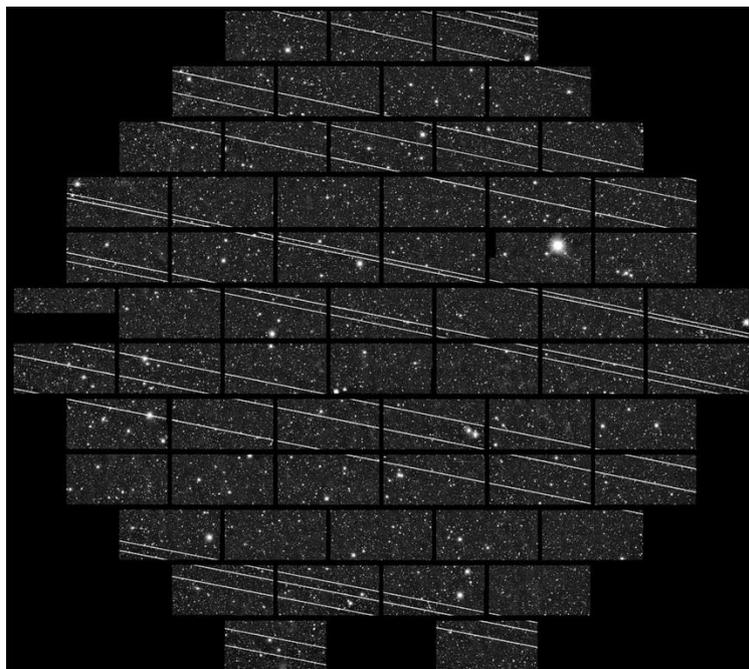


Congestion orbitale, pollution lumineuse, désintégration... Starlink, une menace pour la recherche et l'environnement ?



Eyal Benaroché
Ludovic Lepic
Mathias Setterblad
Raphaël Tribot

Simon Dubail
Augustin Goubault
Guillaume Taret
Maksim Tsekot

Cette publication a été réalisée par des étudiants en troisième année du cycle ingénieur de Mines Paris PSL Research University. Il présente le travail réalisé dans le cours intitulé « Descriptions de controverse », qui a pour objectif d'introduire les étudiants à l'univers incertain de la recherche scientifique et technique et de les sensibiliser aux enjeux de la participation citoyenne.

Mines Paris décline toute responsabilité pour les erreurs et les imprécisions que peut contenir cet article. Vos réactions et commentaires sont bienvenus. Pour signaler une erreur, réagir à un contenu ou demander une modification, merci d'écrire à la responsable de l'enseignement : madeleine.akrich@mines-paristech.fr.

■ Introduction

Depuis le premier satellite artificiel en 1957, l'espace est devenu une zone d'influence, de recherche scientifique, d'applications militaires et de solutions civiles qui sont aujourd'hui essentielles au bon fonctionnement de nos sociétés – citons par exemple le GPS, aujourd'hui intégré dans un très grand nombre de produits technologiques du quotidien.

Traditionnellement, l'espace est un domaine de projection de la puissance militaire des États, qui demeurent les seuls en mesure d'envoyer des objets dans l'espace. Cependant, depuis le début des années 2000, un nombre restreint d'acteurs privés investissent l'espace à leur tour, avec pour certains de véritables succès : en particulier, l'entreprise d'Elon Musk SpaceX, qui grâce à ses lanceurs réutilisables est devenu partenaire privé de choix pour la NASA et est chargé de la mise en orbite de nombreux satellites comme de la conception des capsules spatiales pour les futures missions lunaires de la NASA. Aux côtés de SpaceX, de nombreuses entreprises (Kuiper, Blue Horizon, OneWeb, etc.), pour beaucoup américaines, se lancent à la conquête de l'espace désormais perçu comme un marché nouveau au grand potentiel, et sur lequel ceux qui sauront se positionner le plus vite auront le plus de succès. De fait, de nouvelles formes d'exploitation de l'espace émergent ; un des exemples les plus frappants est celui des méga-constellations.

Les méga-constellations sont un ensemble de satellites organisés en réseaux et qui orbitent tous autour de la Terre en communiquant entre eux. Ils sont en particulier utilisés afin de fournir un accès internet peu importe là où on se situe sur Terre, grâce à la large couverture permise par le réseau. Les clients de ces méga-constellations peuvent ensuite se connecter à internet depuis n'importe où, moyennant l'achat d'une antenne personnelle et d'un abonnement au service. Cette solution offre un moyen robuste et fiable d'accéder à une connexion internet de bonne qualité depuis n'importe où dans le monde, même dans les zones dépourvues de connectivité via les autres technologies de communication (la 5G par exemple). Pionnière en la matière, l'entreprise Starlink, propriété d'Elon Musk, est la première à déployer sa méga-constellation dès 2019, et aujourd'hui fonctionnelle. À terme, il est envisagé que cette constellation comprenne 42000 satellites pour garantir une couverture maximale à ses usagers. Ces dernières années, des concurrents directs de Starlink ont envoyé leurs satellites en orbite, ou du moins ont annoncé leurs ambitions en termes de constellation : OneWeb possède ainsi environ 650 satellites, le projet Kuiper d'Amazon envisage à terme 3000 satellites (deux prototypes en orbite pour l'instant), tandis que Qianfan, concurrent chinois, a commencé son déploiement en août 2024 avec comme objectif 12000 satellites en orbite in fine. Les méga-constellations n'en sont donc qu'à leurs balbutiements, alors que les déploiements se succèdent les uns aux autres.

L'émergence de Starlink et de son projet aux proportions énormes s'est accompagnée d'un engouement du public pour ces constellations de satellites. On constate ainsi une augmentation au cours du temps des articles traitant du sujet. En effet, nous avons effectué une recherche dans la base de données d'Europresse sur toute la presse francophone avec les mots clefs « LEAD= satellite* & constellation », afin de conserver tous les articles dont le premier paragraphe traite de constellation de satellites. À partir des résultats de cette recherche (figure 1), on remarque que sur la base d'environ 17.000 d'articles, les constellations de satellites enregistrent un premier pic médiatique en 2015, date de la création de Starlink, et un second en 2019, année de la première mise en orbite de leurs satellites. Les constellations de satellites sont donc graduellement de plus en plus discutées par les médias, et d'autant plus à la faveur des événements géopolitiques auxquels elles sont liées : ainsi, à partir des mots clefs « LEAD= satellite* & constellation & TEXT= armée | militaire* | guerre* », on obtient le graphe de la figure 2. Le fort pic médiatique de 2022 correspond à la guerre en Ukraine : en effet, la méga-constellation de Starlink joue un rôle essentiel d'information et de connectivité dans ce conflit armé. Ainsi, au-delà de l'intérêt médiatique pour les constellations de satellites en tant que prouesses technologiques, leurs liens avec de nombreux domaines et enjeux modernes, comme l'environnement ou la géopolitique, font des méga-constellations un objet médiatique de plus en plus discuté.



Figure 1 : Graphe du nombre de documents faisant référence aux termes satellite et constellation dans la base de données d'Europresse au cours du temps.

Source : base de données Europresse. Mot-clef utilisé : « LEAD= satellite* & constellation ».



Figure 2 : Graphe du nombre de documents faisant référence aux termes satellite et constellation et armée, militaire ou guerre dans le texte dans la base de données d'Europresse au cours du temps.

Source : base de données Europresse. Mot-clef utilisé : « LEAD= satellite* & constellation & TEXT= armée | militaire* | guerre* ».

En effet, le déploiement effréné des constellations et en particulier de Starlink ne rencontre pas l'assentiment de tous : au-delà des acteurs traditionnels du spatial (États, agences spatiales, constructeurs, et maintenant entreprises privées), d'autres types d'acteurs, que ce soit des institutions publiques, des laboratoires scientifiques ou des collectifs citoyens et associations prennent possession du sujet pour en souligner les limites et impacts.

Pour mieux comprendre l'évolution de ces discussions, une analyse quantitative des cooccurrences des termes présents dans les publications académiques permet d'identifier les principaux sujets abordés autour des satellites en orbite basse et des méga-constellations comme Starlink (figure 3).

Cette analyse permet de dégager plusieurs thématiques distinctes : en premier lieu, la question des **débris spatiaux et de la durabilité orbitale** est un axe majeur autour duquel se construit la controverse autour de Starlink. En effet, l'envoi en orbite de milliers de satellites supplémentaires est directement associé à une augmentation des risques de pollution orbitale en raison du nombre de débris et d'objets au sens large orbitant autour de la Terre. Enjeu bien identifié de longue date par tous les acteurs, la limitation du nombre de débris en orbite est source de débats importants entre l'entreprise Starlink et les autres acteurs souhaitant limiter le nombre de débris.

Par ailleurs, l'analyse met en valeur la question des **perturbations géomagnétiques et environnementales**. L'impact des constellations sur l'environnement reste en effet fortement discuté entre entreprises qui minimisent les conséquences sur l'environnement et proposent des solutions, et associations et scientifiques qui présentent des indices suggérant que les risques ne sont pas nuls.

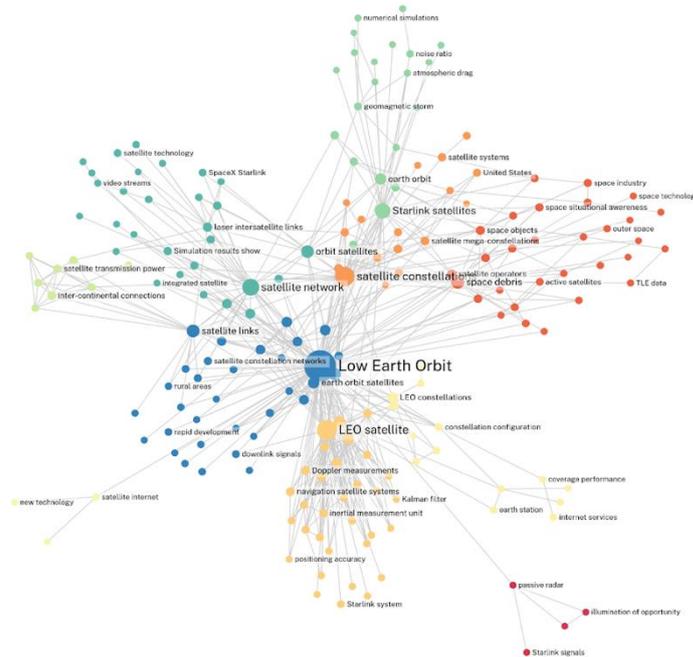


Figure 3 : analyse quantitative des cooccurrences des termes présents dans les publications académiques au sujet des méga-constellations.

Source : analyse quantitative de la base de données Scopus

De même, l'**impact des constellations sur la pollution lumineuse du ciel nocturne** se dégage comme un axe de controverse : l'envoi de satellites contribue à la pollution lumineuse du ciel nocturne, et l'impact de Starlink avec ses milliers de satellites est dès lors dénoncé par associations et ONG. En particulier, les satellites Starlink ont un impact extrêmement important sur la recherche scientifique et l'observation du ciel, et à ce titre menacent la possibilité des observatoires d'avoir accès à leur sujet d'étude. Des membres de la communauté scientifique, comme le NOIRLab par exemple, analysent les conséquences de l'activité de Starlink et l'efficacité des solutions que l'entreprise propose pour réduire son impact.

À ces différents sujets thématiques s'ajoutent des domaines exclusivement scientifiques, mais tout de même remarquables par l'analyse quantitative, comme les recherches explorant les **interconnexions laser et les réseaux satellitaires**, ou encore **la distribution des interférences et performances des constellations LEO (Low Earth Orbit)**. Ces domaines, bien qu'étroitement liés au sujet des méga-constellations, soulèvent uniquement des questions d'ordre scientifique. Ils ne seront donc pas abordés dans cet article.

La méga-constellation de satellites Starlink, tout comme ses concurrents, sont donc à l'origine de questionnements de nature variée. Que ce soit au sujet des débris dans l'atmosphère, des conséquences environnementales ou de la pollution lumineuse et des impacts plus larges sur la société civile, tous les acteurs concernés par le sujet, de l'entreprise Starlink elle-même aux collectifs de citoyens, présentent des points de vue variés et souvent en opposition, qui témoigne d'une véritable controverse. Si l'arrivée agressive de Starlink (de par la rapidité de son déploiement) est source de réticence et d'interrogations, le narratif mis en avant par l'entreprise de progrès scientifique et d'un service utile et essentiel dans la lutte contre la fracture numérique séduit et cristallise les tensions.

Ainsi, **comment appréhender les conséquences multiples des méga-constellations comme Starlink, à la fois au niveau environnemental et au niveau sociétal, et comment se positionnent les acteurs à ce sujet ? Les constellations de satellites sont-elles une menace pour la recherche et l'environnement ? Les bénéfices avancés par l'entreprise coïncident-ils avec la réalité et justifient-ils les conséquences d'un déploiement aussi agressif d'objets en orbite ?**

Pour explorer ces questions et la controverse autour des méga-constellations comme Starlink, nous démarrons notre étude par les domaines les plus scientifiques, pour progressivement étendre notre analyse aux sujets de société associés à la question des satellites.

La question du passage à échelle est ainsi le premier grand enjeu de cette controverse : face à autant de nouveaux satellites déployés, les approches de préservation des orbites d'une accumulation de débris varient d'un acteur à l'autre. Au-delà de la simple question des débris spatiaux, les conséquences environnementales de méga-constellations sont un sujet particulièrement disputé : le manque de données scientifiques nécessaires à l'établissement d'un cadre clair et consensuel est un des éléments-clé de la controverse. Les enjeux ne sont, pour autant, pas qu'environnementaux : l'impact sur la recherche scientifique des constellations, tout comme sur la société en général, aboutit à des questionnements plus larges sur la pertinence de ces technologies dans nos sociétés. Enfin, la question de la régulation de ces méga-constellations se pose sur tous les sujets que cette controverse aborde : là encore, les positions contraires des entreprises, États et institutions illustrent d'un point de vue juridique et réglementaire la controverse toute entière.

■ Les enjeux du passage à l'échelle : débris spatiaux, durabilité orbitale et collisions

De vastes étendues orbitales peuplées d'objets en mouvement : l'espace n'est pas qu'une autoroute de satellites actifs. Autour de notre planète gravitent également des fragments d'engins désuets, des débris issus de collisions passées ou d'étages de fusées abandonnés. Le nombre de satellites actifs a explosé, passant de 6 800 en 2022 à plus de 10 200 fin 2024¹. La croissance fulgurante de ce ballet chaotique accentue les risques de congestion et de collisions. Comment gérer cet encombrement croissant sans compromettre l'exploration et la durabilité de l'environnement spatial ?

■ L'espace, une poubelle géante ? Entre pollution et congestion orbitale

Les débris spatiaux désignent l'ensemble des objets artificiels en orbite autour de la Terre qui ne remplissent plus aucune fonction utile. Cela inclut des fragments de tailles variées allant du plus large comme des satellites (artificiels) entiers ayant achevé leurs missions et des étages de lanceurs spatiaux aux plus petits comme des morceaux résultant de collisions entre plusieurs débris. Ces débris, même de taille infime, représentent un danger significatif pour les satellites opérationnels et les missions spatiales en raison de leur vitesse extrêmement élevée et la traque de ces derniers peut s'avérer particulièrement compliquée.

À ce jour, l'agence Spatiale Européenne (ESA) a recensé 36 000 objets de plus de dix centimètres dans l'espace², principalement concentrés sur la zone d'orbite basse, moins de 2000 km d'altitude et la zone d'orbite géostationnaire, située à 36 000 km. Les éléments de moins de 10 cm ne sont, quant à eux, pas considérés, bien qu'ils soient également très dangereux, puisqu'ils ne sont pas détectables.

Mais même si les débris sont très nombreux, il y a beaucoup de place dans l'espace extra-atmosphérique. Comme nous l'explique en entretien un ancien chercheur du CNES,

« Rapportée uniquement au volume disponible en haute atmosphère, cette quantité de satellites et de débris spatiaux représente seulement l'équivalent d'environ deux bouteilles dans la mer Méditerranée »

La quantité de débris ne semble donc pas être une préoccupation. Cependant, cette formulation ne prend pas en compte que la répartition des débris dans l'espace n'est pas homogène, ils sont très concentrés dans certaines zones, et qu'ils se déplacent à grande vitesse. Par exemple, ce même chercheur nous a expliqué qu'au niveau des pôles, il existe un point de congestion majeur de la constellation de OneWeb, un concurrent de Starlink, où un satellite passe en moyenne toutes les 9 secondes.

Le problème n'est donc pas, selon lui, un manque de place disponible, mais plutôt lié à la mobilité des débris, leur vitesse dangereuse et leur persistance en orbite. Même les débris en orbite à moins de 400 km d'altitude mettent une vingtaine d'années à se désintégrer dans l'atmosphère en raison de leur lente perte de vitesse³. Cette durée de vie prolongée, combinée à l'absence de solutions efficaces de recyclage ou de destruction et à des pratiques de gestion limitées, rend la croissance des débris spatiaux particulièrement préoccupante, surtout face à l'accélération des lancements.

¹ ESA. (2024, septembre 20). *Space debris by the numbers*. Consulté le 10 décembre 2024, à l'adresse https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers

² CNES. (s. d.). *Les débris spatiaux*. Consulté le 12 décembre 2024, à l'adresse <https://cnes.fr/dossiers/debris-spatiaux>

³ CNES. (2024, juillet 2). *Débris spatiaux, un risque à la loupe*. Consulté le 12 décembre 2024, à l'adresse <https://cnes.fr/actualites/debris-spatiaux-un-risque-loupe>



Figure 4 : Illustration de tous les objets (débris et satellites actifs) de plus de 1 centimètre en orbite autour de la Terre.
Source : ESA, European Space Agency (animation)

Ce problème est parfois même accentué par l'envoi de missiles, par certaines puissances militaires nationales, notamment par les États-Unis, la Chine et la Russie, représentant en 2022 près de 87% de la population orbitale, avec une large domination américaine pour les satellites, mais une répartition plus équilibrée pour les débris⁴ (voir figure 5). En orbite haute, au-delà de 800 km, un satellite hors d'usage ou un débris peut rester en orbite pendant plusieurs décennies, voire même plusieurs siècles avant de redescendre naturellement vers la Terre. Cette persistance prolonge l'existence d'une zone stagnante où les débris se multiplient et surpassent en nombre les satellites actifs.

Pour limiter cette accumulation dans les orbites hautes et exploiter les zones de meilleures performances, les opérateurs satellitaires privilégient désormais des altitudes plus basses, généralement inférieures à 600 km. À ces altitudes, l'atmosphère terrestre exerce une résistance qui permet un nettoyage progressif des débris. Cette stratégie est notamment adoptée par Starlink. Toutefois, même ces orbites plus basses commencent à subir une congestion croissante. En témoigne une situation inédite :

« Pour la première fois dans l'histoire, un opérateur [OneWeb] a choisi son orbite en fonction des débris et non de ses performances »⁵

Cette concentration croissante de satellites dans les orbites basses s'accompagne d'un nombre d'envois toujours plus important, accentuant la pression sur ces zones. Starlink constitue un exemple frappant de cette dynamique. Depuis le début des lancements en mai 2019, le nombre de satellites en orbite n'a cessé de croître. Alors qu'environ 60 satellites étaient initialement lancés par mission, leur déploiement s'est intensifié pour atteindre plus de 3 000 satellites en orbite à la fin de 2022 et plus de 6 900 en fonctionnement fin 2024, soit plus de 7 500

⁴ Gallois, D., & Barthélémy, P. (2022, décembre 16). L'espace, une gigantesque poubelle de débris spatiaux au-dessus de nos têtes. *Le Monde*.

⁵ Christophe Bonnal, ancien chercheur au CNES, cité dans l'article de la note 5.

satellites lancés⁶. La croissance rapide du nombre d'objets stellaires, soutenue par les méga-constellations visant à fournir une couverture Internet mondiale, illustre l'accélération sans précédent des lancements. Toutefois, elle accentue les risques de congestion et de collisions en orbite basse. Selon Hugh Lewis, directeur du groupe de recherche en astronautique de l'Université de Southampton, au Royaume-Uni, les satellites de Starlink à eux seuls sont impliqués, en 2021, dans environ 1 600 rapprochements critiques entre deux engins spatiaux chaque semaine, soit près de 50 % de tous les incidents de ce type. Ces rapprochements incluent des situations où deux engins spatiaux passent à moins de 1 kilomètre l'un de l'autre, augmentant significativement les risques de collisions. En comparaison, OneWeb, opérant près de 250 satellites en 2021, était impliqué dans environ 80 passages rapprochés chaque semaine avec des satellites d'autres opérateurs⁷.

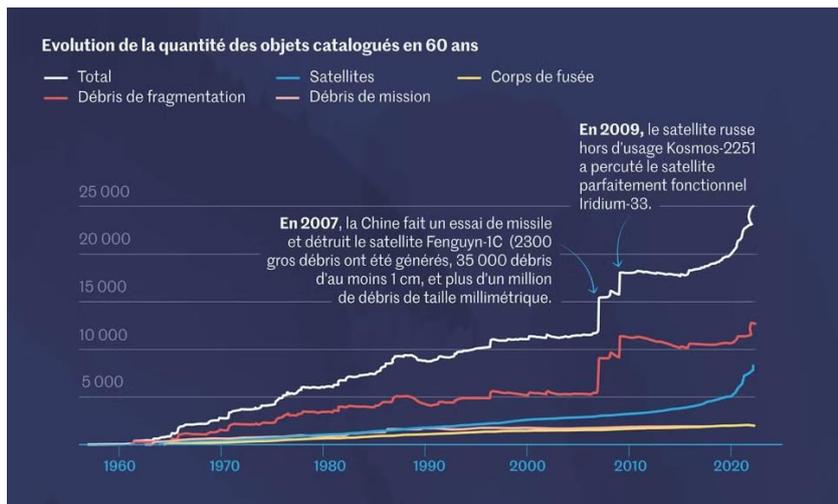


Figure 5 : évolution de la quantité des objets catalogués en 60 ans

Source : ESA, Centre national d'études spatiales, NASA Space Debris Quarterly News ; Infographie : Le Monde, Victoria Denys

▪ Quelles réponses face aux risques de collision ?

En 1978, un consultant de la NASA, Donald Kessler, donna un nom aux conséquences qui pourraient survenir si le volume de débris spatiaux en orbite basse atteignait un certain seuil. Selon ce "syndrome de Kessler", les collisions en chaîne augmenteront de façon exponentielle le nombre de débris, rendant les orbites basses impraticables. Ce scénario ne s'est pas encore concrétisé. Cependant, comme l'ont souligné les membres de l'Académie des sciences, il est crucial de déterminer précisément le moment où il pourrait survenir⁸.

D'un point de vue technique, les potentielles collisions qui découlent de cette congestion constituent un risque important pour l'ensemble des acteurs. D'une part, la vitesse des objets en orbite est telle qu'une collision entraîne nécessairement des impacts sévères, et ce, peu importe la taille des objets en contact. En effet, d'après

⁶ Pultarova, T., Dobrijevic, D., & Mann, A. (2022, avril 14). *Starlink satellites : Facts, tracking and impact on astronomy*. Space.Com. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>

⁷ Pultarova, T. (2021, août 20). *Starlink satellites responsible for over 50% of close encounters in space*. Consulté le 4 janvier 2025, à l'adresse <https://www.space.com/spacex-starlink-satellite-collision-alerts-on-the-rise>

⁸ Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. (2024). *Les débris spatiaux* (Les Notes Scientifiques de l'Office 44).

Christophe Bonnal⁹, un débris en aluminium d'un millimètre de diamètre a la même force qu'une boule de bowling lancée à 100 km/h. Outre l'intensité des chocs, c'est avant tout le nombre d'objets dans l'espace qui préoccupe les centres de recherche comme le CNES, les agences spatiales européennes et les autres opérateurs de satellites¹⁰.

Certains acteurs privés du spatial comme SpaceX, qui assurent que le risque de collisions est complètement maîtrisé, présentent un discours différent. Elon Musk défend un risque infiniment faible de collisions de ses satellites. En effet, Starlink affirme contrôler grâce à des logiciels exploitant l'IA la trajectoire de ses satellites en utilisant des manœuvres d'évitement, une démarche de plus en plus courante. Dans son rapport semi-annuel pour la *Federal Communications Commission* (FCC) américaine du 1er juillet 2024¹¹, Starlink affirme effectuer des manœuvres d'évitement dès lors que le risque de collision avec un objet en orbite dépasse une chance sur un million. Ce chiffre serait, selon SpaceX, bien supérieur à la norme actuelle employée dans l'industrie, qui est autour d'une chance sur 10 000. En effet, chez OneWeb, d'après un de ses anciens ingénieurs avec qui nous avons eu un entretien :

« Le seuil de collision pour lequel on réagit est de 1 chance sur 10 000. En dessous de 2e-5, on ne regarde pas, »¹²

En revanche, il reste très difficile de vérifier l'exactitude du seuil de collision donné par SpaceX. Ce haut niveau d'automatisation, dans la prise de décision et d'exécution, distingue Starlink des autres opérateurs : en cas de risque de collision, qui est calculé par les algorithmes, les satellites planifient et exécutent eux-mêmes les manœuvres d'évitement. Cela permet à Starlink d'alléger le personnel affecté aux procédures plus traditionnelles d'évitement de collisions, en particulier lorsqu'il s'agit d'un potentiel impact avec un satellite étranger à Starlink.

« Au départ, on s'envoyait des mails. Les algorithmes d'évitement des satellites Starlink posent problème alors qu'avant il y avait une chaîne de commandement bien structurée. »¹³

D'après ce même ingénieur, le processus d'évitement requiert une grande coordination en interne comme en externe : périodes d'astreintes, réactions dans les 24 à 36 heures après alerte, vérification des calculs dans les quatre heures après la manœuvre, échanges avec les parties prenantes...

Selon le rapport de SpaceX déposé auprès de la FCC, les satellites Starlink ont effectué un peu moins de 50 000 manœuvres d'évitement entre le 1^{er} décembre 2023 et le 31 mai 2024 pour éviter des approches potentiellement dangereuses avec d'autres engins spatiaux et des débris orbitaux. On constate ainsi une véritable différenciation dans l'approche du problème des collisions entre Starlink et les autres acteurs du spatial. Ces manœuvres anticollision reflètent l'émergence de problèmes de communication entre acteurs spatiaux, en particulier provenant de pays différents, et l'intensification des activités spatiales dont Starlink est incontestablement responsable.

Par ailleurs, cette nouvelle approche n'est pas sans risques: le 2 septembre 2019, l'ESA a dû effectuer une manœuvre avec son satellite Aeolus afin d'éviter une collision potentielle avec l'un des engins de la constellation Starlink. Cet incident, survenu alors que Aeolus était en orbite depuis un an déjà, met en lumière les tensions qui

⁹ Gallois, D., & Barthélémy, P. (2022, décembre 16). L'espace, une gigantesque poubelle de débris spatiaux au-dessus de nos têtes. *Le Monde*.

¹⁰ Lehoucq, R., & Graner, F. (2020, septembre 5). Constellation Starlink : La « pollution spatiale » d'Elon Musk. *La Tribune*. Consulté le 12 novembre 2024, à l'adresse <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/constellation-starlink-la-pollution-spatiale-d-elon-musk-855739.html?id=19581449512088>

¹¹ FCC *International Communications Filing System*. (s. d.). Consulté le 23 novembre 2024, à l'adresse https://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/related_filing.hts?f_key=-443498&f_number=SATMOD2020041700037

¹² Entretien avec un ancien ingénieur de chez OneWeb

¹³ Entretien avec un ancien ingénieur de chez OneWeb

peuvent découler de la très forte autonomie de Starlink sur les questions de collision. En particulier, l'ESA reproche une absence de réactivité de la part de Starlink, qui serait d'autant plus responsable car le satellite Starlink 44, arrivé bien après Aeolus sur une orbite (320 km) qui n'est pas l'orbite habituelle de Starlink (550 km), est bien plus petit que le satellite européen. Le responsable de la sécurité spatiale à l'ESA s'est exprimé sur le sujet :

« Cet exemple montre qu'en l'absence de règles de circulation et de protocoles de communication, l'évitement des collisions dépend entièrement du pragmatisme des opérateurs concernés [...] Aujourd'hui, cette négociation se fait par l'échange d'e-mails – un processus archaïque qui n'est plus viable alors que le nombre croissant de satellites dans l'espace entraîne une augmentation du trafic spatial. »¹⁴

Le groupe américain a réagi dans un communiqué plusieurs heures après l'incident pour préciser qu'un simple « bug de messagerie » l'aurait empêché de contacter l'ESA suite au message de l'US Air Force le prévenant d'une augmentation de probabilité de collision. Outre la question des rapports de force, ce genre de situations soulève des enjeux économiques car la manœuvre d'évitement, qui utilise du propergol, réduit la durée de vie du satellite de celui qui fait la manœuvre.¹⁵

De la même manière, en juillet et octobre 2021, la station spatiale chinoise Tiangong a été contrainte d'effectuer des manœuvres d'évitement à deux reprises, alors que des astronautes chinois s'y trouvaient. Cependant, aucune notification d'urgence n'a été émise, ce qui soulève des questions sur les critères spécifiques de SpaceX quant au risque de collision. Si les satellites Starlink sont équipés d'un logiciel autonome qui minimise le risque de collision, pourquoi les satellites en question n'ont-ils pas modifié leur trajectoire dans les deux cas ?

L'incident a également mis une nouvelle fois en évidence un échec de communication impliquant l'opérateur américain. La Chine affirme avoir tenté de contacter les autorités américaines plusieurs fois par e-mail sans réponse, tandis que les États-Unis soutiennent n'avoir reçu aucun message. Suite à cela, la Chine a déposé plainte auprès du Bureau des affaires spatiales de l'ONU à Vienne le 6 décembre 2021¹⁶, déplaçant ainsi l'incident dans la sphère politique internationale. La mission permanente des États-Unis à l'ONU a répondu à la plainte dans une note verbale le 28 janvier 2022 :

« S'il y avait eu une probabilité élevée de collision avec la Station spatiale chinoise, les États-Unis auraient envoyé une notification de rapprochement directement au point de contact désigné par la Chine. [...] Les États-Unis n'ont pas eu connaissance d'un quelconque contact ni d'une quelconque tentative de contact de la Chine avec le Commandement spatial des États-Unis, les exploitants de Starlink-1095 et Starlink-2305 ou toute autre entité américaine pour leur faire part d'informations ou de préoccupations concernant les incidents mentionnés avant la note verbale que la Chine a adressée au Secrétaire général. »¹⁷

Une estimation du *Government Accountability Office* (GAO) des États-Unis prévoit le lancement de 58 000 satellites supplémentaires d'ici 2030, contre 5 500 satellites actifs en orbite en 2022¹⁸. Starlink, qui souhaite développer son business et fournir un accès internet au plus grand nombre, n'a pas l'intention d'arrêter ; par

¹⁴ ESA. (2019, septembre 3). *Predicted near miss between Aeolus and Starlink 44*. Consulté le 17 décembre 2024, à l'adresse https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/09/Predicted_near_miss_between_Aeolus_and_Starlink_44

¹⁵ Lamigeon, V. (2019, septembre 3). SpaceX joue-t-il les cow-boys de l'espace ? *Challenges*. Consulté le 10 décembre 2024, à l'adresse https://www.challenges.fr/entreprise/aeronautique/spacex-joue-t-il-les-cow-boys-de-l-espace_672330

¹⁶ *Note verbale datée du 3 décembre 2021, adressée au Secrétaire général par la Mission permanente de la Chine auprès de l'Organisation des Nations Unies à Vienne*. (2021, décembre 3).

¹⁷ *Note verbale datée du 28 janvier 2022, adressée au Secrétaire général par la Mission permanente des États-Unis d'Amérique auprès de l'Organisation des Nations Unies à Vienne*. (2022, janvier 28).

¹⁸ *Large Constellations of satellites: Mitigating Environmental and other effects* (GAO-22-105166). (2022). United States Government Accountability Office.

ailleurs des concurrents la rejoignent dans cette démarche. Le constat est clair : avec le nombre actuel de débris qui représentent des menaces permanentes, les manœuvres d'évitement sont devenues inévitables. Pour autant, avec son déploiement massif Starlink aurait sa part de responsabilité, selon Jonathan McDowell, du Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian aux États-Unis :

« Nous avons constaté une augmentation du nombre de risques de collision depuis le début du déploiement de Starlink. »

Les futurs lancements prévus par Starlink laissent présager une augmentation des obstacles dans l'espace, entraînant avec elle une intensification des risques, tant pour l'environnement que pour l'humanité sur Terre.

■ Risques environnementaux et humains : entre zones d'ombre scientifique et monopole de l'expertise

■ Un trou dans la raquette scientifique

Un des problèmes des méga-constellations de satellites réside dans leurs nombreuses conséquences environnementales et humaines inconnues ou mal quantifiées. Le collectif Pour un Réveil Écologique, dans son rapport *Spatial - Analyse Sectorielle* daté de janvier 2024, affirme que c'est les conséquences du changement d'échelle radical du nombre de lancements qui pourrait faire exploser la part du domaine spatial dans les émissions de gaz à effet de serre mondial, estimé entre 0.01% et 0.6%¹⁹. Dans ce rapport, rédigé par un groupe de professionnels du spatial engagés dans la responsabilisation de leur secteur, cette estimation reste toutefois sujette à une incertitude majeure, liée à la méconnaissance des impacts environnementaux des deux principales sources d'émission : la combustion d'ergols lors des lancements et la désintégration atmosphérique des satellites en fin de vie. D'après le rapport, ce manque de connaissance s'explique par la complexité des processus chimiques en haute atmosphère et les difficultés techniques d'obtenir des données précises à ces altitudes. Cela engendre une incertitude majeure et pourrait expliquer une potentielle explosion du bilan carbone du secteur.

Le rapport souligne que lors des lancements, la combustion des ergols, des carburants spécifiquement utilisés pour propulser les satellites, libère des particules de suie et des composés toxiques qui se concentrent dans la mésosphère et la stratosphère, pouvant ainsi modifier les processus chimiques naturels. Ces particules absorbent le rayonnement solaire, ce qui peut provoquer un réchauffement local et perturber les dynamiques thermiques et chimiques atmosphériques. Il est également souligné que, bien que les fusées réutilisables soient de plus en plus employées pour leurs avantages économiques, cette pratique n'entraîne pas de réduction significative de l'impact environnemental global. Ces engins rejettent également d'importantes quantités de gaz à effet de serre et d'oxydes métalliques, dont les effets cumulatifs restent mal compris. La complexité des phénomènes chimiques et physiques en jeu, combinée à la difficulté d'obtenir des mesures précises en haute atmosphère, rend particulièrement ardue la modélisation de ces impacts.

La désintégration des satellites en fin de vie ajoute une couche de complexité à cette problématique. Le concept de « *design for demise* », adopté par SpaceX et plébiscité par l'industrie et la communauté spatiale, prévoit la désintégration complète des satellites lors de leur rentrée atmosphérique afin d'éviter la création de débris spatiaux. Bien que très appréciée par l'industrie et les institutions comme la NASA ou l'ESA car salvatrice pour l'état d'encombrement des orbites spatiales, cette stratégie engendre des rejets massifs de particules métalliques, notamment d'alumine, dans la stratosphère. Comme récemment soulevé dans l'étude *Potential Ozone Depletion From Satellite Demise During Atmospheric Reentry in the Era of Mega-Constellations* par Ferreira et al., publiée dans la revue *Geophysical Research Letters*, l'alumine libérée lors de la désintégration

¹⁹ Pour un Réveil Écologique. (2024, janvier). *Rapport collectif - Analyse sectorielle : Spatial et Environnement*.

des satellites pourrait interagir avec l'ozone, aggravant conséquemment son appauvrissement²⁰. De plus, les suies issues de la désintégration s'accumulent dans les couches supérieures de l'atmosphère, où elles pourraient former un écran réfléchissant les rayons du soleil, avec des conséquences similaires à celles des aérosols volcaniques, entraînant un refroidissement ou un réchauffement localisé²¹.

L'état embryonnaire de la recherche sur ces questions se reflète dans la nature des études disponibles, et particulièrement celles médiatisées, laissant parfois sérieusement douter de la maturité des connaissances sur le sujet. L'hypothèse purement théorique de Sierra Solter sur l'affaiblissement possible du champ magnétique terrestre par l'accumulation de particules métalliques dans l'ionosphère illustre bien cette situation. Son étude *Potential Perturbation of the Ionosphere by Megaconstellations and Corresponding Artificial Re-entry Plasma Dust*, publiée en 2023 sous forme de preprint sans revue par les pairs, suggère que ces particules conductrices pourraient créer une forme de réseau magnétique réduisant la portée et la puissance protectrice du champ géomagnétique²². Si cette hypothèse a suscité une médiatisation non négligeable pour son caractère aussi bien exceptionnel qu'alarmiste, elle est aussi largement controversée. D'autres chercheurs ont dès lors pris la parole dans des articles de presse et sur des plateformes comme Twitter, comme Samantha Lawler, reconnaissant l'importance de l'étude pour attirer l'attention sur une question encore peu étudiée, mais pointent des lacunes dans les données utilisées et les modèles proposés, qui sont jugés trop simplistes. De nombreuses critiques affirment qu'il n'existe à ce jour aucune preuve directe permettant de valider ou de quantifier les effets évoqués par Solter, des experts comme John Tarduno et José Ferreira insistant sur la nécessité d'approfondir les recherches avec des modélisations plus robustes et des données empiriques fiables^{23,24}. Solter elle-même reconnaît les limites de son hypothèse et appelle à un effort collaboratif pour étudier ce phénomène potentiellement critique. En dépit de ces critiques, son travail a permis d'initier un débat nécessaire sur les impacts cumulés des satellites désintégrés et de souligner le besoin urgent de recherches multidisciplinaires dans ce domaine.

Face à ces incertitudes, certains scientifiques, comme Christophe Bonnal, chercheur au CNES, exposent une vision radicalement opposée au consensus actuel de désintégration prôné par SpaceX et l'ESA. Lors de son intervention intitulée « *Atmospheric reentry of orbital objects - Can Design-For-Non-Demise be the optimal solution ?* » lors de la récente IAA *Space Debris & Sustainability Conference* de l'Université de Hong Kong (décembre 2024), ainsi qu'au cours d'un entretien réalisé dans le cadre de notre étude, il défend le principe de précaution et soutient l'idée de construire des satellites qui ne se désintègrent pas dans l'atmosphère (« *design for non demise* »). Il considère les effets environnementaux sur la haute atmosphère comme potentiellement au moins aussi dangereux que les risques de retombées dans des zones habitées. Il soulève notamment la problématique de l'alumine, déjà mentionnée, dont les effets nocifs sont bien documentés mais qui continue de faire l'objet de recherches pour mieux comprendre les seuils critiques et leurs impacts relatifs.

Lors d'un entretien, un expert du CNES²⁵ a particulièrement insisté sur l'absence de données longitudinales précises, qui représente une lacune majeure dans la compréhension des impacts à long terme. Il explique que la zone concernée, l'ionosphère, située entre 30 et 70 km d'altitude, reste difficilement accessible pour les mesures scientifiques. En effet, cette altitude dépasse les capacités des meilleurs avions, même expérimentaux

²⁰ Ferreira, J. P., Huang, Z., Nomura, K., & Wang, J. (2024). Potential Ozone Depletion From Satellite Demise During Atmospheric Reentry in the Era of Mega-Constellations. *Geophysical Research Letters*.

²¹ Pour un Réveil Écologique. (2024, janvier). *Rapport collectif - Analyse sectorielle : Spatial et Environnement*.

²² Solter-Hunt, S. (2023). Potential Perturbation of the Ionosphere by Megaconstellations and Corresponding Artificial Re-entry Plasma Dust (arXiv:2312.09329). arXiv.

²³ Baker, H. (2024, 13 mars). Controversial paper claims satellite 'megaconstellations' like SpaceX's could weaken Earth's magnetic field and cause 'atmospheric stripping.' *Live Science*.

²⁴ Hammer, A. (2024, 15 mars). Controversial new paper suggests satellites falling to earth could weaken planet's magnetic field, sounding alarm on rise of private-owned craft like Elon Musk's Starlink which could become space junk. *Daily Mail*.

²⁵ Entretien avec un ancien chercheur du CNES

qui ne dépassent pas 20 km, tandis que les fusées ne font que traverser rapidement cette zone, rendant impossible toute mesure approfondie. Il met ainsi en garde contre le risque de surestimer les avantages immédiats de la stratégie de désintégration sans évaluer rigoureusement ses conséquences pour les générations futures. Cette diversité limitée des points de vue scientifiques reflète le manque de recul et de données précises de la communauté sur ce sujet complexe, un constat largement partagé par des experts comme Christophe Bonnal et le collectif Pour un Réveil Écologique. Ils soulignent que les difficultés techniques et le coût élevé des études en haute atmosphère limitent les possibilités de collecte de données empiriques et de validation des modèles.

Les phénomènes chimiques et physiques associés aux émissions en haute atmosphère sont non seulement complexes et difficiles à modéliser, mais leur étude nécessite des moyens considérables que seuls certains acteurs peuvent mobiliser. Le manque de données actuelles rend crucial un effort collectif pour financer des études multidisciplinaires sur ces questions. Les débats cités plus haut autour du « *design for demise* » soulèvent une question plus fondamentale : comment évaluer objectivement ces risques dans un contexte où la production scientifique elle-même semble échapper au contrôle de la recherche publique ? Peut-on seulement espérer quantifier correctement les risques d'abandon du principe de « *design for demise* », alors que l'on peine déjà aujourd'hui à évaluer les risques de retombées de matériel lorsque ce même principe est appliqué à grande échelle ?

▪ La science à sens unique

On introduit ici une notion fondamentale de la controverse : la difficulté pour la société civile et la recherche publique à produire de la science et de la contre-expertise dans ce domaine, point parfaitement illustré par la quantification des risques de retombées de satellites.

La controverse entre la FAA et SpaceX en 2023 illustre parfaitement cette asymétrie dans la production scientifique. Dans son rapport au Congrès, la FAA (*Federal Aviation Administration*) s'appuyait sur une analyse de l'*Aerospace Corporation* suggérant un risque considérable : d'ici 2035, une personne serait tuée ou blessée tous les deux ans par des débris de satellites Starlink, avec une probabilité non négligeable (0,0007 par an) qu'un avion soit accidenté²⁶. Face à ces conclusions alarmantes, la réaction de SpaceX fut immédiate et virulente, qualifiant l'analyse de « grotesque, injustifiée et inexacte ». Dans un communiqué officiel destiné au congrès américain, l'entreprise pointe notamment l'utilisation d'une étude NASA datant de 2000 sur les satellites Iridium, technologiquement dépassée et explicitement déconseillée pour ce type d'évaluation des risques²⁷.

Ce qui est particulièrement révélateur dans cet échange, c'est l'asymétrie fondamentale dans l'accès aux données techniques. SpaceX peut aisément réfuter l'analyse en démontrant que ses satellites sont conçus pour une désintégration totale lors de leur rentrée atmosphérique, s'appuyant sur l'expérience de 325 satellites déjà désorbités sans incident. L'entreprise souligne d'ailleurs un taux de succès de « plus de 99% » dans la désintégration de ses satellites, une donnée cruciale manifestement absente du rapport. L'*Aerospace Corporation*, malgré son statut d'organisme fédéral de recherche, se trouve dans l'impossibilité de produire une contre-expertise solide, faute d'accès aux spécifications précises des satellites et aux données opérationnelles détaillées.

Cette situation met en lumière un paradoxe : alors que les méga-constellations représentent un enjeu de sécurité publique majeur, l'évaluation indépendante des risques qu'elles comportent reste tributaire du bon vouloir des opérateurs privés. L'*Aerospace Corporation*, bien que mandatée par la FAA, s'est vue contrainte de baser son analyse sur des extrapolations et des modèles génériques, faute d'accès aux données techniques spécifiques.

²⁶ Federal Aviation Administration. (2023, 22 septembre). *Report to Congress: Risk Associated with Reentry Disposal of Satellites from Proposed Large Constellations in Low Earth Orbit*.

²⁷ SpaceX. (2023, 9 octobre). *Response to FAA regarding Starlink Demise*.

SpaceX peut ainsi facilement discréditer toute évaluation externe en pointant ses imprécisions, tout en conservant un contrôle étroit sur les informations permettant une analyse plus rigoureuse. L'étude de Beck et al. (2019) intitulée *Improved representation of destructive spacecraft re-entry from analysis of high enthalpy wind tunnel tests of spacecraft and equipment* publiée dans *Acta Astronautica* illustre parfaitement cette dynamique. Les chercheurs tentent d'établir une contre-expertise en reproduisant en soufflerie les conditions de désintégration des satellites lors de leur rentrée atmosphérique. Leurs résultats contredisent notamment les affirmations de SpaceX en démontrant la survie partielle de composants critiques comme les batteries, les roues d'inertie, ou certaines structures protégées. Cependant, privés d'accès aux satellites Starlink réels, ils doivent se contenter de modèles approximatifs, laissant leurs conclusions vulnérables aux critiques des opérateurs qui détiennent seuls les données techniques précises.



Fig. 25. CubeSat remains.

Figure 6 : restes des composants après leur « désintégration » en soufflerie. On voit bien que certains composants, plus que d'autres, ont des difficultés à se désintégrer complètement.

Source : Beck, J. C., Holbrough, I., Schleutker, T., & Guelhan, A. (2019). *Improved representation of destructive spacecraft re-entry from analysis of high enthalpy wind tunnel tests of spacecraft and equipment*. *Acta Astronautica*, 164, 287-296.

Les failles méthodologiques pointées par SpaceX soulèvent d'ailleurs une question plus profonde sur la capacité des organismes publics à produire des évaluations pertinentes dans un domaine en mutation rapide, soulignant une forme de capture de l'expertise par les entreprises privées. Le rapport de l'*Aerospace Corporation* se basait sur des données de 2021 concernant les constellations prévues, ignorant les modifications substantielles intervenues depuis, notamment la réduction de 7518 satellites dans les demandes d'autorisation déposées à la FCC. Cette obsolescence rapide des données utilisées révèle les limites d'un système où les régulateurs peinent à suivre le rythme d'évolution du secteur. D'autre part, l'analyse se concentrait presque exclusivement sur Starlink, négligeant d'autres acteurs majeurs comme le Project Kuiper d'Amazon ou OneWeb, ainsi que les systèmes en développement en Chine, comme la constellation Guo Wang, prévue pour inclure près de 13 000 satellites. Cette focalisation sur un seul acteur, conjuguée à l'utilisation de données dépassées, illustre la difficulté croissante pour les institutions publiques à produire des évaluations holistiques et actualisées des risques liés aux méga-constellations.

Cette logique d'asymétrie s'applique également à l'étude des émissions en haute atmosphère. Un ingénieur aérospatial, engagé dans la transition écologique du secteur, a partagé son point de vue à ce sujet. Rédacteur

du rapport sur le spatial pour « Pour un Réveil Écologique » et membre d'AéroDécarbo, selon lui, la technicité du sujet et les moyens financiers nécessaires pour mener des études à une telle échelle ralentissent la production de connaissance par les acteurs qui en auraient les moyens. Le spatial est un domaine structurellement peu démocratique : très coûteux, il reste dans les mains d'acteurs ayant un intérêt stratégique légitime (économie, défense, gouvernance) à ne pas ralentir leur secteur en finançant certaines études²⁸.

Toujours selon ce rédacteur du rapport, les premiers articles scientifiques sur l'impact environnemental des émissions en haute atmosphère ne datent que de 2014, bien après les designs préliminaires des lanceurs actuels. Le membre d'AéroDécarbo, une association dédiée à la décarbonation des secteurs aérospatial et aéronautique, souligne que cette temporalité n'est pas anodine : financer des recherches coûteuses risquant de démontrer un impact environnemental majeur n'enchantent guère une industrie déjà sous pression face à la concurrence américaine et chinoise. Cette réticence est d'autant plus marquée que les choix technologiques engagent le secteur sur des décennies, notamment en matière de propulsion. La recherche commence toutefois à s'organiser : le CNES lance le projet ATMOS pour étudier les émissions lors des rentrées atmosphériques, tandis que des bancs d'essai analysent les rejets des lanceurs au sol.

L'apparition des méga-constellations cristallise ces tensions à un moment où le spatial bascule dans la sphère commerciale. Historiquement, ce domaine lié à la défense n'a jamais vraiment fait l'objet de débats citoyens. Face à ce constat, des organisations comme Pour un Réveil Écologique changent de stratégie : plutôt que de sensibiliser uniquement les professionnels, elles visent désormais le grand public via les médias et les réseaux sociaux. L'objectif est de faire évoluer la perception du risque : passer d'une pollution méconnue à un enjeu public susceptible d'affecter les financements. Cette approche s'appuie sur le constat que l'industrie spatiale, particulièrement sensible à son image, réagirait davantage aux préoccupations du grand public qu'aux alertes internes du secteur.

■ Impacts sur la recherche et la société civile : d'un débat scientifique à un questionnement public

Les controverses autour des méga-constellations ne se limitent toutefois pas aux questions de pollution extra-atmosphériques et de conséquences environnementales. En effet, la diversification des usages de l'espace, comme illustré par Starlink et les méga-constellations en général, et son exploitation par des acteurs privés à des fins commerciales posent la question des éventuels impacts ou controverses que ces technologies peuvent susciter au sein de la société civile.

La commercialisation de l'offre Starlink auprès du grand public à un forfait accessible et compétitif par rapport aux autres acteurs du secteur (opérateurs de télécommunication traditionnels avec des solutions comme la fibre ou l'ADSL) est un des premiers exemples de la commercialisation d'un service extra-atmosphérique. Si ce n'est pas la première fois que l'espace et les technologies spatiales trouvent un usage concret au-delà des occupations militaires (le *Global Positioning System*, ou GPS américain et ses équivalents sont par exemple essentiels à beaucoup de services civils), l'avènement de ces méga-constellations marque un tournant significatif dans l'histoire de l'exploitation de l'espace : les acteurs privés à but lucratifs se multiplient en orbite, et l'espace est à leurs yeux un marché sur lequel il convient de se positionner au plus vite. En conséquence, Starlink comme d'autres entreprises concurrentes s'empressent de déployer au plus vite leurs satellites, et de premiers impacts sont constatés au niveau de la société civile. Plusieurs acteurs s'opposent ainsi : entreprises, communauté scientifique, associations et citoyens débattent de la nature et de l'étendue des impacts revendiqués, tout comme de la pertinence des méga-constellations au sens large et du modèle de société que l'on souhaite construire.

²⁸ Entretien avec un ingénieur, représentant de Pour Un Réveil Écologique et membre d'AéroDécarbo

▪ Conséquences sur l'observation astronomique : entre opposition et conciliation, la communauté scientifique divisée

En premier lieu, le déploiement effréné de centaines de satellites dans le cadre des méga-constellations a un impact majeur sur la capacité de la communauté scientifique à observer le ciel dans de bonnes conditions, affirment les chercheurs.

Il existe un consensus, partagé par tous les acteurs et étayés par plusieurs clichés d'observations, sur le fait que les satellites comme ceux de Starlink perturbent l'activité d'observation spatiale. Comme ces images l'illustrent (voir figure 7), le lancement des satellites Starlink engendrent des traînées lumineuses visibles à l'œil nu, et a fortiori par les télescopes. Ces traces lumineuses sont sources de nuisance pour les télescopes, en particulier lorsque les sujets d'observation sont des objets de très faible luminosité. En particulier, ces perturbations empêchent le travail des astronomes dans les domaines de l'étude de l'espace profond, la surveillance et recherche d'astéroïdes potentiellement géocroiseurs ou de la recherche d'exoplanètes²⁹. Face à ces conséquences, certains scientifiques comme Éric Lagadec, de l'Observatoire de la Côte d'Azur³⁰, la Société Américaine d'Astronomie³¹ ou bien l'Union Astronomique Internationale³² manifestent leurs inquiétudes face au déploiement accéléré de ces satellites au détriment des capacités de recherche, et cherchent à encadrer, ralentir et minimiser les lancements de satellites afin de permettre la coexistence de la recherche et des services proposés. Les entreprises comme Starlink opposent à ces revendications le fait qu'ils proposent un service utile, efficace et nécessaire pour certaines personnes, et qu'ils répondent ainsi à un besoin des populations. Néanmoins, face au constat de ces perturbations, Starlink a souhaité se montrer ouvert à la collaboration et affirme ainsi avoir fait des efforts pour limiter la pollution lumineuse issue de ses satellites³³ : en effet, plusieurs essais ont été menés pour adapter les satellites afin de réduire leur luminosité une fois en orbite. Par exemple, Starlink a lancé le projet de « *DarkSat* »³⁴ (voir figure 8), un satellite peint en noir : si les observateurs au sol confirment que la luminosité des satellites baisse grâce à ce revêtement noir, et ne sont presque plus visibles à l'œil nu, les satellites restent visibles par les télescopes, qui disposent de capacités d'observation largement supérieures à celle de l'œil humain. Par ailleurs, cette proposition de solution n'est pas sans conséquences annexes :

« Starlink a prétendu faire des efforts, mais qui n'en ont pas été, de peindre en noir leurs satellites, par exemple, pour qu'ils réfléchissent moins à la lumière. Sauf que s'il y a réfléchissement, il absorbe plus, et quand ils sont éclairés par le soleil, ils chauffent plus. C'est mauvais pour la fonction du satellite. Donc ils vont arrêter. »³⁵

²⁹ Walker, et al. (2020). Impact of Satellite Constellations on Optical Astronomy and Recommendations Toward Mitigations. Bulletin of the American Astronomical Society. 52. 10.3847/25c2cfcb.346793b8.

³⁰ Lagadec, É. (2021). Un ciel observable starlinké : Quand un projet commercial peut faire obstacle à l'avancée des connaissances. *Ziisel*, 9(2), 11-25.

³¹ American Astronomical Society. (2019, juin 10). *AAS Issues Position Statement on Satellite Constellations*. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://aas.org/press/aas-issues-position-statement-satellite-constellations>

³² IAU. (2019, juin 3). *IAU Statement on Satellite Constellations*. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann19035/>

³³ *Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics 2020 Astro2020 : Optical Interference from Satellite Constellations Meeting*. (2020, avril 27). [Conference]. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://www.nationalacademies.org/event/04-27-2020/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020-light-pollution-rfi-meeting>

³⁴ Entretien réalisé avec un ancien chercheur du CNES

³⁵ Entretien réalisé avec un chercheur en astrophysique du Commissariat à l'Energie Atomique

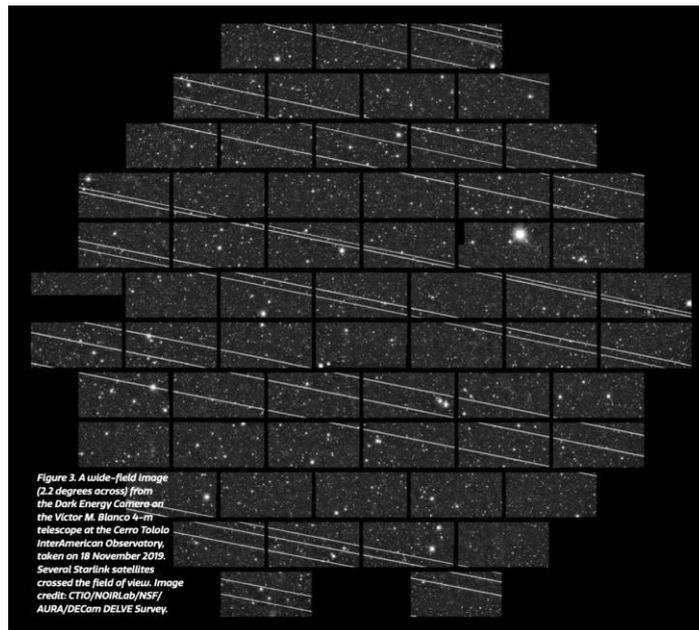


Figure 7 : image des traînées lumineuses dues aux lancements de satellites Starlink sur le télescope Victor M. Blanco, prise le 18 novembre 2019

Source : Walker, et al. (2020). *Impact of Satellite Constellations on Optical Astronomy and Recommendations Toward Mitigations*. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 52. 10.3847/25c2cfcb.346793b8.

Face à cela, Starlink a souhaité poursuivre la coopération pour montrer son envie de bien faire, et a proposé d'autres solutions : modifier lors du vol l'inclinaison des satellites pour limiter les réflexions en direction de la Terre, espacer les satellites entre eux pour limiter l'effet de traînée lumineuse lors du déploiement, installer des pare-soleil sur les satellites (VisorSat)³⁶, etc. Grâce à ces manœuvres, Starlink est parvenu à voir un réel impact, reconnu y compris par des chercheurs du CNES, sur la magnitude visuelle de ses satellites. La magnitude visuelle, unité de mesure qui qualifie la visibilité d'un objet, a ainsi été augmentée jusqu'à dépasser 7 (plus la magnitude visuelle est élevée, moins l'objet est visible) : au-delà de ce seuil, l'objet devient invisible à l'œil nu. Ce sont donc de véritables progrès dont Starlink fait état, et qui sont reconnus par les scientifiques ; néanmoins, les télescopes restent en mesure de détecter les satellites, même invisibles à l'œil nu, et ces efforts ne suffisent pas. Starlink invite donc les astronomes à également adapter leurs pratiques d'observation à la présence de nouveaux objets dans le ciel : l'entreprise propose de coopérer afin de mettre à disposition des astronomes des éphémérides des passages de ses satellites pour permettre de réaliser des observations dans des plages horaires et dans des zones où l'on sait qu'aucun satellite ne passera. Il existe toutefois des télescopes, les plus coûteux à développer et avec les capacités d'observation les plus fines, qui ne peuvent échapper aux perturbations liées au satellites, car leur principe même est d'observer pendant très longtemps une large zone du ciel, le passage d'au moins un satellite Starlink dans l'intervalle étant presque garanti. C'est le cas du télescope Vera C. Rubin, en cours de construction au Chili, et qui pourrait donc être inutilisable avant même d'avoir été achevé³⁷.

³⁶ Rouat, S. (2020, mai 4). *Elon Musk veut équiper de pare-soleils les trop visibles satellites de Starlink*. Sciences et Avenir. Consulté le 6 janvier 2025, à l'adresse https://www.sciencesetavenir.fr/espace/exploration/elon-musk-veut-equiper-de-pare-soleil-les-trop-visibles-satellites-de-starlink_143942

³⁷ Entretien réalisé avec un chercheur en astronautique, ancien membre du CNES



Figure 8 : effet de la technologie DarkSat sur la visibilité des satellites Starlink. Le satellite DarkSat, au centre, n'est pas visible à l'œil nu contrairement aux deux autres Starlink.

Source : Marco Langbroek, Leiden, Pays-bas

Certains laboratoires scientifiques, comme le NOIRLab aux États-Unis, recommandent par ailleurs le développement de logiciels poussés de traitement d'images afin d'effacer les perturbations dues aux traînées lumineuses laissées par les satellites³⁸. Cependant, de telles recommandations rencontrent des avis mitigés parmi certains membres de la communauté scientifique : au-delà des inquiétudes face à la complexité énorme de ces logiciels, il demeure la question du futur de l'observation, alors que les satellites de Starlink vont être toujours plus nombreux en orbite, et que des concurrents vont les y rejoindre :

« Donc, premier inconvénient, premier élément là-dedans, cette perturbation vis-à-vis des astronomes. On a des manières de s'en sortir, on a progressé là-dessus, on a bien discuté de ça. [...] Néanmoins, ce n'est pas satisfaisant. C'est clair que ce n'est pas satisfaisant. En plus, pour le moment, on a 7000 satellites de Starlink. Si on doit en avoir 100 000 en 2030, qu'est-ce qu'on fait ? »³⁹

À nouveau, le passage à échelle de ces satellites est source de débat parmi les astronomes qui défendent des approches différentes.

La controverse demeure aujourd'hui : si personne ne remet en question les impacts initiaux des satellites comme ceux de Starlink pour l'observation, l'entreprise affirme⁴⁰ que les mesures prises résolvent en partie le problème ; la communauté scientifique reste inquiète et affirme que les impacts restent visibles et qu'il ne suffira pas de s'adapter à cette nouvelle donne pour assurer le futur de l'observation spatiale. Par ailleurs, si une forme de coopération a pu s'établir avec Starlink, rien ne garantit que les concurrents de Starlink soient aussi ouverts à la mise en place d'actions préservatrices de l'observation spatiale.

³⁸ Walker, et al. (2020). Impact of Satellite Constellations on Optical Astronomy and Recommendations Toward Mitigations. Bulletin of the American Astronomical Society. 52. 10.3847/25c2feb.346793b8.

³⁹ Entretien réalisé avec un chercheur en astronautique, ancien membre du CNES

⁴⁰ Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics 2020 Astro2020 : Optical Interference from Satellite Constellations Meeting. (2020, avril 27). [Conference]. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://www.nationalacademies.org/event/04-27-2020/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020-light-pollution-rfi-meeting>

« Alors déjà Starlink, ils ont dit, bon, on va vous écouter un petit peu, ce n'était pas très efficace, mais ils ont vraiment fait œuvre d'écoute, [...] alors que, que feront les Chinois, que feront les Russes, que feront les autres constellations ? »⁴¹

▪ Le ciel nocturne, un patrimoine culturel à protéger des méga-constellations ?

Les impacts sur la société civile ne se limitent pas pour autant à la communauté scientifique. La controverse sur les méga-constellations est éminemment technique et scientifique, de sorte que les premiers impacts et les plus évidents de cette controverse sur la société civile se mesurent dans le monde académique, le plus directement capable de se dresser face à Starlink. Toutefois, les questionnements s'élargissent et ne comprennent pas que les aspects purement scientifiques de l'usage du ciel : plus que les limites dans l'observation du ciel, l'altération durable de la nature de ce dernier est critiquée par certains acteurs.

En effet, malgré les techniques mises en place par Starlink pour réduire la magnitude visuelle de ses satellites, ils restent visibles lors de leur lancement (même s'ils ne sont plus vraiment visibles à l'œil nu une fois en place). Par ailleurs, les déploiements répétés par grappe de nouveaux satellites, que ce soit par Starlink ou bien même par d'autres concurrents ou acteurs (OneWeb, Agences nationales, etc.), entraîne l'augmentation logique du nombre de satellites en orbite et de ce fait modifie profondément la nature même de l'espace étoilé qu'il nous est donné à voir la nuit. Au-delà des scientifiques, n'importe quel astronome en herbe peut témoigner de la présence nouvelle des satellites Starlink en orbite.

En conséquence, certaines composantes de la société civile veulent lutter contre la démultiplication de ces constellations qui altèrent le ciel étoilé, considéré comme un bien commun de l'humanité. Ainsi, dans le journal *Le Monde*, l'astrophysicien Miguel Montargès explique que

« [le] lien [au ciel] s'affaiblit à cause de la pollution lumineuse due à la lumière des villes, et maintenant Starlink est une composante supplémentaire de cette coupure du lien avec le ciel. Si j'ai des enfants, ils grandiront dans un monde où, la nuit, ils verront plus d'objets artificiels que d'étoiles... »⁴²

De même, au cours de notre entretien, un astrophysicien du CEA nous a affirmé que :

« Je suis comme citoyen plus concerné que comme astrophysicien professeur. »⁴³

Cette préoccupation manifeste quant à l'avenir du ciel, à la fois en tant que scientifique et en tant que citoyen, est donc partagée par plusieurs autres astronomes qui, comme Miguel Montargès, appellent à l'inscription du ciel étoilé au Patrimoine mondial de l'humanité de l'Unesco. En effet, s'il existe des réserves internationales de ciel étoilé, label remis par l'Association internationale Dark Sky⁴⁴, le ciel en lui-même n'est pas classé au patrimoine mondial. Si l'irruption du débat public sur les méga-constellations prend racine dans leurs impacts sur l'observation scientifique, de plus en plus d'institutions et de groupes se saisissent de ces questionnements pour amener la société entière à s'interroger. Ainsi, en 2021 au MUCEM de Marseille l'association Agir pour l'environnement et l'Association française d'astronomie ont organisé une conférence intitulée : « Le ciel étoilé, patrimoine mondial de l'humanité ? »⁴⁵. Ces démarches, si elles restent d'ampleur modeste, traduisent tout de

⁴¹ Entretien réalisé avec un chercheur en astrophysique du Commissariat à l'Energie Atomique

⁴² Barthélémy, P. (2020, février 19). Le ciel sous la menace des méga-constellations. *Le Monde*, 4-5.

⁴³ Entretien réalisé avec un chercheur en astrophysique du Commissariat à l'Energie Atomique

⁴⁴ Dark Sky International. (2024, septembre 11). *DarkSky Approved, the seal you can count on*. Consulté le 13 décembre 2024, à l'adresse <https://darksky.org/news/darksky-approved-the-seal-you-can-count-on/>

⁴⁵ *Le ciel étoilé, patrimoine mondial de l'humanité ?* (s. d.). Mucem — Musée des civilisations et de la Méditerranée. Consulté 8 janvier 2025, à l'adresse <https://www.mucem.org/programme/le-ciel-etoile-patrimoine-mondial-de-lhumanite>

même un malaise et une opposition face à la mise en place rapide des méga-constellations, indépendamment de toute considération sociétale.

Des collectifs, associations et organisations se sont également constitués dans cette optique : dénonçant les conséquences néfastes et durables de la mise en place de Starlink comme des autres méga-constellations, elles souhaitent freiner le déploiement des satellites et mettre en place un débat de société, une concertation sur le sujet pour notamment parler des conséquences sur le ciel étoilé. Les actions de Starlink dans le but de réduire l’empreinte lumineuse de leurs satellites ne suffisent pas à répondre aux enjeux car leur apparaît comme une solution superficielle face à des questionnements plus fondamentaux. Ainsi, la *International Dark-Sky Association* a déposé un recours aux États-Unis contre la FCC (*Federal Communications Commission*, Commission fédérale des communications) pour faire appel de la décision d’autoriser le déploiement des satellites Starlink de deuxième génération. Dans son document d’appel, l’IDA invoque l’impact sur le ciel étoilé de ces nouveaux satellites, en termes de pollution lumineuse. Par ailleurs, l’IDA affirme que la FCC n’a pas réalisé une enquête environnementale suffisamment approfondie, se contentant des affirmations de Starlink⁴⁶. De ce fait, l’IDA a demandé l’annulation de l’autorisation de déploiement des satellites Starlink de deuxième génération. Si l’IDA motive en droit son appel sur des considérations de non-respect de la procédure et de manquements de la part de la FCC, on constate que cette plainte a pour but pour l’association de protéger le ciel étoilé dans sa dimension patrimoniale, culturelle et religieuse. L’ONG s’efforce d’exploiter les textes de droit pour protéger le ciel étoilé, mais le ciel étoilé ne bénéficie pas de protection légale à proprement parler.

De fait, la notion de droit à l’obscurité est revendiquée par certains acteurs pour structurer le débat de société, notamment dans sa dimension légale. Ce droit, non reconnu à l’heure actuelle, revendique de pouvoir jouir de l’obscurité de la nuit et du ciel dénué de pollution lumineuse. Il s’agit de prolonger dans l’arène juridique des concepts déjà affirmés dans la déclaration de la Palma de 2007, qui affirme à l’issue de la Conférence Internationale pour la défense de la qualité du ciel nocturne et le droit d’observer les étoiles que

« Le droit à un ciel nocturne non pollué, qui permet de contempler le firmament, doit être considéré comme un droit inaliénable de l’Humanité, équivalent à tous les autres droits environnementaux, sociaux et culturels, au regard de son impact sur le développement de tous les peuples et sur la préservation de la biodiversité. »⁴⁷

Néanmoins, ce droit-synthèse, dont l’idée se construit progressivement au gré de l’évolution du droit de l’environnement, de la notion de patrimoine culturel et mondial, reste théorique à l’heure actuelle, bien que des acteurs comme l’IDA souhaiteraient voir cette notion consacrée en droit afin de pouvoir s’appuyer dessus dans la défense du ciel étoilé.

Bien qu’il n’existe pas encore en France, c’est déjà au nom, entre autres, de ce même droit que l’association Agir Pour l’environnement a déposé conjointement avec l’association Priartem en 2022 un recours en excès de pouvoir devant le Conseil d’État pour annuler la décision de l’Arcep attribuant des fréquences à Starlink pour son utilisation en France⁴⁸. Comme dans le cas du recours de l’IDA, les demandeurs à l’instance ont ici reproché à l’Arcep l’absence d’étude environnementale précise sur le sujet, et l’absence de concertation publique avec les usagers.

⁴⁶ International Dark-Sky Association. 2023. *Brief for The International Dark Sky Association On Appeal from the Federal Communications Commission*. Déposé le 14 avril. Consulté le 19 janvier 2025 <https://darksky.org/app/uploads/2023/01/2023-04-14-IDA-Brief.pdf>

⁴⁷ Starlight. *Déclaration pour la défense du ciel nocturne et le droit à la lumière des étoiles*. (2007).

⁴⁸ PRIARTEM - Pour Rassembler, Informer et Agir sur les Risques liés aux Technologies ElectroMagnétiques. (2022, avril 6). *STARLINK : Le projet d’internet par satellites d’Elon Musk annulé par le Conseil d’Etat—#DavidcontreGoliath*. Consulté le 4 novembre 2024, à l’adresse https://www.priartem.org/STARLINK-Le-projet-d-internet-par.html?utm_source=chatgpt.com

▪ Les méga-constellations, un risque pour la santé ?

Les impacts potentiels sur la société civile ne se limitent pas au patrimoine ou à l'environnement : des craintes, relayées notamment par l'association Priartem, qui représente les électrosensibles de France, se font entendre sur l'impact que les ondes utilisées pour la communication de la constellation peuvent avoir sur les populations, alors qu'elle est déjà très impactée par toutes les autres sources d'ondes⁴⁹. D'importants débats se font entendre à ce sujet, et une controverse existe sur le principe même de l'électrosensibilité ; néanmoins, la victoire de Priartem conjointement avec Agir Pour l'Environnement face à l'Arcep montre que la société civile s'empare également de cet aspect de la controverse posée par les méga-constellations, malgré les dénégations répétées de Starlink sur tout éventuel impact sanitaire de ses installations.

En particulier, des questionnements apparaissent au sujet des installations au sol de Starlink, stations relais permettant la communication de l'entreprise avec la constellation. L'exemple de Saint-Senier-de-Beuvron l'illustre : Starlink a demandé à la commune l'autorisation d'installer une antenne sur son territoire, constituée en réalité de 9 dômes à proximité desquels les émissions d'ondes sont très fortes au vu de la concentration du flux d'informations. Face à cette demande, la commune de 333 habitants a demandé des précisions à l'entreprise, mais au-delà de la garantie que le blindage des dômes garantissait la sécurité des habitants à proximité, aucune réponse précise n'a été communiquée au conseil municipal. Ainsi, la commune a refusé l'installation de cette station relais qui a dû trouver un autre site d'implantation en France⁵⁰. Ce refus est une des formes de la contestation du projet Starlink en France, et entretient le débat à son sujet, notamment au niveau sanitaire : cela a conduit l'Agence nationale des fréquences (ANFR) à se saisir du sujet en 2022 et à mesurer les émissions d'ondes à proximité des antennes vendues aux clients pour leur usage personnel du réseau Starlink, et concluant à une absence de risques à moins d'être à proximité immédiate de l'antenne de façon prolongée⁵¹. Néanmoins, le rapport ne couvre pas le cas des stations Starlink au sol, comme celle qui devait être implantée dans le village de Saint-Senier-de-Beuvron.

▪ Le rôle de société des méga-constellations et leur pertinence mise en question

Face à ces contestations multiples, Starlink dénonce une vision biaisée de la situation qui repose bien davantage sur des considérations antisatellites et contre le progrès que sur un véritable souci de société.

De fait, Starlink va même plus loin en défendant la portée de son action comme un moyen de réduire la fracture numérique des sociétés en permettant aux populations vivant dans des zones peu ou pas couvertes de disposer d'un accès fiable et de haute qualité à internet.

« [Elon] Musk dit, "oui moi je suis un bienfaiteur de l'humanité je donne internet à 4 milliards d'habitants qui ne l'ont pas" »⁵²

Il existe donc des arguments moraux mis en avant par Starlink ou bien son fondateur pour défendre sa mission à la fois au vu de sa pertinence économique, du besoin d'investir l'espace extra-atmosphérique qui aurait de toute façon vocation à devenir un marché, et de l'intérêt pour les populations d'avoir accès à ce service. On trouve ainsi le commentaire suivant mis en avant sur le site internet de Starlink:

⁴⁹ Carrette, J. (2021). Avec Starlink, Elon Musk innove dans la pollution. *Reporterre*. Consulté le 15 novembre 2024, à l'adresse <https://reporterre.net/Avec-Starlink-Elon-Musk-innove-dans-la-pollution>

⁵⁰ Les élu-e-s Normandie Écologie - EELV (Réalisateur). (2021, avril 7). *François Dufour sur la mobilisation contre le projet Starlink de SpaceX* [Enregistrement vidéo]. Consulté le 20 décembre 2024, à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=EpFj8mIDpic>

⁵¹ Direction de la Surveillance du marché et de l'Exposition du public (DSE). (2022). *Etude de l'exposition aux ondes électromagnétiques du kit de communication au réseau Starlink*.

⁵² Entretien réalisé avec un chercheur en astronautique, ancien membre du CNES.

« Des millions de personnes n'ont pas accès à Internet, et nous sommes vraiment contents de pouvoir dire que ce n'est plus notre cas. C'est rapide comme l'éclair, nous sommes en ligne en quelques minutes. Starlink met fin à six ans de difficultés. »

De même, l'annonce de partenariats entre Starlink et T-Mobile afin de garantir une couverture téléphonique partout aux États-Unis et dans ses eaux territoriales illustre la mission que Starlink veut se donner⁵³.

Néanmoins, ce narratif est remis en question, dans le cas de Starlink comme de son concurrent Oneweb, par leurs stratégies marketing. En effet, nous avons appris en entretien avec un ancien employé de chez OneWeb que les deux entreprises sont présentes dans les salons de promotion de yachts pour vendre leurs services à des propriétaires de yachts pour leur donner un accès à Internet une fois en mer. Ces entreprises insistent aussi sur les qualités de la connexion que leurs services offrent, avec la capacité, comme expliqué sur leurs sites internet, de regarder en haute définition des films en streaming, ou bien de jouer aux jeux vidéo en ligne sans problèmes de délai. Cette différenciation entre le discours exposé par Starlink et sa stratégie de vente, le débat sociétal sur les méga-constellations s'élargit : les méga-constellations sont-elles vraiment adaptées pour s'attaquer aux problèmes de société qu'elles prétendent résoudre, ou bien les conséquences de leur déploiement supplantent-elles les potentiels bénéfiques que l'on pourrait en tirer ? La société civile s'empare de ces questionnements et remet en question le narratif des entreprises comme Starlink, créant ainsi un débat entre différents acteurs aux positions très différentes.

Plus largement, l'émergence et le déploiement extrêmement rapide des méga-constellations s'inscrit dans des controverses autour du modèle de société jugé désirable pour l'avenir, et de la pertinence de ces technologies dans ce cadre : à l'heure de la lutte contre le dérèglement climatique, les méga-constellations ont-elles leur place dans des sociétés ayant la vocation d'être durables ? Si les entreprises comme Starlink répondent par la positive en mettant en avant les bénéfices essentiels de ces technologies, cela n'efface pas pour autant les coûts et conséquences que les méga-constellations entraînent, comme le font remarquer de nombreux acteurs de la société civile, du simple citoyen à la communauté scientifique dans son ensemble, ou encore des collectifs comme Pour un réveil écologique.

Ainsi, Nicolas Bobrinsky, chef du département ingénierie et innovation à l'ESA, dit dans un article du Monde :

« A-t-on réellement besoin de ces méga-constellations pour disposer partout d'un Internet à haut débit ? Est-ce la solution la plus "écologique" ? L'orbite basse terrestre est une ressource précieuse, il ne faut pas la surexploiter. »⁵⁴

Cette citation fait écho à de nombreux aspects et conséquences potentielles des méga-constellations déjà abordées dans cet article, et illustre les questionnements plus larges qui se posent à l'aune du développement de ces méga-constellations. Les positions défendues par les différents acteurs s'opposant à des degrés divers aux projets comme Starlink – communauté scientifique, associations, ONG, citoyens... visent également à alimenter ce débat : quel sens y a-t-il à remplir l'orbite basse de satellites pour fournir des services déjà disponibles par ailleurs ; face aux conséquences, minimisées par Starlink mais avérées d'après les différents collectifs, ne vaudrait-il mieux pas mettre un coup d'arrêt à ces projets de développement ? Parmi les professionnels du spatial également, la question de la pertinence d'envoyer toujours plus de satellites en orbite se pose, alors que des risques existent déjà étant donné le nombre élevé d'objets déjà présents⁵⁵. Pour autant, de nombreux individus ne considèrent pas les conséquences négatives que pourraient avoir ces satellites, car

⁵³ SpaceX. (2022, août 25). *SpaceX Invites World's Carriers to Collaborate—No More Cell Phone Dead Zones*. Consulté le 4 janvier 2025, à l'adresse <https://www.spacex.com/updates>

⁵⁴ Barthélémy, P. (2020, février 19). Le ciel sous la menace des méga-constellations. *Le Monde*, 4-5.

⁵⁵ Cet élément est revenu dans les entretiens que nous avons réalisés avec un astrophysicien du CEA, un chercheur en astronautique, anciennement au CNES, un membre de Pour un réveil écologique et ingénieur aérospatial et avec un ancien salarié de Oneweb.

elles ne sont pas tangibles, alors que les intérêts de la technologie Starlink, très fonctionnelle et efficace, sont avérés au quotidien pour les abonnés au service.

Ce débat plus large, sur le choix de société que l'on souhaite, illustre l'irruption de l'espace extra-atmosphérique comme composante de nos sociétés à travers les nouvelles façons de l'exploiter. Plus généralement, plusieurs acteurs à tous les niveaux (organisations, internationales, collectifs citoyens, associations d'astronomes...) réclament que ces questionnements s'accompagnent d'une réflexion accrue sur les éventuels modes de gouvernance ou de régulation de ce secteur nouveau, afin de l'intégrer formellement dans nos structures sociétales. Pour autant, de nombreux désaccords apparaissent entre les parties prenantes sur la nature de la régulation, sa forme, ou même sa pertinence : face à une technologie aux usages certes civils mais également militaires, à la vocation stratégique évidente, l'enjeu de régulation est majeur mais extrêmement complexe.

■ Régulation et gouvernance des méga-constellations, frein ou nécessité ?

La question de la régulation de ces nouvelles méga-constellations qui émergent dans l'espace est le dernier point majeur de cette controverse, et s'inscrit en réalité en filigrane des autres points de controverse. En effet, si la controverse autour des méga-constellations puise ses racines dans les domaines scientifique et technique, et par plusieurs aspects repose sur des faits scientifiques (traces lumineuses sur les télescopes, risque de collision potentiel, ...), les débats qu'elle entraîne dans l'espace public, en particulier dans leur dimension réglementaire, sont très disputés. La nécessité même d'une régulation est débattue par les institutions publiques, entreprises et représentants de la société civile : faut-il réguler les méga-constellations comme Starlink, les régulations de l'espace existante ne suffisent-elles pas et dans ce cas, comment mettre en place une véritable gouvernance sont autant de questions encore en suspens.

■ Une réglementation historique du secteur spatial face aux nouvelles méga-constellations et au *New Space*

Avec le premier satellite artificiel, le Spoutnik-1 lancé en 1957, s'ouvre une nouvelle ère de conquête de l'espace dans le cadre de la guerre froide. L'espace apparaît ainsi pour les deux blocs comme un lieu de projection de sa puissance militaire. Afin de se préserver des risques d'escalade associés à la course à l'espace, les États sous l'égide de L'ONU adoptent en 1963 une résolution⁵⁶ consacrant l'espace comme un bien commun à toute l'humanité, et dont l'exploitation ne pourra se faire qu'à son bénéfice. Elle énonce par ailleurs l'impossibilité pour l'espace d'être susceptible d'appropriation nationale ou de proclamation de souveraineté. Cette résolution, non contraignante, se voit traduire juridiquement en 1967 par le traité des Nations Unies relatif à l'espace extra-atmosphérique :

« L'exploration et l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique [...], doivent se faire pour le bien et dans l'intérêt de tous les pays, quel que soit le stade de leur développement économique ou scientifique ; elles sont l'apanage de l'humanité tout entière. »⁵⁷

Ce traité est encore aujourd'hui au fondement du droit international dans le domaine spatial. D'autres accords et traités viennent consolider ces acquis dans les années qui suivent, notamment pour établir les principes de

⁵⁶ Résolution 1962 de l'Assemblée plénière, Déclaration des principes juridiques régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, Pub. L. No. XVIII (1963).

⁵⁷ Nations Unies. (1967). Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes (Traité N° 2222).

responsabilité dans l'espace, en cas de dommage sur des objets spatiaux par exemple⁵⁸. Depuis 1976, l'État ou l'opérateur spatial qui lance un objet dans l'espace extra-atmosphérique se doit de l'immatriculer, de communiquer les informations relatives à son identification et d'informer de tout événement affectant sa vie en orbite, comme par exemple sa perte, sa désorbitation ou sa fin d'exploitation. Ce sont les principes de non appropriation et de liberté d'utilisation qui prédominent dans les traités des Nations Unies. Par ces aspects, le droit international de l'espace est très similaire au droit qui s'applique dans les eaux internationales.

Si un État ne peut contraindre ou restreindre les activités spatiales d'autres États, les firmes du spatial sont quant à elles soumises à la législation de l'État auquel elles sont rattachées. Ainsi, toute entreprise française se doit de respecter la Loi relative aux Opérations Spatiales (LOS), ou le *Space Act*⁵⁹ aux États-Unis. Afin de suivre la bonne application de leurs législations et de satisfaire leurs ambitions spatiales à travers des programmes nationaux ou internationaux, les États se dotent également d'institutions dédiées (agences spatiales comme la NASA, ROSCOSMOS, l'ESA ou encore le CNES).

Le cadre de régulation, au-delà des principes de droit international énoncés par les traités des Nations Unies, est donc très dépendant de l'État à l'origine des activités spatiales : que la mission soit publique ou privée, c'est l'État qui fournit l'autorisation préalable et impose sa législation. Les activités spatiales françaises sont parmi les plus réglementées dans le monde depuis la LOS, tout comme au niveau européen les pays signataires doivent respecter certaines chartes de l'ESA, notamment concernant les débris.

Il existe donc bien un cadre réglementaire historique des activités spatiales, qui a été jusqu'à maintenant suffisant pour faire coexister les acteurs du spatial. Néanmoins, ce cadre est-il adapté aux enjeux contemporains, et en particulier à l'émergence du New Space ? En effet, malgré les traités internationaux en vigueur, l'espace est de plus en plus pensé en tant que nouveau lieu de conflictualité entre puissances. L'espace apparaît comme un lieu stratégique dans le jeu géopolitique et militaire, comme l'illustre la nouvelle course à l'espace qui se lance entre Chine et États-Unis⁶⁰. Par ailleurs, l'espace est maintenant investi par de nouvelles entreprises privées, les plus avancées étant majoritairement américaines. Celles-ci opèrent leurs propres satellites pour fournir des services de communication, d'imagerie ou d'internet : Starlink construit et opère ses satellites, lancés par SpaceX, OneWeb (télécom) et Planet Labs (imagerie terrestre) contrôlent également leurs propres satellites. D'autres acteurs ont de sérieuses ambitions pour concurrencer ces nouvelles constellations, par exemple le projet Kuiper d'Amazon ou des méga-constellations chinoises (par exemple, le projet Qianfan qui vise le déploiement de 15000 satellites d'ici à 2030). Acteurs comme usages de l'espace se sont diversifiés, et l'espace est désormais également un marché pour le secteur privé : dès lors, plusieurs institutions, comme l'Institut International sur la loi de l'espace ou bien des agences spatiales, s'interrogent sur le besoin d'adapter le cadre réglementaire au New Space, et en particulier au cas des méga-constellations⁶¹.

Les entreprises développant les méga-constellations ne sont pas pour autant soumises à aucune régulation: les firmes qui veulent que leurs satellites de télécommunication utilisent certaines bandes de fréquences doivent obtenir une autorisation de L'Union internationale des télécommunications (UIT) qui est l'agence spécialisée des Nations Unies pour les technologies numériques via l'agence nationale du pays dans lequel elles sont

⁵⁸ Quatre textes principaux : Nations Unies. (1968). Accord sur le sauvetage des astronautes et le retour des objets spatiaux (Traité N° 9463) ; Nations Unies. (1972). Convention sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux (Traité N° 9349) ; Nations Unies. (1976). Convention sur l'enregistrement des objets lancés dans l'espace extra-atmosphérique (Traité N° 10553) ; Nations Unies. (1979), Accord sur la Lune (Traité N° 27740).

⁵⁹ Notons par ailleurs que cette régulation ouvre la voie à l'exploitation de l'espace par les entreprises américaines – en contradiction apparente avec les traités internationaux sur l'espace ; cela alimente les tensions entre États et illustre le dilemme des États, à la fois régulateurs mais voulant également se ménager une longueur d'avance sur les puissances étrangères, ici dans le domaine spatial.

⁶⁰ Josephs, J. (2023, septembre 28). Rivalité entre les États-Unis et la Chine : Elle stimule les investissements dans les technologies spatiales. BBC News Afrique. Consulté le 9 janvier 2025, à l'adresse <https://www.bbc.com/afrique/articles/c51j3zld11o>

⁶¹ Aguilar, R. M. (2021), Mega-constellations of Satellites and Their Impact on Astronomy: A Potential Need for International Regulation, Proceedings of the International Institute of Space Law 2021, pp.489-504

enregistrées (les États-Unis dans le cas de Starlink). Elles peuvent ensuite solliciter les autorisations d'envoi de leurs satellites dans l'espace toujours auprès de l'État concerné, et l'État de notifier l'ONU du lancement de satellite par un de ses ressortissants dans le respect des traités de 1967 et de 1976. Par la suite, si Starlink souhaite opérer dans un autre pays, comme la France, il faut obtenir l'autorisation d'exploitation de fréquences de la part de la ou des agences nationales compétentes. Les entreprises comme Starlink sont donc déjà soumises à une régulation claire ; toutefois cette régulation laisse une large marge de manœuvre aux entreprises :

« Il n'y a pas de limitation, vous pouvez faire ce que vous voulez. À une exception près qui est, vous n'avez pas le droit de brouiller le voisin. Donc vous devez demander une autorisation pour les fréquences de télécommunication que vous allez utiliser. »⁶²

Cette double régulation à la fois dans le domaine spatial et dans le domaine des télécommunications n'est par ailleurs pas toujours suffisante pour contraindre les entreprises à la respecter. En effet, tous les pays ne disposent pas des mêmes moyens pour faire respecter leur souveraineté, et en pratique, Starlink peut choisir de rendre son service disponible sur un territoire quelconque. Elon Musk affirme ainsi sur X (ex-Twitter) que si des États veulent couper l'accès à Starlink sur leur territoire,

« Ils peuvent toujours agiter leur poing au ciel »⁶³

En pratique, le service est cependant bien désactivé dans certaines zones géographiques, par exemple en Chine, qui s'équipe de ses propres constellations.

Enfin, les régulations concernant les méga-constellations et les acteurs comme Starlink restent peu nombreuses : si les règles en termes de télécommunication sont très claires, au niveau spatial ce sont plus souvent des standards qui sont édictés que des règles contraignantes. Élaborés par des institutions comme l'Organisation Internationale pour la Standardisation (normes ISO), ces standards peuvent ensuite être suivis, ou non, par les industriels.

« Pour le moment, il n'y a qu'une loi dans le monde, c'est la loi française. Les autres, c'est des standards. C'est-à-dire des espèces de recommandations : « Si vous faisiez ça, ça serait mieux », ou des codes de bonne conduite : « Ça serait [...] bien si vous faisiez ça » »⁶⁴

Ainsi, la procédure de fin de vie d'un satellite suit le standard d'industrie « *design for demise* », déjà expliqué au sujet des impacts environnementaux des méga-constellations. Quand bien même tous les acteurs de l'industrie le suivent, et les acteurs institutionnels comme l'ESA l'encouragent et se l'imposent à eux-mêmes⁶⁵, rien n'oblige les entreprises comme Starlink à le suivre.

Il existe donc depuis le début de la course à l'espace un cadre réglementaire international qui régit l'utilisation de l'espace. Cependant, l'émergence du New Space et de ses acteurs comme Starlink, Virgin Galactic ou Blue Origin entraîne des mutations profondes dans la façon dont l'espace s'intègre à nos sociétés. Pour autant, les domaines d'exploitation de l'espace n'ont pas fondamentalement changé depuis 50 ans (premier satellite pour les télécommunications internationales INTELSAT en 1964, premiers satellites de radiocommunication régionaux lancés dans les années 70) :

⁶² Entretien réalisé avec un chercheur en astronautique, ancien membre du CNES

⁶³ Musk, E. (2021, septembre 1). Elon Musk sur X: « @thesheetzweetz They can shake their fist at the sky » / X. X (formerly Twitter). Consulté à l'adresse <https://x.com/elonmusk/status/1433123220643717120>

⁶⁴ Entretien réalisé avec un chercheur en astronautique, ancien membre du CNES

⁶⁵ ESA. (s. d.). New Space Debris Mitigation Policy and Requirements in effect. Consulté 7 décembre 2024, à l'adresse <https://esoc.esa.int/new-space-debris-mitigation-policy-and-requirements-effect>

« Ces dernières années on voit l'émergence d'un nouveau marché avec du *direct to consumer*, c'est-à-dire que tu peux toi-même acheter un terminal Starlink, mais à part ça, on fait toujours la même chose, radiocommunication, observation, exploration. »⁶⁶

Ces nouvelles entreprises privées sont par ailleurs soumises aux réglementations existantes, à la fois dans le domaine des télécommunications et dans le domaine spatial. Néanmoins, lorsqu'il existe, le cadre réglementaire est souvent national ou se concentre sur des activités connexes, par exemple l'allocation de bandes de fréquence ou la désorbitation. De ce fait, plusieurs acteurs et institutions du domaine spatial (agence américaine d'astronomie, ESA, IISL, ...) souhaitent faire évoluer le droit de l'espace pour l'adapter à ces nouvelles formes de présence spatiale. Cette volonté de régulation se heurte toutefois au statut très particulier de l'espace : zone de recherche civile comme de projection militaire, l'espace et les méga-constellations se retrouvent au centre du jeu géopolitique, donnant ainsi à la controverse une coloration stratégique.

▪ Conflits d'intérêts et manque de coordination

Longtemps lieu de projection de sa puissance militaire et d'innovation, ce n'est que dans un second temps que l'espace joue un rôle pour la société civile. Ainsi, depuis le lancement du GPS en 1978 par les américains, les constellations de satellites se trouvent à la croisée des innovations civiles et des ambitions stratégiques. Le GPS, initialement développé par le Département de la Défense des États-Unis pour des applications militaires, a progressivement été ouvert à des usages civils, transformant des secteurs entiers tels que la navigation, la logistique et les communications. La technologie GPS, déjà alors perçue comme un enjeu stratégique, a donné lieu au développement du réseau concurrent Galileo en Europe, de Beidou en Chine ou de Glonass en Russie. De manière similaire, les méga-constellations, bien qu'orientées vers des applications civiles comme la connectivité Internet mondiale, sont en tant qu'infrastructures de communication des éléments stratégiques pour les États. D'autres États cherchent ainsi à s'équiper de constellations similaires : l'Union Européenne, par l'intermédiaire de l'ESA, travaille de ce fait sur un projet de méga-constellation souveraine appelée IRIS2, pour ne pas dépendre de méga-constellations d'origine étrangère et privée. L'ESA est pourtant un des acteurs les plus vocaux au sujet du besoin de bien gérer les risques de débris dans l'espace, ou bien sur les impacts des méga-constellations ; mais comme nous l'a expliqué un des membres du département *Space Safety* de l'ESA :

« On est le réceptacle de volonté des États qui sont membres de l'ESA. [...] en fait l'ESA en tant que telle n'a pas forcément une autonomie très importante. »⁶⁷

On comprend ainsi que malgré les volontés de régulation, la garantie de la souveraineté des États et leur volonté prime. La Chine, de son côté, a lancé depuis l'année dernière le projet concurrent Qianfan.

Les technologies comme Starlink ont par ailleurs déjà démontré leurs capacités militaires : ainsi, des milliers de terminaux Starlink ont déjà été livrés à l'Ukraine depuis le début de l'invasion russe en février 2022. Éléments essentiels de la défense ukrainienne, les terminaux Starlink permettent à l'armée ukrainienne d'avoir un accès fiable à des moyens d'information et de communication sur toute la ligne de front. Néanmoins, cela a rapidement soulevé des questions sur la dépendance à une infrastructure privée dans un conflit d'ampleur internationale. Au cours de la guerre en Ukraine, le service Starlink a brutalement été interrompu sur demande d'Elon Musk, qui craignait qu'une attaque ukrainienne contre la flotte russe en mer Noire ne provoque une escalade nucléaire, une décision controversée qui a mis en lumière l'influence démesurée d'un acteur privé sur le déroulement d'un conflit géopolitique majeur⁶⁸.

⁶⁶ Entretien réalisé avec un ingénieur dans le domaine spatial, anciennement salarié chez OneWeb.

⁶⁷ Entretien réalisé avec un ingénieur membre du département *Space Safety Policy and Coordination* de l'ESA

⁶⁸ Elon Musk a coupé Starlink pour stopper une attaque ukrainienne. (2023, septembre 8). *Courrier international*. Consulté le 8 décembre 2024, à l'adresse <https://www.courrierinternational.com/article/conflit-elon-musk-a-coupe-starlink-pour-stopper-une-attaque-ukrainienne>

Le possible double usage des technologies de communication satellitaires comme Starlink pose introduit une dimension de souveraineté dans les débats au sujet d'une régulation des projets de méga-constellations, avec des États qui à la fois souhaitent une régulation du secteur, mais sans entraver leur souveraineté avec leur propre constellation :

« La distorsion en concurrence joue à fond. [...] Eux, ils disent bien surtout, il faut appliquer les lois. Les Américains, Russes et Chinois, ils sont présents dans tous nos groupes ISO, CSS, IADC, ils disent "il faut que" et tout, mais ils ne font rien derrière. Et par exemple, la France, on a la loi spéciale française, c'est bien, on est les seuls. »⁶⁹

On constate ainsi des difficultés à communiquer et à se coordonner entre acteurs et États, dans ce qui est perçu parfois une course à la souveraineté spatiale.

La conséquence directe de ce manque de coordination est la difficulté de gestion des potentielles collisions et la limitation des débris dans l'espace.

Comme nous l'avons vu, un des plus grands dangers causés par la très forte augmentation du nombre de satellites est le risque accru de collisions, et donc un accroissement du nombre de débris en orbite. Il n'y a pas de régulation internationale sur la gestion des débris ou la réduction du risque d'en créer de nouveaux ; de ce fait, rien n'empêche les États de produire davantage de débris en orbite, si ce n'est les répercussions diplomatiques. Ainsi, la Chine a procédé en 2007 à un test de destruction d'un de ces satellites avec une arme anti-satellitaire⁷⁰, formant de très nombreux débris. Ce tir a été condamné par la communauté internationale, mais l'Inde et la Russie l'ont imité en 2019 et 2021. À travers ces tirs, les États démontrent leurs capacités militaires au reste du monde.

Au-delà de ces productions volontaires de débris, les collisions majeures arrivent parfois, comme déjà expliqué dans la première partie ; citons par ailleurs la collision le 10 février 2009 entre un ancien satellite Cosmos et un satellite de la constellation Iridium, ou encore la plainte de la Chine auprès des Nations Unies en 2021 que Starlink mettait en danger la vie de ses taïkonautes, et l'obligeait à faire des manœuvres d'évitement de sa station spatiale.

Ces événements ont été à l'origine de certaines initiatives et prise de conscience au sujet du besoin de réguler la production de débris dans l'espace, par exemple à travers le programme Zéro Débris de l'agence spatiale européenne, qui permet de privilégier la désintégration des satellites et de prévoir la fin de leur cycle de vie.

Par ailleurs, la mise en place d'un cadre réglementaire plus clair sur les procédures d'évitement entre satellites (qui doit faire la manœuvre, comment interagir, etc.) est un enjeu clair pour éviter la production de débris en plus grand nombre, et qui souffre aujourd'hui de la re-géopolitisation de l'espace. Cela soulève également des questions pratiques : qui doit éviter une collision lorsqu'un risque est détecté ? Comment établir des priorités et coordonner les manœuvres d'évitement entre opérateurs, notamment entre des acteurs publics et privés aux intérêts divergents ? Si à ce stade aucune régulation claire n'existe, il existe des acteurs, dont certains sont privés comme LeoLabs, qui envoient des alertes aux opérateurs en cas de probabilité de collision. Généralement, les alertes sont prises en compte quand la probabilité est supérieure à 1 pour 10000 à effet dans moins de 48h. Toutefois, les opérateurs ont ensuite très peu de temps pour réagir, (entre 24 et 36 heures pour réagir, avec des délais de 4 heures entre les réponses des opérateurs), et avec des modalités de communication en décalage avec l'urgence d'une telle situation :

⁶⁹ Entretien réalisé avec un chercheur en astronautique, anciennement membre du CNES

⁷⁰ China confirms anti-satellite missile test. (2007, janvier 23). The Guardian. Consulté le 25 novembre 2024, à l'adresse <https://www.theguardian.com/science/2007/jan/23/spaceexploration.china>

« Au départ on s'envoyait des mails, et on disait qui est-ce qui bouge, en général c'est la personne qui manœuvre qui bouge. Sinon, priorité au montant en général. »⁷¹

En sus de ces problématiques claires sur la chaîne de commandement humaine, l'intégration de l'intelligence artificielle dans les procédures d'évitement de satellites Starlink réduit la part d'intervention humaine dans un processus autrefois très structuré. Sans protocoles clairs, la coordination entre acteurs devient plus hasardeuse et risque de produire davantage de collisions. L'absence d'une régulation internationale efficace de l'espace permet à des entreprises comme Starlink d'agir selon leurs intérêts propres, sans avoir à prendre en compte les conséquences négatives pour la science et l'environnement.

En l'absence de toute régulation claire sur le sujet, les seuls principes généraux qui s'appliquent peuvent encourager une course effrénée à l'occupation de l'espace par les acteurs privés disposant des moyens technologiques et financiers les plus importants, conduisant à la congestion des orbites et leur monopolisation de facto. Dès lors que ces technologies ont un impact sur la société civile, et visent à démocratiser l'accès à l'Internet peu importe l'emplacement sur Terre, leur régulation doit également se penser au sein de l'arène publique.

▪ Envisager le spatial comme un espace démocratique

Le changement majeur de positionnement dans l'espace dans nos sociétés du fait du New Space et de ses applications commerciales directes invite les citoyens et la société civile à également prendre part au débat.

La troisième partie de la controverse mentionne en effet de nombreux groupes – associations, institutions publiques, collectifs... qui se saisissent de la question de méga-constellations au sein de la société également dans le but de débattre du besoin d'encadrer les pratiques. Ainsi, l'organisation en novembre 2023 d'une journée conférence avec notamment comme sujet « Satellites et environnement : quand les promesses des méga-constellations se heurtent aux limites de l'espace » par l'Arcep, l'ADEME et le CNES montre que des institutions à même de soutenir de potentielles réglementations entament une réflexion sur le sujet.

Pour autant, tous les citoyens n'abordent pas la controverse du même point de vue: si les collectifs comme Pour un réveil écologique, ou bien les associations de défense du ciel sont en faveur d'une régulation, et que même certains citoyens s'opposent au projet de Starlink localement (comme à Saint-Senier-de-Beuvron), pour beaucoup de personnes les capacités spatiales de Starlink sont synonymes de progrès et bénéfiques, en particulier au vu des services qu'elles proposent.

« Le narratif du *New Space* est très attirant, surtout que cela est couplé avec des prouesses technologiques géniales. Cela rend la critique difficile. »⁷²

Toutefois, l'impact direct que Starlink a sur les consommateurs à travers son service est un moteur pour l'établissement du débat autour de sa régulation. Au Brésil, Starlink est un acteur incontournable pour fournir un accès internet aux régions les plus reculées de la forêt amazoniennes, et dispose d'un monopole tel sur le marché de consommateurs dans ces zones que les autorités brésiliennes craignent qu'un contrôle disproportionné des infrastructures de communication par une entreprise américaine ne compromette la capacité du pays à protéger ses données sensibles ou à garantir une gestion indépendante de ses réseaux, et souhaitent donc encadrer voire remettre en question la place de Starlink dans ces zones (Le Monde, 17 novembre 2024). Les influences de ces technologies sur les consommateurs, associées à des enjeux de souveraineté, peuvent donc encourager les pouvoirs publics à se saisir du sujet et de prendre part à la controverse. Par ailleurs, le fait que Starlink soit

⁷¹ Entretien réalisé avec un ancien employé de OneWeb, entreprise concurrente de Starlink

⁷² Entretien réalisé avec un membre du collectif Pour Un Réveil Écologique, également ingénieur aérospatial chez ArianeGroupe

directement relié à l'utilisateur final facilite la communication auprès de ce dernier sur les conséquences de ces technologies.

« Si les gens sont informés des conséquences négatives des méga-constellations, cela pourrait exercer une pression sur l'industrie et les décideurs. » ⁷³

Enfin, la possibilité de réguler reste toutefois conditionnée à la capacité à produire suffisamment de données scientifiques pour cadrer les termes du débat public : si cela n'est pas fait au préalable, le risque est que la controverse demeure au niveau de la remise en question des chiffres des différentes parties, sans pouvoir entrer dans le cœur du sujet. Alors que les méga-constellations engendrent de nombreuses conséquences environnementales inconnues ou mal quantifiées, les données sont insuffisantes pour discuter de leur pertinence. Pour un réveil écologique souhaite donc davantage de recherche soit effectuée sur le sujet, notamment pour contrebalancer l'expertise de Starlink qui n'est pas partagée avec les autres acteurs :

« Des recherches supplémentaires sur l'impact environnemental des méga-constellations sont nécessaires pour obtenir une vision plus complète et élaborer des mesures de régulation. » ⁷⁴

En définitive, la controverse sur les méga-constellations comme Starlink comporte une dimension réglementaire certaine, qui s'inscrit en filigrane dans l'ensemble de ses aspects. Que ce soit sur la question de débris, des impacts environnementaux ou bien des impacts plus larges sur la société civile, de nombreux groupements (associations d'astronomie, collectifs citoyens, institutions publiques, ...) souhaitent établir une régulation plus claire et détaillée pour compléter la régulation déjà existante, mais très générique, dans le domaine spatial. Néanmoins, les acteurs de ce *New Space*, s'ils acceptent de respecter certains principes de construction (comme le « *design for demise* »), restent peu enclins à contribuer à une régulation de leur activité. De plus, les États, traditionnels régulateurs des secteurs économiques, doivent ici composer avec la dimension géopolitique et stratégique des activités spatiales, de nature à ralentir les efforts de régulation du secteur. La société civile, comme les institutions commencent néanmoins à se saisir du sujet : l'intensification des activités de Starlink et de ses concurrents promet par ailleurs un renforcement des débats sur le sujet.

⁷³ Entretien réalisé avec un membre du collectif Pour Un Réveil Écologique, également ingénieur aérospatial chez ArianeGroupe

⁷⁴ Entretien réalisé avec un membre du collectif Pour Un Réveil Écologique, également ingénieur aérospatial chez ArianeGroupe

■ Conclusion

Avec l'émergence du *New Space* et de ses acteurs, l'espace qui pendant des décennies était la chasse gardée des États voit des entreprises privées l'investir, et un marché se développer, à travers par exemple le tourisme spatial ou les méga-constellations. De ces évolutions naît une controverse sur la place de l'espace dans nos sociétés, à travers notamment l'exemple de Starlink, méga-constellation pionnière à la fois en termes de technologie et en termes d'échelle.

L'étude de cette controverse nous a permis de confirmer qu'il existe un consensus partagé par tous les acteurs sur l'existence d'impacts dus aux méga-constellations. Cependant, des nœuds de discussions apparaissent entre acteurs dès lors qu'il s'agit de détailler la nature et l'ampleur de ces impacts.

Dans un espace surencombré par les débris spatiaux, la question du passage à l'échelle de Starlink constitue un premier sujet de débat. Le déploiement massif de satellites en orbite basse alimente le phénomène de congestion orbitale et instaure un climat de défiance entre les acteurs de cette zone, pour qui les risques de collision sont autant de sources de tension. La volonté affichée des différents acteurs de travailler ensemble se heurte aux difficultés de coopération : malgré les algorithmes d'intelligence artificielle de Starlink permettant d'éviter toute collision, des situations critiques apparaissent et des collisions sont évitées en urgence. En l'absence de règles clairement établies, les protagonistes ont pour le moment pour unique recours de solliciter davantage de coopération ; et le déploiement complet de la constellation Starlink (42000 satellites) ne fait qu'accroître l'importance de ce sujet.

Au-delà de ce consensus sur la question de la gestion des débris, d'autres points de discussion émergent : en particulier, la question des impacts environnementaux des méga-constellations comme Starlink alimentent un débat sur la capacité à produire des données scientifiques solides sur le sujet. Ces impacts se déclinent en deux grands axes : les émissions en haute atmosphère provoquées par la désintégration – systématique selon les standards actuels de l'industrie – des satellites d'une part, et la retombée sur terre de structures physiques de l'autre. Starlink affirme que ses satellites se désintègrent complètement dans l'atmosphère, ce qui est source d'inquiétude pour certains chercheurs qui soulignent les risques connus de dommages faits à la couche d'ozone par l'alumine issue de la désintégration. L'impossibilité d'obtenir des données scientifiques fiables dans la zone de désintégration empêche d'établir le cadre scientifique du débat ; ce problème est exacerbé par l'absence de partage des données des industriels avec d'autres acteurs publics ou indépendants, empêchant l'établissement d'une contre-expertise face aux affirmations de Starlink. Controverse éminemment scientifique et technique, le débat sur les méga-constellations souffre donc des discussions associées sur la solidité des preuves scientifiques avancées par chacun, et met en exergue le rôle crucial de l'expertise scientifique dans des controverses comme celle-ci.

L'apparition des méga-constellations cristallise ainsi des tensions à un moment où Starlink fait basculer pour la première fois le spatial dans le commercial, donc dans l'arène publique. Son irruption dans la société civile se fait en premier lieu via la pollution lumineuse que ses satellites engendrent, en particulier pour les observatoires d'astronomie. Face au constat des effets importants de Starlink sur les observations télescopiques, Starlink propose des solutions qui divisent la communauté scientifique : là où certains laboratoires sont prêts à saisir la main tendue de Starlink, d'autres affirment que le meilleur moyen de se préserver de toute pollution est d'arrêter l'envoi de satellites. Au-delà de l'impact sur la recherche scientifique, le projet Starlink représente pour certaines associations comme Dark Sky l'obstruction du ciel étoilé, considéré patrimoine culturel de l'humanité, tandis que d'autres s'inquiètent des risques encourus par ces technologies pour la santé. Le projet Starlink s'immisce donc dans la vie des citoyens par de nombreux aspects, et le débat s'élargit : au-delà des impacts de Starlink, c'est la pertinence de ces méga-constellations à l'heure des transitions, notamment écologique, qui est posée par certains acteurs institutionnels, culturels ou bien collectifs citoyens.

Enfin, chaque nœud de discussion de cette controverse comprend une dimension réglementaire ; le débat à ce sujet est encore récent, au vu de la réticence des acteurs privés à suivre une réglementation au-delà des principes

sur lesquels ils se sont déjà accordés et qui ne les lient pas juridiquement, et de la difficulté des États à concilier rôle de régulateur et maintien de leur souveraineté dans le domaine spatial.

L'étude de la controverse autour de la méga-constellation Starlink illustre comment l'apparition de nouvelles technologies et procédés scientifiques, et le débat scientifique associé se transforme en un débat au sein de la société civile. Aux acteurs historiques du domaine spatial s'en ajoutent de nouveaux, collectifs, associations, institutions publiques prêtes à se saisir d'un sujet qui dépasse son domaine d'origine. Une telle dynamique est révélatrice des points de tension souvent associés aux controverses scientifiques : entre discours contradictoires, données différentes et difficultés à parvenir à un consensus sur les faits scientifiques, le cadre scientifique est souvent de lui-même source de controverse, autant que le sujet de débat.

La controverse sur les satellites Starlink ne s'est pas encore tarie : leur place de plus en plus prépondérante dans la société (que ce soit via l'annonce faite par François Bayrou de recourir aux satellites Starlink après le passage de l'ouragan Chido à Mayotte, ou bien la nomination d'Elon Musk, propriétaire de Starlink, au gouvernement de Donald Trump) renforce le débat autour de leur utilisation. En définitive, la question encore en suspens et sur laquelle s'arrime cette controverse est celle de la coexistence : coexistence physique des objets spatiaux en orbite, coexistence des satellites et des habitants de la Terre, mais aussi et surtout coexistence des intérêts économiques et de la préservation de notre planète.

■ Matériel et méthodes

Le présent travail repose sur une analyse approfondie de la littérature scientifique et de la presse, complétée par des entretiens avec des acteurs clés du domaine des méga-constellations de satellites.

Une première étude quantitative a été menée sur la base de données Europresse, couvrant la période de 1990 à 2024, avec un corpus initial de plus de 17 000 articles francophones identifiés à partir de l'équation de recherche "LEAD= satellite* & constellation". Ce corpus a ensuite été affiné par des recherches thématiques ciblées portant sur les aspects militaires, les télécommunications, la réglementation, les débris spatiaux et la pollution. L'analyse chronologique de ces publications a permis d'identifier l'émergence et l'évolution des différentes problématiques liées aux méga-constellations.

En parallèle, une seconde étude quantitative a été réalisée sur la base de données Scopus, constituant un corpus d'environ 600 articles scientifiques. L'analyse de cooccurrences des termes, effectuée via la plateforme CorTexT, a révélé huit clusters thématiques majeurs, allant des aspects techniques (interconnexions laser, performances des constellations) aux enjeux environnementaux (débris spatiaux, pollution lumineuse) et sociétaux (connectivité globale, implications socio-économiques).

Notre étude bibliographique s'est également appuyée sur des rapports institutionnels et des documents techniques issus des acteurs industriels du secteur. Ce travail a été enrichi par la conduite d'entretiens semi-directifs auprès d'acteurs représentatifs du secteur spatial, notamment :

- un chercheur en astronautique, ancien membre du CNES ;
- un ancien employé de OneWeb, entreprise concurrente de Starlink ;
- un membre du collectif Pour Un Réveil Écologique, également ingénieur aérospatial chez ArianeGroupe ;
- un chercheur en astrophysique du Commissariat à l'Énergie Atomique ;
- un ingénieur membre du département *Space Safety Policy and Coordination* de l'ESA.

Les témoignages recueillis ont fait l'objet d'une retranscription et d'une analyse approfondie, permettant de confronter les différentes perspectives sur les enjeux techniques, environnementaux et sociétaux des méga-constellations. Toutefois, notre enquête a été effectuée dans un laps de temps assez restreint - trois mois - et de ce fait le corpus de témoignages aurait gagné à être enrichi. Nous regrettons l'absence de témoignage directs d'acteurs de la société civile, comme l'association Agir pour l'environnement, ou d'acteurs plus proche des sphères politiques, en particulier celui du député Arnaud Saint-Martin, qui s'est emparé publiquement de la question des méga-constellations et de leurs implications sociétales. L'ensemble de ces données a été traité selon une approche chronologique et thématique, permettant de mettre en lumière l'évolution des débats et l'émergence de nouvelles problématiques au fil du développement des projets de méga-constellations. Les résultats quantitatifs détaillés des analyses bibliométriques sont présentés en annexes A et B.

■ Références

■ Articles de presse généraliste / presse professionnelle

- Barthélémy, P. (2020, février 19). Le ciel sous la menace des mégaconstellations. *Le Monde*, 4-5.
- Carrette, J. (2021). Avec Starlink, Elon Musk innove dans la pollution. *Reporterre*. Consulté le 15 novembre 2024, à l'adresse <https://reporterre.net/Avec-Starlink-Elon-Musk-innove-dans-la-pollution>
- China confirms anti-satellite missile test. (2007, janvier 23). *The Guardian*. Consulté le 25 novembre 2024, à l'adresse <https://www.theguardian.com/science/2007/jan/23/spaceexploration.china>
- Elon Musk a coupé Starlink pour stopper une attaque ukrainienne. (2023, septembre 8). *Courrier international*. Consulté le 8 décembre 2024, à l'adresse <https://www.courrierinternational.com/article/conflit-elon-musk-a-coupe-starlink-pour-stopper-une-attaque-ukrainienne>
- Gallois, D., & Barthélémy, P. (2022, décembre 16). L'espace, une gigantesque poubelle de débris spatiaux au-dessus de nos têtes. *Le Monde*.
- Hammer, A. (2024, 15 mars). Controversial new paper suggests satellites falling to earth could weaken planet's magnetic field, sounding alarm on rise of private-owned craft like Elon Musk's Starlink which could become space junk. *Daily Mail*.
- Josephs, J. (2023, septembre 28). Rivalité entre les États-Unis et la Chine : Elle stimule les investissements dans les technologies spatiales. *BBC News Afrique*. Consulté le 9 janvier 2025, à l'adresse <https://www.bbc.com/afrique/articles/c51j3zldl11o>
- La Chine dépose une plainte à l'ONU contre les satellites Starlink de SpaceX. (2021, décembre 29). *Ouest-France*. Consulté le 17 novembre 2024, à l'adresse <https://www.ouest-france.fr/monde/chine/la-chine-depose-une-plainte-a-l-onu-contre-les-satellites-starlink-de-spacex-3a57fd90-d450-427a-b2fb-5173b03c9c24>
- Lagadec, É. (2021). Un ciel observable starlinké ? Quand un projet commercial peut faire obstacle à l'avancée des connaissances. *Zilsel*, 9(2), 11-25. <https://doi.org/10.3917/zil.009.0011>
- Lamigeon, V. (2019, septembre 3). SpaceX joue-t-il les cow-boys de l'espace ? *Challenges*. Consulté le 10 décembre 2024, à l'adresse https://www.challenges.fr/entreprise/aeronautique/spacex-joue-t-il-les-cow-boys-de-l-espace_672330
- Lehoucq, R., & Graner, F. (2020, septembre 5). Constellation Starlink : La « pollution spatiale » d'Elon Musk. *La Tribune*. Consulté le 12 novembre 2024, à l'adresse <https://www.la Tribune.fr/opinions/tribunes/constellation-starlink-la-pollution-spatial-d-elon-musk-855739.html?id=19581449512088>
- Regny, D. (2024, mai 23). Guerre en Ukraine : Pourquoi les failles de l'« indispensable » Starlink d'Elon Musk inquiètent-elles Kiev ? 20 minutes. Consulté le 15 novembre 2024, à l'adresse <https://www.20minutes.fr/monde/ukraine/4092166-20240523-guerre-ukraine-pourquoi-failles-indispensable-starlink-elon-musk-inquietent-elles-kiev>

■ Article de revue scientifique

- Baker, H. (2024, 13 mars). Controversial paper claims satellite 'megaconstellations' like SpaceX's could weaken Earth's magnetic field and cause 'atmospheric stripping.' *Live Science*.
- Beck, J. C., Holbrough, I., Schleutker, T., & Guelhan, A. (2019). Improved representation of destructive spacecraft re-entry from analysis of high enthalpy wind tunnel tests of spacecraft and equipment. *Acta Astronautica*, 164, 287-296.
- Ferreira, J. P., Huang, Z., Nomura, K., & Wang, J. (2024). Potential Ozone Depletion From Satellite Demise During Atmospheric Reentry in the Era of Mega-Constellations. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2024GL109280>
- Rouat, S. (2020, mai 4). Elon Musk veut équiper de pare-soleils les trop visibles satellites de Starlink. *Sciences et Avenir*. Consulté le 6 janvier 2025, à l'adresse https://www.sciencesetavenir.fr/espace/exploration/elon-musk-veut-equiper-de-pare-soleil-les-trop-visibles-satellites-de-starlink_143942
- Solter-Hunt, S. (2023). Potential Perturbation of the Ionosphere by Megaconstellations and Corresponding Artificial Re-entry Plasma Dust (arXiv:2312.09329). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.09329>
- Walker, et al. (2020). Impact of Satellite Constellations on Optical Astronomy and Recommendations Toward Mitigations. *Bulletin of the American Astronomical Society*. 52. <https://doi.org/10.3847/25c2feb.346793b8>

▪ Ouvrages

Aguilar, R. M. (2021), Megaconstellations of Satellites and Their Impact on Astronomy: A Potential Need for International Regulation, Proceedings of the International Institute of Space Law 2021, pp.489-504

▪ Littérature grise

Lois et traités

LOI n° 2008-518 du 3 juin 2008 relative aux opérations spatiales (1), 2008-518 (2008).

Nations Unies. (1967). Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes (Traité N° 2222). <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE11F.pdf>

Nations Unies. (1968). Accord sur le sauvetage des astronautes et le retour des objets spatiaux (Traité N° 9463). <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE13F.pdf>

Nations Unies. (1972). Convention sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux (Traité N° 9349). <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE14F.pdf>

Nations Unies. (1976). Convention sur l'enregistrement des objets lancés dans l'espace extra-atmosphérique (Traité N° 10553). <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE15F.pdf>

Nations Unies. (1979). Accord sur la Lune (Traité N° 27740). <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE17F.pdf>

Nations Unies. (2002). Traités et principes des Nations Unies relatifs à l'espace extra-atmosphérique.

Rapports

Direction de la Surveillance du marché et de l'Exposition du public (DSE). (2022). Etude de l'exposition aux ondes électromagnétiques du kit de communication au réseau Starlink.

Federal Aviation Administration. (2023, 22 septembre). Report to Congress: Risk Associated with Reentry Disposal of Satellites from Proposed Large Constellations in Low Earth Orbit. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Report_to_Congress_Reentry_Disposal_of_Satellites.pdf

Large Constellations of satellites: Mitigating Environmental and other effects (GAO-22-105166). (2022). United States Government Accountability Office. <https://www.gao.gov/assets/gao-22-105166.pdf>

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. (2024). Les débris spatiaux (Les Notes Scientifiques de l'Office 44).

Pour un Réveil Écologique. (2024, janvier). Rapport collectif - Analyse sectorielle : Spatial et Environnement. <https://pour-un-reveil-ecologique.org/fr/articles/rapport-secteur-spatial/>

Notes verbales et déclarations

American Astronomical Society. (2019, juin 10). AAS Issues Position Statement on Satellite Constellations. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://aas.org/press/aas-issues-position-statement-satellite-constellations>

Déclaration des principes juridiques régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, Pub. L. No. XVIII (1963).

International Dark-Sky Association. 2023. Brief for The International Dark Sky Association On Appeal from the Federal Communications Commission. Déposé le 14 avril. Consulté le 19 janvier 2025 <https://darksky.org/app/uploads/2023/01/2023-04-14-IDA-Brief.pdf>

IAU. (2019, juin 3). IAU Statement on Satellite Constellations. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann19035/>

Note verbale datée du 3 décembre 2021, adressée au Secrétaire général par la Mission permanente de la Chine auprès de l'Organisation des Nations Unies à Vienne. (2021, décembre 3). https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2021/aac_105/aac_1051262_0_html/AAC105_1262F.pdf

Note verbale datée du 28 janvier 2022, adressée au Secrétaire général par la Mission permanente des États-Unis d'Amérique auprès de l'Organisation des Nations Unies à Vienne. (2022, janvier 28).
<https://documents.un.org/doc/undoc/gen/v22/003/47/pdf/v2200347.pdf>

Starlight. Déclaration pour la défense du ciel nocturne et le droit à la lumière des étoiles. (2007).

▪ Divers

Sites Web

Astromaterials Research & Exploration Science. (s. d.). Consulté le 12 janvier 2025, à l'adresse <https://archive.wikiwix.com/cache/index2.php?url=https%3A%2F%2Forbitaldebris.jsc.nasa.gov%2Ffaq.html#federation=archive.wikiwix.com&tab=url>

CNES. (s. d.). Les débris spatiaux. Consulté le 12 décembre 2024, à l'adresse <https://cnes.fr/dossiers/debris-spatiaux>

CNES. (2024, juillet 2). Débris spatiaux, un risque à la loupe. Consulté le 12 décembre 2024, à l'adresse <https://cnes.fr/actualites/debris-spatiaux-un-risque-loupe>

Dark Sky International. (2024, septembre 11). DarkSky Approved, the seal you can count on. Consulté le 13 décembre 2024, <https://darksky.org/news/darksky-approved-the-seal-you-can-count-on/>

ESA. (s. d.). New Space Debris Mitigation Policy and Requirements in effect. Consulté 7 décembre 2024, à l'adresse <https://esoc.esa.int/new-space-debris-mitigation-policy-and-requirements-effect>

ESA. (2019, septembre 3). Predicted near miss between Aeolus and Starlink 44. Consulté le 17 décembre 2024, à l'adresse https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/09/Predicted_near_miss_between_Aeolus_and_Starlink_44

ESA. (2024, septembre 20). Space debris by the numbers. Consulté le 10 décembre 2024, à l'adresse https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers

FCC. International Communications Filing System. (s. d.). Consulté 23 novembre 2024, à l'adresse https://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/related_filing.htm?f_key=-443498&f_number=SATMOD2020041700037

Global Positioning System. (2024). In Wikipédia. Consulté le 4 novembre 2024, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Global_Positioning_System&oldid=221463620#Pr%C3%A9sentation

PRIARTEM - Pour Rassembler, Informer et Agir sur les Risques liés aux Technologies ElectroMagnétiques. (2022, avril 6). STARLINK : Le projet d'internet par satellites d'Elon Musk annulé par le Conseil d'Etat—#DavidcontreGoliath". Consulté le 4 novembre 2024, à l'adresse https://www.priartem.org/STARLINK-Le-projet-d-internet-par.html?utm_source=chatgpt.com

Pultarova, T. (2021, août 20). Starlink satellites responsible for over 50% of close encounters in space. Consulté le 4 janvier 2025, à l'adresse <https://www.space.com/spacex-starlink-satellite-collision-alerts-on-the-rise>

Pultavara, T., Dobrijevic, D., & Mann, A. (2022, avril 14). Starlink satellites : Facts, tracking and impact on astronomy. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>

SpaceX. (s. d.). Protecting Radio Astronomy Through Real-Time Coordination. Consulté le 6 novembre 2024, à l'adresse https://api.starlink.com/public-files/Telescope_Boresight_Avoidance.pdf

SpaceX. (2022, août 25). SpaceX Invites World's Carriers to Collaborate—No More Cell Phone Dead Zones. Consulté le 4 janvier 2025, à l'adresse <https://www.spacex.com/updates>

Vidéo

Les élu-e-s Normandie Écologie - EELV (Réalisateur). (2021, avril 7). François Dufour sur la mobilisation contre le projet Starlink de SpaceX [Enregistrement vidéo]. Consulté le 20 décembre 2024, à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=EpFj8mlDpic>

Conférences

Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics 2020 Astro2020 : Optical Interference from Satellite Constellations Meeting. (2020, avril 27). [Conférence]. Consulté le 5 janvier 2025, à l'adresse <https://www.nationalacademies.org/event/04-27-2020/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020-light-pollution-rfi-meeting>

Le ciel étoilé, patrimoine mondial de l'humanité ? (s. d.). Mucem — Musée des civilisations et de la Méditerranée. [Conférence]. Consulté le 8 janvier 2025, à l'adresse <https://www.mucem.org/programme/le-ciel-etoile-patrimoine-mondial-de-lhumanite>

Réseaux sociaux

Musk, E. (2021, septembre 1). Elon Musk sur X : « @thesheettweetz They can shake their fist at the sky » / X. X (formerly Twitter). Consulté à l'adresse <https://x.com/elonmusk/status/1433123220643717120>

Autres

SpaceX. (2023, 9 octobre). Response to FAA regarding Starlink Demise.

Le **cluster orange** traite de **l'impact des constellations de satellites sur la pollution lumineuse du ciel nocturne**, en lien direct avec les préoccupations de la communauté astronomique, notamment sur l'altération des observations du ciel profond et les réflexions lumineuses des satellites.

Le **cluster jaune clair** aborde des thématiques plus techniques avec la **distribution des interférences et performances des constellations LEO**, soulignant les questions d'optimisation des signaux, de gestion des fréquences et des interférences potentielles entre satellites pour assurer une couverture efficace.

Le **cluster vert clair** se concentre sur les **connexions intercontinentales et la puissance de transmission**, explorant l'utilisation des constellations pour améliorer la connectivité globale, en particulier dans les zones rurales et isolées.

Le **cluster rouge foncé** (plus isolé) est plus spécifique, lié aux **travaux de l'Université de Varsovie sur le radar passif**, une technologie d'observation permettant de suivre la position des satellites et de surveiller les objets en orbite basse sans émettre de signal actif.

Enfin, le **cluster jaune foncé** (plus isolé) traite des recherches portant sur **l'internet par satellite et le projet Starlink**, mettant en avant les ambitions de couverture globale et l'accessibilité d'une connectivité internet haut débit depuis l'espace, ainsi que les implications socio-économiques associées à cette expansion.

Cette cartographie permet d'identifier une diversité de thèmes, allant des avancées technologiques de pointe aux controverses environnementales et sociétales, reflétant l'ampleur des débats scientifiques et la complexité des enjeux soulevés par les méga-constellations de satellites.

▪ Annexe B : Analyses quantitatives de la base de données Europresse

Nous avons recherché dans la base de données d'Europresse les articles qui traitent de constellation de satellites, du 01/01/1990 au 11/12/2024, articles en français, toutes les sources presse.

Avec la recherche « LEAD= satellite* & constellation » (figure B.1), nous avons une première base de plus de 17.000 articles francophones. Nous affinons par la suite cette base en précisant la recherche par mots-clés. Nous utilisons les outils d'Europresse pour tracer l'évolution des publications au cours du temps. Nous obtenons donc les graphes 1 à 6 avec ces recherches.

Nous pouvons observer une augmentation récente des sujets de constellations de satellites, qui n'apparaissent pas avant les années 90. Nous avons identifié des grands thèmes corrélés au sujet de constellation, d'une part avec l'analyse quantitative Scopus de l'annexe A, et d'autre part au travers de nos lectures et des entretiens réalisés. Nous décomposons donc l'évolution des publications sur ces thèmes pour mettre en évidence leur contribution. Nous avons retenu les thèmes militaires, de télécommunication, de réglementation, de débris et de pollution.

Toutes les courbes sont fortement croissantes. Les graphes B.3, B.4 et B.5 mettent en évidence que les sujets de pollution, de débris et de réglementation sont très récents, moins d'une dizaine d'années, ce qui montre que la controverse des méga-constellations est un sujet d'actualité.

Certaines courbes ont des comportements (des pics) qui correspondent fortement à des événements particuliers. En 2022, le graphe B.2 a un pic en 2022, ce qui correspond à la guerre en Ukraine, le graphe B.5 a un pic en 2019, année de destruction par l'Inde d'un de ses satellites.



Figure B.1 : Base d'articles avec la recherche « LEAD= satellite* & constellation »

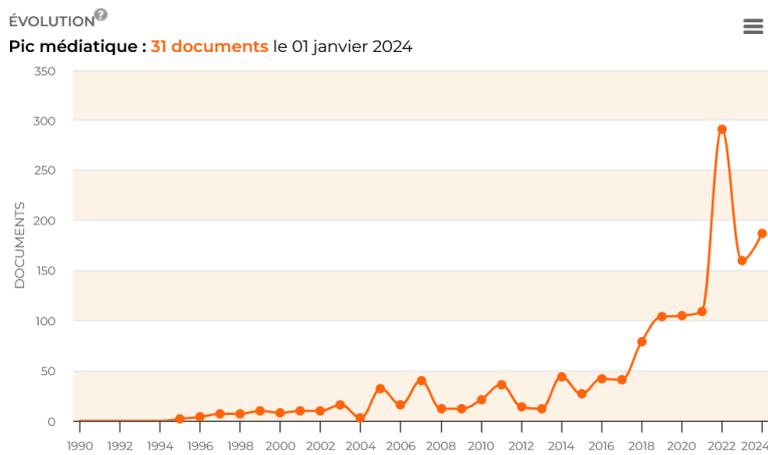


Figure B.2 : Base d'articles avec la recherche « LEAD= satellite* & constellation & TEXT= armée | militaire* | guerre* »



Figure B.3 : Base d'articles avec la recherche « LEAD= satellite* & constellation & TEXT= télécommunication* »



Figure B.4 : Base d'articles avec la recherche « LEAD= satellite* & constellation & TEXT= réglementation* | régulation* »



Figure B.5 : Base d'articles avec la recherche « LEAD= satellite* & constellation & TEXT= débris »



Figure B.6 : Base d'articles avec la recherche « LEAD= satellite* & constellation & TEXT= pollution »

