, 24 décembre 2022, <https://spacenews.com/congress-adds-1-7-billion-for-u-s-space-force-in-2023-spending-bill/>.

⁴⁶ Jérôme Dollé, « L'Espace au service des opérations », *Les cahiers de la Revue Défense Nationale* (Comité d'études de défense nationale, 2011).

⁴⁷ Céline Lanusse, « La dualité civil/militaire de la filière aéronautique et spatial : le défi de l'industrialisation », *La Tribune*, 1 décembre 2015, sect. Business, <https://objectifaquitaine.latribune.fr/business/2015-12-01/la-dualite-civil/militaire-de-la-filiere-aeronautique-et-spatial-le-defi-de-l-industrialisation.html>.

⁴⁸ W. Fred Boone, *NASA Office of Defense Affairs: the first five years: December 1, 1962, to January 1, 1968*, electronic resource (Washington, D.C: Historical Division, Office of Policy, National Aeronautics and Space Administration, 1970), <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS69912>.

⁴⁹ « L'Espace et la dualité civile et militaire » (Laboratoire de stratégie de l'armement, mars 2004).

plus de 25 000 terminaux Starlink ont été envoyés en Ukraine, fournissant l'équivalent de la 4G ou de la fibre optique quelles que soient les destructions sur le terrain⁵⁰. Selon un industriel français rencontré dans l'enquête, le DoD américain finance ces terminaux pour 4 000 dollars par mois. Starlink n'avait évidemment pas compté sur cette guerre pour assurer la viabilité de son modèle, cependant ce type de réutilisation militaire de moyens civils incite les nouveaux entrants à intégrer la commande publique dans leur plan d'affaires.

La dualité civil - militaire s'observe également dans les échanges de données satellitaires. En France, Météo France compte les armées parmi ses clients de données océanographiques et météorologiques⁵¹. Le partage des satellites entre usages militaire et civil est également possible : ce fût le cas des satellites français Syracuse I et II, détenus par France Télécom et utilisés dans le domaine militaire⁵².

Ces éléments expliquent que la dualité imprègne la culture des entreprises du spatial. Les commandes militaires représentent une part importante des revenus des opérateurs civils. SpaceX a effectué plusieurs lancements dans le cadre de la mission USSF-67 de l'*US Space Force*, pour un montant total de 316 millions de dollars⁵³. La compagnie a récemment annoncé le développement d'une constellation spécifiquement militaire pour le Pentagone nommée Starshield, s'appuyant sur les technologies développées avec Starlink⁵⁴. La dualité est aussi dans le modèle organisationnel de Safran, pour qui le département de recherche et développement (R&D) et la main d'œuvre sont communs aux projets civils et militaires⁵⁵. Pour un satellite, les ajustements techniques sont souvent peu nombreux pour passer d'une charge utile civile à une charge utile militaire. Dès lors que l'armée souhaite envoyer des objets dans l'espace, elle allonge la taille des séries de production presque comme un client civil. C'est là l'effet multiplicateur des économies d'échelle permises par la dualité.

b) L'intérêt militaire, un multiplicateur des économies d'échelle dans le domaine civil

La dualité des technologies spatiales renforce les économies d'échelle du *New Space*. L'augmentation de la taille des séries permet l'amortissement des coûts fixes (investissement en R&D, construction de l'usine, acquisition des moyens de production, etc.) sur chaque unité produite. Ainsi, plus les séries s'allongent, plus les coûts fixes se divisent, plus le coût moyen de l'unité diminue. Il s'agit d'une révolution dans les domaines militaire comme civil. Historiquement, les deux secteurs sont issus d'une industrie de prototypes.

L'investissement public, notamment militaire, dans un secteur spatial en quête d'économies d'échelle a un effet multiplicateur. Dans un premier temps, la puissance publique investit en cofinancement des coûts fixes. Les militaires sont prêts à surpayer certaines prestations pour assurer la survie des entreprises concernées : cela coûte toujours moins cher que de reconstituer leurs

⁵⁰ Elise Vincent, Alexandre Piquard, et Cédric Pietralunga, « Comment Starlink et les constellations de satellites d'Elon Musk changent la guerre », *Le Monde.fr*, 15 décembre 2022, https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/12/15/starlink-et-les-constellations-de-satellites-nouvel-enjeu-militaire_6154463_3234.html.

⁵¹ « L'Espace et la dualité civile et militaire »; Dollé, « L'Espace au service des opérations ».

⁵² « L'Espace et la dualité civile et militaire ».

⁵³ Stephen Clark, « U.S. Military Payloads Mated to SpaceX Falcon Heavy Rocket for Weekend Launch », *Spaceflight Now*, janvier 2023, <https://spaceflightnow.com/2023/01/13/u-s-military-payloads-mated-to-spacex-falcon-heavy-rocket-for-weekend-launch/>.

⁵⁴ Michael Sheetz, « SpaceX Unveils "Starshield," a Military Variation of Starlink Satellites », *CNBC*, 5 décembre 2022, <https://www.cnbc.com/2022/12/05/spacex-unveils-starshield-a-military-variation-of-starlink-satellites.html>.

⁵⁵ Valérie Mérimond et David W. Versailles, « La dualité comme moyen de repenser la position stratégique des firmes », *Revue Défense Nationale* 780, n° 5 (2015): 46-51, <https://doi.org/10.3917/rdna.780.0046>.

compétences et leurs technologies. La commande publique soutient la phase de R&D et les infrastructures, si bien que la part financée par l'entreprise diminue. Cet investissement est souvent décidé pour des raisons stratégiques : conservation d'une industrie militaire souveraine, maintien de la puissance militaire nationale, etc. La commande publique subventionne et abaisse les barrières pour le secteur privé. La baisse du coût d'accès à l'espace fait que l'envoi d'objets de plus en plus petits et nombreux devient rentable, ce qui a pour effet d'augmenter les effets de taille dans la production. Le fabricant peut alors vendre ses produits à moindre coût à des acteurs privés, mais aussi à la puissance publique dont les subventions bénéficieront de cet effet de levier. Le cercle vertueux du fordisme est dopé par les aides publiques.

Mais la puissance publique y trouve aussi son compte. La NASA utilise les capsules réutilisables *Crew Dragon* de SpaceX pour envoyer ses astronautes et du matériel à bord de l'ISS dans le cadre du programme COTS (*Commercial Orbital Transportation Services*) de la NASA⁵⁶. Un lanceur peut aussi bien transporter une charge utile militaire que civile, si bien que le DoD profite aussi de l'abaissement du coût d'accès à l'espace en multipliant les contrats avec SpaceX pour envoyer des satellites à usage militaire avec son lanceur Falcon 9⁵⁷. Ces clients militaires prêts à payer plus cher concourent à l'effet de volume. En retour, SpaceX peut diminuer les tarifs appliqués au civil.

Notons que le domaine militaire profite une seconde fois des effets d'échelle. Bien que les cahiers des charges soient confidentiels, les experts vus lors de notre enquête ont reconnu qu'un satellite civil pouvait sans peine emporter une charge utile militaire. Si l'abaissement des coûts d'accès à l'espace permet au civil d'allonger ses séries de satellites, les militaires disposent d'un plus grand nombre d'occasions de s'associer à ces plateformes. Ce serait le cas de Starlink : outre les revenus induits par la guerre en Ukraine, la constellation (civile à l'origine) embarquerait des charges utiles militaires dont les revenus compenseraient les pertes enregistrées sur le marché civil. Ainsi, bien que la dualité soit ancienne dans le domaine spatial, la dualité au service des économies d'échelle est un facteur décisif du *New Space*.

⁵⁶ « NASA - Space Exploration Technologies (SpaceX) », NASA (Brian Dunbar, s. d.), <https://www.nasa.gov/offices/c3po/partners/spacex/index.html>.

⁵⁷ scr00chy, « List of SpaceX Contracts ».

II. L'émergence de nouveaux marchés

Le *New Space* s'inscrit dans la continuité de la révolution numérique. Les autoroutes terrestres de l'information desservant des milliards de terminaux mobiles ont vocation à s'étendre dans l'espace. Elles ont commencé avec la numérisation des satellites géostationnaires, et poursuivent avec l'exploitation de l'orbite basse (LEO, *Low Earth Orbit*). Avec ces infrastructures s'ouvrent de nouveaux marchés et de nouveaux moyens de financement.

A- Vers un espace de l'information

a) *Le spatial, relais critique d'une architecture informationnelle nouvelle*

La seconde moitié des années 2000 consacre le déploiement planétaire du GPS et des smartphones connectant objets et personnes au moyen du code numérique. Dans ce contexte, la demande de services d'observation, de suivi, de géolocalisation terrestre et de surveillance dans l'espace et depuis l'espace explose.

L'espace devient la continuité naturelle et essentielle de la fibre optique terrestre. La croissance des services tire le déploiement de l'infrastructure, justifiant les économies d'échelle recherchées dans son installation. Les plans d'affaires s'articulent autour de la connectivité (utilisation des infrastructures spatiales pour transmettre les données numériques) et de la data (valorisation des données collectées depuis l'espace)⁵⁸. Les services de géolocalisation et les balises GPS s'étendent, par exemple, à de très nombreux objets de la vie quotidienne. Ils sont souvent financés par la publicité des médias en ligne. La numérisation tire bien d'autres usages. Celui de l'observation de la Terre connaît un fort développement.

b) *La conquête des "autoroutes" de l'information par les États-Unis : une volonté historique d'occupation du segment GEO*

Les États-Unis ont toujours eu conscience des atouts de l'espace pour les télécommunications. Leur volonté de coloniser les "autoroutes de l'information" remonte à la guerre froide. Durant cette période, les États-Unis sont à l'initiative de nombreux progrès dans le domaine des communications⁵⁹ (Arpanet, GPS, premiers systèmes d'observation de la Terre). Après le démantèlement d'AT&T (1983), la fibre optique commence à se déployer prenant en charge les flux de données qui croissent exponentiellement. Le big bang des télécoms s'accompagne de l'arrivée en cascade de nombreux opérateurs, revendeurs et autres entreprises de services. Cette "nouvelle frontière" dans la maîtrise des moyens de communication s'étend alors au domaine spatial. Avec les *Satcoms* et sous l'égide d'Intelsat, le premier opérateur de services par satellites de l'histoire, l'exploitation américaine débute dans le domaine spatial⁶⁰.

Les États-Unis équipent l'orbite géostationnaire autant que l'allocation des positions le leur permet en y installant des satellites de communication, d'observation optique ou électroma-

⁵⁸ Sebastian Moranta, « The Space Downstream Sector: Challenges for the Emergence of a European Space Economy », Etudes de l'Ifri (Ifri, mars 2022).

⁵⁹ Olivier Bomsel et Gilles Le Blanc, éd., *Dynamiques industrielles et réglementaires des télécoms : une comparaison États-Unis/France*, Les notes de l'IFRI, no 29 (Paris: Institut français des relations internationales, 2000).

⁶⁰ Anne-Marie Malavialle, « Les satellites de communications : des promesses techniques aux réalités politiques et industrielles », *Hermès* n° 34, n° 2 (2002): 191, <https://doi.org/10.4267/2042/14454>.

gnétique⁶¹. En outre, la dualité civil - militaire des activités spatiales les incite à maîtriser ces technologies, notamment pour répondre au besoin de liaison fiable et résiliente face à un éventuel ennemi. Quant à l'observation de la Terre, c'est un atout majeur en matière de renseignement⁶².

La donne géopolitique post-guerre froide pousse l'administration Clinton à exploiter davantage la maîtrise de l'espace. Le prestige industriel et la domination technologique cautionnent cette stratégie⁶³. En 1991, la *National Information Infrastructure* (NII) promue et supervisée par le vice-président Al Gore, induit des investissements massifs dans le spatial et les télécommunications. Ils s'accompagnent de nombreuses incitations fiscales, aides à l'investissement et par un premier plan de modernisation et de digitalisation des services fédéraux à hauteur de 2 milliards de dollars. Au cours de cette décennie, les entreprises américaines investissent près de 50 milliards de dollars par an dans les technologies de l'information (ordinateurs, fibres optiques, services de communication par satellites etc.)⁶⁴.

B- Le passage du GEO au LEO

a) L'orbite LEO, nouvelle autoroute de l'information

Aux États-Unis, après l'orbite GEO, la numérisation pousse à investir l'orbite LEO. La NASA encourage l'exploitation de l'orbite basse par les acteurs publics comme privés⁶⁵. L'émergence de nouveaux usages et de nouveaux marchés ouvre alors la voie à la colonisation de cette orbite. Dès lors, l'orbite LEO apparaît comme une priorité du secteur.

Que ce soit pour la data – capture d'images satellitaires – ou pour la connectivité, dont un des enjeux est la réduction du temps de latence, l'orbite LEO apparaît mieux adaptée aux applications numériques. En effet, les constellations en orbite basse répondent à la demande de connexion téléphonique et internet : la faible distance à la Terre réduit le temps de latence d'un facteur 15, de 700 ms pour un satellite en GEO à moins de 50 ms pour un satellite LEO⁶⁶. La couverture offerte est aussi un atout : la multiplication de satellites de petite taille est une alternative à l'infrastructure terrestre dans les zones à faible densité. L'orbite basse permet également de fournir des connexions haut débit aux opérateurs maritimes ou aériens⁶⁷. Ainsi, Starlink Maritime de SpaceX propose-t-il une connexion haut débit aux navires en haute mer. Enfin, comme les satellites GEO couvrent mal les pôles,

⁶¹ Jérôme Pellistrandi, « Xavier Pasco : Le nouvel âge spatial – De la guerre froide au New Space ; CNRS Éditions, 2017 ; 192 pages », *Revue Défense Nationale* 806, n° 1 (2018): 117-18, <https://doi.org/10.3917/rdna.806.0117>.

⁶² « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. »

⁶³ Guilhem Penent, « Governing the Geostationary Orbit Orbital Slots and Spectrum Use in an Era of Interference » (Ifri, janvier 2014); Xavier Pasco, « L'adaptation de la politique spatiale américaine aux changements internationaux », *Annales des Mines - Réalités industrielles* Mai 2012, n° 2 (2012): 75, <https://doi.org/10.3917/rindu.122.0075>.

⁶⁴ Lewis M. Branscomb et Brian Kahin, « Standards Processes and Objectives for the National Information Infrastructure », *Information Polity*, janvier 1995.

⁶⁵ Patrick Besha et Alexander MacDonald, « Economic Development of Low Earth Orbit » (NASA, 29 janvier 2016), http://www.nasa.gov/connect/ebooks/economic_development_of_low_earth_orbit_detail.html.

⁶⁶ Inigo del Portillo, Bruce G. Cameron, et Edward F. Crawley, « A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband », *Acta Astronautica* 159 (1 juin 2019): 123-35, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.040>.

⁶⁷ Claudia Marquina, « How LEO Satellite Technology Can Connect the Unconnected », World Economic Forum, s. d., <https://www.weforum.org/agenda/2022/02/explainer-how-low-earth-orbit-satellite-technology-can-connect-the-unconnected/>.

l'orbite basse répond, dans ces zones, aux enjeux de sécurité et défense. C'est d'ailleurs un point important de la stratégie arctique européenne⁶⁸.

Si l'orbite basse a d'abord été l'apanage d'activités militaires ou stratégiques, elle est désormais le lieu d'une exploitation commerciale intensive. Cette tendance est marquée par l'omniprésence de satellites de communication qui pesaient peu dans l'utilisation de l'orbite basse avant les années 2010. Le nombre de nouveaux satellites décroît alors sensiblement sur l'orbite géostationnaire et croît de manière exponentielle en orbite basse. Advient alors un changement de paradigme dans les communications par satellite dont témoigne l'émergence des constellations.

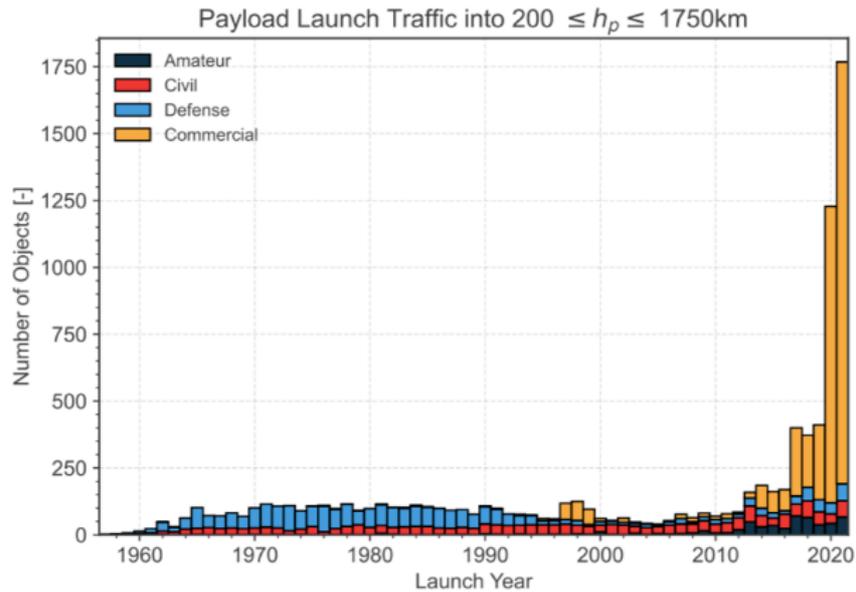
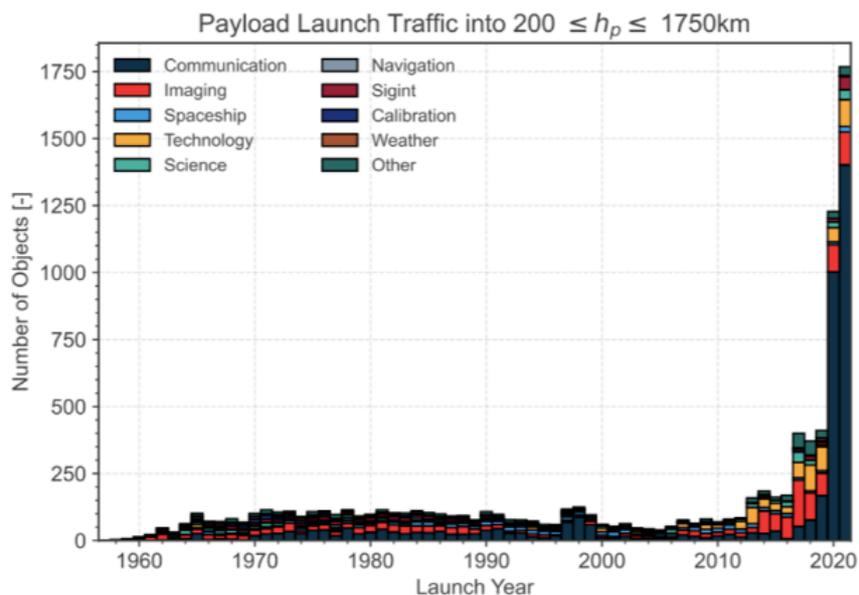


Figure 3 - Évolution du nombre de satellites en orbite basse par secteur
Source : European Space Agency ([ESA's Space Environment Report 2022](#))



⁶⁸ « Proposition de résolution en application de l'article 73 quinquies du Règlement, sur la proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant le programme de l'Union pour une connectivité sécurisée pour la période 2023-2027 (exposé des motifs) », Sénat, s. d., <http://www.senat.fr/leg/exposes-des-motifs/ppr21-780-expose.html#fn11>.

Figure 4 - Évolution du nombre de satellites en orbite basse par type d'activité.
 Source : European Space Agency ([ESA's Space Environment Report 2022](#))

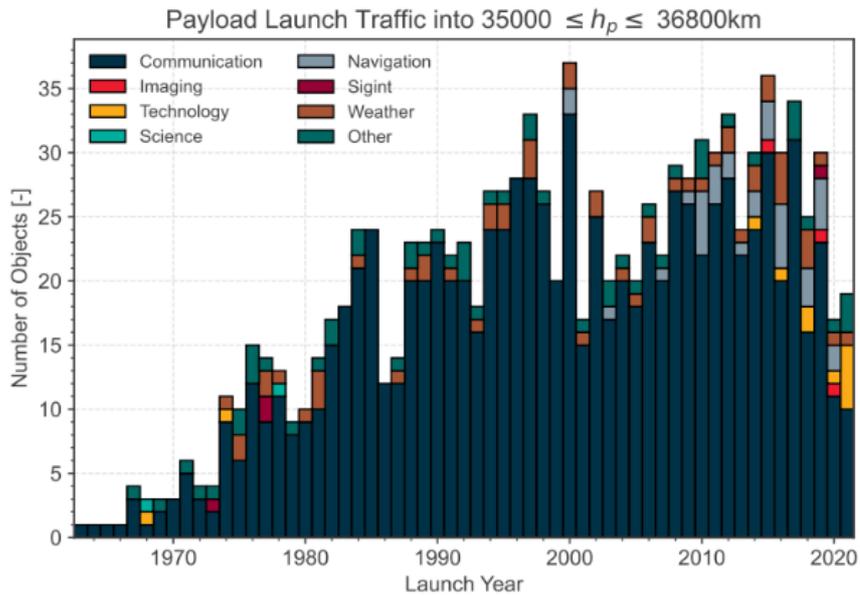


Figure 5 - Évolution du nombre de satellites en orbite géostationnaire par type d'activité.
 Source : European Space Agency ([ESA's Space Environment Report 2022](#))

L'orbite LEO requiert l'utilisation de constellations pour maintenir une fréquence de passages qui assure la continuité des communications sur chaque zone. Elles sont faites de satellites standardisés, de petite taille et de masse réduite. Ceux-ci se prêtent mieux à la production en série que les lourds satellites géostationnaires. Les petits satellites représentent désormais la majorité des objets opérationnels en orbite basse. La constellation Starlink a été pionnière mais d'autres acteurs ont rapidement suivi comme Blue Origin et sa constellation Kuiper ou OneWeb récemment racheté par l'opérateur français Eutelsat. Par ailleurs, pour les entreprises intégrées, la présence sur le marché aval permet de consommer la production interne : en 2022, la moitié des 61 lancements de SpaceX emporte une charge utile Starlink.

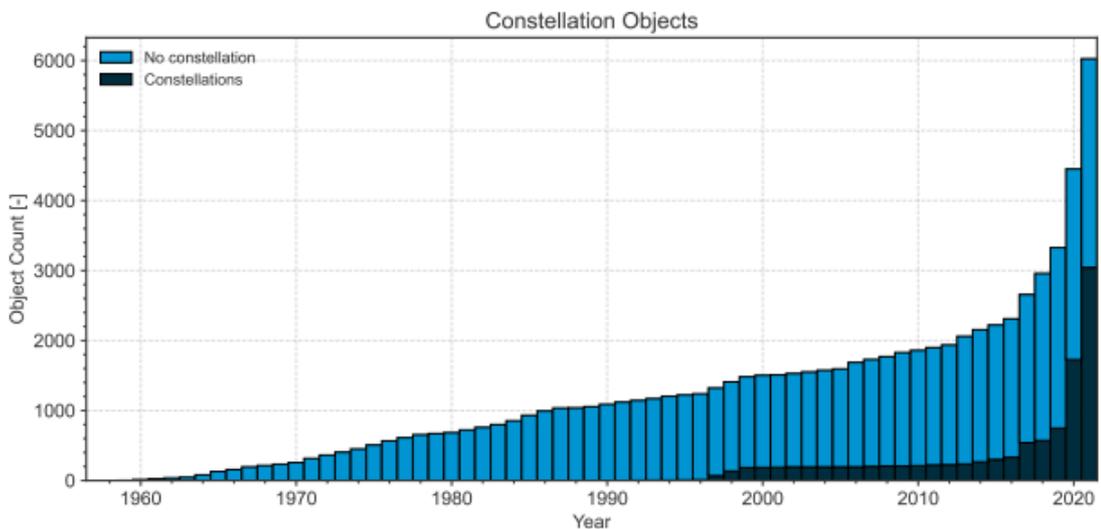


Figure 6 - Évolution du nombre de satellites en orbite basse appartenant ou pas à des constellations.
 Source : European Space Agency ([ESA's Space Environment Report 2022](#))

b) Une exploitation intensive de l'orbite basse ... qui a ses limites

La multiplication des usages entraîne une augmentation exponentielle du nombre de satellites lancés chaque année⁶⁹. Le déploiement des méga-constellations accélère le phénomène. Entre 1960 et 2010, on lançait en moyenne 150 satellites par an. Ce nombre a été multiplié par 12 lors de la dernière décennie.

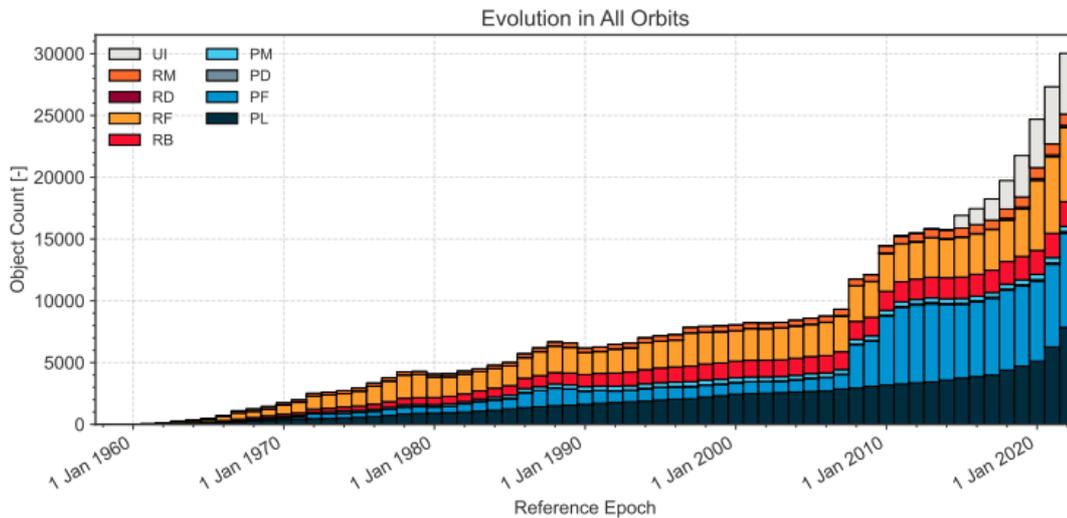


Figure 7 - Évolution du nombre d'objets dans l'orbite basse par typologie.

Classification: PL = Payload; PF = Payload Fragmentation Debris; PD = Payload Debris; PM = Payload Mission Related Object; RB = Rocket Body; RF = Rocket Fragmentation Debris; RD = Rocket Debris; RM = Rocket Mission Related Object; UI = Unidentified

Source : European Space Agency ([ESA's Space Environment Report 2022](#))

La prolifération du nombre d'objets en orbite basse pose la question de la soutenabilité de ces opérations spatiales. La congestion de l'orbite basse complique non seulement l'accès aux orbites plus lointaines, et l'accès à l'espace depuis la Terre de façon générale, mais aussi l'accès à l'orbite basse elle-même. Le risque est de saturer l'orbite voire de la rendre inutilisable. L'ESA⁷⁰ alerte en effet sur les débris générés par la croissance du nombre d'objets dans l'espace. De plus en plus nombreux, ces débris engendrent un risque croissant de collision avec les satellites opérationnels avec des conséquences désastreuses sur le plan économique. Alors que beaucoup de débris sont intraquables, le nombre estimé d'objets entre 1 cm et 1 mm par analyse statistique s'élèverait aujourd'hui à 128 millions⁷¹. Pourtant, en 2022, seuls 36 000 débris ont été répertoriés et suivis. Si on ne change rien à la gestion des vols, des lancements et de la fin de vie des objets spatiaux, le risque est d'aboutir au "syndrome de Kessler" : le nombre de débris est si élevé qu'ils rentrent souvent en collision avec des satellites, entraînant à leur tour de nouveaux débris et des collisions en chaîne. Les orbites concernées seraient alors inutilisables sur plusieurs générations.

L'autre point critique concerne les bandes de fréquences et les interférences. L'utilisation des bandes de fréquences par les opérateurs de satellites est soumise à un contrôle strict de l'Union internationale des télécommunications (UIT), qui pilote leur attribution et définit des règles de priorité en lien avec les organismes nationaux ou régionaux. Le principe « premier arrivé premier servi » prime néanmoins dans les règles d'attribution des fréquences de communication. Or, celles-ci constituent

⁶⁹ « Aeronautics and Space Report of the President: Fiscal Year 2020 Activities. » (NASA, s. d.).

⁷⁰ « ESA'S Annual Space Environment Report 2022 » (ESA, 22 avril 2022).

⁷¹ Loïs Miraux, « Environmental Limits to the Space Sector's Growth », *Science of The Total Environment* 806 (1 février 2022): 150862, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150862>.

des ressources limitées, de sorte que les opérateurs de satellites considèrent aujourd'hui qu'un maximum de six constellations de connectivité de type Starlink pourront coexister en orbite LEO sans générer d'interférences. Les satellites commerciaux en orbite basse fonctionnent en effet sur deux bandes de fréquence principales, la bande Ku (12-18 GHz), majoritairement utilisée, et la bande Ka (26.5-40 GHz), soumise aux aléas météorologiques et plus difficile d'utilisation. Les constellations OneWeb et Starlink utilisent la bande Ku mais doivent respecter la priorité d'utilisation donnée aux satellites géostationnaires pour éviter les interférences. Ainsi, Starlink estime avoir besoin de 10 000 objets pour assurer le fonctionnement de son réseau sans perturbation même quand il est nécessaire de se désactiver. Or, si un nouvel acteur ayant la priorité arrivait, il faudrait alors monter à 100 000 objets. Les interférences limitent donc fortement l'arrivée d'autres constellations, telle Kuiper, et de nouveaux acteurs : par exemple, Amazon critique souvent la place trop importante accordée à Starlink lors des autorisations délivrées par la *Federal Communications Commission (FCC)*⁷², l'autorité fédérale américaine de régulation des communications. Les acteurs en place réclament aujourd'hui l'extension des fréquences auxquelles ils peuvent avoir accès⁷³. Enfin, l'essor des constellations et leur positionnement sur un grand nombre de fréquences sont source de frustration des pays émergents qui voient leurs perspectives de programmes spatiaux disparaître.

Le désordre induit par le foisonnement des usages et des constellations en orbite basse interroge sur la soutenabilité de ces activités. De nombreux acteurs se mobilisent pour un meilleur encadrement des pratiques spatiales et cherchent à adresser les questions d'équité, d'environnement et de durabilité que soulèvent ces activités. À titre d'exemple, l'UIT encadre la gestion des bandes de fréquence et leur attribution, sans pouvoir toutefois revenir sur des décisions prises. De même, des lois spatiales nationales comme la LOS en France promulguée en 2008 tentent de responsabiliser les acteurs privés, notamment sur le sujet de la fin de vie de leurs moyens spatiaux⁷⁴. Ces lois demeurent inapplicables au plan international.

Au-delà des limites physiques de l'orbite basse (multiplication des collisions et rareté des bandes de fréquence), les opérateurs de satellites font surtout face à des risques économiques sur un marché de l'accès à internet très concurrentiel⁷⁵. En effet, plusieurs experts estiment que dans les conditions actuelles, il ne peut y avoir de place pour plus de cinq constellations en orbite basse. Pour offrir un réseau d'information performant et continu sur l'ensemble du globe, de nombreux opérateurs s'orientent peu à peu vers des architectures multicouches.

c) *Vers une architecture globale et multicouche : un mix GEO-LEO-terrestre*

Les opérateurs satellitaires réfléchissent à se doter d'architectures globales multi-fréquentielles et multi-orbitales. Il s'agit d'exploiter les avantages respectifs des différentes orbites et d'établir des couplages entre elles afin de bénéficier d'une couverture internet puissante, continue et à moindre coût.

⁷² Alexandre Piquard et Dominique Gallois, « Derrière le Starlink d'Elon Musk, la bataille des constellations de satellites », *Le Monde.fr*, 13 décembre 2022, https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/12/13/telecommunications-derriere-le-starlink-d-elon-musk-la-bataille-des-constellations-de-satellites_6154134_3234.html.

⁷³ Peter B. de Selding, « Dish Network Battles OneWeb and SpaceX for Ku-Band Spectrum Rights », *SpaceNews*, 9 juin 2016, <https://spacenews.com/dish-network-battles-oneweb-and-spacex-for-ku-band-spectrum-rights/>.

⁷⁴ « Proposition de résolution en application de l'article 73 quinquies du Règlement, sur la proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant le programme de l'Union pour une connectivité sécurisée pour la période 2023-2027 (exposé des motifs) ».

⁷⁵ Piquard et Gallois, « Derrière le Starlink d'Elon Musk, la bataille des constellations de satellites ».

Revenons d'abord sur les inconvénients des constellations en orbite LEO. Tout d'abord, la proximité avec la Terre des satellites en orbite basse favorise leur descente dans l'atmosphère limitant leur durée de vie. La plupart des constellations lancées ou en cours de développement misent sur des durées de vie d'environ 5 ans pour chaque satellite ce qui impose un renouvellement régulier et coûteux⁷⁶. On évalue ainsi à 2 milliards d'euros le renouvellement des équipements spatiaux de SpaceX⁷⁷, s'ajoutant aux coûts initiaux d'installation de l'ordre de 10 milliards. Un second inconvénient est posé par la largeur de la bande passante fournie par les satellites LEO. En effet, si les satellites géostationnaires offrent un débit de plusieurs centaines de gigabits par seconde (Gb/s) (voire jusqu'à 1 téraoctet par seconde pour les satellites à venir), la capacité des constellations LEO est limitée par la taille et la puissance des satellites et le plus petit nombre de bandes de fréquences adressées⁷⁸. Enfin, les bandes de fréquence utilisées posent également question. Soumises aux contraintes météorologiques, les fréquences des satellites LEO (bandes Ku et Ka) subissent les brouillages provenant des tempêtes, des orages, de la pluie et de la neige. Les interférences entre différentes constellations aux bandes de fréquences proches accroissent également l'instabilité de leur réseau internet. Elles constituent par conséquent une limite à l'exploitation de l'orbite basse, ce qui pousse les opérateurs à rechercher des alternatives⁷⁹.

L'usage de constellations multicouches peut apparaître comme une solution. En Europe, la Commission européenne a décidé de lancer son programme IRIS² (Infrastructure de Résilience et d'Interconnexion Sécurisée par Satellites). Annoncé pour 2027, le projet prévoit de fournir une combinaison de services de connectivité sécurisés, performants et haut débit aux pays membres de l'Union en tirant profit des orbites LEO et MEO (*Medium Earth Orbit*)⁸⁰. Toutefois, il ne s'agit encore que d'un projet. À travers leur rapprochement, l'opérateur historique de satellites géostationnaires français Eutelsat et la société à l'origine de la constellation de satellites de connectivité en orbite basse OneWeb⁸¹ ambitionnent également la formation d'une infrastructure spatiale européenne hybride multicouches multi-missions, cette fois à but commercial. Bien que les satellites OneWeb restent manufacturés aux États-Unis et que la constellation souffre de la compétition accrue de Starlink, la fusion entre les deux entreprises inaugure un nouveau modèle d'infrastructure spatiale et ouvre la voie à un regroupement des acteurs du secteur. En 2021, aux États-Unis, l'opérateur Viasat historiquement positionné sur l'orbite géostationnaire entendait acquérir le britannique Inmarsat qui possède une flotte de satellites en orbite basse⁸². Plus récemment, Inmarsat présentait son projet Orchestra⁸³, une architecture informationnelle novatrice au maillage dynamique multicouche GEO-LEO pour offrir la 5G et de nouveaux services dans les secteurs maritime, aérien ou gouvernemental.

⁷⁶ « ESA'S Annual Space Environment Report 2022 ».

⁷⁷ Chris Daehnick, Isabelle Klinghoffer, et Bill Wiseman, « Large LEO satellite constellations: Will it be different this time? », McKinsey & Company, s. d., <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/large-leo-satellite-constellations-will-it-be-different-this-time>.

⁷⁸ <https://www.linkedin.com/advice/1/what-main-challenges-benefits-operating>

⁷⁹ « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. »

⁸⁰ « The New IRIS Constellation Will Be Beneficial to EU Citizens in Several Ways, Find out 5 of Them! », 29 novembre 2022, <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/new-iriss-constellation-will-be-beneficial-eu-citizens-several-ways-find-out-5-them>.

⁸¹ « Eutelsat Strategy Update on the proposed combination with OneWeb » (Eutelsat, s. d.).

⁸² Anne Bauer, « Satellites : l'Américain Viasat achète le Britannique Inmarsat », *Les Echos*, 8 novembre 2021, sect. Industrie Services, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/satellites-lamericaain-viasat-achete-le-britannique-inmarsat-1362046>.

⁸³ « ORCHESTRA, the Communications Network of the Future That Will Deliver Unprecedented Performance and Ground-Breaking New Services for Global Mobility », Inmarsat Corporate Website, s. d., <https://www.inmarsat.com/en/about/technology/orchestra.html>.

C- L'ouverture du spatial à de nouveaux marchés

Cette période nouvelle où offre et demande se reconfigurent est propice à l'émergence de nouveaux marchés du spatial.

a) Tendances générales

Le *Legacy Space* ou *Old Space* est encore dominé par une industrie de prototypes. Les agences y conçoivent des projets aux applications prédéfinies. Les satellites sont ensuite produits sur-mesure et en très petites séries. Le coût est secondaire par rapport à l'objectif, les retours socio-économiques des investissements sont limités. L'avènement du *New Space* marque un changement d'approche : on passe d'une conception d'infrastructures aux champs d'applications dédiés, à une industrie visant le foisonnement des applications et des services⁸⁴.

L'infrastructure spatiale devient alors une commodité, source d'applications commerciales et de services militaires ou civils. Elle s'accompagne d'une quête permanente de baisse des coûts par innovations itératives et économies d'échelle⁸⁵.

Le marché amont construit les infrastructures et les capacités techniques nécessaires au développement des services, tandis qu'en aval, des jeunes pousses testent des applications sur des marchés commerciaux. Dans cette dynamique, les marchés se transforment, tant en termes de technologies, que de régions couvertes et de types de clients (voir Annexe 6).

Depuis la fin des années 2000, l'entrepreneuriat fleurit, soutenu par des investissements privés croissants (15 milliards de dollars en 2021⁸⁶). Il s'accompagne de l'entrée de nouveaux acteurs, à commencer par les *tech trusts*, avides de saisir les opportunités de l'espace. Au début des années 2000, en moyenne, quatre nouvelles entreprises spatiales levaient des financements chaque année. Aujourd'hui, ce chiffre est près de huit fois supérieur⁸⁷.

⁸⁴ Moranta, « The Space Downstream Sector: Challenges for the Emergence of a European Space Economy ».

⁸⁵ Enrique Dans, « Elon Musk's Economies Of Scale Won SpaceX The NASA Moonshot », *Forbes*, s. d., sect. Leadership Strategy, <https://www.forbes.com/sites/enriquedans/2021/04/25/elon-musks-economies-of-scale-won-spacex-the-nasamoonshot/>.

⁸⁶ « Start-Up Space: Update on investment in commercial space ventures » (Bryce Tech, 2022), https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2022.pdf.

⁸⁷ « Start-Up Space: Update on investment in commercial space ventures » (Bryce Tech, 2020), https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2020.pdf.

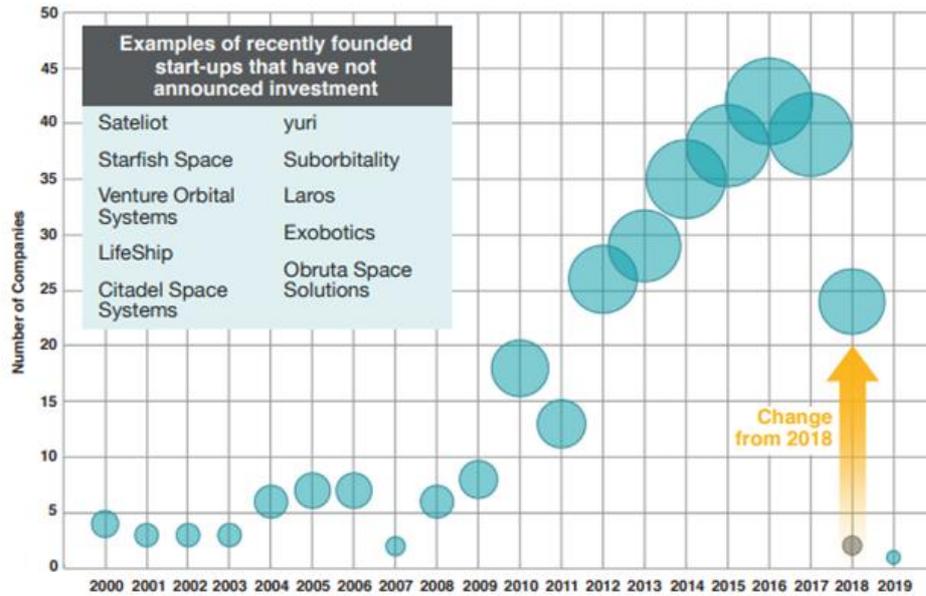


Figure 8 - Évolution du nombre de start-ups spatiales créées depuis les années 2000.

Source : Bryce Tech ([Start-up space UPDATE ON INVESTMENT IN COMMERCIAL SPACE VENTURES](#))

Investment in Start-Up Space Companies 2012 to 2021, by Investment Type

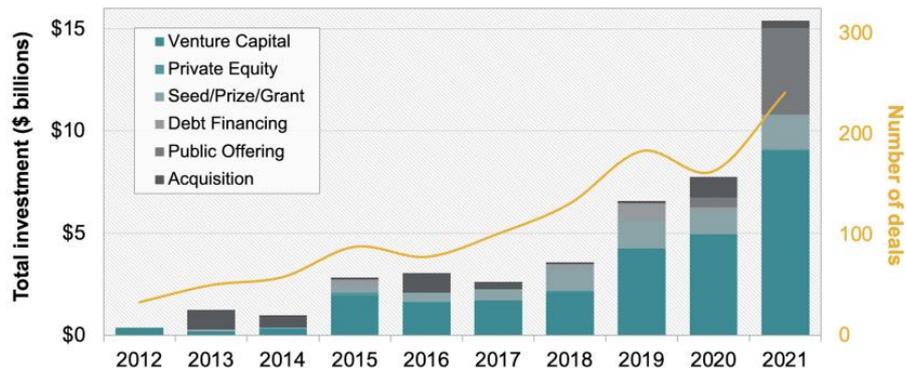


Figure 9 - Mix des types d'investissement dans les entreprises du spatial, de 2012 à 2021.

Source : Bryce Tech ([Start-up space UPDATE ON INVESTMENT IN COMMERCIAL SPACE VENTURES](#))

Ces entrées reflètent les interactions du spatial et de l'économie numérique. Le secteur aval du spatial devient un écosystème centré sur les données. L'implication des GAFAM (Google⁸⁸, Apple, Facebook, Amazon⁸⁹ et Microsoft⁹⁰) illustre cette évolution.

Les acteurs de l'économie digitale étendent au spatial leur stratégie "d'internet partout et tout le temps". Amazon, leader dans le *cloud computing* et le *streaming*, bâtit Kuiper, sa propre

⁸⁸ Darrell Etherington, « Google Cloud Teams up with SpaceX's Starlink for Enterprise Connectivity at Network's Edge », *TechCrunch*, 13 mai 2021, <https://techcrunch.com/2021/05/13/google-cloud-teams-up-with-spacexs-starlink-for-enterprise-connectivity-at-networks-edge/>.

⁸⁹ « AWS for Aerospace and Satellite (A&S) Solutions », Amazon Web Services, Inc., s. d., <https://aws.amazon.com/government-education/aerospace-and-satellite/>.

⁹⁰ « Azure Space – Satellite Connection and Innovation | Microsoft Azure », [azure.microsoft.com](https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/space/), s. d., <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/space/>.

constellation⁹¹. Google, leader des services en ligne, investit dans SpaceX et dans Starlink⁹². Ces incursions permettent à ces monopoles d'atteindre toujours plus d'utilisateurs (dans les régions faiblement connectées notamment), et d'accroître les revenus de leurs services.

Au-delà de la connectivité, les données sont parties intégrantes de la synergie entre le spatial et le numérique. En France, plusieurs nouveaux entrants exploitent les données d'observation de la Terre à des fins militaires, agricoles, de gestion des ressources, etc. Ces données sont croisées avec d'autres pour développer de nouveaux usages (flux d'images et de messages sur les réseaux sociaux, données de capteurs terrestres, etc.). Ainsi, la startup Preligens indique que ses activités recouvrent « la fusion d'informations provenant de capteurs multi-intelligence, y compris de sources de données disparates⁹³ ». Les volumes de données collectées dans l'espace requièrent de nouveaux moyens de traitement et de stockage. Avec l'émergence du business de *Ground Stations as a Service* (GSaaS), les géants du web cherchent à mieux intégrer leurs infrastructures et leurs services aux systèmes spatiaux et à leurs données. Amazon et Microsoft investissent massivement avec le développement d'*AWS Ground Station*⁹⁴ et *Microsoft Azure Orbital solutions*⁹⁵. L'Europe reste en retard sur ce point, l'offre cloud et GSaaS restant encore embryonnaire vis-à-vis des États-Unis et demeurant un angle mort des stratégies de développement spatiales française et européenne.

Le foisonnement des applications s'accompagne d'une recherche d'économies liées à l'infrastructure. Les firmes sont en concurrence pour offrir une connectivité et des données plus performantes et moins chères⁹⁶. Ce phénomène amplifie la pression sur les économies d'échelle. Les économies des lanceurs réutilisables (Falcon 9 de SpaceX, New Glenn de Blue Origin) s'étendent aux satellites produits en grandes séries (Starlink de SpaceX avec 42 000 satellites à terme⁹⁷, Kuiper d'Amazon avec plus de 3 200 satellites à terme⁹⁸), sans oublier les processus de conception et de test : SpaceX en est au 24^e prototype de son Starship⁹⁹.

Les constellations de plusieurs centaines voire milliers de satellites, les déchets spatiaux qui prolifèrent, stimulent la création de services liés à la logistique, l'opération et la maintenance de l'infrastructure spatiale. Parmi ceux-ci, de nouveaux *brokers* se proposent de fournir de la logistique pour les satellites avant lancement : obtention des licences de vol, courtage en achat d'emport sur les fusées, transport du satellite, préparation au lancement. D'autres entreprises se spécialisent dans le

⁹¹ Darren Achord, « Let's Work Together: Broadband Connectivity for All Americans », About Amazon, 17 août 2021, <https://www.aboutamazon.com/news/policy-news-views/lets-work-together-broadband-connectivity-for-all-americans>.

⁹² « Starlink », s. d., <https://www.starlink.com>.

⁹³ « Preligens | Pioneering AI for a safer world ».

⁹⁴ « Amazon Web Services Announces AWS Ground Station », About Amazon, 27 novembre 2018, <https://press.aboutamazon.com/2018/11/amazon-web-services-announces-aws-ground-station>.

⁹⁵ Jason Zander, « New Azure Space Products Enable Digital Resiliency and Empower the Industry », *Microsoft Azure Blog* (blog), septembre 2022, <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/new-azure-space-products-enable-digital-resiliency-and-empower-the-industry/>.

⁹⁶ « Global Market for Commercial Earth Observation Data and Services to Reach \$8 Billion by 2029, Growing from \$4.6 Billion in 2019 », Euroconsult, 22 octobre 2020, <https://www.euroconsult-ec.com/press-release/global-market-for-commercial-earth-observation-data-and-services-to-reach-8-billion-by-2029-growing-from-4-6-billion-in-2019/>.

⁹⁷ Stephen Clark, « SpaceX Passes 2,500 Satellites Launched for Starlink Internet Network », *Spaceflight Now*, s. d., <https://spaceflightnow.com/2022/05/13/spacex-passes-2500-satellites-launched-for-companys-starlink-network/>.

⁹⁸ Jagmeet Singh, « Amazon Eyes Bringing Satellite Internet Business Project Kuiper to India », *TechCrunch*, 21 juillet 2022, <https://techcrunch.com/2022/07/21/amazon-project-kuiper-satellite-broadband-india-launch/>.

⁹⁹ Jeff Foust, « SpaceX Completes Starship Wet Dress Rehearsal », *SpaceNews*, 24 janvier 2023, <https://spacenews.com/spacex-completes-starship-wet-dress-rehearsal/>.

service en orbite et la logistique spatiale, se proposant de positionner à bas coûts les petits satellites sur la bonne orbite. Enfin, certaines startups développent des instruments d'observation des débris pour vendre des consignes d'évitement protégeant les satellites des collisions.

Cette transformation de l'écosystème spatial affecte aussi la création des nouveaux marchés. Jusqu'alors, les agences développaient ou commandaient des satellites pour des usages scientifique ou militaire, puis ouvraient ensuite cette infrastructure à des usages commerciaux. L'exemple le plus marquant est celui du GPS, initialement à usage exclusivement militaire, avant de s'ouvrir aux usages civils¹⁰⁰. Désormais, certains acteurs se positionnent en tant qu'utilisateurs d'une infrastructure privée existante. Les satellites Starshield¹⁰¹ de SpaceX sont dérivés des modules de Starlink, et proposent aux militaires des capacités d'observation exclusives, une infrastructure de télécommunications dédiée et des charges utiles spécifiques.

b) *Évolution des modalités de financement*

Qui dit nouvelle économie et nouvelle industrie du spatial dit aussi nouveaux modes de financement. L'industrie spatiale historique était principalement financée par des agences gouvernementales¹⁰². Leur rôle était de développer l'industrie au moyen de contrats de fourniture *ad hoc*. Ceux-ci visaient à obtenir le matériel et les services utiles à la conduite des programmes. Dans cet écosystème, les contrats fixaient un accord entre une entité publique et une entreprise privée engageant cette dernière à produire un bien ou un service vendu à coût plus marge (*cost plus*). Au plan économique, ces contrats étaient jugés très inefficaces car truffés d'asymétries d'information favorables au constructeur.

Depuis le début du XXI^e siècle, ces contrats ont évolué vers des formules jugées plus efficaces tels des partenariats public-privé (PPP) ou de la fourniture de services à long terme¹⁰³. Ces contrats ont permis l'entrée dans le secteur de capitaux privés : financements bancaires, fonds propres apportés par les entreprises, fonds de capital-risque et entrée en Bourse. Les apports en fonds propres ont pris de l'ampleur dans les années 2010, en passant de moins de 50 investissements en 2012 à plus de 200 en 2021 dans le monde¹⁰⁴. Les entreprises financées ont également gagné en maturité, avec un ticket moyen passant de 20 millions de dollars en 2012 à 75 millions de dollars en 2021¹⁰⁵.

¹⁰⁰ « A Brief History of GPS », Aerospace Corporation, 29 décembre 2022, <https://aerospace.org/article/brief-history-gps>.

¹⁰¹ « SpaceX - Starshield », SpaceX, s. d., <https://www.spacex.com/starshield/>.

¹⁰² « ESPI Report 70 - Evolution of the Role of Space Agencies - Full Report » (European Space Policy Institute (ESPI), octobre 2019).

¹⁰³ « ESPI Report 70 - Evolution of the Role of Space Agencies - Full Report ».

¹⁰⁴ « Start-Up Space: Update on investment in commercial space ventures », 2022.

¹⁰⁵ « Start-Up Space: Update on investment in commercial space ventures ».

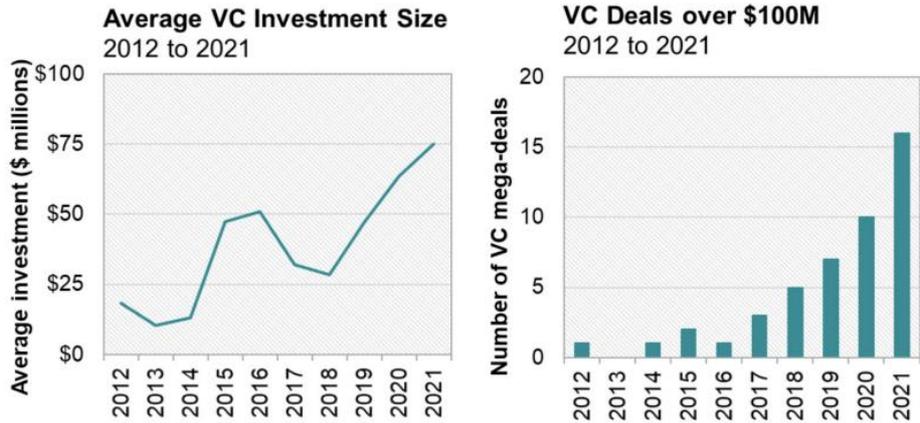


Figure 10 - Taille des investissements privés et nombre de mega-deals dans le secteur spatial de 2012 à 2021.
 Source : Bryce Tech ([Start-up space UPDATE ON INVESTMENT IN COMMERCIAL SPACE VENTURES](#))

En 2021, le capital-risque était la première source d'investissements dans les start-ups spatiales, avec 9 milliards de dollars sur un total de 15 milliards de dollars investis. Les financements via l'introduction en Bourse des start-ups via des SPACs (*Special Purpose Acquisition Company*) ont également représenté une part considérable des investissements, avec un total de 4 milliards de dollars, soit 28 % du total de l'année. Mais les SPACs ont eu tendance à sous-performer et l'évolution à la hausse ou à la baisse des valorisations des entreprises portées par les SPACs risque désormais de ternir le recours à ce moyen de financement.

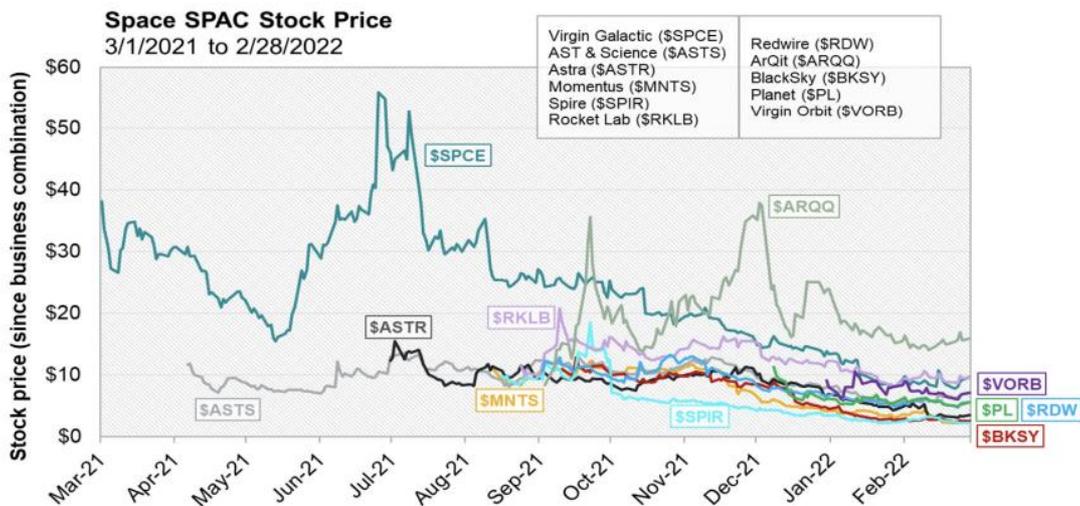


Figure 11 - Évolution du cours d'entreprises ayant eu recours aux SPACs.
 Source : Bryce Tech ([Start-up space UPDATE ON INVESTMENT IN COMMERCIAL SPACE VENTURES](#))

En parallèle, le nombre d'acquisitions de start-ups a fortement augmenté au cours des années 2010, passant de 2 en 2013 à 13 en 2021, essentiellement aux États-Unis. Une part des rachats a nourri la création de SPACs¹⁰⁶. Dans les acquisitions industrielles, c'est l'intégration verticale qui a été recherchée. Le rachat par Rocket Lab, fabricant américain de lanceurs, d'Advanced Solutions Inc,

¹⁰⁶ Jeff Foust, « Redwire Completes SPAC Merger », *SpaceNews*, 2 septembre 2021, <https://spacenews.com/redwire-completes-spac-merger/>.

concepteurs de logiciels de vol et de simulation, s'inscrit dans cette logique.¹⁰⁷ De son côté, SpaceX a acquis Swarm Technologies, focalisée sur les pico-satellites dédiés à l'IoT¹⁰⁸. Comme souvent dans l'émergence de monopoles, les acquisitions ont musclé l'intégration verticale des acteurs puissants : SpaceX couvre en interne la R&D, la construction et l'opération d'une grande partie de la chaîne de valeur (lanceurs, satellites, segments sols, opération des satellites en orbite et fourniture d'accès Internet (Starlink)). Blue Origin poursuit le même modèle avec Kuiper.

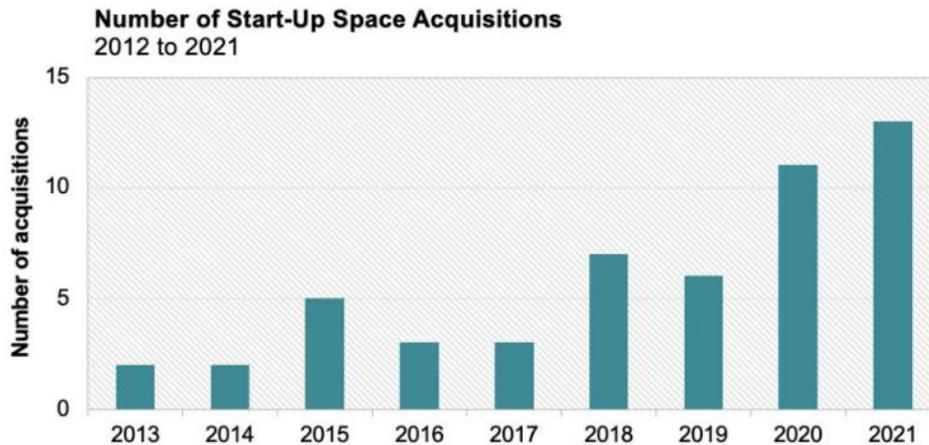


Figure 12 - Nombre d'acquisitions de startups (2013-2021).

Source : Bryce Tech ([Start-up space UPDATE ON INVESTMENT IN COMMERCIAL SPACE VENTURES](#))

La pandémie, puis la guerre en Ukraine ont modifié le contexte économique et géopolitique mondial, avec des effets sur l'industrie spatiale. L'augmentation de l'inflation et des taux d'intérêt a refroidi les investisseurs qui se sont recentrés sur les firmes aux revenus et flux de trésorerie stables¹⁰⁹. En 2022, le retournement a dopé la consolidation de l'industrie avec des fusions-acquisitions majeures menées (ou en attente d'approbation) le long de la chaîne de valeur. Outre les rapprochements d'Eutelsat et de OneWeb¹¹⁰ et du britannique Inmarsat avec Viasat¹¹¹, Safran a conclu l'acquisition de Syrlinks¹¹², une PME française fondée en 2011, spécialisée dans la radiocommunication et navigation pour le secteur spatial. De son côté, le norvégien Kongsberg Defence & Aerospace a annoncé en juillet 2022 vouloir détenir 77 % du constructeur lituanien de micro et nanosatellites NanoAvionics¹¹³.

¹⁰⁷ « Rocket Lab Acquires Space Software Company Advanced Solutions, Inc », Rocket Lab, s. d., <https://www.rocketlabusa.com/updates/rocket-lab-acquires-space-software-company-advanced-solutions-inc/>.

¹⁰⁸ Alice Vitard, « SpaceX s'offre la start-up Swarm Technologies spécialisée dans les picosatellites dédiés à l'IoT », *L'Usine Nouvelle*, 10 août 2021, <https://www.usine-digitale.fr/article/spacex-s-offre-la-start-up-swarm-technologies-specialisee-dans-les-picosatellites-dedies-a-l-iot.N1131864>.

¹⁰⁹ « Rising interest rates and inflation have upended investing », *The Economist*, 8 décembre 2022, <https://www.economist.com/briefing/2022/12/08/rising-interest-rates-and-inflation-have-upended-investing>.

¹¹⁰ Eutelsat et OneWeb, « Eutelsat and OneWeb to combine: a leap forward in Satellite Connectivity », s. d., https://www.eutelsat.com/files/PDF/investors/2021-22/CP_EN_Eutelsat_OneWeb_2607.pdf.

¹¹¹ « Viasat and Inmarsat to Combine, Creating a New Leading Global Communications Innovator », Inmarsat Corporate Website, 8 novembre 2021, <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/corporate/2021/viasat-inmarsat-to-combine.html>.

¹¹² « Safran Acquires Syrlinks to Consolidate Leadership in Earth-Space Communications Equipment », Safran, 4 novembre 2022, <https://www.safran-group.com/pressroom/safran-acquires-syrlinks-consolidate-leadership-earth-space-communications-equipment-2022-11-04>.

¹¹³ « KONGSBERG Enters into an Agreement to Acquire Smallsat Manufacturer NanoAvionics », NanoAvionics, 5 juillet 2022, <https://nanoavionics.com/news/kongsberg-enters-into-an-agreement-to-acquire-smallsat-manufacturer-nanoavionics/>.

III. Les causes institutionnelles du retard européen

Face à la *fordisation* du secteur, l'Europe accuse un retard qui s'est accentué ces derniers mois. Ce retard concerne les lanceurs, les constellations de satellites et le financement de la croissance. Les structures institutionnelles, les choix historiques en matière de dualité et la multiplicité des acteurs à coordonner fournissent des éléments d'explication.

A- Les trois dimensions du déphasage

a) *Le cas Ariane*

Les lanceurs spatiaux européens doivent garantir à l'Union un accès indépendant à l'espace. Ainsi, le programme du lanceur Ariane lancé par le CNES en 1973 est l'un des premiers à être repris par l'Agence spatiale européenne après sa création en 1975. Depuis, les États membres de l'ESA ont soutenu le développement de cinq générations de fusées Ariane commercialisées par Arianespace, la sixième étant en cours de développement. Jusqu'en 2022, les familles de lanceurs Soyouz et Vega complétaient l'offre d'Arianespace à destination du marché commercial et institutionnel européen.

Aujourd'hui, l'accès autonome à l'espace de l'Union européenne est compromis par différents facteurs. D'abord, après l'invasion de l'Ukraine et les sanctions qu'elle a soulevées, l'agence spatiale russe a suspendu le 26 avril 2022 le lancement des fusées Soyouz à Kourou¹¹⁴. Cette décision qui illustre, malgré ses pétitions de souveraineté, la dépendance de l'Union face à la Russie, a fortement impacté l'activité d'Arianespace qui a dû réduire de 60 % son programme de lancement. En outre, les avances financières faites à la Russie pour l'achat des Soyouz n'ont pas été remboursées¹¹⁵. S'y est ajouté l'échec du vol inaugural de Vega-C le 21 décembre 2022, au plus mauvais moment pour l'Europe¹¹⁶. Enfin, le retard pris dans le développement d'Ariane 6, dont la mise sur le marché initialement prévue pour l'été 2020 a été reportée à fin 2023, contraste avec le dynamisme de la filière américaine.

Car avec Ariane 6, le retard européen n'est pas que conjoncturel. Il traduit les choix stratégiques effectués il y a dix ans. L'Europe a raté le train du fordisme et des économies d'échelle du lanceur réutilisable. Pour combler son retard, elle a fait appel aux lanceurs russes, impliqués dans neuf tirs sur quinze en 2021. Avec Ariane 6, l'ESA a reconduit le concept du lanceur lourd à usage unique, pariant sur la poursuite des succès d'Ariane 5, un temps leader du marché du lancement. Ariane s'est trouvée piégée dans sa trajectoire industrielle et institutionnelle. Ce n'est qu'en 2021 que l'ESA a fini par acter par l'initiative NESTS (*New European Space Transportation Solutions*), le développement d'une gamme de lanceurs réutilisables¹¹⁷. Son arrivée sur le marché étant prévue pour 2030, cela induit que l'Europe accuse au mieux, dans le domaine des lanceurs, un retard de 15 ans sur les États-Unis.

¹¹⁴ Valentin Hamon Beugin, « Soyouz, ISS, Mars... Les coopérations spatiales avec la Russie ébranlées par la guerre en Ukraine », *L'Usine Nouvelle*, 28 février 2022, <https://www.usinenouvelle.com/article/soyouz-iss-mars-les-cooperations-spatiales-avec-la-russie-ebanlees-par-la-guerre-en-ukraine.N1788552>.

¹¹⁵ « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. »

¹¹⁶ Dominique Gallois, « La perte de Vega-C, un échec sévère pour l'Europe spatiale », *Le Monde.fr*, 21 décembre 2022, https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/12/21/la-perte-de-vega-c-un-echec-severe-pour-l-europe-spatiale_6155298_3234.html.

¹¹⁷ Alizée De Bibikoff, « ArianeGroup et l'initiative NESTS de l'ESA », ArianeGroup, s. d., <https://www.ariane.group/fr/actualites/une-famille-de-lanceurs-reutilisables-et-ecoresponsables-pour-leurope/>.



Figure 13 - Nombre annuel de lancements d'Arianespace (1980-2021).

Source : Arianespace ([Archives des missions](#)).

ArianeGroup étant le premier pourvoyeur européen d'accès à l'espace, sa baisse d'activité impacte l'ensemble des acteurs de la filière. L'impuissance à répondre aux demandes de lancement dopées par les constellations fragilise la position de l'Europe. En outre, les prix d'Ariane ne sont plus compétitifs. Pour lancer leurs satellites, les opérateurs européens doivent se tourner ailleurs, y compris chez leurs concurrents. Eutelsat s'est ainsi adressé à SpaceX pour lancer son dernier satellite Eutelsat 10 B en novembre 2022¹¹⁸. Et ce n'est que le début. La préférence nationale des États-Unis et de la Chine en matière de lancement contraint les opérateurs européens à subir des délais qui amplifient leur retard systémique alors même que le *time-to-market* norme la concurrence. Selon Rachel Villain, conseillère principale chez Euroconsult, les lancements européens sont à la merci de la volonté de SpaceX : « *Tout va dépendre des arbitrages de SpaceX entre ses 3 principaux clients : lui-même, en premier lieu, les acteurs institutionnels américains, le DoD et la NASA, et, en troisième position, les clients commerciaux* ».

b) *Le retard sur le marché des constellations d'internet par satellite*

Si la constellation d'Elon Musk fut pionnière en matière d'internet par satellites, de nombreux acteurs l'ont très vite imité. Blue Origin fondé par Jeff Bezos et sa constellation Kuiper, Boeing avec un projet de constellation lancé en 2017¹¹⁹ ou OneWeb (anciennement O3b) acquise par Google en 2013. Bien que OneWeb ait été racheté par Airbus en 2016, puis ait fusionné avec l'opérateur européen Eutelsat en 2022, l'Europe s'est lancée tardivement dans les constellations en orbite basse.

À l'automne 2022, la Commission européenne a décidé le lancement du programme IRIS² multi-orbites¹²⁰, mais cette décision a tout d'un effet d'annonce. Elle intervient tard compte tenu des enjeux d'occupation des bandes de fréquences associées aux constellations de satellites (voir partie II). Pourtant, le besoin de connectivité à haut débit est stimulé par l'ambition des États de réduire la

¹¹⁸ « Chronologie spatiale - Récapitulatif des lancements depuis 1957 », s. d., <https://destination-orbite.net/astronautique/lancements/recapitulatif/>.

¹¹⁹ Léna Corot, « Boeing veut concurrencer SpaceX et Amazon avec sa constellation de satellites pour Internet », *L'Usine Digitale*, 4 novembre 2021, <https://www.usine-digitale.fr/article/boeing-veut-concurrencer-spacex-et-amazon-avec-sa-constellation-de-satellites-pour-internet.N1157032>.

¹²⁰ « Iris²: the new EU Secure Satellite Constellation », Defense Industry and Space | European Commission, s. d., https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/eu-space-programme/iriss_en.

fracture numérique, et le projet, initialement estimé à 6 milliards d'euros, est doté d'une enveloppe de 2,4 milliards d'euros tirée du budget de l'UE. L'initiative illustre surtout le retard de l'Europe en matière d'indépendance stratégique dans la gestion de l'information.

c) *La question du financement des activités spatiales*

Conséquence de ces retards, le secteur spatial européen peine à faire face au financement de nouveaux entrants. La culture du risque reste le fait du secteur spatial américain, et la recherche de la qualité dès l'origine freine le développement des projets. En effet, la bureaucratie des agences européennes impose encore des phases de R&D longues et coûteuses. S'ensuivent des cycles de développement et d'industrialisation plus longs en moyenne que pour les acteurs américains aux mêmes stades de développement¹²¹.

Par ailleurs, l'investissement privé est à la peine en Europe. Le rapport publié à l'issue des Assises du *New Space* en France en 2022 insiste sur le faible nombre de levées de fonds réalisées par les *spacetechs* françaises et européennes par rapport aux entreprises américaines, et sur l'insuffisance de leurs montants¹²². Le déséquilibre des levées de fonds serait de 1 à 10, et celui de l'accès au financement de 1 à 20, notamment sur les levées de fonds de série B ou C et sur l'accès aux prêts bancaires. Cela signifie qu'en moyenne, les start-ups européennes n'ont qu'un à deux ans de trésorerie devant elles. Les investisseurs expliquent le manque d'investissements dans le marché spatial par plusieurs raisons¹²³. D'une part, les marchés d'équipements pour le spatial ont moins de potentiel de croissance que leurs applications (ex : logiciels). De plus, les investissements demandés dans le secteur sont lourds, et les projets nécessitent des rentrées d'argent régulières. L'étroitesse du marché prive aussi les jeunes acteurs de moyens de faire des acquisitions. Enfin, la durée de développement des projets ne coïncide pas avec celle des fonds de capital-risque, ce qui complique les modalités de sortie des investisseurs. Dit autrement, étroit et peu liquide, le marché n'est pas attractif.

En fait, l'Europe manque d'un financement public cohérent à destination des nouveaux entrants. Les marchés spatiaux restent, en effet, très largement publics. Au niveau mondial, l'investissement public dans le spatial représentait 80 milliards d'euros en 2021 contre 12 milliards pour le secteur privé¹²⁴. Malgré des avancées, comme l'initiative Cassini de janvier 2021 dotée par la Commission européenne d'un milliard d'euros pour le secteur spatial privé¹²⁵, les financements publics en Europe restent en deçà des financements américains.

Pour certains experts, le choix des États de soutenir le secteur spatial par des subventions (comme celles des programmes de recherche ou de France 2030) est inadapté et inefficace. Selon eux, il faudrait privilégier une commande publique forte, massive¹²⁶. Les entreprises américaines bénéficient en effet de contrats gouvernementaux (NASA, DoD, etc.) qui assurent les entreprises américaines d'une demande à long terme finançant des économies d'échelle : la commande publique représente environ 90 % du marché américain. Le programme Artemis de la NASA, qui vise à renvoyer l'homme sur la Lune, en est un bon exemple. Il s'agit d'un investissement estimé à 92 milliards de

¹²¹ « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. »

¹²² « Rapport Ambition New Space 2027 » (Les Assises du New Space, septembre 2022).

¹²³ « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. »

¹²⁴ « Rapport Ambition New Space 2027 ».

¹²⁵ « CASSINI Space Entrepreneurship Initiative », Defense Industry and Space | European Commission, s. d., https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/space-entrepreneurship-initiative-cassini_en.

¹²⁶ André Loeseckrug-Pietri, « L'Europe peut-elle rester une puissance spatiale ? », *Les Echos*, 24 novembre 2022, <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-leurope-peut-elle-rester-une-puissance-spatiale-1882374>.

dollars d'ici à 2025, une part importante étant versée à SpaceX pour fabriquer le vaisseau alunisseur¹²⁷. Nul doute qu'une part de l'investissement servira à renforcer des activités commerciales de la firme. En dehors des raisons historiques, la différence avec l'Europe peut s'expliquer par le fait que celle-ci ne vise ni l'hégémonie, ni même une puissance militaire dans l'espace. L'Europe se distingue ainsi des autres puissances spatiales. Si les considérations socio-économiques et commerciales sont aussi fort présentes pour les autres pays, elles sont prises dans la dualité et subordonnées à des priorités stratégiques telles que la sécurité nationale, la supériorité militaire, le prestige international, le leadership dans le vol habité et l'exploration galactique.

B- Comparaison des contextes institutionnels américain et européen

Comparaison n'est pas raison. Néanmoins, le retard spatial européen ne peut se comprendre sans prise en compte du cadre institutionnel qui structure l'industrie. La compétition industrielle dont nous avons parlé reflète une compétition institutionnelle que la comparaison des contextes permet de mieux percevoir.

a) La US Space dominance et l'agilité des institutions américaines

Durant le siècle américain (1941-1991), les États-Unis ont joué un rôle pionnier dans le développement des activités spatiales. Le pays s'est doté d'institutions spatiales solides, y compris au niveau du DoD. Aujourd'hui encore, elles fonctionnent en synergie, ce qui permet au gouvernement de dicter une politique spatiale unique, robuste mais également flexible et relativement agile. Après un flottement à la fin de la guerre froide, plusieurs d'entre elles ont été réactivées, notamment sous l'administration Trump. Ainsi, en 2017, le *National Space Council* (NSC), un organe présidé par le vice-président des États-Unis, a été rétabli après 24 ans de sommeil pour forger l'unicité de la politique spatiale américaine.

La NASA et le DoD illustrent ces synergies institutionnelles. La NASA compte en effet sur le DoD pour lui permettre d'atteindre les deux objectifs fixés lors de sa création : établir et maintenir la liberté d'action des États-Unis dans l'espace, prétendument au bénéfice de toute l'humanité, et s'assurer que l'espace ne puisse être utilisé contre les États-Unis par une puissance ennemie¹²⁸. La coopération NASA - DoD a été matérialisée par une longue série de *Memorandums of understanding* dès 1958 prouvant que ces deux administrations ont réussi à se coordonner d'un point de vue administratif mais aussi opérationnel¹²⁹. Un des derniers mémorandums à date, publié en 2020, établit une relation entre la NASA et l'US Space Force récemment créée au sein du DoD (il s'agit de la sixième branche des forces armées américaines, spécialement dédiée au spatial, établie au même niveau que les forces armées terrestres, aériennes, navales, maritimes et de la garde côtière). La plateforme détaille onze points de collaboration, dont le support au lancement, la *Space Defense Awareness*, la coopération pour la recherche scientifique et technologique, etc.¹³⁰

Outre ces synergies, le DoD et la NASA jouissent, pour des raisons historiques, d'une flexibilité exceptionnelle dans leurs procédures d'achat. En principe, tout achat par une administration américaine est réglementé par la *Federal Acquisition Regulation* (FAR). Ce règlement impose des

¹²⁷ « Mission Artemis-1 : le rêve de la conquête spatiale et son prix », *Le Monde*, 17 novembre 2022, https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/11/17/mission-artemis-1-le-reve-de-la-conquete-spatiale-et-son-prix_6150294_3232.html.

¹²⁸ Boone, *NASA Office of Defense Affairs*.

¹²⁹ Boone.

¹³⁰ « Memorandum of understanding between the National Aeronautics and Space Administration and the United States Space Force » (2020), https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_ussf_mou_21_sep_20.pdf.

contraintes pour établir la concurrence et le prix le plus bas possible. Or, le *Space Act* de 1958, qui instaure la NASA, lui confère une dérogation lui permettant de faire des "Other Transactions" (OT). Dans un contexte de course à l'espace, ces transactions ne tombent pas sous la coupe de la *Federal Acquisition Regulation* et dotent la NASA d'une grande flexibilité dans ses transactions¹³¹. En 1989, le Congrès dote le DoD de prérogatives semblables pour contourner la bureaucratie de la FAR pour les acteurs privés¹³². Les OT ont montré leur efficacité dans un grand nombre de situations. En particulier, elles ont permis à la NASA et au DoD de signer des accords de R&D avec des entreprises commerciales qui ne pourraient ou ne voudraient pas d'accord dans le régime de la FAR. C'est d'ailleurs dans le cadre d'une OT que SpaceX a été sélectionnée en 2007 pour favoriser l'essor de l'industrie commerciale et fournir à la NASA un lanceur à moindre coût. La NASA aura ainsi financé 47 % du développement des *Commercial Orbital Transportations Services* (COTS) de SpaceX par un apport de 396 millions de dollars. L'achat du service de SpaceX s'est ensuite fait à travers la FAR¹³³. On voit ainsi comment un mécanisme dérogatoire créé en 1958 dans le cadre de la conquête spatiale a été utilisé par la NASA (mais aussi par le DoD) pour favoriser le développement de technologies dans le secteur commercial.

L'avènement du *New Space* a renforcé le leadership américain¹³⁴. Le pays reste le premier investisseur du secteur spatial et distance largement les autres continents. En 2020, les dépenses américaines institutionnelles dans le secteur spatial ont atteint 47,7 milliards de dollars avec une répartition de 24,3 milliards investis dans le domaine militaire et de 23,5 milliards investis dans le secteur civil¹³⁵. Par comparaison, le budget institutionnel total en Europe en 2020 s'élevait à seulement 13,3 milliards de dollars, dont 3,5 milliards investis par la France, qui conservait son leadership en Europe, suivie de l'Allemagne (2,4 milliards).

L'agilité des institutions américaines, civiles et militaires, et les budgets qui leur sont alloués, se traduisent par une commande publique agile qui sert aussi les activités spatiales militaires. En vertu de la doctrine de "*Space dominance*" instaurée par George W. Bush après la deuxième guerre du Golfe, et qui infuse toutes les politiques spatiales américaines, les États-Unis disposent aujourd'hui de l'arsenal militaire spatial le plus complet au monde :

- En 2018, les systèmes *Space Situational Awareness* (SSA) comprenaient plus de 350 satellites d'intelligence, de surveillance et de reconnaissance. Ces satellites fournissent des images, des signaux, des mesures et des signatures dites intelligentes.
- En matière de positionnement et de navigation, les informations des satellites GPS sont intégrées à une multitude de systèmes d'armes. La *Space Development Agency* (SDA) devrait investir 11 milliards de dollars pour lancer, d'ici 2025, 250 satellites fournissant un nouveau système mondial de communication à l'armée et un renforcement du GPS¹³⁶.

¹³¹ Surya Gablin Gunasekara, « "Other transaction" authority : NASAs dynamic acquisition instrument for the commercialization of manned spaceflight or cold war relic ? », *Public Contract Law Journal* 40, n° 4 (2011): 893-909.

¹³² Justin Parker, « Understanding Other Transactions, a DOD Contractor's Perspective » (Doctoral Dissertations and Projects, 2020), <https://digitalcommons.liberty.edu/doctoral/2462/>.

¹³³ Denis Stone, « NASA's Experience in Other Transaction Authority to Foster Development », https://arpa.e.energy.gov/sites/default/files/2022-05/1110_Stone.pdf.

¹³⁴ Comité 1 - 56e session nationale de l'IHEDN, « Le New Space : opportunité ou menace pour notre autonomie stratégique ? », *Revue Défense Nationale*, n° 836 (janvier 2021): 12-20.

¹³⁵ « ESPI Yearbook 2021 – Space policies, issues and trends » (European Space Policy Institute (ESPI), juillet 2022), https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2022/07/ESPI-Yearbook-2021-Space-policies-issues-and-trends.pdf?fbclid=IwAR1Run0-E58UIyZk4Ewz330CzwWr6hxiSyN52TZ1-_ohU7mlqMTrDB-Miw.

¹³⁶ Christoph Schwarz, Sofia-Maria Satanakis, « Space Race 2.0 – Renewed Great Power. Competition in the Earth's Orbits », *AIES*, juin 2020, <https://www.aies.at/download/2020/AIES-Fokus-2020-06.pdf>.

- Les capacités « contre-spatiales » américaines sont en plein développement. Le *Counter Communication System* (CCS) est utilisé pour brouiller les communications inamicales. De plus, même si les États-Unis ne sont pas équipés d'un antisatellite à ascension directe, ils disposent de moyens terrestres pouvant atteindre des satellites de basse altitude¹³⁷.
- Enfin, les États-Unis s'assurent de disposer à tout instant de deux lanceurs capables de mettre en orbite une charge utile. Leurs programmes d'accès souverain à l'espace sont actuellement opérés par deux entreprises privées : United Launch Alliance (ULA), co-dirigée par Boeing et Lockheed Martin, et SpaceX depuis leurs sites de lancement en Californie et en Floride¹³⁸.

b) Rigidité et cloisonnement des institutions spatiales européennes

L'Agence spatiale européenne est créée au milieu des années 1970 pour répondre à un objectif précis : celui d'allouer au mieux les financements de ses États membres à une industrie de prototypes, c'est-à-dire de systèmes techniques sur mesure intégrant diverses briques technologiques définies par des fonctions¹³⁹. Le mécanisme du juste-retour – selon lequel un euro de contribution à l'ESA de la part d'un État membre doit se traduire par un euro d'investissement sur son territoire dans le cadre d'un contrat de programme – est institué pour répondre à ce besoin. En cela, l'ESA est la réplique et l'extension à l'échelle européenne, avec toutes les rigidités que cela entraîne, des agences nationales des pays initiateurs de l'industrie. L'émergence d'autres institutions, telle que l'*EU Agency for the Space Program* (EUSPA), ou la coexistence historique de l'ESA avec les agences nationales n'a jusqu'à présent pas remis en cause ce mécanisme structurant.

Ce cadre institutionnel n'est pas adapté à la *fordisation* de l'industrie spatiale. En effet, l'obtention d'effets d'échelle et d'innovations itératives requiert une coordination sans frottements allant jusqu'à l'intégration verticale. Le mécanisme d'agence tel qu'il s'est structuré en Europe va à l'inverse de cette tendance. Certes, une spécialisation nationale a peu à peu émergé autour de sous-systèmes ou de fonctions techniques : la France dans les lanceurs lourds, les capteurs optiques, l'Italie dans les lanceurs légers, l'Allemagne dans les capteurs radar (compromis historique franco-allemand), etc. Mais les mécanismes des programmes sont restés figés autour de relations d'agence taillées pour une industrie de prototypes. Le juste retour géographique impose une dispersion coûteuse des sites industriels, biaisant le critère de sélection des acteurs de la compétence vers la nationalité.¹⁴⁰ Le fiasco européen des lanceurs met en cause de cette organisation : les agences ont vu passer le train des économies d'échelle sans adapter leurs programmes en conséquence, ni toucher à l'organisation industrielle du secteur.

Le principe de juste retour n'est cependant plus un tabou. Bruxelles a décidé d'y renoncer dans ses appels d'offres pour la constellation IRIS², privilégiant ainsi l'échéance de mise en service en 2027. Au lieu de diluer les investissements partout en Europe, la Commission souhaite tirer profit de la

¹³⁷ Christoph Schwarz, Sofia-Maria Satanakis.

¹³⁸ Joshua Huminski, « Moving Beyond Assured Access to Space », *Breaking Defense*, 2 novembre 2021, <https://breakingdefense.com/2021/11/moving-beyond-assured-access-to-space/>.

¹³⁹ Arthur Olivier, « La politique spatiale européenne : histoire, objectifs, programmes », *Toute l'Europe*, 15 février 2022, <https://www.touteurope.eu/economie-et-social/la-politique-spatiale-europeenne-histoire-objectifs-programmes/>.

¹⁴⁰ « Spatial : la souveraineté européenne menacée », *Le Monde.fr*, 29 décembre 2022, https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/12/29/spatial-la-souverainete-europeenne-menacee_6156017_3232.html.

compétence technique et des capacités d'innovation des industriels¹⁴¹. Pas sûr pour autant qu'elle parvienne à l'objectif. Par ailleurs, suite au fiasco des lanceurs (l'Allemagne ayant décidé de se lancer seule dans la course aux mini fusées, ArianeGroup ayant rétorqué avec un projet de lanceur réutilisable Maia¹⁴²) un accord conclu entre les ministres français, allemand et italien de l'Économie prévoit à moyen terme des discussions sur la pertinence du juste retour¹⁴³.

c) *Le manque de dualité dans une Europe pacifiste*

La Convention fondatrice de l'ESA signée en 1975 institue le caractère exclusivement civil des activités de l'agence. L'article II énonce que :

« L'Agence a pour mission d'assurer et de développer, à des fins exclusivement pacifiques, la coopération entre États européens dans les domaines de la recherche et de la technologie spatiales et de leurs applications spatiales, en vue de leur utilisation à des fins scientifiques et pour des systèmes spatiaux opérationnels d'applications¹⁴⁴ ».

Ainsi, la Convention exclut d'emblée toute possibilité de financement d'activités spatiales militaires par l'ESA. L'article XVI exempté même de toute obligation relative au service militaire l'ensemble du personnel de l'Agence. Pourtant, si cette règle s'applique sans équivoque aux usages purement militaires, elle ne s'étend pas de façon directe aux applications duales tant qu'elles sont utilisées à des fins pacifiques. C'est le cas par exemple du système de positionnement par satellites Galileo, initié par un accord entre l'ESA et l'Union européenne, qui est placé « *sous contrôle civil* »¹⁴⁵. Ainsi, les principaux postes de dépense de l'ESA concernent l'observation de la Terre, le transport spatial (les lanceurs Ariane) et la navigation : on est bien là dans des applications civiles. L'ESA est aussi handicapée par sa composition légèrement différente de l'Union européenne. Certains États membres ne font pas ou plus partie de l'Union (Royaume-Uni, Norvège, Suisse, Canada), ce qui empêche l'ESA d'être l'agence spatiale de l'Union européenne¹⁴⁶. Néanmoins, la guerre en Ukraine a sonné un début de conscience des enjeux militaires de l'espace et de l'importance d'y bâtir des synergies duales.

En dehors de l'ESA, il n'existe pas de programme européen de défense qui investirait dans des programmes spatiaux civils avec un éventuel volet « sécurité »¹⁴⁷. Si des tentatives européennes de coopération militaire hors du secteur spatial, tel le drone Euromale, ont pu exister, celles-ci n'ont jamais dépassé le niveau du sous-système. Et pour cause, la défense de l'Union repose en premier lieu sur l'OTAN, autrement dit sur l'allié américain. Difficile d'être autonome quand la dissuasion nucléaire dépend de Washington. Ainsi, l'Allemagne privilégie-t-elle la coopération militaire avec les États-Unis,

¹⁴¹ « Spatial : la souveraineté européenne menacée ».

¹⁴² Dominique Gallois, Pierre Barthélémy et Philippe Jacqué, « L'Europe spatiale veut mettre les moyens face aux Américains et aux Chinois », *Le Monde*, 21 novembre 2022, https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/11/21/l-europe-spatiale-veut-mettre-les-moyens-face-aux-americaains-et-aux-chinois_6150823_3234.html.

¹⁴³ « Déclaration conjointe France, Allemagne et Italie sur l'espace », Presse - Ministère des Finances, 22 novembre 2022, <https://presse.economie.gouv.fr/22112022-declaration-conjointe-france-allemande-et-italie-sur-lespace/>.

¹⁴⁴ ESA, « Convention de l'Agence spatiale européenne et Règlement Intérieur du Conseil », Pub. L. No. ESA SP-133 (2019), https://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/SP-1337/SP-1337_FR.pdf.

¹⁴⁵ « Qu'est-Ce Que Galileo? », European Space Agency, s. d., https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Qu_est-ce_que_Galileo.

¹⁴⁶ Dominique Gallois, Pierre Barthélémy et Philippe Jacqué, « L'Europe spatiale veut mettre les moyens face aux Américains et aux Chinois ».

¹⁴⁷ « Stratégie spatiale de défense » (Ministère des Armées, 2019), <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/194000642.pdf>.

notamment en matière d'aviation. L'urgence de la guerre en Ukraine qui remet l'OTAN en première ligne, oblige à repenser la coordination d'une industrie de défense européenne dans une alliance atlantique relancée. Dans le domaine spatial, l'ampleur des investissements militaires aux États-Unis ne saurait être égalée en Europe (voir figure 14).

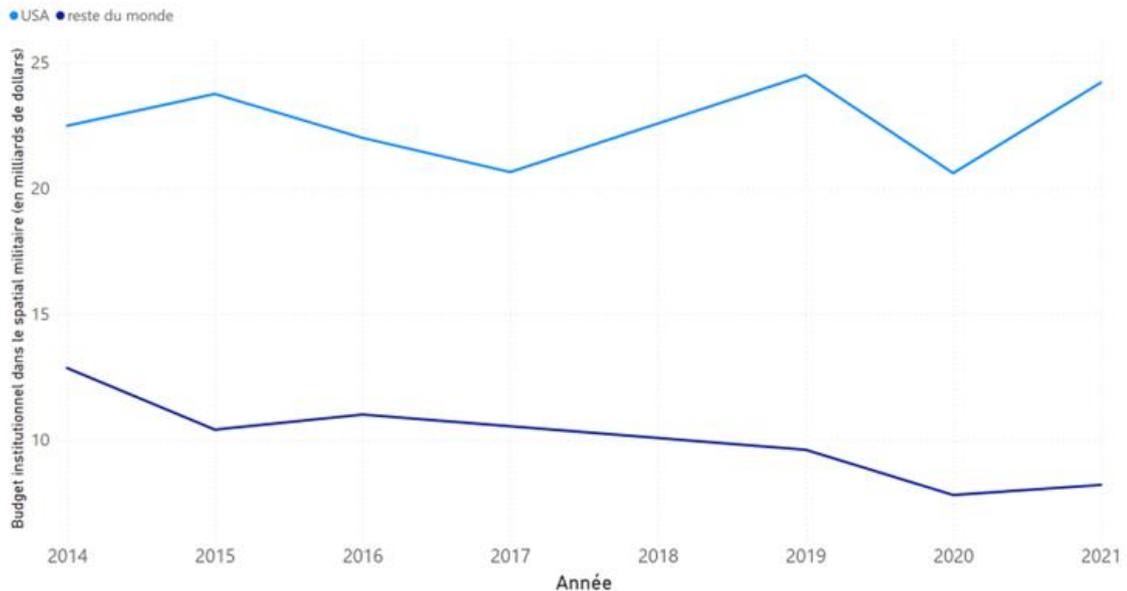


Figure 14 - Évolution des budget spatiaux militaires américain et mondiaux (2014-2021).
Source: European Space Policy Institute (ESPI) ([Yearbook 2021](#)).

Le manque de dualité semble désormais concerner les autorités européennes. La constellation IRIS² introduit timidement une clause de dualité : selon le commissaire en charge, « la future constellation contribuera [...] aux applications qui sont essentielles pour l'économie, la sécurité et la défense des États membres ». La Commission souhaite encourager le secteur privé à participer : les constructeurs et opérateurs privés sélectionnés pourront, après avoir participé au partenariat public - privé qui financera la moitié du coût de la constellation, fournir des services commerciaux dont la Commission n'entend pas se charger¹⁴⁸.

À ce jour, seuls les gouvernements des États membres peuvent financer des activités spatiales purement militaires. Cependant, les ordres de grandeur sont loin des États-Unis. En France, la Loi de programmation militaire 2019-2025 prévoit ainsi un budget de 3,6 milliards d'euros pour le spatial de défense sur la période ¹⁴⁹. Les 26,3 milliards de dollars alloués en 2023 à la *US Space Force* soulignent l'ampleur de l'écart de moyens, alors même que la France est l'un des États membres où le spatial est le plus développé.

À son échelle, la France tente de se réorganiser pour exploiter les synergies duales du spatial. Dans sa stratégie spatiale de défense publiée en 2019¹⁵⁰, la ministre des Armées Florence Parly reconnaît le besoin de rapprochement entre le ministère et le CNES, lequel préside à la création du Commandement de l'Espace la même année. Le rapport témoigne d'une volonté de faire bénéficier les investissements du spatial militaire au civil, notamment par le biais du programme 191 « Recherche duale (civile et militaire) » de la LPM (loi de programmation militaire). Ce programme vise

¹⁴⁸ Philippe Jacqué, « Bruxelles donne le coup d'envoi d'Iris², sa constellation de satellites concurrente de Starlink », *Le Monde*, 18 novembre 2022, https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/11/18/bruxelles-donne-le-coup-d-envoi-d-iris-sa-constellation-de-satellites-concurrente-de-starlink_6150455_3234.html.

¹⁴⁹ « Macron dévoile ses ambitions spatiales », *Le Point*, 13 juillet 2019, https://www.lepoint.fr/politique/macron-devoile-ses-ambitions-spatiales-13-07-2019-2324406_20.php.

¹⁵⁰ « Stratégie spatiale de défense ».

explicitement à « maximiser les retombées civiles de la recherche de défense et à faire bénéficier le domaine de la défense des avancées de la recherche civile ». Dans le cadre de la LPM 2019-2025, le programme 191 finance plusieurs projets duaux¹⁵¹ :

- Le programme CASTOR (Capacité strAtégique Spatiale Télécom mObile Résiliente) de télécommunications, visant à préparer les futures technologies *Satcoms* en exploitant les synergies entre civil et militaire.
- Le programme CO3D (Constellation optique en 3D) d'observation de la Terre, pour une constellation de minisatellites optiques capables d'effectuer des modélisations numériques de terrain et des modèles 3D mondiaux pour des besoins civils et militaires. Ces minisatellites reposent sur un concept d'unité « à coût récurrent compétitif et sur une architecture-système conçue pour un déploiement incrémental permettant d'enrichir progressivement la capacité vis-à-vis des deux besoins de missions exprimés », ce qui évoque une approche *New Space*.
- Le projet NESS de surveillance du spectre électromagnétique par nanosatellite, visant à étudier la faisabilité d'un projet de nouvelle génération de satellites de ROEM (renseignement d'origine électromagnétique). Etc.

Cependant, si la stratégie spatiale de défense dispose un cadre compatible avec l'émergence d'un *New Space* français, les investissements publics consentis ne suffisent pas à combler les retards. En outre, le développement des programmes spatiaux militaires repose toujours sur des relations d'agence (entre la DGA et le CNES, puis entre le CNES et les principaux intégrateurs) qui ne favorisent pas la production en série et empêche la mise en place d'une commande publique véritablement agile comme aux États-Unis. Le spatial militaire français reste encore une industrie de prototypes, ne serait-ce qu'en raison de la faible taille du marché. La construction d'une politique européenne spatiale de défense permettrait la *fordisation* de l'industrie, dès lors qu'elle pourrait s'affranchir de la tutelle américaine et de son cadre institutionnel actuel.

¹⁵¹ « Recherche duale (civile et militaire) » (République Française, 2019).

IV. Bilan de l'enquête industrielle

L'analyse du cadre industriel et institutionnel qui vient d'être exposée est le fruit d'une réflexion, initiée à partir d'une enquête menée auprès de 34 entreprises du secteur spatial, du 10 au 14 octobre 2022 à Toulouse.

Durant l'enquête, nous avons interrogé une grande variété d'acteurs évoluant dans des start-ups ou des multinationales, réalisant tout ou partie de leur chiffre d'affaires dans le secteur spatial et positionnés sur différents segments de marché (voir méthodologie et Annexe 12). Nous différencions ainsi les entreprises situées sur le segment spatial (fabricants de composants satellites ou lanceurs, maîtres d'œuvre satellites et charges utiles, fabricants de lanceurs ou fournisseurs de services de lancement), les entreprises situées sur le segment sol (fabricants de systèmes sol ou fournisseurs de services pour les opérateurs et les opérateurs) et les entreprises situées sur le segment utilisateur (fabricants de terminaux utilisateurs, fournisseurs de services ou d'applications satellitaires). Les segments spatial et sol représentent le segment amont des activités spatiales, et le segment utilisateur le segment aval. Certaines entreprises sont positionnées sur tout ou partie de ces segments de marché. Cette partie présente les conclusions de notre enquête à la lumière des réflexions exposées dans les parties précédentes. Pour des raisons de confidentialité, nous ne citons pas nommément les entreprises.

A- Entreprises innovantes visant les économies d'échelle

Parmi les entreprises rencontrées, certaines – des start-ups pour la plupart – ont réussi à profiter des opportunités créées par le *New Space*. Elles ont réussi à intégrer la dynamique des économies d'échelle de deux manières.

En premier lieu, les entreprises qui se démarquent sont celles qui parviennent à intégrer les économies d'échelle dans leur modèle industriel en produisant des pièces en série, en intégrant des composants non-durcis provenant d'industries plus classiques (industrie aéronautique par exemple), ou en s'inscrivant dans une nouvelle culture du risque. L'une d'elles, positionnée sur le segment des plateformes satellitaires a choisi de s'appuyer sur la miniaturisation des satellites et le développement de *cubesats* modulables. En effet, l'utilisation de briques technologiques déjà conçues et validées – les *cubesats* – permet de réduire le temps de conception. La start-up espère également diviser par 3 ses coûts unitaires d'ici 2025 grâce à une production en série de gros volumes amortissant ses coûts fixes. Une autre start-up, spécialisée dans la construction de moteurs d'appoint, a su tirer parti de la standardisation des composants pour réaliser des PoC à coût limité. La possibilité de faire des tests à bas coût sur des objets plus standardisés s'intègre dans la dynamique du secteur et représente un changement de type *New Space*, tourné vers un développement plus itératif. De plus, les exigences de robustesse revues à la baisse permettent de diminuer le nombre de tests et donc de diminuer encore le prix des satellites.

Parmi les entreprises rencontrées, ce sont les fournisseurs de solutions techniques destinées à l'infrastructure LEO qui apparaissent comme les mieux à même de profiter des économies d'échelle. De nombreuses questions demeurent cependant, notamment vis-à-vis de la pertinence de la R&D des nouveaux entrants et de la validation de leurs solutions. Les normes industrielles, bien qu'elles assurent la qualité des produits, sont en effet des barrières à l'entrée. La commande publique, notamment militaire, joue alors un rôle clé de validation des prototypes avant industrialisation et production en série.

La baisse du coût moyen de l'accès à l'espace a conduit d'autres acteurs à redéfinir les contours de leur marché. En effet, le *New Space* a une incidence sur la répartition de l'offre contractuelle

publique et privée sur certains segments. Une entreprise fabriquant des lignes d'assemblage pour les satellites, a constaté que si le secteur public constitue encore le principal débouché des entreprises du secteur spatial, la demande privée croît pour certains produits, tels que les nanosatellites, les micro-lanceurs et les données issues de l'observation de la Terre. Ainsi, les acteurs interrogés sont conscients que le marché se dirige vers un amenuisement de la demande de sous-systèmes sur-mesure, au profit du développement de produits « sur étagère » mieux exportables et générateurs de gains d'efficacité et de profit. De plus, avec la multiplication des acteurs privés dans l'espace, le *time-to-market* devient un enjeu majeur. Une autre entreprise exploite cet aspect pour proposer des services en orbite aux opérateurs afin d'accélérer la mise à poste des satellites et se placer sur le marché du « *last mile delivery* ». De fournisseuse de produits (petits moteurs électriques et logiciels), elle veut devenir prestataire de services, en surfant sur les effets des économies d'échelle.

Le changement de paradigme industriel du *New Space* a aussi créé des opportunités pour des firmes extérieures au secteur spatial, lequel offre une diversification. Ainsi, cette firme qui fabrique des systèmes inertiels, lesquels pourront à terme équiper les systèmes de positionnement par satellite. Bien que s'étant développée en dehors du secteur, elle peut aller capter les économies d'échelle du *New Space* ; son récent rachat par un groupe familial lui assure les moyens financiers de ses ambitions.

B- Des marchés de services en plein essor

Avant le *New Space*, les applications commerciales du spatial étaient quasi-exclusivement limitées aux télécoms et à la télédiffusion. L'enquête met en évidence l'essor d'une nouvelle offre centrée sur les services et la chaîne d'exploitation des données s'adressant à de nouveaux marchés.

Le traitement d'images par satellites est l'un des principaux moteurs de cette diversification. En effet, ces données constituent une manne encore sous-exploitée dont les applications semblent infinies. La baisse du coût de l'accès à l'espace a entraîné une multiplication du nombre d'opérateurs en orbite et des données collectées, notamment dans le domaine de l'observation de la Terre. En parallèle, la politique d'ouverture de l'EUSPA a conduit l'Union européenne à fournir en libre accès les images prises dans le cadre du programme civil de télédétection Copernicus¹⁵².

Attirées par cette opportunité, de nombreuses entreprises ont vu le jour ces dernières années, notamment en France pour chercher à exploiter ces données. Les images, le plus souvent brutes, doivent en effet être traitées pour être utilisées. En apportant de la valeur ajoutée aux données par le biais de traitements numériques ou de l'intelligence artificielle, et en les croisant avec d'autres données d'origine terrestre, ces nouvelles entreprises fondent un segment qui adresse plusieurs cas d'usages. Nous en avons rencontré quelques-unes. Parmi elles, six entreprises sont mono-marché : aménagement du territoire, tourisme, renseignement militaire, prévision photovoltaïque, développement des territoires. D'autres ont fait le choix de se diversifier, et adressent des marchés parfois très différents : surveillance de l'environnement et du climat, gestion de la pêche, surveillance maritime, infrastructures et mobilités pour l'une, prévision photovoltaïque et transport urbain, pour une autre, qualité de l'eau, gestion de forêt, suivi d'infrastructures et humanitaire pour une troisième. Avec peu de barrières à l'entrée, le marché des images satellitaires en Europe comprend un grand nombre d'acteurs de taille relativement restreinte (4,8 millions d'euros de chiffre d'affaires moyen pour la plupart des acteurs rencontrés). Beaucoup ont bénéficié en France de financements publics dans le cadre du volet spatial du Plan de Relance et de son appel à projet « Innovation France »¹⁵³. Des collaborations se tissent aussi entre ces nouveaux entrants et des entreprises situées hors du secteur

¹⁵² « Il s'agit d'une constellation de 8 satellites Sentinel. », s. d.

¹⁵³ « Spatial : les lauréats de la partie « Innovation France » annoncés », Ministère de l'Economie et des Finances, 3 août 2022, <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/spatial-laureats-innovation-France#>.

spatial, comme Météo France par exemple, très demandeuses de services de traitement de données pour des applications météorologiques.

Le marché est cependant amené à évoluer au cours des cinq prochaines années. De nombreuses entreprises sont en concurrence pour atteindre des débouchés certes réels, mais encore insuffisants. De plus, ces sociétés sont tributaires des opérateurs de satellites qui les fournissent en images (leur matière première), et soumises à l'évolution des politiques de l'UE concernant Copernicus. Elles doivent aussi composer avec la concurrence du drone, par exemple pour l'aménagement du territoire. Enfin, la disproportion de taille et de croissance entre les entreprises européennes et américaines pose la question de la capacité des entreprises européennes à conquérir des parts de marchés, ou du moins à conserver les leurs. Le chiffre d'affaires d'entreprises comme Planet Labs ou encore BlackSky excède très largement celui des entreprises françaises. De plus, l'enjeu de l'exploitation et du stockage des données intéresse les GAFAM, premiers utilisateurs de données d'observation de la Terre pour l'ensemble de leurs services. Nul doute que la course à l'intelligence artificielle va encore aiguïser leur appétit. Si la valorisation d'images satellitaires est donc encore en plein foisonnement en Europe, il faut s'attendre à voir émerger au mieux deux ou trois leaders pérennes.

L'enquête révèle aussi l'émergence d'autres marchés : simulations 3D d'entraînement en avions ou hélicoptères de chasse, formation en géomatique à différents niveaux d'expertise, conseil en faisabilité dans les télécommunications géostationnaires, etc. Le marché du vol habité se développe aussi, quoique bien plus timidement en France qu'aux États-Unis, avec un premier intérêt pour les voyages en ballon dans l'espace.

Cette diversification des marchés et des entrants européens est l'une des principales conséquences du *New Space*. Elle s'accompagne d'une désintégration de l'industrie historique, en fait une externalisation qui favorise la baisse des coûts dans le vieil écosystème. À l'inverse de ce qui se produit aux États-Unis où la tendance est à l'intégration verticale des nouveaux entrants¹⁵⁴.

C- Un secteur qui peine à prendre la vague

Si quelques pépites françaises ciblent les économies d'échelle et saisissent les opportunités qui se créent dans le *New Space*, ce n'est pas une généralité. En effet, pour la plupart des petits acteurs, il est difficile de s'adapter aux changements et de se développer sans le soutien des grands groupes et des institutions.

L'enquête montre que le secteur spatial français reste dominé par des entreprises dont les clients sont très liés au *Legacy Space* (voir tableau en Annexe 7). Parmi les clients des 31 entreprises interrogées, les intégrateurs et opérateurs historiques sont présents dans toutes les catégories d'entreprises, indépendamment de leur ancienneté, de leur nombre d'employés et de leur chiffre d'affaires. À noter aussi la présence récurrente d'acteurs institutionnels. Les entreprises les plus récentes sont celles qui disposent de la clientèle la plus variée, mais elles restent très dépendantes des acteurs historiques. Leur quasi-omniprésence dans les carnets de commandes des start-ups et PME nouvelles montre la persistance de l'écosystème historique. Bien souvent, les entreprises plus anciennes sont des sous-traitants des maîtres d'œuvre subissant la baisse des coûts sans obtenir d'effet volume. Confrontée à l'aspiration de la main d'œuvre vers les jeunes entreprises, impossible pour elles de faire évoluer leur rôle de sous-traitants de prototypes. Comme le montre le tableau en

¹⁵⁴ Anne Bauer, « Le Pentagone et la Nasa pourraient bientôt compter un nouveau fournisseur de poids », *Les Echos*, 19 décembre 2022, sect. Industrie Services, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/le-pentagone-et-la-nasa-pourraient-bientot-compter-un-nouveau-fournisseur-de-poids-1890689>.

Annexe 7, il y a une corrélation, pour les entreprises créées dans la dernière décennie du XX^e siècle, entre croissance du chiffre d'affaires et diversification de la clientèle.

Certains acteurs rencontrés se plaignent aussi du manque de lisibilité du cadre institutionnel européen. La profusion des guichets et des appels d'offres exige un lourd investissement temporel pour gagner des contrats institutionnels. Dans un secteur où le financement public joue un rôle si crucial, la connaissance fine des institutions et de leurs rouages est une barrière à l'entrée. Les intégrateurs et opérateurs historiques du secteur sont bien mieux servis que les nouveaux entrants. La circulation des cadres entre grands groupes et institutions publiques favorise un entre-soi dont ne bénéficient pas les nouveaux entrants, à l'exception des *spin-offs* du CNES ou des start-ups ayant recruté d'anciens cadres du CNES ou de l'ESA. *In fine*, la distance vis-à-vis des institutions a une incidence sur le rythme et les perspectives de croissance. Deux entreprises retraçant des images satellites, l'une *spin-off* de grand groupe, l'autre, coopérative créée ex nihilo, n'ont pas les mêmes chances d'accéder aux financements publics.

Côté chiffre d'affaires, les sous-traitants historiques du CNES et des grands équipementiers, bien installés mais de petite taille, sont ceux à qui le *New Space* profite le moins. Positionnés en amont de l'industrie de prototypes, leur stagnation contraste avec les levées de fonds de sociétés qui n'en sont souvent qu'au PoC, mais développent des produits ou services tirant parti des économies d'échelle, tant en aval qu'en amont. Les PME historiques sont confrontées à deux défis : l'accès au financement et la rétention des talents. Peu attractives pour les nouveaux diplômés, ces PME ne peuvent rivaliser avec les salaires proposés par les grands groupes ou les start-ups. Elles subissent une forte attrition alors même qu'elles-mêmes détiennent des compétences industrielles – en matière d'électronique, de conception et de fabrication d'antennes, d'études d'interférence, de fabrication de modules de propulsion pour satellites – indispensables tant au *New Space* qu'à l'*Old Space*. Peu soutenues par les agences, elles nourrissent une amertume vis-à-vis de ces dernières, voire une incrédulité vis-à-vis du *New Space*. Elles peinent à mener les transformations (en termes de procédés industriels, de redéfinition de marché) nécessaires à leur survie dans le nouvel âge spatial.

D- L'importance de la demande militaire

Le secteur militaire reste l'un des principaux débouchés des nouveaux entrants du spatial privé en France. Bien que possédant leurs propres actifs, les acteurs de la défense ont dû externaliser certaines tâches à des acteurs privés.

C'est notamment le cas du traitement des données d'origine spatiale. Ainsi, la start-up Preligens (l'information est publique) a signé le 12 octobre 2022 un contrat d'une valeur de 240 millions d'euros sur 7 ans avec la Direction Générale de l'Armement¹⁵⁵. Ce contrat baptisé TORNADE (Traitement Optique et Radar par Neurones Artificiels via Détecteurs) portait sur l'acquisition de licences logicielles pour le traitement IA de données satellites. Il s'agit certes d'un cas relativement exceptionnel, mais révélateur de l'intérêt de la demande militaire pour les nouveaux entrants du spatial. En effet, les fondateurs de la start-up ne s'étaient pas tournés vers le renseignement militaire lors de la création de la société¹⁵⁶, les applications potentielles de l'imagerie satellitaire étant nombreuses (agriculture, environnement, assurances, sécurité des infrastructures, suivi des stocks de matières premières). C'est en prenant conscience que la défense demeurait, et de très loin, le plus gros consommateur d'images satellites que les fondateurs ont décidé de repenser leur marché. Une stratégie payante : en 2020, la

¹⁵⁵ Hassan Meddah, « Comment Preligens (ex-Earthcube) veut devenir l'acteur de référence de l'IA pour le renseignement et la Défense », *L'Usine Nouvelle*, 19 novembre 2020, <https://www.usinenouvelle.com/article/comment-preligens-ex-earthcube-veut-devenir-l-acteur-de-reference-de-l-ia-pour-le-renseignement-et-la-defense.N1030304>.

¹⁵⁶ « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. »

société jusqu'alors dénommée Earthcube réalise la plus grosse levée de fonds du secteur spatial à 23 millions d'euros. Rebaptisée Preligens, elle fait entrer à son capital le fonds civil ACE Management, mais aussi Definvest, le fonds d'investissement du ministère des Armées dédié aux entreprises stratégiques. Grâce à l'obtention de premiers contrats avec le ministère des Armées, Preligens a multiplié par quatre son chiffre d'affaires entre 2018 et 2020.

Comme nous l'a révélé l'enquête, le marché de la défense possède des particularités fortes, promptes à séduire comme à décourager les nouveaux entrants. Les barrières à l'entrée sont très élevées, en matière de ressources humaines et de temps consacré à répondre aux appels d'offres ; mais une fois franchies, celles-ci garantissent une position de leader aux titulaires des contrats qui opèrent sur un marché captif. De plus, il s'agit d'un secteur dont le budget est stable, et qui a un vif intérêt à financer l'innovation pour rester à niveau. Enfin, l'argent public – y compris militaire – est un sésame pour l'obtention de financements privés, ce qui fait d'un contrat avec le ministère des Armées un graal très recherché par la majorité des PME rencontrées. Logiquement, l'aspect dual se retrouve également au cœur des stratégies des acteurs historiques du secteur : sur les 3,8 milliards d'euros de chiffre d'affaires d'Airbus Defence and Space en septembre 2022, 25 % provient de commandes militaires¹⁵⁷.

La défense intervient aussi dans le financement. Parmi les apports de Bpifrance auxquels sont éligibles les entreprises du secteur spatial, plusieurs sont en réalité des financements militaires. C'est le cas du Fonds innovation défense¹⁵⁸, qui investit en Venture Capital dans des start-ups en croissance ayant démontré un marché primaire civil avec des applications défense. Ou encore de Définvest, qui a pour mission de sécuriser le capital d'entreprises d'intérêt stratégique pour la défense. L'AID (Agence de l'innovation de défense) dispose également de ressources dont peuvent bénéficier les entreprises. Ainsi, en intervenant au niveau de l'offre et de la demande, le secteur de la défense joue un rôle d'animateur de l'écosystème spatial en France. Ce rôle doit considérablement se renforcer, notamment à l'échelle européenne, pour se rapprocher de l'exemple américain.

En résumé de l'enquête, le *New Space* se traduit, en France, par une timide désintégration marquant une diversification des acteurs de la filière spatiale et son ouverture à de nouveaux marchés. De nombreuses questions pèsent encore sur la capacité des entreprises à trouver des économies d'échelle, notamment dans le secteur amont. Toutefois, plusieurs d'entre elles se démarquent en repensant leur organisation industrielle ou en redéfinissant les frontières de leurs marchés. Le segment utilisateur et applications des données d'origine spatiale est très dynamique, mais dominé par les GAFAM. Il devra se reconfigurer dans les années à venir. Les sous-traitants historiques subissent les changements induits par le *New Space*, avec un ralentissement de leur croissance. La demande publique, notamment militaire, joue un rôle essentiel de soutien à l'écosystème.

¹⁵⁷ « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. »

¹⁵⁸ « Le ministère des Armées lance le Fonds innovation défense », Ministère des Armées, 21 décembre 2020, <https://archives.defense.gouv.fr/dga/actualite/le-ministere-des-armees-lance-le-fonds-innovation-defense.html>.

Conclusion

2 500 satellites devraient être lancés chaque année en moyenne dans le monde entre 2022 et 2031, soit sept satellites et trois tonnes de masse par jour selon les estimations publiées en décembre par le cabinet Euroconsult¹⁵⁹. Les constellations de satellites devraient représenter 83 % de ce total¹⁶⁰, qui s'élevait à seulement 400 satellites par an en moyenne entre 2010 et 2020¹⁶¹.

En dix ans, l'industrie spatiale est devenue une industrie de masse, tirée par les économies d'échelle, l'innovation itérative et les nouveaux usages. Avec SpaceX, les États-Unis ont initié ce changement. La baisse du coût d'accès à l'espace a instauré le *New Space* : irruption de nouveaux entrants, diversification des applications, nouvelle organisation industrielle... Les institutions américaines ont accompagné la métamorphose du secteur, soutenant l'essor d'une grande firme intégrée, donnant le jour à un nouvel écosystème. La dualité civil - militaire des applications a été au cœur du processus, alimentant les économies d'échelle dans le domaine des lanceurs, des satellites, ainsi que de la collecte et du traitement des données. Cette nouvelle donne industrielle a eu de nombreuses conséquences sur l'organisation des activités spatiales : ruée vers les orbites basses, développement de constellations, la croissance des marchés de données et de services, attraction des financements privés.

Ce rapport étant l'œuvre d'étudiants, il ne leur appartient pas de faire des recommandations. Il faut cependant souligner que l'Europe accuse un triple retard (lanceurs, satellites, financement) dû à sa rigidité institutionnelle. Le mécanisme de juste-retour géographique de l'ESA en est un des aspects. Si l'industrie spatiale européenne dispose de nombreux atouts en termes de compétences – la participation au programme Artemis de la NASA¹⁶² en est l'illustration –, l'organisation institutionnelle des programmes européens n'est plus adaptée au rythme de l'industrie. Si l'Europe et ses États-membres souhaitent conserver leur rang de puissances industrielles spatiales, ainsi que leur souveraineté et leur indépendance, ses institutions vont devoir se réformer. Un secteur spatial compétitif, c'est-à-dire *fordisé*, ne peut en effet voir le jour sans conditions institutionnelles propices.

Si ce rapport fait une large part aux dynamiques industrielles et institutionnelles américaines ayant instauré la domination de SpaceX, la reproductibilité du modèle américain n'est pour autant ni possible, ni souhaitable. Car, ce succès est aussi dû au hasard. Outre les aspects salariaux propres aux États-Unis, un rapport publié en 2021, issu de la concertation de 232 experts industriels et porté par la défense américaine¹⁶³, pointe du doigt le manque de vision stratégique autour du développement de la filière. Le rapport souligne la fragilité des chaînes d'approvisionnement de la filière spatiale américaine, l'absence d'opportunités contractuelles significatives créées par le DoD, et une politique de soutien à l'innovation et aux financements privés encore insuffisante.

Au-delà de leurs divergences, les filières spatiales européennes et américaines rencontrent aussi des problématiques communes de financement de l'innovation et de gestion de la dualité. Dans un

¹⁵⁹ « Satellites to be Built and Launched, 25th edition » (Euroconsult, décembre (maj 2022), <https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/satellites-to-be-built-launched-new/>).

¹⁶⁰ « Mais seulement 30% de la valeur totale de fabrication et de lancement estimée par Euroconsult. », s. d.

¹⁶¹ Zajackowski et Maubert, « L'émergence et le développement du New Space aux États-Unis ».

¹⁶² Mathilde Rochefort, « Thales Alenia Space, entreprise stratégique du spatial européen », *Siècle Digital*, 25 janvier 2023, <https://siecledigital.fr/2023/01/25/thales-alenia-space-entreprise/>.

¹⁶³ « State of the Space Industrial Base 2021. Infrastructure & Services for Economic Growth & National Security » (US Space Force, Defense Industrial Unit, Air Force Research Laboratory, 2021), https://assets.ctfassets.net/3nanhbfr0pc/43TeQTAMdYrym5DTRhjd3/1218bd749befdde511ac2c900db3a43b/Space_Industrial_Base_Workshop_2021_Summary_Report_-_Final_15_Nov_2021.pdf.

rapport publié par des start-ups françaises à l'issue des Assises du *New Space*¹⁶⁴, celles-ci énoncent 24 recommandations à destination des acteurs publics français et européens afin de soutenir la mutation de l'écosystème. Parmi celles-là, les aspects de financement, de formation des personnes, de développement commercial et de soutien à l'innovation figurent en bonne place ; mais les auteurs soulignent aussi l'enjeu du renforcement de la commande publique (propositions 7 et 10) et surtout, la nécessité d'une réforme des institutions européennes (proposition 16).

Nous avons décrit dans ce rapport les enjeux économiques et institutionnels liés à la *fordisation* de la filière spatiale impulsée par les États-Unis. La soutenabilité environnementale de ce nouveau paradigme doit aussi être interrogée (voir Annexes 8, 9 et 11). Outre la multiplication des débris en orbite basse qui menace les futures constellations, les activités spatiales sont source de pollution, et, même si le fait accompli l'emporte couramment sur le droit, le débat autour de l'exploitation des ressources extra-atmosphériques physiques (ressources lunaires) ou immatérielles (positions orbitales, fréquences) est loin d'être clos.

Enfin, le défi posé par la coexistence avec d'autres puissances spatiales, notamment la Russie et la Chine, ne doit pas être sous-estimé. Nous nous sommes en effet appuyés sur l'exemple américain, mais la Chine a également pris acte des économies d'échelle pour l'organisation industrielle de sa propre filière spatiale et les ambitions chinoises en matière d'occupation de l'orbite basse et d'infrastructure lunaire sont réelles. La politique spatiale chinoise a surtout une incidence directe sur la politique spatiale des États-Unis¹⁶⁵, point que l'Europe ne peut ignorer si elle souhaite s'accorder à la dynamique américaine.

¹⁶⁴ « Rapport Ambition New Space 2027 ».

¹⁶⁵ Isabelle Sourbès-Verger, « L'espace, lieu particulier des rivalités politiques et technologiques », *Revue Défense Nationale*, n° 851 (juin 2022), <https://www.cairn.info/revue-defense-nationale-2022-6-page-73.htm>.

Annexe 1 – Acteurs rencontrés

Institutions politiques	
Bpifrance	Nicolas Berdou, Investisseur Fonds Innovation Défense & Definvest
Agence Spatiale Européenne	Isabelle Duvaux-Béchon, Directrice Stratégie et Développement
Direction Générale de l'Armement	Pierre Fontaine, Ingénieur de l'Armement
Centre National d'Études Spatiales	Murielle Lafaye, Responsable du programme Observatoire de l'économie spatiale
Agence Innovation Défense	Jean-Michel Parlier, Manager d'accélération de l'innovation
Commandement de l'Espace	Sylvain Rocagel, Conseiller technique
Facilitateurs et organismes de financement	
Starburst	Sandra Budimir, Cofondatrice
Defense Angels	François Mattens, Directeur Général
Expansion	Quentin Robert, Associé
Chercheurs	
Université Paris-Saclay	Philippe Achilleas, Professeur de droit de l'espace
Fondation pour la Recherche stratégique	Xavier Pasco, Directeur
Entreprises	
ACRI-ST	Pierre Léonard, Commercial Chargé de Communication
ADF	Sarah Colautti, Directeur exécutif culture et capital humain
Agenium	Pauline Labatte, Responsable recrutement Olivier Bontaz, Responsable commercial
Airbus Defence and Space	Fabrice Chenille, Business Développement, branche Spatiale
Callisto	Benoît Fauroux, Directeur Général
CLS	Christophe Vassal, CEO
Comat	Benoît Moulas, Président
ECA Group	Bruno Chaduteau, Directeur des Opérations
ESSP SAS	Frédéric Daffis, Directeur des Ressources Humaines Antoine De Laveleye, Directeur des Opérations
Exotrail	Nicolas Heitz, Cofondateur et COO
Gisaïa	Laurent Dezou, CEO
Hemeria	Gregory Pradels, Directeur du Développement, des Ventes et du Marketing
IdGeo	Renaud Lahaye, Fondateur
Kinéis	Alexandre Tisserant, Président
La Telescop	Bastien Nguyen, Gérant et fondateur
Groupe MISTRAL	Marc Pollina, PDG de M3 Systems et président du groupe Mistral
Mecano ID	Didier Mesnier, Gérant et responsable technique
MICROTEC Electronics	Fabrice Marchese, Président
Murmuration	Cathy Sahuc, COO
NEXIO	Nicolas Delhoume, Consultant et ingénieur d'affaires, Business Développeur Sud-Ouest
Pixstart	Richard Barre, CEO
Preligens	Nathan Juglard, Key Account Manager
Reuniwatt	Olivier Liandrat, Ingénieur R&D

Eutelsat	Serge Cholley, Directeur Sécurité Défense
Share My Space	Romain Luckens, CEO
Space Network Services	Yann Le Du, Co-fondateur
Stradot	José Iriarte, PDG
TerraNIS	David Hello, CEO
TRAD Tests & Radiations	Christian Chatry, CEO
U-Space	Fabie Apper, Président cofondateur Alain Gaboriau, Consultant responsable du programme JANUS au CNES
Arianespace	Laurent Bouaziz, VP Business Development
Viveris Technologies	Eric Frelot, Directeur General Délégué de Viveris, branche technologie, sur l'entité de Rungis et de Toulouse
Zephalto	Amice Monclar, Directeur Général
VorteX.io	Guillaume Valladeau, Fondateur

Annexe 2 – Historique de SpaceX

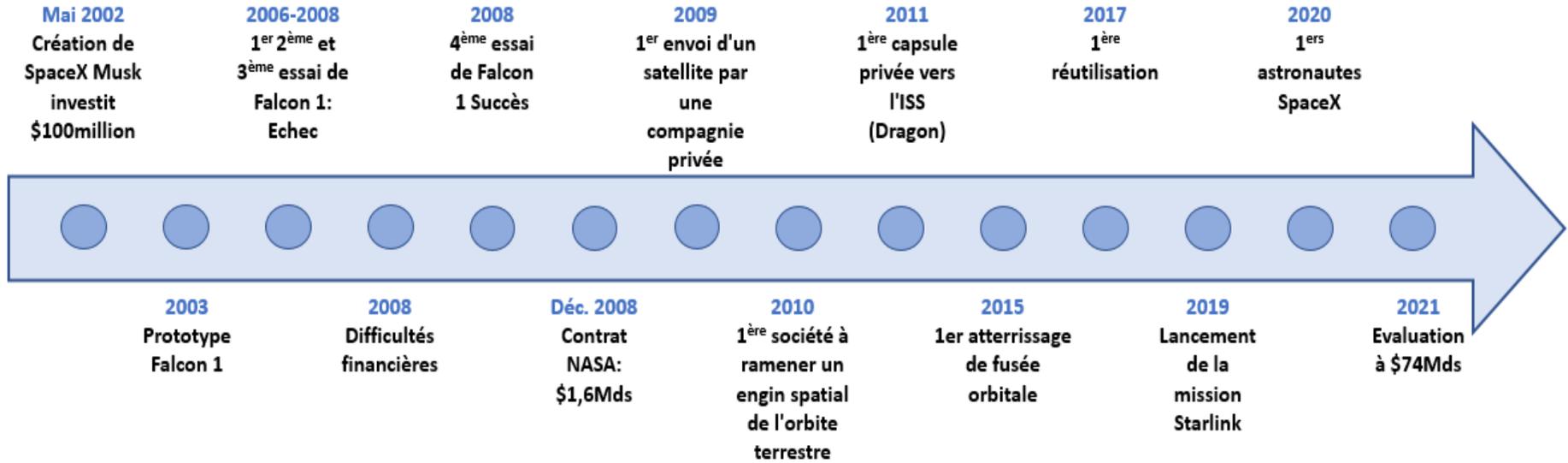


Figure 15 - Frise Chronologique de l'histoire de SpaceX
 Source : Timetoast ([SpaceX Timeline](#))

Annexe 3 - L'organisation disruptive de SpaceX

Le document ci-dessous¹⁶⁶ décrit l'évolution de l'architecture des Falcon et illustre la démarche d'innovation itérative. Les architectures sont similaires, voire reprises d'un modèle à un autre : "F1 and F9 share similar architecture".

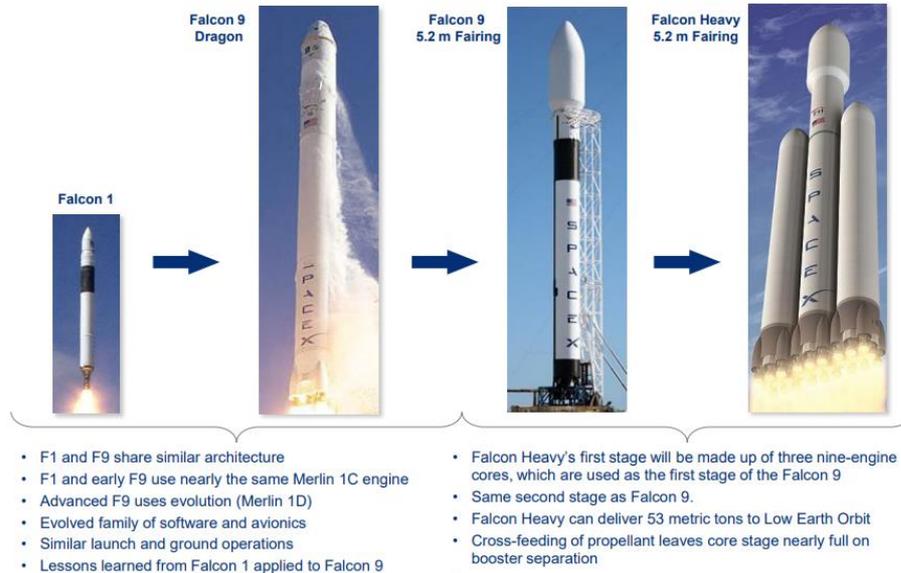


Figure 16 - Evolution du lanceur Falcon.

Source : Space X ([System Engineering: A Traditional Discipline in a Non-traditional Organization](#))

L'objectif est de trouver un équilibre entre les systèmes d'ingénierie massifs d'une part et les prototypages rapides de l'autre, afin de minimiser les risques globaux. Cet équilibre dépend de l'agilité organisationnelle, du coût de l'itération et de la faculté à faire remonter les informations. En raison de la possibilité de réaliser des essais à relativement faible coût, SpaceX peut se permettre « d'apprendre par l'expérience » plutôt que d'être forcée d'anticiper absolument toutes les interactions possibles de ses systèmes. Le mot d'ordre est : "Design a testable system and test what you fly!". Plus le produit est mature, plus l'ordre dans lequel les pièces sont testées est flexible (voir schéma du processus de test ci-dessous).

¹⁶⁶ Space X, « System Engineering: A Traditional Discipline in a Non-traditional Organization ».

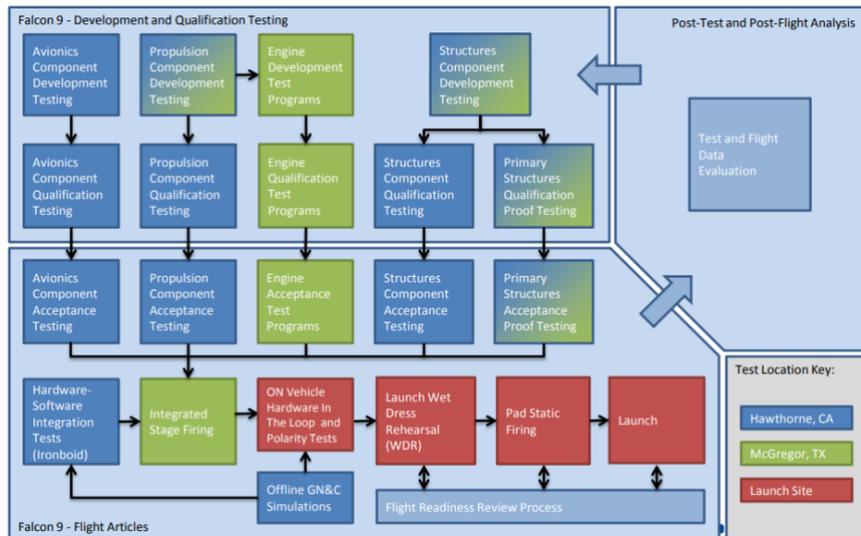
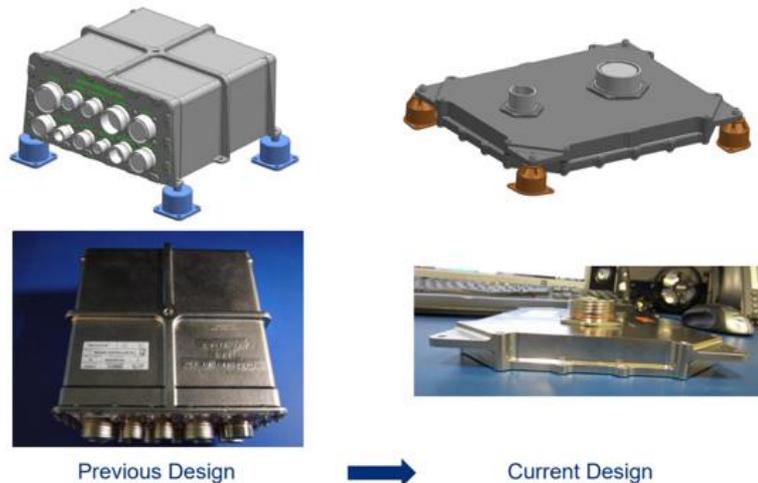


Figure 17 – Test de développement et de qualité (Falcon 9).

Source : Space X (*System Engineering: A Traditional Discipline in a Non-traditional Organization*)

L’entreprise illustre cette démarche itérative avec l’exemple de l’engine controller notamment et via un schéma explicatif de leur méthode de travail dite en “spirale rapide” :

Some Examples of “Iterative Design”: Engine Controller



9/28/2012 | © Space Exploration Technologies Corp. | Page 8



Figure 18 - Exemples du “Design par processus itératif” : unité de contrôle du moteur
Source : Space X (*System Engineering: A Traditional Discipline in a Non-traditional Organization*)

La configuration hiérarchique et de transmission de l’information chez SpaceX est différente de celle que l’on trouve dans les entreprises du domaine spatial traditionnel. La sous-traitance est limitée au maximum.

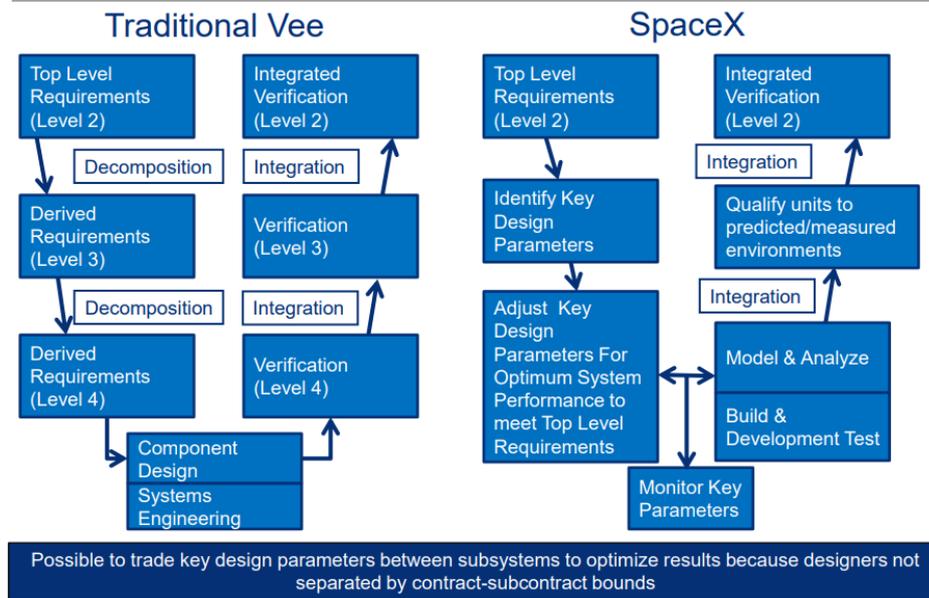


Figure 19 - Processus de conception, de manière traditionnelle et chez SpaceX
 Source : Space X (*System Engineering: A Traditional Discipline in a Non-traditional Organization*)

Annexe 4 – Falcon 9, calcul de coûts

Les coûts de production sont basés sur les déclarations publiques de SpaceX. Si celles-ci ne sont pas toutes vérifiables, il est possible de voir émerger de bons ordres de grandeur en recoupant plusieurs déclarations.

Premièrement, Elon Musk estimait en 2018¹⁶⁷ que le coût de production d'un lanceur Falcon 9 se répartissait comme suit : 60 % pour le premier étage, 20 % pour le second, 10 % pour la coiffe et 10 % pour les autres dépenses. Le chiffre de 60 % est repris par un rapport sénatorial français de 2019¹⁶⁸. Ici, la part du premier étage est plus faible que celle estimée par une étude de 2016 de la banque d'investissement Jefferies international¹⁶⁹, ce qui diminue les potentielles économies dues à la réutilisation. Ensuite, Elon Musk estime que la production d'un second étage ne coûtait environ 10 millions de dollars, prix indiqué en 2020 dans une entrevue accordée à *Aviation Week*¹⁷⁰. Le coût de production d'une fusée neuve serait donc de l'ordre de 50 millions de dollars.

Pour estimer le coût moyen d'une fusée utilisée 10 fois, on a considéré que la coiffe n'était pas récupérée et qu'il fallait en produire une autre. Les coûts de production du second étage, de la coiffe et les autres dépenses restent donc respectivement de 10, 5 et 5 millions de dollars. En 2017, Gwynne Shotwell, la COO (Chief Operating Officer) de SpaceX, annonçait¹⁷¹ que le prix de remise à neuf du premier étage était « significativement plus bas que la moitié du coût de production », c'est-à-dire bien inférieur à 15 millions de dollars. Elon Musk évoquait 3 ans plus tard un coût de seulement 1 million de dollars. Au vu de la fourchette de coûts importante, nous avons décidé d'utiliser ces seuils de 1 et 15 millions de dollars pour obtenir un coût compris entre 21 et 35 millions de dollars pour une fusée réutilisée. Gardons en tête que la valeur haute de 15 millions de dollars pour la réfection du premier étage est surévaluée.

Enfin, en ce qui concerne le nombre moyen d'utilisations d'un premier étage Block 5, le chiffre mentionné de 6 constitue une borne inférieure pour une future évolution car la plupart des boosters n'ont pas eu le temps d'atteindre leur nombre d'emploi maximal. De la même manière, le nombre moyen de jours entre deux lancements d'un même étage est surévalué, les temps de réfections ne faisant que diminuer depuis 2018.

¹⁶⁷ Michael Sheetz, « Here's Everything Elon Musk Told Reporters about the Reusable Rocket That Will Fly Twice within 24 Hours », *CNBC*, 11 mai 2018, <https://www.cnbc.com/2018/05/11/full-elon-musk-transcript-about-spacex-falcon-9-block-5.html>.

¹⁶⁸ Sophie Primas et Jean-Marie Bockel, « Rapport d'information fait au nom de la commission des affaires économiques et de la commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées sur la politique des lanceurs spatiaux » (Sénat, 19 novembre 2019).

¹⁶⁹ Peter B. de Selding, « SpaceX's Reusable Falcon 9: What Are the Real Cost Savings for Customers? », *SpaceNews*, 25 avril 2016, <https://spacenews.com/spacexs-reusable-falcon-9-what-are-the-real-cost-savings-for-customers/>.

¹⁷⁰ Elon Musk, Podcast: Interview with SpaceX's Elon Musk | Aviation Week Network, Aviation Week Network, 26 mai 2020, https://aviationweek.com/defense-space/space/podcast-interview-spacexs-elon-musk?fbclid=IwAR2r5igTE78at9T3rh_MDa8i1KFLbgtli54pFzk7VWgflSAqn-nyE2oA-hA.

¹⁷¹ Jeff Foust, « SpaceX Gaining Substantial Cost Savings from Reused Falcon 9 », *SpaceNews*, 5 avril 2017, <https://spacenews.com/spacex-gaining-substantial-cost-savings-from-reused-falcon-9/>.

Annexe 5 - Miniaturisation et standardisation des satellites

Avec l'arrivée de nouveaux acteurs offrant des lancements moins chers, notamment grâce au développement de (micro) lanceurs réutilisables et à la généralisation du "rideshare", les opérateurs peuvent désormais envoyer leurs satellites à moindre coût. Mais encore faut-il que le satellite lui-même soit abordable. Ainsi, un changement essentiel dans la conception et la production des satellites est leur miniaturisation et leur standardisation.

Les révolutions technologiques de miniaturisation permettent l'optimisation des masses envoyées en orbite et donc la réduction des coûts dans le secteur spatial¹⁷². On voit ainsi l'émergence de satellites de plus en plus petits, les *smallsats* (minisats : 100-200 kg, microsats : 10-100 kg, nanosats : 1-10 kg). Les satellites envoyés dans l'espace sont plus petits car simplifiés et plus spécialisés. En effet, les acteurs majeurs du spatial privilégient désormais l'envoi de plusieurs satellites plus petits et plus standardisés par rapport à l'envoi d'un grand satellite comportant toutes les fonctionnalités nécessaires. On remarque notamment l'apparition des cubesats, petits satellites cubiques miniatures (10 cm × 10 cm × 10 cm) d'environ 1 kg et utilisés seuls (1 unité ou 1U) ou en groupe (jusqu'à 24 unités ou 24U). La production est donc standardisée et les charges utiles sont différenciées pour des satellites plus spécialisés. Cela permet la rationalisation des chaînes de production en masse et des économies d'échelle importantes, qui ont pour conséquence un abaissement significatif des coûts de production. En effet, si on observe une baisse du coût de production des satellites de télécommunication (1,5 milliard d'euros dans les années 70-80¹⁷³ contre 300 millions aujourd'hui¹⁷⁴), l'arrivée des petits satellites spécialisés des constellations bouleverse le marché (900 000 euros environ pour produire un des minisats de la constellation OneWeb¹⁷⁵). Des start-ups – comme la petite entreprise conceptrice de plateformes que nous avons rencontrée – se développent donc avec un *business model* de construction de satellites ayant une approche modulaire s'appuyant sur des sous-composants standardisés permettant des économies d'échelle. Ces entreprises estiment aujourd'hui le coût de production d'un cubesat 3U à un montant compris entre 700 000 euros et 1 million d'euros, donc bien inférieur au coût d'un satellite de télécommunication traditionnel. Elles ont pour objectif à horizon 2025 de réduire ce coût à 250 000 euros l'unité, grâce à une production en gros volumes, à hauteur de 300 *smallsats* par an environ.

Ces évolutions transforment le marché et 14 000 nanosatellites devraient être lancés d'ici à 2030 d'après une étude réalisée par Euroconsult¹⁷⁶. Le marché des nano et microsattelites devrait d'ailleurs enregistrer un taux de croissance de plus de 8% entre 2022 et 2027 d'après Mordor Intelligence¹⁷⁷.

¹⁷² D. ZAJACKOWSKI et N. MAUBERT, « L'émergence et le développement du New Space aux États-Unis », CNES, juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://france-science.com/wp-content/uploads/2022/07/Note-th%C3%A9matique_Emergence-et-developpement-du-New-Space-america.pdf?fbclid=IwAR2JJS4fK-ajj2qqfD8fz_5p68i-jY7RbSTf6Ny4wP_UZyhTtrSUzdKpW38

¹⁷³ « Satellites Espions ».

¹⁷⁴ Lamigeon, « Satellites SES »; TASCH, « La facture du nouveau satellite militaire s'alourdit »; « La France lance un satellite militaire dernière génération ».

¹⁷⁵ Forrest, « The Forrester Report: OneWeb's "Valley of Death" »; « OneWeb ».

¹⁷⁶ « Prospects for Handheld, IoT and M2M Markets, 7th Edition » (Euroconsult, 2021), <https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/prospects-for-l-band-iot-m2m-markets/>.

¹⁷⁷ « Rapport sur le marché des nano et micro satellites - Croissance, Tendances, Impacte du Covid-19 et Prévisions (2023-2028) » (Mordor Intelligence, 2021), <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/nano-and-micro-satellite-market>.

Annexe 6 - Structure du marché spatial

Sur une chaîne de valeur simplifiée, l'industrie des infrastructures spatiales correspond à l'amont de la chaîne de valeur, et désigne l'ensemble des activités économiques conduisant à un système satellitaire opérationnel en orbite. L'industrie des services spatiaux correspond quant à elle à l'aval de la chaîne de valeur, et désigne toutes les activités économiques ultérieures liées au fonctionnement et à l'exploitation des systèmes satellitaires pour fournir des produits et services spatiaux aux utilisateurs finaux. Ces deux segments de la chaîne de valeur ont des dynamiques de marchés différentes, en matière d'applications, de clients et de régions.



Figure 20 - Segmentation du marché du spatial.
Source : Euroconsult, ([Space Economy Report 2022](#))

Tendances de marchés par application

Des différences notables apparaissent lorsque l'on compare la répartition par application en amont et en aval. Les segments des satellites de télécommunication et d'observation terrestre, propulsés par les projets de constellations en cours, représentent 59 % du marché amont total¹⁷⁸. Cela est dû à un marché fragmenté avec de nombreux acteurs, chacun ayant des besoins spécifiques pour l'architecture de son satellite¹⁷⁹. D'un autre côté, le marché de la navigation est un marché contrôlé par les gouvernements avec moins de satellites, mais des satellites plus chers (environ 120 unités dans le monde) ayant des cycles de remplacement plus longs¹⁸⁰. Les satellites de sécurité représentent une part importante de la valeur en amont compte tenu de leur sophistication et de leur coût élevé. Par exemple, le DoD américain a dépensé 2,5 milliards de dollars dans le système de 12 satellites SBIRS¹⁸¹ en 2021.

¹⁷⁸ « The Space Economy Report 9th edition » (Euroconsult, 2022), <https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/space-economy-report/>.

¹⁷⁹ Victoria Krisman, « World Teleport Association Publishes Top Operator Rankings for 2021 - World Teleport Association », *World Teleport Association* (blog), 2 février 2022, <https://www.worldteleport.org/news/594359/World-Teleport-Association-Publishes-Top-Operator-Rankings-for-2021.htm>.

¹⁸⁰ « MGEX Constellations », International GNSS Service, s. d., <https://igs.org/mgex/constellations/>.

¹⁸¹ « DOD Releases Fiscal Year 2021 Budget Proposal », *U.S. Department of Defense* (blog), 10 février 2020, <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2079489/dod-releases-fiscal-year-2021-budget-proposal/https%3A%2F%2Fwww.defense.gov%2FNews%2FReleases%2FRelease%2FArticle%2F2079489%2Fdod-releases-fiscal-year-2021-budget-proposal%2F>.



Figure 21 - Répartition des marchés amont et aval par application.

Source : Euroconsult, ([Space Economy Report 2022](#))

La répartition par application du segment en aval est très différente. Les services de navigation satellite représentent 60 % de la valeur totale du marché aval. Ce segment est considérablement influencé par les applications "activées par l'espace". Ces activités génèrent des revenus à travers l'utilisation des signaux GNSS (*Global Navigation Satellite System*). D'après BryceTech, en 2021, le marché des puces et des équipements GNSS représentait 110 milliards de dollars, soit plus de 30 % de l'ensemble du marché aval¹⁸². Le segment de la communication satellite représente la deuxième plus grande partie du marché en aval, toujours dominé par une activité de télévision par satellite (75 % du marché en 2020¹⁸³) en déclin (95 milliards de dollars en 2014¹⁸⁴, contre 88 milliards de dollars en 2020¹⁸⁵) mais de plus en plus propulsée par les besoins de connectivité des gouvernements, des entreprises et des individus. Le marché de l'internet par satellite est ainsi passé de 1,2 milliard de dollars en 2010¹⁸⁶ à 2,8 milliards de dollars en 2020¹⁸⁷. Les autres marchés représentent une part plus modeste du marché des services, avec des dynamiques spécifiques : malgré la croissance, l'observation de la Terre ne représente que 2 % des marchés spatiaux en aval en raison de l'absence d'applications de grande envergure B2C¹⁸⁸.

Tendances de marché par type de clients

Bien que présentant des parts de marché relativement similaires en matière de valeur entre clients gouvernementaux, militaires et commerciaux, le marché amont est assez disparate en ce qui concerne les volumes. Les trois types de clients présentent une typologie très différente : les clients commerciaux, portés par les projets de constellation, représentent la majorité du volume en nombre de satellites, en plus d'être associés au prix unitaire satellitaire le moins élevé. Les acteurs gouvernementaux civils ont tendance à privilégier leur industrie nationale dès que possible tout en se concentrant principalement sur des activités non rentables telles que la science, la navigation et l'exploration. Les acteurs de la défense représentent quant à eux un volume très faible mais généralement associé à des systèmes haut de gamme à prix élevé. Ces systèmes d'avant-garde compensent leurs volumes inférieurs par leur haute valeur. Il est important de noter que le segment de la défense est largement impulsé par le budget américain, qui est utilisé pour développer des technologies d'avant-garde et pour assurer leur leadership. Certains de ces transferts peuvent être effectués vers le secteur civil une fois que des capacités supérieures ont été atteintes.

¹⁸² « State of the Satellite Industry Report 2022 » (Bryce Tech, 2022), https://brycetechnology.com/reports/report-documents/SIA_SSIR_2022.pdf.

¹⁸³ « State of the Satellite Industry Report 2021 » (Bryce Tech, 2021), https://brycetechnology.com/reports/report-documents/SIA_SSIR_2021.pdf.

¹⁸⁴ « State of the Satellite Industry Report 2015 » (Bryce Tech, 2015).

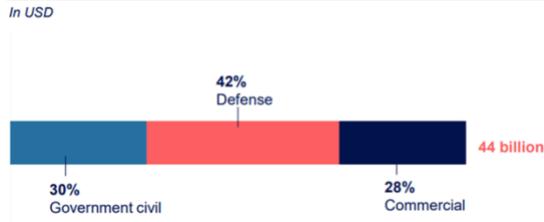
¹⁸⁵ « State of the Satellite Industry Report 2021 ».

¹⁸⁶ « State of the Satellite Industry Report 2015 ».

¹⁸⁷ « State of the Satellite Industry Report 2021 ».

¹⁸⁸ European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. et PwC., *Copernicus Market Report: February 2019. Issue 2*. (LU: Publications Office, 2019), <https://data.europa.eu/doi/10.2873/011961>.

2022 global space market by client types - Upstream



2022 global space market by client types - Downstream



Figure 22 - Répartition des marchés amont et aval par type de client.

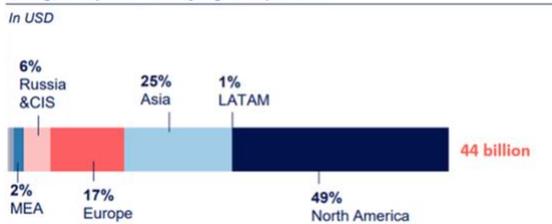
Source : Euroconsult, ([Space Economy Report 2022](#))

L'industrie en aval est quant à elle largement dominée par les activités commerciales. Les entreprises privées et les utilisateurs finaux privés restent les principaux clients des signaux satellites, stimulés par la nature de marché de masse des marchés B2C de la navigation par satellite et des communications par satellite. Les dépenses gouvernementales civiles sont motivées par la commande de systèmes satellites pour les applications d'observation de la Terre ou de sécurité. Les systèmes d'observation de la Terre civils gouvernementaux, tels que les systèmes de navigation, sont utilisés pour stimuler la croissance économique en offrant un service gratuit à la population afin de stimuler son développement.

Tendances de marchés par régions

Les revenus du marché spatial sont essentiellement concentrés en Amérique du Nord, en Europe et en Asie. Les principaux acteurs de l'industrie amont sont situés dans les régions d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie, et sont soutenus par une demande institutionnelle nationale importante (couvrant à la fois la R&D et les programmes publics pour les besoins souverains...) ainsi que par un marché commercial national ou régional mature générant une demande de systèmes satellitaires avancés.

2022 global space market by region - Upstream



2022 global space market by region - Downstream

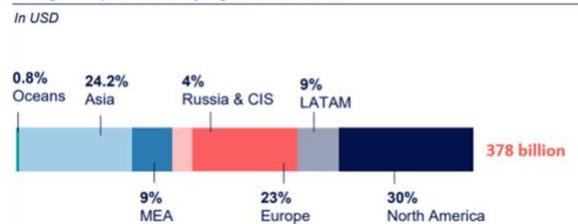


Figure 23 - Répartition des marchés amont et aval par région.

Source : Euroconsult, ([Space Economy Report 2022](#))

Alors que le marché amont comporte un besoin récurrent de programmes gouvernementaux pour prospérer, le marché aval est plus également réparti entre les régions en raison de sa nature de "marché de masse", mais n'exige pas d'efforts financiers importants en amont ni de contrats gouvernementaux pour être durable. Il répond à un besoin de connectivité ou de services basés sur l'emplacement, générant un flux de revenus continu, contrairement au marché amont. La croissance du marché aval est corrélée à deux facteurs majeurs : l'évolution démographique et l'évolution du niveau de vie régional. Ces deux facteurs stimulent le besoin de services de connectivité et de navigation. Le besoin de connectivité à haut débit est également stimulé par l'ambition des différents gouvernements de réduire la fracture numérique à travers des programmes de développement (RDOF) finançant la connectivité satellite.

Annexe 7 - Principaux clients des entreprises interrogées en fonction de leur date de création et de leur chiffre d'affaires (1970-2022)

Année de création	Avant 1990	1990-1999	2000-2009	2010-2014	2015-2017	2018-2019	Après 2020
Moins de 10				Mairies, Universités, INRA, Bureaux d'études	?	CNES, la Banque Mondiale, Airbus, Vilogia, idGéo collectivités territoriales Services de l'État Etablissements scientifiques Associations	Gouvernements Grosses entreprises privées Opérateurs de satellites types eutelsat, intelsat DGA ou équivalent britannique
10-20		ESA, CNES, Safran, Thales, Airbus		Coopératives agricoles	CNES Korean Space Agency EUSPA ISARaerospace	CNES Laboratoire Onera, client privé, Commandement de l'Espace Institutionnels, agences de voyage, site vacances, Fournisseurs d'énergie, agriculture, ville intelligente	
20-50		CNES ESA, Eurocontrol Eutelsat	Thales, Airbus Energie solaire, meteo		Particuliers à haut capitaux		
50-100		Thales, Airbus DS, CNES	Airbus DS, Airbus Satellites, Alenia			CNES ENEDIS	

100-200		CNES, Airbus DS, Thales Anywaves, D-orbit, U-Space, Momentus, Hemeria, Infinite Orbits Centre Spatial Universitaire de Grenoble	Space, CNES Métropole de Toulouse, CDE		Opérateurs de satellites défense	Petites entreprises, associations et particuliers
		Airbus DS, Thales PME, start-ups	CNES, Airbus DS, Thales, ArianeGroup			
		Airbus DS, Dassault				
		Thales Alenia Space ESA, UE, marché institutionnel	Institutionnel européen			
200-500				Étatiques ou institutionnels	Airbus DS, Thales Alenia Space, CNES, Iridium Next, OHB, Armée, Naval Group, DGA	
Plus de 500	CNES	Ariane, CNES, Airbus DS, Thales				
	CNES, CNP Marine Nationale	CNES, Airbus DS, Thales, Safran Collins Aerospace, Zodiac Aerospace, MBDA, Nexter, Arqus				

Légende : Chiffre d'affaires 2021	
< 500 000	
500 000 - 1 million	
1 m - 10 m	
10 m - 30 m	
30 m - 50 m	
> 50 millions	

Annexe 8 - L’empreinte environnementale et climatique du secteur spatial

Les états actifs dans l’espace ne questionnent généralement pas la soutenabilité de leurs projets spatiaux. La dimension militaire est priorisée par rapport à la dimension environnementale. Cependant, en France, la loi relative aux opérations spatiales (LOS) de 2008 fait figurer l’obligation de « protection des personnes, des biens, et de l’environnement (terrestre et spatial) » à laquelle sont soumises les opérations privées. Côté américain en revanche, la *Federal Communications Commission* (FCC) a dispensé Elon Musk de toute étude d’impact préalable au déploiement de la deuxième génération des satellites Starlink, provoquant la réaction d’associations environnementales.

Lors des 44 entretiens que nous avons menés, seuls 6 acteurs ont évoqué spontanément la question de la gestion des ressources spatiales (débris spatiaux, fréquences, demande énergétique ou ressources lunaires). Parmi eux, un acteur évoquait uniquement le cadre légal, un autre avait fait de la gestion des débris spatiaux son cœur de métier, un troisième évoquait la demande énergétique à venir, et les trois autres mentionnaient davantage les apports technologiques du spatial en matière de prévision et de réduction des émissions de GES (gaz à effet de serre) et de solutions d’adaptabilité face aux enjeux climatiques que d’empreinte environnementale du secteur. Les satellites météorologiques jouent effectivement depuis des décennies un rôle fondamental dans l’étude du changement climatique¹⁸⁹. Le secteur du spatial contrôle plus de la moitié des 50 indicateurs climatiques majeurs. Les données fournies en accès libre par le satellite d’observation Copernicus participent d’ailleurs de ce rôle de vigilance. Ces arguments sont en permanence mis en avant par les acteurs spatiaux, au détriment de l’empreinte environnementale du secteur en lui-même¹⁹⁰.

In fine, la question des émissions de GES et de la déplétion de la couche d’ozone dues au secteur spatial est complètement marginalisée et éludée. La contribution des lancements à la déplétion de l’ozone et au réchauffement climatique reste minime en raison du faible nombre de lancements. Cependant, ce nombre est susceptible d’être multiplié par 10 dans les prochaines décennies, ce qui rendrait la déplétion de l’ozone comparable à celle causée par les ODS (*Ozone Depleting Substance*), et produirait un forçage radiatif comparable à celui de l’aviation mondiale. De plus, les études d’impact ne prennent en compte que le CO₂, l’impact dû au carbone noir et à l’aluminium n’étant pas considéré dans l’impact des lancements. Lors d’un lancement, les hautes températures convertissent l’azote de l’air en oxydes d’azote qui détruisent l’ozone dans la stratosphère. La perte causée par les lancements a été estimée entre 0,01 % et 0,1 % de la quantité d’ozone totale. Pour rappel, la perte occasionnée par les substances destructrices d’ozone interdites était de 3 %. 1 000 lancements par an avec des HRE pourraient causer la perte de 6 % de l’ozone dans les régions polaires¹⁹¹. Le réchauffement de l’atmosphère dû aux émissions des fusées est causé à 70 % par le carbone noir, à 28 % par l’aluminium, à 2 % par l’eau, et à presque 0 % pour le CO₂¹⁹². Les chercheurs prédisent une multiplication par 30 voire par 100 de la masse de suies envoyée dans la stratosphère chaque année en raison des lancements si les technologies ne sont pas modifiées. Leur analyse est fondée sur les

¹⁸⁹ Olivier Rolland, « « L’exploration spatiale joue un rôle important dans la recherche de solutions durables » », *Le Monde.fr*, 4 janvier 2022, https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/01/04/l-exploration-spatiale-joue-un-role-important-dans-la-recherche-de-solutions-durables_6108108_3232.html.

¹⁹⁰ « Space Sustainability Rating », World Economic Forum, s. d., <https://www.weforum.org/projects/space-sustainability-rating/>.

¹⁹¹ Liz Goldstein, « The Environmental Impacts of the New Space Race », *Georgetown Environmental Law Review* (blog), consulté le 25 janvier 2023, <https://www.law.georgetown.edu/environmental-law-review/blog/the-environmental-impacts-of-the-new-space-race/>.

¹⁹² Ramin Skibba, « The Black Carbon Cost of Rocket Launches », *Wired*, 16 juin 2022, <https://www.wired.com/story/the-black-carbon-cost-of-rocket-launches/>.

moteurs brûleurs de kérosène, comme ceux utilisés par les boosters de première génération de SpaceX Falcon, RocketLab Electron, et les fusées russes Soyouz. Avec le nombre total de lancements augmentant jusqu'à 8 % par an, les scientifiques ont prévu le décollage de 1 000 fusées à combustibles à base d'hydrocarbures chaque année jusqu'en 2040, ce qui pourrait causer une élévation de la température de 1°C¹⁹³. Pour l'instant, l'impact des lancements est relativement bas.

Pour pallier ce problème, l'ESA a lancé la réalisation d'un bilan carbone de l'industrie du spatial dans le cadre de son Agenda 2025. L'objectif est de réduire les émissions de GHG de 46 % d'ici 2030 par rapport à celles de 2019 (chiffres tirés de l'Accord de Paris) et d'établir une roadmap de réduction spécifique à chaque secteur. D'après l'ESA, la plupart des émissions de la filière spatiale européenne sont dues à la *supply chain*, dont l'étude a prévu de couvrir en priorité les *scope 1* et *2*. La NASA a également fixé un objectif (*Financial Year 2025*) de réduction des émissions de GES de 47 % sur les *scopes 1* et *2* et de 37 % pour le *scope 3* par rapport au FY 2008. À titre d'exemple, un vol complet Falcon 9, avec récupération de la capsule habitée grâce à des navires spécialisés et un hélicoptère émet 1 150 tonnes de CO₂, et un vol lunaire Starship/Super Heavy (projet *Dear Moon*) émettra 3 750 tonnes¹⁹⁴. Des estimations montrent qu'en 2050 l'empreinte du secteur du spatial atteindra environ 4 millions de tonnes de CO₂ pour un scénario de croissance faible, environ 110 millions de tonnes CO₂ pour une croissance modérée et environ 760 millions de tonnes de CO₂ dans un scénario de croissance forte¹⁹⁵. De plus, l'effet combiné des satellites et des débris spatiaux sur la pollution lumineuse serait responsable d'une augmentation de 10 % de la luminosité du ciel la nuit par rapport au niveau naturel, ce qui est au-delà du seuil de définition d'un site comme non pollué défini par la communauté internationale d'astronomie¹⁹⁶. Le nombre de particules métalliques émanant des rentrées dans l'atmosphère des satellites dépasserait de loin celui des entrées d'origine naturelle comme les météorites, avec des conséquences pour l'instant inconnues.

Enfin, l'augmentation de l'offre internet dans le monde grâce aux constellations implique une augmentation de la demande énergétique. Le Commandement de l'Espace évoque que l'avènement du *Power Space* à partir de 2030-2035 risque également de stimuler la demande : cette question éludée par tous les acteurs reste une inconnue dans les projets de développement spatiaux futurs. On peut évoquer les projets de centrales spatiales productrices d'énergie prévus pour assurer la demande énergétique du secteur spatial, mais aussi la demande terrestre, irréalisables dans les délais nécessaires. Par exemple, la centrale solaire chinoise, pionnière en la matière, devrait pouvoir produire 1 GW en 2050, ce qui signifie qu'en un an d'utilisation elle ne couvrirait que 0,1 % de la demande énergétique chinoise de 2018¹⁹⁷, laquelle augmentera encore largement d'ici 2050.

¹⁹³ Goldstein, « The Environmental Impacts of the New Space Race ».

¹⁹⁴ « Draft Environmental Assessment for the SpaceX Starship and Super Heavy Launch Vehicle at Kennedy Space Center (KSC) » (Federal Aviation Administration, août 2019).

¹⁹⁵ Loïs Miraux, Andrew Ross Wilson, et Guillermo J. Dominguez Calabuig, « Environmental Sustainability of Future Proposed Space Activities », *Acta Astronautica* 200 (1 novembre 2022): 329-46, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.034>.

¹⁹⁶ Miraux, « Environmental Limits to the Space Sector's Growth ».

¹⁹⁷ « China - Countries & Regions », IEA, s. d., <https://www.iea.org/countries/china>.

Annexe 9 - La problématique des débris spatiaux

L'ESA a publié en 2022 son *"Space Debris Environment Report"* dans lequel elle décrit l'activité spatiale et la manière dont les mesures internationales de réduction des débris améliorent la durabilité long-terme des projets spatiaux¹⁹⁸.

En prenant en compte une absence de changement de nos façons de lancer, voler et gérer la fin de vie des objets spatiaux, on peut extrapoler le nombre de collisions. On arrive au "Syndrome de Kessler" qui est un effet de cascade : plus il y a de collisions, plus il y a de débris. Finalement, certaines orbites basses deviendront inhospitalières.

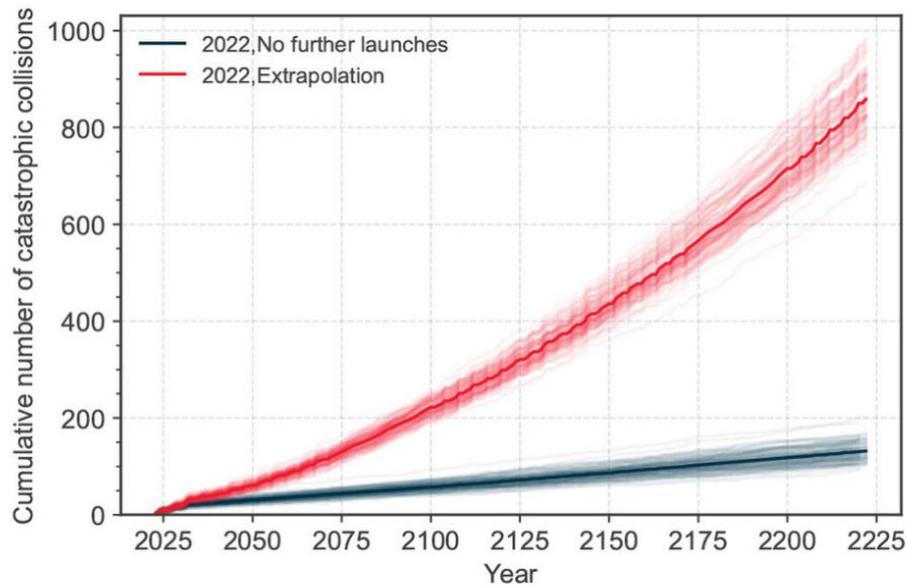


Figure 24 - Représentation du syndrome de Kessler (2025-2225)
Source: [The Satellite Encyclopedia](https://www.satelliteencyclopedia.com/)

Les événements de collision peuvent avoir des conséquences désastreuses : la destruction en 2007 du satellite FengYun-1C a doublé la quantité de débris à 800 km d'altitude et a augmenté de 30 % le nombre total de débris. L'utilisation des orbites terrestres (notamment l'orbite LEO) a grandement augmenté ces 10 dernières années, tout comme les utilisations institutionnelles et commerciales de l'espace. Le déploiement des méga-constellations accélère également le phénomène.

Les débris génèrent des coûts, dont ceux dus à la protection de satellites, aux remplacements, à la surveillance et au *tracking*. Les opérateurs de satellites GEO estiment que ces coûts correspondent à 5-10 % du coût total de la mission, et à davantage pour l'orbite LEO. Dans le cas d'une impossibilité d'utiliser une orbite, les impacts socio-économiques seraient alors très importants : cela rendrait inopérants des services essentiels comme le GPS, les télécommunications, et les services de contrôle climatique ou environnemental. L'une des menaces les plus grandes pour la durabilité à long-terme des opérations spatiales est donc celle des débris spatiaux.

Afin d'éviter le *Kessler Syndrome*, il convient de suivre les recommandations de l'IADC (*Inter-Agency Debris Coordination Committee*) et de commencer à nettoyer l'espace. ClearSpace-1 (start-up suisse ClearSpace SA) prévue pour 2025 sera la première mission de nettoyage et doit tenter de retirer

¹⁹⁸ « ESA's Space Environment Report 2021 », s. d., https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_s_Space_Environment_Report_2021.

un morceau de débris de 112 kg de son orbite. D'après l'OCDE¹⁹⁹, les guidelines pour le nettoyage des orbites LEO et GEO indiquent des mesures qui contribueraient à ralentir l'accumulation de débris : pas de génération intentionnelle de débris, la règle des 25 ans en orbite, pas d'explosion accidentelle en orbite, évitement de collisions. Des études prônent le retrait de plusieurs grands débris chaque année.

Mais le respect de ces mesures reste encore insuffisant : les opérateurs de GEO les appliquent mais les opérateurs de LEO beaucoup moins (moins de 60 % sur toutes les orbites et seulement 20 % dans les orbites inférieures à 650 km). Même si la prévention des débris n'est pas intégrée aux conditions fondamentales du droit international de l'espace, le statut de la ressource « spectre-orbite » est mentionné dans la Convention et Constitution de l'UIT en 1992 : « les membres tiennent compte du fait que les fréquences et l'orbite des satellites géostationnaires sont des ressources naturelles limitées qui doivent être utilisées de manière rationnelle, efficace et économique ». Loin de cette ligne directrice, la gestion des débris n'est ni rationnelle, ni efficace, ni économique.

Des collisions graves se sont déjà produites, et des menaces existent, comme celles de la Russie avec Starlink. La start-up rencontrée dont l'activité est de cataloguer et prévoir les manœuvres à réaliser pour éviter des collisions entre satellites et débris présente sa mission comme relative à la protection de l'environnement et à la souveraineté²⁰⁰. Financée par des institutions du spatial, elle incarne l'internalisation des externalités que sont les débris spatiaux, émis par les mêmes acteurs qui en pâtissent ensuite, et qui deviennent alors les clients de cette start-up. D'après cet acteur, l'ESA fait 2 manœuvres par an et par satellite, ce qui correspond à environ 10 % de perte sur son revenu annuel. Un détournement coûte entre 50 000 et 500 000 milliers d'euros par manœuvre, et la perte d'un satellite engendre une perte de 50 millions d'euros. Cet acteur mentionne le fait que malgré l'enjeu, seules 5 personnes sont chargées de l'enjeu des débris chez SpaceX.

Ces éléments économiques éloquentes montrent que le nettoyage des débris n'est pas une priorité face à la militarisation de l'espace.

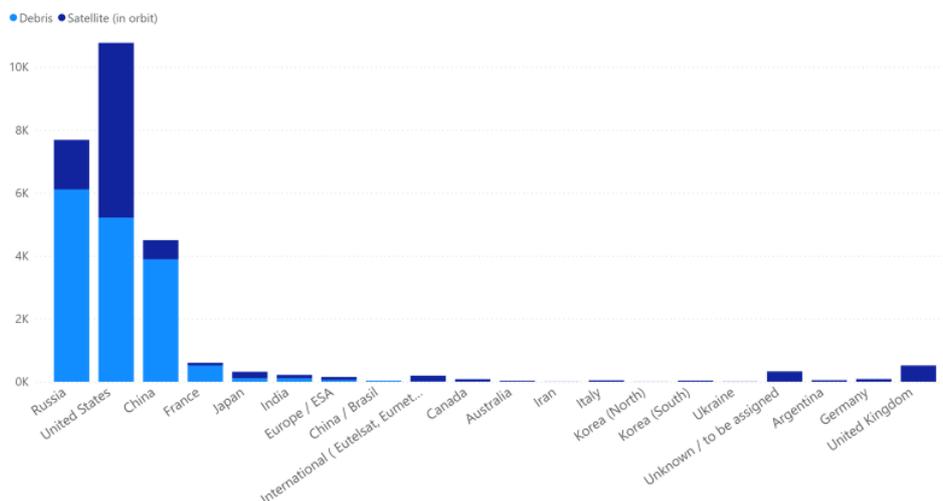


Figure 25 - Nombre de satellites et de débris produits par pays en 2022.
Source: [The Satellite Encyclopedia](https://www.satelliteencyclopedia.com/)

¹⁹⁹ Marit Undseth, Claire Jolly, et Mattia Olivari, « Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective », vol. 87, OECD Science, Technology and Industry Policy Papers (Editions OCDE, Paris, 8 avril 2020), <https://doi.org/10.1787/a339de43-en>.

²⁰⁰ « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. »

Annexe 10 – Typologie des principales constellations

Constellation	Pays	Applications	Année de lancement	Nombre de satellites final	Nombre de satellites actuel	Année de mise en service	Orbite	Fréquence	Users	Coût total	Lanceurs
Starlink (SpaceX)	US	Internet access	2018	12000	3300 (Novembre 2022)	2021	LEO	Ku-Ka	1M	\$10 Milliards ²⁰¹	Falcon 9
Kuiper (Blue Origin - Amazon)	US	Internet access	2023	3236	0	Non communiqué	LEO	Ku-Ka	Non communiqué	\$10 Milliards ²⁰²	Atlas V, Ariane 6
OneWeb (Eutelsat)	UK-UE-Inde	Internet access	2023	648	464 (Octobre 2022)	Non communiqué	LEO	Ku ²⁰³	Non communiqué	7 – 10 Milliards € ²⁰⁴	Soyouz
Iris (Commission européenne)	UE	Internet access	2025	170 (LEO)	0	2027	LEO + MEO	Non communiqué	Non communiqué	2.4 Milliards €	Non communiqué
GPS	US	Navigation	1978	32	24	1993	MEO ²⁰⁵	1.5 GHz	6.4 billions units	\$12 Milliards ²⁰⁶	Non communiqué
SatRevolution	Pologne - Suède	Observation	2021	1024	7	2026	LEO	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	LauncherOne

²⁰¹ « Starlink », in *Wikipédia*, 26 janvier 2023, <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Starlink&oldid=200796680>.

²⁰² « Kuiper Systems », in *Wikipedia*, 18 janvier 2023, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kuiper_Systems&oldid=1134353679.

²⁰³ « Consultation publique | du 21 juillet 2022 au 22 septembre 2022 - Attribution d'une autorisation d'utilisation de fréquences radioélectriques à la société OneWeb Limited pour un réseau ouvert au public du service fixe par satellite et pour fournir des services de communications pour des stations terriennes en mouvement (ESIM) » (Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse, 21 juillet 2022).

²⁰⁴ « OneWeb ».

²⁰⁵ « Global Positioning System », in *Wikipedia*, 9 janvier 2023, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Global_Positioning_System&oldid=1132585538.

²⁰⁶ « How Much Does GPS Cost? », *Time*, 21 mai 2012, <https://nation.time.com/2012/05/21/how-much-does-gps-cost/>.

Iridium	US	Communication, Internet access	1997	95	82	2002	LEO	1.6 GHz	1.8M ²⁰⁷	\$5 Billiards ²⁰⁸	Delta II, Longue Marche 2C
SkySat	US	Observation	2013	21	21	2013	LEO ²⁰⁹	Non communiqué	Non communiqué	Non communiqué	Vega, Minotaur C, Falcon 9
Sfera	Russie	Internet Observation	2018	600	1	2024	LEO	Non communiqué	Non communiqué	180 Billiards ₺	Non communiqué

²⁰⁷ Iridium Communications Inc., « Iridium Announces First-Quarter 2022 Results », Iridium, s. d., <https://investor.iridium.com/2022-04-19-IRIDIUM-ANNOUNCES-FIRST-QUARTER-2022-RESULTS>.

²⁰⁸ « Iridium Satellite Constellation », in *Wikipedia*, 10 janvier 2023, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Iridium_satellite_constellation&oldid=1132706771.

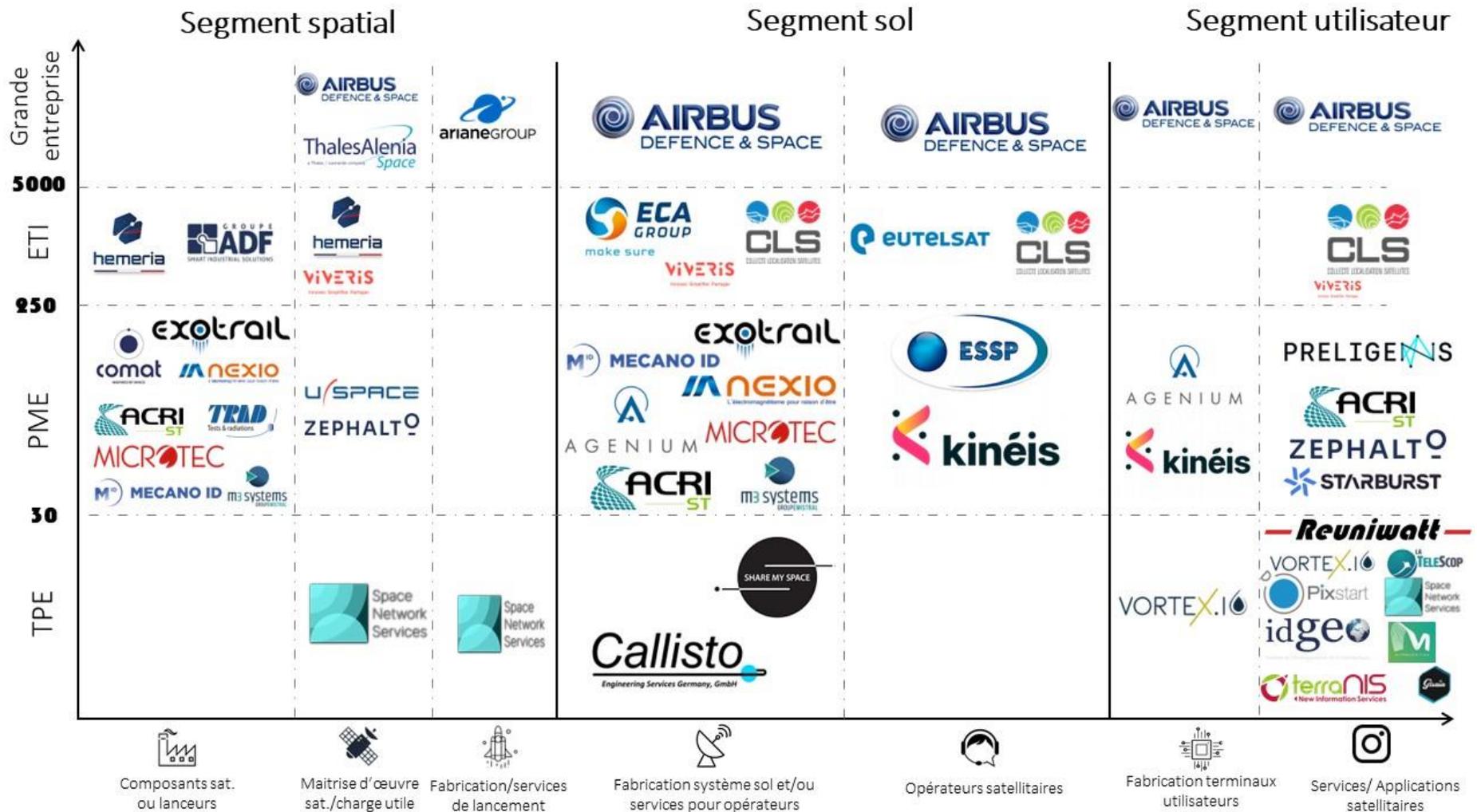
²⁰⁹ « SkySat », in *Wikipedia*, 14 janvier 2023, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=SkySat&oldid=1133660876>.

Annexe 11- Le cas des ressources lunaires

Le cas de l'exploitation des ressources provenant des corps célestes est évoqué dans l'Accord sur la Lune, article 11 : « La Lune et ses ressources naturelles constituent le patrimoine commun de l'humanité. Les États s'engagent à mettre en place un régime international, lorsque l'exploitation des ressources de la Lune deviendra possible ». Il s'agit de la première mention d'un patrimoine commun de l'humanité dans le droit international, mais le texte n'est ratifié que par 18 pays, ce qui limite sa portée. En proposant à leurs partenaires (9 à l'origine, rejoints par 13 autres) de signer les accords Artemis sur les principes de coopération dans l'exploration civile et l'utilisation de la Lune, de Mars, des comètes, et des astéroïdes à des fins pacifiques en 2020, les Américains qui n'avaient pas signé le traité sur la Lune de 1984 ont relancé le débat sur l'exploitation des ressources extra-atmosphériques. Dans un texte fédéral promulgué en 2015, les États-Unis avaient déjà autorisé unilatéralement les acteurs privés américains à exploiter les ressources des corps célestes.

Alors qu'en 1967, le Traité de l'espace avait vocation à protéger l'espace des excès, celui-ci est aujourd'hui réinterprété pour renforcer la puissance militaire dans l'espace, et la dynamique de compétition des premiers temps de l'exploration spatiale semble connaître un nouveau souffle. En témoigne le projet sino-russe de base lunaire, évoqué dans nos entretiens par les plus gros acteurs institutionnels du spatial français, qui se veut concurrente du *nar Gateway* construit par les États-Unis avec le concours de l'Europe, du Canada et du Japon. Bien qu'il s'agisse officiellement de projets civils, ceux-ci montrent que la militarisation de l'espace s'étend désormais aux territoires extra-orbitaux, et la Lune, en première ligne, est d'ores et déjà considérée par les acteurs comme un terrain propice à l'installation de bases militaires stratégiques, où le premier arrivé raflera la mise.

Annexe 12 – Cartographie des acteurs rencontrés



Bibliographie

- Aerospace Corporation. « A Brief History of GPS », 29 décembre 2022. <https://aerospace.org/article/brief-history-gps>.
- A. Day, Dwayne. « Invitation to Struggle: The History of Civilian-Military Relations in Space ». In *Exploring the Unknown: Selected Documents in the History of the U.S. Civilian Space Program II: External Relationships*, 233-81, 1996.
- Achord, Darren. « Let's Work Together: Broadband Connectivity for All Americans ». About Amazon, 17 août 2021. <https://www.aboutamazon.com/news/policy-news-views/lets-work-together-broadband-connectivity-for-all-americans>.
- « Aeronautics and Space Report of the President: Fiscal Year 2020 Activities. » NASA, s. d.
- About Amazon. « Amazon Web Services Announces AWS Ground Station », 27 novembre 2018. <https://press.aboutamazon.com/2018/11/amazon-web-services-announces-aws-ground-station>.
- André Loesekrug-Pietri. « L'Europe peut-elle rester une puissance spatiale ? » *Les Echos*, 24 novembre 2022. <https://www.lesechos.fr/idees-debats/cercle/opinion-leurope-peut-elle-rester-une-puissance-spatiale-1882374>.
- Arianespace. « Ariane 5 », s. d. <https://www.arianespace.com/vehicule/ariane-5/>.
- Arthur Olivier. « La politique spatiale européenne : histoire, objectifs, programmes ». Toute l'Europe, 15 février 2022. <https://www.touteurope.eu/economie-et-social/la-politique-spatiale-europeenne-histoire-objectifs-programmes/>.
- Amazon Web Services, Inc. « AWS for Aerospace and Satellite (A&S) Solutions », s. d. <https://aws.amazon.com/government-education/aerospace-and-satellite/>.
- azure.microsoft.com. « Azure Space – Satellite Connection and Innovation | Microsoft Azure », s. d. <https://azure.microsoft.com/en-us/solutions/space/>.
- Bauer, Anne. « Le Pentagone et la Nasa pourraient bientôt compter un nouveau fournisseur de poids ». *Les Echos*, 19 décembre 2022, sect. Industrie Services. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/le-pentagone-et-la-nasa-pourraient-bientot-compter-un-nouveau-fournisseur-de-poids-1890689>.
- — —. « Satellites : l'Américain Viasat achète le Britannique Inmarsat ». *Les Echos*, 8 novembre 2021, sect. Industrie Services. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/satellites-lamericain-viasat-achete-le-britannique-inmarsat-1362046>.
- Besha, Patrick, et Alexander MacDonald. « Economic Development of Low Earth Orbit ». NASA, 29 janvier 2016. http://www.nasa.gov/connect/ebooks/economic_development_of_low_earth_orbit_detail.html.
- Bibikoff, Alizée De. « ArianeGroup et l'initiative NESTS de l'ESA ». ArianeGroup, s. d. <https://www.ariane.group/fr/actualites/une-famille-de-lanceurs-reutilisables-et-ecoresponsables-pour-leurope/>.
- Bishop, Todd. « How Elon Musk Plans to Get to Mars, via Seattle: What the SpaceX Founder Said at That Private Event ». *GeekWire*, 19 janvier 2015. <https://www.geekwire.com/2015/elon-musk-plans-get-mars-via-seattle-spacex-founder-said-private-event/>.

- Bomsel, Olivier, et Gilles Le Blanc, éd. *Dynamiques industrielles et réglementaires des télécoms : une comparaison Etats-Unis/France*. Les notes de l'IFRI, no 29. Paris: Institut français des relations internationales, 2000.
- Boone, W. Fred. *NASA Office of Defense Affairs: the first five years: December 1, 1962, to January 1, 1968*. Electronic resource. Washington, D.C: Historical Division, Office of Policy, National Aeronautics and Space Administration, 1970. <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS69912>.
- Bottlaender, Eric. « Le bilan spatial 2022, des astronautes et des fusées comme s'il en pleuvait ». *Clubic*, 31 décembre 2022. <https://www.clubic.com/mag/sciences/conquete-spatiale/actualite-451686-le-bilan-spatial-2022-des-astronautes-et-des-fusees-comme-s-il-en-pleuvait.html>.
- . « Ne ratez pas le décollage de l'antépénultième Ariane 5 ! » *Clubic*, 13 décembre 2022. <https://www.clubic.com/arianespace/actualite-450000-ne-ratez-pas-le-decollage-de-l-antepenultieme-ariane-5.html>.
- Branscomb, Lewis M., et Brian Kahin. « Standards Processes and Objectives for the National Information Infrastructure ». *Information Polity*, janvier 1995.
- « Capabilities & Services - Space X ». s. d. https://www.spacex.com/media/Capabilities&Services.pdf?fbclid=IwAROWgBFFR8dfZTXyKB D4hoUW6HZ30iGURpKdUoAMkloKzLvtJ6cG82C_MJQ.
- Defense Industry and Space | European Commission. « CASSINI Space Entrepreneurship Initiative », s. d. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/space-entrepreneurship-initiative-cassini_en.
- IEA. « China - Countries & Regions », s. d. <https://www.iea.org/countries/china>.
- Christoph Schwarz, Sofia-Maria Satanakis. « Space Race 2.0 – Renewed Great Power. Competition in the Earth's Orbits ». *AIES*, juin 2020. <https://www.aies.at/download/2020/AIES-Fokus-2020-06.pdf>.
- « Chronologie spatiale - Récapitulatif des lancements depuis 1957 », s. d. <https://destination-orbite.net/astronautique/lancements/recapitulatif/>.
- Clark, Stephen. « SpaceX booster launches for record 15th time on Starlink mission – Spaceflight Now », 25 janvier 2023. <https://spaceflightnow.com/2022/12/17/falcon-9-starlink-4-37-launch/>.
- . « SpaceX Passes 2,500 Satellites Launched for Starlink Internet Network ». *Spaceflight Now*, s. d. <https://spaceflightnow.com/2022/05/13/spacex-passes-2500-satellites-launched-for-companys-starlink-network/>.
- . « U.S. Military Payloads Mated to SpaceX Falcon Heavy Rocket for Weekend Launch ». *Spaceflight Now*, janvier 2023. <https://spaceflightnow.com/2023/01/13/u-s-military-payloads-mated-to-spacex-falcon-heavy-rocket-for-weekend-launch/>.
- Clavey, Martin. « SpaceX : la réutilisation, ça marche ». *Next Inpact*, 3 novembre 2022. <https://www.nextinpact.com/article/70281/spacex-reutilisation-ca-marche>.
- Cochennec, Yann. « Déploiement réussi de 40 satellites OneWeb lancés avec SpaceX ». *Air&Cosmos International*, 11 janvier 2023. <https://air-cosmos.com/article/deploiement-reussi-de-40-satellites-oneweb-lances-avec-spacex-63960>.
- Comité 1 - 56e session nationale de l'IHEDN. « Le New Space : opportunité ou menace pour notre autonomie stratégique ? » *Revue Défense Nationale*, n° 836 (janvier 2021): 12-20.
- « Consultation publique | du 21 juillet 2022 au 22 septembre 2022 - Attribution d'une autorisation d'utilisation de fréquences radioélectriques à la société OneWeb Limited pour un réseau ouvert au public du service fixe par satellite et pour fournir des services de communications

- pour des stations terriennes en mouvement (ESIM) ». Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse, 21 juillet 2022.
- Corot, Léna. « Boeing veut concurrencer SpaceX et Amazon avec sa constellation de satellites pour Internet ». *L'Usine Digitale*. 4 novembre 2021. <https://www.usine-digitale.fr/article/boeing-veut-concurrencer-spacex-et-amazon-avec-sa-constellation-de-satellites-pour-internet.N1157032>.
- Daehnick, Chris, Isabelle Klinghoffer, et Bill Wiseman. « Large LEO satellite constellations: Will it be different this time? » McKinsey & Company, s. d. <https://www.mckinsey.com/industries/aerospace-and-defense/our-insights/large-leo-satellite-constellations-will-it-be-different-this-time>.
- Dans, Enrique. « Elon Musk's Economies Of Scale Won SpaceX The NASA Moonshot ». *Forbes*, s. d., sect. Leadership Strategy. <https://www.forbes.com/sites/enriquedans/2021/04/25/elon-musks-economies-of-scale-won-spacex-the-nasamoonshot/>.
- Presse - Ministère des Finances. « Déclaration conjointe France, Allemagne et Italie sur l'espace », 22 novembre 2022. <https://presse.economie.gouv.fr/22112022-declaration-conjointe-france-allemande-et-italie-sur-lespace/>.
- Denis Stone. « NASA's Experience in Other Transaction Authority to Foster Development ». Présenté à ARPA-E Fusion Programs Annual Meeting, 26 avril 2022. https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2022-05/1110_Stone.pdf.
- Christain Devenport, "The revolution in satellite technology means there are swarms of spacecraft no bigger than a loaf of bread in orbit", *The Washington Post*, 6 avril 2021 ; <https://www.washingtonpost.com/technology/2021/04/06/small-satellites-growth-space/>
- U.S. Department of Defense. « DOD Releases Fiscal Year 2021 Budget Proposal », 10 février 2020. <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2079489/dod-releases-fiscal-year-2021-budget-proposal/https%3A%2F%2Fwww.defense.gov%2FNews%2FReleases%2FRelease%2FArticle%2F2079489%2Fdod-releases-fiscal-year-2021-budget-proposal%2F>.
- Dollé, Jérôme. « L'Espace au service des opérations ». Les cahiers de la Revue Défense Nationale. Comité d'études de défense nationale, 2011.
- Dominique Gallois, Pierre Barthélémy et Philippe Jacqué. « L'Europe spatiale veut mettre les moyens face aux Américains et aux Chinois ». *Le Monde*, 21 novembre 2022. https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/11/21/l-europe-spatiale-veut-mettre-les-moyens-face-aux-americains-et-aux-chinois_6150823_3234.html.
- « Draft Environmental Assessment for the SpaceX Starship and Super Heavy Launch Vehicle at Kennedy Space Center (KSC) ». Federal Aviation Administration, août 2019.
- Erwin, Sandra. « Congress Adds \$1.7 Billion for U.S. Space Force in 2023 Spending Bill ». *SpaceNews*, 24 décembre 2022. <https://spacenews.com/congress-adds-1-7-billion-for-u-s-space-force-in-2023-spending-bill/>.
- ESA. Convention de l'Agence spatiale européenne et Règlement Intérieur du Conseil, Pub. L. No. ESA SP-133 (2019). https://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/SP-1337/SP-1337_FR.pdf.
- « ESA'S Annual Space Environment Report 2022 ». ESA, 22 avril 2022.
- « ESA's Space Environment Report 2021 », s. d. https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_s_Space_Environment_Report_2021.

- « ESPI Report 70 - Evolution of the Role of Space Agencies - Full Report ». European Space Policy Institute (ESPI), octobre 2019.
- « ESPI Yearbook 2021 – Space policies, issues and trends ». European Space Policy Institute (ESPI), juillet 2022. https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2022/07/ESPI-Yearbook-2021-Space-policies-issues-and-trends.pdf?fbclid=IwAR1Run0-E58UlyZk4Ewz330CzwWr6hxiSyN52ZTz1-_ohU7mlqMTrDB-Miw.
- Etherington, Darrell. « Google Cloud Teams up with SpaceX's Starlink for Enterprise Connectivity at Network's Edge ». *TechCrunch*, 13 mai 2021. <https://techcrunch.com/2021/05/13/google-cloud-teams-up-with-spacexs-starlink-for-enterprise-connectivity-at-networks-edge/>.
- Euractiv France, et AFP. « L'UE lance Iris, une constellation de satellites pour sécuriser ses communications et internet – EURACTIV.fr ». *Euractiv*, 18 novembre 2022. <https://www.euractiv.fr/section/avenir-de-lue/news/lue-lance-iris-une-constellation-de-satellites-pour-securiser-ses-communications-et-internet/>.
- European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. et PwC. *Copernicus Market Report: February 2019. Issue 2*. LU: Publications Office, 2019. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/011961>.
- European Union Agency for the Space Programme. « EUSpace Market », 4 mai 2021. <https://www.euspa.europa.eu/european-space/euspace-market>.
- Eutelsat, et OneWeb. « Eutelsat and OneWeb to combine: a leap forward in Satellite Connectivity », s. d. https://www.eutelsat.com/files/PDF/investors/2021-22/CP_EN_Eutelsat_OneWeb_2607.pdf.
- « Eutelsat Strategy Update on the proposed combination with OneWeb ». Eutelsat, s. d.
- Exotrail. « Exotrail and Isar Aerospace sign multiple launch services agreement to break new ground in space mobility », 11 mars 2022. <https://www.exotrail.com/blog/exotrail-and-isar-aerospace-sign-multiple-launch-services-agreement-to-break-new-ground-in-space-mobility>.
- Forrest, Chris. « The Forrester Report: OneWeb's "Valley of Death" ». *SatMagazine*, novembre 2018. <http://www.satmagazine.com/story.php?number=1452687289>.
- Foust, Jeff. « Redwire Completes SPAC Merger ». *SpaceNews*, 2 septembre 2021. <https://spacenews.com/redwire-completes-spac-merger/>.
- . « SpaceX Completes Starship Wet Dress Rehearsal ». *SpaceNews*, 24 janvier 2023. <https://spacenews.com/spacex-completes-starship-wet-dress-rehearsal/>.
- . « SpaceX Gaining Substantial Cost Savings from Reused Falcon 9 ». *SpaceNews*, 5 avril 2017. <https://spacenews.com/spacex-gaining-substantial-cost-savings-from-reused-falcon-9/>.
- Gallois, Dominique. « La perte de Vega-C, un échec sévère pour l'Europe spatiale ». *Le Monde.fr*, 21 décembre 2022. https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/12/21/la-perte-de-vega-c-un-echec-severe-pour-l-europe-spatiale_6155298_3234.html.
- Euroconsult. « Global Market for Commercial Earth Observation Data and Services to Reach \$8 Billion by 2029, Growing from \$4.6 Billion in 2019 », 22 octobre 2020. <https://www.euroconsult-ec.com/press-release/global-market-for-commercial-earth-observation-data-and-services-to-reach-8-billion-by-2029-growing-from-4-6-billion-in-2019/>.
- « Global Positioning System ». In *Wikipedia*, 9 janvier 2023. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Global_Positioning_System&oldid=1132585538.
- Goldstein, Liz. « The Environmental Impacts of the New Space Race ». *Georgetown Environmental Law Review* (blog). Consulté le 25 janvier 2023. <https://www.law.georgetown.edu/environmental-law-review/blog/the-environmental-impacts-of-the-new-space-race/>.

- Goswami, Namrata. « Le programme spatial indien et ses déterminants : implications possibles pour le marché spatial mondial ». *Ifri*, 28 janvier 2022. <https://www.ifri.org/fr/publications/notes-de-lifri/programme-spatial-indien-determinants-implications-possibles-marche>.
- Hamon Beugin, Valentin. « Soyouz, ISS, Mars... Les coopérations spatiales avec la Russie ébranlées par la guerre en Ukraine ». *L'Usine Nouvelle*, 28 février 2022. <https://www.usinenouvelle.com/article/soyouz-iss-mars-les-cooperations-spatiales-avec-la-russie-ebraleees-par-la-guerre-en-ukraine.N1788552>.
- Hardesty, Linda. « Eutelsat, OneWeb Want to Create Hybrid LEO-GEO Satellite Network ». *Fierce Wireless*, 12 octobre 2022, sect. Fierce Wireless Homepage. <https://www.fiercewireless.com/tech/eutelsat-oneweb-want-create-hybrid-leo-geo-satellite-network>.
- Hassan Meddah. « Comment Preligens (ex-Earthcube) veut devenir l'acteur de référence de l'IA pour le renseignement et la Défense ». *L'Usine Nouvelle*, 19 novembre 2020. <https://www.usinenouvelle.com/article/comment-preligens-ex-earthcube-veut-devenir-l-acteur-de-reference-de-l-ia-pour-le-renseignement-et-la-defense.N1030304>.
- Time. « How Much Does GPS Cost? », 21 mai 2012. <https://nation.time.com/2012/05/21/how-much-does-gps-cost/>.
- « Il s'agit d'une constellation de 8 satellites Sentinel. », s. d.
- « Information recueillie dans le cadre de l'enquête industrielle. », s. d.
- Iridium Communications Inc. « Iridium Announces First-Quarter 2022 Results ». Iridium, s. d. <https://investor.iridium.com/2022-04-19-IRIDIUM-ANNOUNCES-FIRST-QUARTER-2022-RESULTS>.
- « Iridium Satellite Constellation ». In *Wikipedia*, 10 janvier 2023. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Iridium_satellite_constellation&oldid=1132706771.
- Defense Industry and Space | European Commission. « Iris²: the new EU Secure Satellite Constellation », s. d. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/eu-space-programme/iriss_en.
- Isabelle Sourbès-Vergier. « L'espace, lieu particulier des rivalités politiques et technologiques ». *Revue Défense Nationale*, n° 851 (juin 2022). <https://www.cairn.info/revue-defense-nationale-2022-6-page-73.htm>.
- Joshua Huminski. « Moving Beyond Assured Access to Space ». *Breaking Défense*, 2 novembre 2021. <https://breakingdefense.com/2021/11/moving-beyond-assured-access-to-space/>.
- Justin Parker. « Understanding Other Transactions, a DOD Contractor's Perspective », 2020. <https://digitalcommons.liberty.edu/doctoral/2462/>.
- NanoAvionics. « KONGSBERG Enters into an Agreement to Acquire Smallsat Manufacturer NanoAvionics », 5 juillet 2022. <https://nanoavionics.com/news/kongsberg-enters-into-an-agreement-to-acquire-smallsat-manufacturer-nanoavionics/>.
- Krisman, Victoria. « World Teleport Association Publishes Top Operator Rankings for 2021 - World Teleport Association ». *World Teleport Association* (blog), 2 février 2022. <https://www.worldteleport.org/news/594359/World-Teleport-Association-Publishes-Top-Operator-Rankings-for-2021.htm>.
- « Kuiper Systems ». In *Wikipedia*, 18 janvier 2023. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kuiper_Systems&oldid=1134353679.

- Challenges. « La France lance un satellite militaire dernière génération », octobre 2021. https://www.challenges.fr/entreprise/aeronautique/la-france-lance-un-satellite-militaire-derniere-generation_786162.
- Lamigeon, Vincent. « Satellites SES: le gros coup de Thales Alenia Space ». *Challenges*, 18 novembre 2021, sect. Aéronautique. https://www.challenges.fr/entreprise/aeronautique/satellites-ses-le-gros-coup-de-thales-alenia-space_789569.
- NASA. « Landsat Science », s. d. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
- Lanusse, Céline. « La dualité civil/militaire de la filière aéronautique et spatial: le défi de l'industrialisation ». *La Tribune*, 1 décembre 2015, sect. Business. <https://objectifaquitaine.latribune.fr/business/2015-12-01/la-dualite-civil/militaire-de-la-filiere-aeronautique-et-spatial-le-defi-de-l-industrialisation.html>.
- Ministère des Armées. « Le ministère des Armées lance le Fonds innovation défense », 21 décembre 2020. <https://archives.defense.gouv.fr/dga/actualite/le-ministere-des-armees-lance-le-fonds-innovation-defense.html>.
- « Le programme Artemis, qui regroupe le développement d'un véhicule spatial, nommé Orion, d'un lanceur (Space Launch System) mais aussi d'une station spatiale en orbite lunaire (Lunar Gateway), a l'ambition de vouloir ramener des humains sur le sol lunaire en 2025. », s. d.
- « L'Espace et la dualité civile et militaire ». Laboratoire de stratégie de l'armement, mars 2004.
- « Leur durée est aussi plus adaptée à la durée de vie des satellites LEO qui est plus courte. », s. d.
- Liberation, et AFP. « Internet haut débit: Arianespace tope avec Amazon pour 18 lancements de satellites ». *Libération*, 6 avril 2022, sect. Espace. https://www.liberation.fr/sciences/espace/internet-haut-debit-arianespace-tope-avec-amazon-pour-18-lancements-de-satellites-20220406_ZDIBWO3MYFDY3O3EREXZDHGJBY/.
- Le Point. « Macron dévoile ses ambitions spatiales », 13 juillet 2019. https://www.lepoint.fr/politique/macron-devoile-ses-ambitions-spatiales-13-07-2019-2324406_20.php.
- « Mais seulement 30% de la valeur totale de fabrication et de lancement estimée par Euroconsult. », s. d.
- Malavialle, Anne-Marie. « Les satellites de communications : des promesses techniques aux réalités politiques et industrielles ». *Hermès* n° 34, n° 2 (2002): 191. <https://doi.org/10.4267/2042/14454>.
- Marquina, Claudia. « How LEO Satellite Technology Can Connect the Unconnected ». World Economic Forum, s. d. <https://www.weforum.org/agenda/2022/02/explainer-how-low-earth-orbit-satellite-technology-can-connect-the-unconnected/>.
- Marrone, Alessandro, et Michele Nones. « The Expanding Nexus between Space and Defence ». *Istituto Affari Internazionali*, 2022.
- Maussion, Florian. « Le retard des nouvelles fusées géantes complique le lancement des satellites ». *Les Echos*, 3 janvier 2023. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/le-retard-des-nouvelles-fusees-geantes-complique-le-lancement-des-satellites-1893396>.
- Memorandum of understanding between the National Aeronautics and Space Administration and the United States Space Force (2020). https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_ussf_mou_21_sep_20.pdf.
- Mérindol, Valérie, et David W. Versailles. « La dualité comme moyen de repenser la position stratégique des firmes ». *Revue Défense Nationale* 780, n° 5 (2015): 46-51. <https://doi.org/10.3917/rdna.780.0046>.

- International GNSS Service. « MGEX Constellations », s. d. <https://igs.org/mgex/constellations/>.
- Miroux, Loïs. « Environmental Limits to the Space Sector's Growth ». *Science of The Total Environment* 806 (1 février 2022): 150862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150862>.
- Miroux, Loïs, Andrew Ross Wilson, et Guillermo J. Dominguez Calabuig. « Environmental Sustainability of Future Proposed Space Activities ». *Acta Astronautica* 200 (1 novembre 2022): 329-46. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.034>.
- Le Monde. « Mission Artemis-1 : le rêve de la conquête spatiale et son prix », 17 novembre 2022. https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/11/17/mission-artemis-1-le-reve-de-la-conquete-spatiale-et-son-prix_6150294_3232.html.
- Moranta, Sebastian. « The Space Downstream Sector: Challenges for the Emergence of a European Space Economy ». Etudes de l'Ifri. Ifri, mars 2022.
- Musk, Elon. Podcast: Interview with SpaceX's Elon Musk | Aviation Week Network. Aviation Week Network, 26 mai 2020. https://aviationweek.com/defense-space/space/podcast-interview-spacexs-elon-musk?fbclid=IwAR2r5igTE78at9T3rh_MDa8i1KFLbgtli54pFzk7VWgflSAqn-nyE2oA-hA.
- NASA. « NASA, DARPA Will Test Nuclear Engine for Future Mars Missions ». *PR Newswire*, janvier 2023. <https://www.prnewswire.com/news-releases/nasa-darpa-will-test-nuclear-engine-for-future-mars-missions-301729418.html>.
- NASA. « NASA - Space Exploration Technologies (SpaceX) ». Brian Dunbar, s. d. <https://www.nasa.gov/offices/c3po/partners/spacex/index.html>.
- Neale, Rick. « OneWeb Satellites Cranking out Two Satellites per Day at Kennedy Space Center Factory ». *Florida Today*. Consulté le 24 janvier 2023. <https://www.floridatoday.com/story/tech/science/space/2022/01/21/oneweb-satellites-look-inside-sci-fi-factory-kennedy-space-center-florida/6172817001/>.
- OECD. « The Space Economy in Figures: How Space Contributes to the Global Economy ». *OECD Publishing*, 2019. <https://doi.org/10.1787/c5996201-en>.
- « OneWeb ». In *Wikipedia*, 23 janvier 2023. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=OneWeb&oldid=1135286419>.
- Inmarsat Corporate Website. « ORCHESTRA, the Communications Network of the Future That Will Deliver Unprecedented Performance and Ground-Breaking New Services for Global Mobility », s. d. <https://www.inmarsat.com/en/about/technology/orchestra.html>.
- U.S. Department of Defense. « Our Forces », s. d. <https://www.defense.gov/About/Our-Forces/>.
- Pachler, Nils, Inigo del Portillo, Edward F. Crawley, et Bruce G. Cameron. « An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband ». In *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 1-7, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473799>.
- Pasco, Xavier. « L'adaptation de la politique spatiale américaine aux changements internationaux ». *Annales des Mines - Réalités industrielles* Mai 2012, n° 2 (2012): 75. <https://doi.org/10.3917/rindu.122.0075>.
- Pellistrandi, Jérôme. « Xavier Pasco : Le nouvel âge spatial – De la guerre froide au New Space ; CNRS Éditions, 2017 ; 192 pages ». *Revue Défense Nationale* 806, n° 1 (2018): 117-18. <https://doi.org/10.3917/rdna.806.0117>.
- Penent, Guilhem. « Governing the Geostationary Orbit Orbital Slots and Spectrum Use in an Era of Interference ». Ifri, janvier 2014.

- Philippe Jacqué. « Bruxelles donne le coup d'envoi d'Iris², sa constellation de satellites concurrente de Starlink ». *Le Monde*, 18 novembre 2022. https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/11/18/bruxelles-donne-le-coup-d-envoi-d-iris-sa-constellation-de-satellites-concurrente-de-starlink_6150455_3234.html.
- Piquard, Alexandre, et Dominique Gallois. « Derrière le Starlink d'Elon Musk, la bataille des constellations de satellites ». *Le Monde.fr*, 13 décembre 2022. https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/12/13/telecommunications-derriere-le-starlink-d-elon-musk-la-bataille-des-constellations-de-satellites_6154134_3234.html.
- Pires, Carlo. « Project Kuiper : les premiers satellites début 2023 ». *Télé Satellite & Numérique*, 13 octobre 2022. <https://www.telesatellite.com/actu/61077-project-kuiper-les-premiers-satellites-debut-2023.html>.
- Pope, Charles. « FY22 Budget Gives Air & Space Forces the Strength to Meet Threats, Roth, Brown, Raymond Tell Senate ». *United States Space Force*, juin 2021. <https://www.spaceforce.mil/News/Article/2651197/fy22-budget-gives-air-space-forces-the-strength-to-meet-threats-roth-brown-raym/https%3A%2F%2Fwww.spaceforce.mil%2FNews%2FArticle%2F2651197%2Ffy22-budget-gives-air-space-forces-the-strength-to-meet-threats-roth-brown-raym%2F>.
- Portillo, Inigo del, Bruce G. Cameron, et Edward F. Crawley. « A Technical Comparison of Three Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband ». *Acta Astronautica* 159 (1 juin 2019): 123-35. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.040>.
- « Preligens | Pioneering AI for a safer world », s. d. <https://www.preligens.com/fr>.
- Primas, Sophie, et Jean-Marie Bockel. « Rapport d'information fait au nom de la commission des affaires économiques et de la commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées sur la politique des lanceurs spatiaux ». Sénat, 19 novembre 2019.
- Sénat. « Proposition de résolution en application de l'article 73 quinquies du Règlement, sur la proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant le programme de l'Union pour une connectivité sécurisée pour la période 2023-2027 (exposé des motifs) », s. d. <http://www.senat.fr/leg/exposes-des-motifs/ppr21-780-expose.html#fn11>.
- « Prospects for Handheld, IoT and M2M Markets, 7th Edition ». Euroconsult, 2021. <https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/prospects-for-l-band-iot-m2m-markets/>.
- European Space Agency. « Qu'est-Ce Que Galileo? », s. d. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Qu_est-ce_que_Galileo.
- « Rapport Ambition New Space 2027 ». Les Assises du New Space, septembre 2022.
- « Rapport sur le marché des nano et micro satellites - Croissance, Tendances, Impact du Covid-19 et Prévisions (2023-2028) ». Mordor Intelligence, 2021. <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/nano-and-micro-satellite-market>.
- « Rapport sur le marché des nano et microsatsellites, perspectives, prévisions (2022-27) », s. d.
- « Recherche duale (civile et militaire) ». République Française, 2019.
- The Economist. « Rising interest rates and inflation have upended investing », 8 décembre 2022. <https://www.economist.com/briefing/2022/12/08/rising-interest-rates-and-inflation-have-upended-investing>.
- Rochefort, Mathilde. « Thales Alenia Space, entreprise stratégique du spatial européen ». *Siècle Digital*, 25 janvier 2023. <https://siecledigital.fr/2023/01/25/thales-alenia-space-entreprise/>.

- Rocket Lab. « Rocket Lab Acquires Space Software Company Advanced Solutions, Inc », s. d. <https://www.rocketlabusa.com/updates/rocket-lab-acquires-space-software-company-advanced-solutions-inc/>.
- Rolland, Olivier. « « L’exploration spatiale joue un rôle important dans la recherche de solutions durables » ». *Le Monde.fr*, 4 janvier 2022. https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/01/04/l-exploration-spatiale-joue-un-role-important-dans-la-recherche-de-solutions-durables_6108108_3232.html.
- Safran. « Safran Acquires Syrlinks to Consolidate Leadership in Earth-Space Communications Equipment », 4 novembre 2022. <https://www.safran-group.com/presroom/safran-acquires-syrlinks-consolidate-leadership-earth-space-communications-equipment-2022-11-04>.
- « Satellites Espions ». In *Encyclopædia Universalis*. Consulté le 24 janvier 2023. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/satellites-espions/>.
- « Satellites to be Built and Launched, 25th edition ». Euroconsult, dcembre (maj 2022). <https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/satellites-to-be-built-launched-new/>.
- scr00chy. « List of SpaceX Contracts ». *ElonX.Net* (blog), 11 juillet 2019. <https://www.elonx.net/list-of-spacex-contracts/>.
- Selding, Peter B. de. « Dish Network Battles OneWeb and SpaceX for Ku-Band Spectrum Rights ». *SpaceNews*, 9 juin 2016. <https://spacenews.com/dish-network-battles-oneweb-and-spacex-for-ku-band-spectrum-rights/>.
- . « SpaceX’s Reusable Falcon 9: What Are the Real Cost Savings for Customers? » *SpaceNews*, 25 avril 2016. <https://spacenews.com/spacexs-reusable-falcon-9-what-are-the-real-cost-savings-for-customers/>.
- Sheetz, Michael. « Here’s Everything Elon Musk Told Reporters about the Reusable Rocket That Will Fly Twice within 24 Hours ». *CNBC*, 11 mai 2018. <https://www.cnbc.com/2018/05/11/full-elon-musk-transcript-about-spacex-falcon-9-block-5.html>.
- . « NASA Taps SpaceX for 5 More Astronaut Missions Worth \$1.4 Billion ». *CNBC*, 31 août 2022. <https://www.cnbc.com/2022/08/31/nasa-awards-spacex-1point4-billion-in-contracts-for-5-more-astronaut-missions.html>.
- . « SpaceX Is Manufacturing 120 Starlink Internet Satellites per Month ». *CNBC*, 20 août 2020. <https://www.cnbc.com/2020/08/10/spacex-starlink-satellite-production-now-120-per-month.html>.
- . « SpaceX Unveils “Starshield,” a Military Variation of Starlink Satellites ». *CNBC*, 5 décembre 2022. <https://www.cnbc.com/2022/12/05/spacex-unveils-starshield-a-military-variation-of-starlink-satellites.html>.
- Singh, Jagmeet. « Amazon Eyes Bringing Satellite Internet Business Project Kuiper to India ». *TechCrunch*, 21 juillet 2022. <https://techcrunch.com/2022/07/21/amazon-project-kuiper-satellite-broadband-india-launch/>.
- Skibba, Ramin. « The Black Carbon Cost of Rocket Launches ». *Wired*, 16 juin 2022. <https://www.wired.com/story/the-black-carbon-cost-of-rocket-launches/>.
- « SkySat ». In *Wikipedia*, 14 janvier 2023. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=SkySat&oldid=1133660876>.
- Smith, Rich. « Europe’s New Space Rocket Is Incredibly Expensive ». *The Motley Fool*, 10 novembre 2020, sect. investing. <https://www.fool.com/investing/2020/11/10/europe-space-rocket-incredibly-expensive-airbus/>.

- World Economic Forum. « Space Sustainability Rating », s. d. <https://www.weforum.org/projects/space-sustainability-rating/>.
- Space X. « System Engineering: A Traditional Discipline in a Non-traditional Organization ». s. d. http://sewiki.ru/images/0/00/CASE2012_2-4_Muratore_presentation.pdf?fbclid=IwAR3lhoftHM2UvRraYn_8sauavUESvd_5S7Kkbtr2yNbvRq-CGCBmwLKzALU.
- Spaceflight. « Spaceflight - Launch Services, Dedicated and Rideshare », s. d. <https://spaceflight.com/>.
- SpaceX. « SpaceX - Starshield », s. d. <https://www.spacex.com/starshield/>.
- SpaceX [@SpaceX]. « Falcon 9's First Stage Has Landed on the Just Read the Instructions Droneship – Completing This Booster's Second Flight in 21 Days <https://t.co/8jreRAApsX> ». Tweet. *Twitter*, 29 avril 2022. <https://twitter.com/SpaceX/status/1520155013661659137>.
- Le Monde.fr. « Spatial : la souveraineté européenne menacée », 29 décembre 2022. https://www.lemonde.fr/idees/article/2022/12/29/spatial-la-souverainete-europeenne-menacee_6156017_3232.html.
- Ministère de l'Economie et des Finances. « Spatial : les lauréats de la partie « Innovation France » annoncés », 3 août 2022. <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/spatial-laureats-innovation-France#>.
- « Starlink ». In *Wikipédia*, 26 janvier 2023. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Starlink&oldid=200796680>.
- « Starlink », s. d. <https://www.starlink.com>.
- « Start-Up Space: Update on investment in commercial space ventures ». Bryce Tech, 2020. https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2020.pdf.
- « Start-Up Space: Update on investment in commercial space ventures ». Bryce Tech, 2022. https://brycetechnology.com/reports/report-documents/Bryce_Start_Up_Space_2022.pdf.
- « State of the Satellite Industry Report 2015 ». Bryce Tech, 2015.
- « State of the Satellite Industry Report 2021 ». Bryce Tech, 2021. https://brycetechnology.com/reports/report-documents/SIA_SSIR_2021.pdf.
- « State of the Satellite Industry Report 2022 ». Bryce Tech, 2022. https://brycetechnology.com/reports/report-documents/SIA_SSIR_2022.pdf.
- « State of the Space Industrial Base 2021. Infrastructure & Services for Economic Growth & National Security ». US Space Force, Defense Industrial Unit, Air Force Research Laboratory, 2021. https://assets.ctfassets.net/3nanhbfr0pc/43TeQTAmDYrym5DTrhjd3/1218bd749befdde511ac2c900db3a43b/Space_Industrial_Base_Workshop_2021_Summary_Report_-_Final_15_Nov_2021.pdf.
- « Stratégie spatiale de défense ». Ministère des Armées, 2019. <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/194000642.pdf>.
- Surya Gablin Gunasekara. « “Other transaction” authority : NASAs dynamic acquisition instrument for the commercialization of manned spaceflight or cold war relic ? » *Public Contract Law Journal* 40, n° 4 (2011): 893-909.
- TASCH, Olivier. « La facture du nouveau satellite militaire s'alourdit ». *Virgule*, 1 avril 2020, sect. Économie. <https://www.wort.lu/fr/economie/la-facture-du-nouveau-satellite-militaire-s-alourdit-5e84a294da2cc1784e35a804>.
- « The New IRISS Constellation Will Be Beneficial to EU Citizens in Several Ways, Find out 5 of Them! », 29 novembre 2022. <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/new-iriss-constellation-will-be-beneficial-eu-citizens-several-ways-find-out-5-them>.

- « The Space Economy Report 9th edition ». Euroconsult, 2022. <https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/space-economy-report/>.
- Undseth, Marit, Claire Jolly, et Mattia Olivari. « Space Sustainability: The Economics of Space Debris in Perspective ». Vol. 87. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers. Editions OCDE, Paris, 8 avril 2020. <https://doi.org/10.1787/a339de43-en>.
- Vance, Ashlee. *Elon Musk: Tesla, Paypal, SpaceX : l'entrepreneur qui va changer le monde*. Traduit par Michel Le Séac'h. Edition enrichie. Paris: Eyrolles, 2017.
- Inmarsat Corporate Website. « Viasat and Inmarsat to Combine, Creating a New Leading Global Communications Innovator », 8 novembre 2021. <https://www.inmarsat.com/en/news/latest-news/corporate/2021/viasat-inmarsat-to-combine.html>.
- Vincent, Elise, Alexandre Piquard, et Cédric Pietralunga. « Comment Starlink et les constellations de satellites d'Elon Musk changent la guerre ». *Le Monde.fr*, 15 décembre 2022. https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/12/15/starlink-et-les-constellations-de-satellites-nouvel-enjeu-militaire_6154463_3234.html.
- Vitard, Alice. « SpaceX s'offre la start-up Swarm Technologies spécialisée dans les picosatellites dédiés à l'IoT ». *L'Usine Nouvelle*. 10 août 2021. <https://www.usine-digitale.fr/article/spacex-s-offre-la-start-up-swarm-technologies-specialisee-dans-les-picosatellites-dedies-a-l-iot.N1131864>.
- Wall, Mike. « Space Force Gets \$15.4 Billion in 2021 Budget Request ». *Space*, 10 février 2020. <https://www.space.com/space-force-2021-budget-request.html>.
- Xavier Pasco. « L'évolution du contexte spatial américain ». *Annales des Mines - Réalités industrielles*, F.F.E, mai 2019, 21-24.
- Yembrick, John. « NASA Awards Space Station Commercial Resupply Services Contracts ». NASA. décembre 2008. https://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/dec/HQ_C08-069_ISS_Resupply.html?fbclid=IwAR320XNaXwz2IEI2QqlZfo0OpY-aPdSGXBJVkJCsTugydWRJaEK-RIw7KvEY.
- Zajackowski, Diane, et Nicolas Maubert. « L'émergence et le développement du New Space aux États-Unis ». Bureau du CNES et Service Spatial de l'Ambassade de France à Washington, juin 2022. https://france-science.com/wp-content/uploads/2022/07/Note-th%C3%A9matique_Emergence-et-developpement-du-New-Space-americain.pdf?fbclid=IwAR2JjS4fK-apj2qqfD8fz_5p68i-jY7RbSTf6Ny4wP_UZyhTtrSUzdKpW38.
- Zander, Jason. « New Azure Space Products Enable Digital Resiliency and Empower the Industry ». *Microsoft Azure Blog* (blog), septembre 2022. <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/new-azure-space-products-enable-digital-resiliency-and-empower-the-industry/>.
- Zapata, Edgar. « An Assessment of Cost Improvements in the NASA COTS/CRS Program and Implications for Future NASA Missions ». NASA, s. d.