Starlink : dommages collatéraux de la flotte de satellites d'Elon Musk

Roland Lehoucq⁽¹⁾ (roland.lehoucq@cea.fr) et François Graner⁽²⁾ (francois.graner@univ-paris-diderot.fr)

(1) Service d'astrophysique, CEA-Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

(2) Laboratoire Matière et Systèmes Complexes (CNRS et Université de Paris), 75205 Paris Cedex 13

Derrière le clinquant des annonces médiatiques, la flotte de satellites Starlink soulève de multiples interrogations. Petit tour d'horizon d'aspects liés à l'astronomie, la navigation dans l'espace, les télécommunications, l'environnement, mais aussi l'économie et les traités internationaux.

Au-dessus de nos têtes est en train de se jouer une partie d'échecs invisible, mais dont les conséquences sont immenses. En mai 2021, trois fusées de la société SpaceX, propriété du milliardaire Elon Musk, ont chacune mis en orbite soixante satellites de 260 kilogrammes chacun. Ce ne sont pas les premiers : depuis novembre 2019, plus de 1600 satellites ont déjà été lancés par une trentaine de tirs.

L'objectif est de constituer un réseau de satellites, baptisé « le lien des étoiles » (Starlink). En 2025, Starlink devrait disposer de 11 943 satellites pour couvrir entièrement la planète, avec un objectif ultérieur de 42 000 s'il en obtient l'autorisation. Ces nombres faramineux sont nettement supérieurs aux quelque 8000 satellites déjà mis en orbite depuis le tout premier Sputnik soviétique, dont environ 2300 sont encore opérationnels. L'ambition ultime d'Elon Musk est de financer son rêve d'une humanité multiplanétaire, en vendant à tous les Terriens (solvables) un accès au réseau Internet via un sous-réseau satellitaire à haut

débit. Initialement, Musk annonçait viser les 3 ou 4 % des Américains vivant dans des zones peu accessibles : îles, régions polaires, etc. Si la population concernée est faible, la rentabilité pourrait en réalité provenir des centaines de bases militaires américaines dispersées autour du monde : en mai 2020, l'US Army a signé avec Starlink un contrat de test de trois ans.

Techniquement, on sait depuis plus de vingt ans se connecter à Internet via un satellite. Un satellite géostationnaire couvre à lui seul la moitié du globe terrestre ; mais étant donnée son altitude, qui est de 36 000 kilomètres, le délai des communications (appelé « temps de latence »), essentiellement fixé par la durée d'aller-retour du signal, est d'au moins 240 millisecondes. Avec des satellites en orbite basse, à quelques centaines de kilomètres d'altitude, le temps de latence est considérablement réduit. Le problème est qu'à cette altitude les satellites ne restent que quelques minutes au-dessus de l'horizon de l'utilisateur : il faut donc disposer de très nombreux satellites pour assurer une connexion permanente.

Ce texte est inspiré de l'article paru il y a un an (le 10 mai 2020) dans The Conversation, et a été entièrement mis à jour. Il a bénéficié des apports d'Emmanuelle Rio, Aurélien Ficot et Jean-Manuel Traidmond.

La nuit étoilée, peinture de Vincent Van Gogh, juin 1889. (Musée d'Art Moderne, New-York, États-Unis)

En février 2021, les 10 000 utilisateurs déjà connectés à Starlink avaient un temps de latence de l'ordre de quarante millisecondes. Et, avec 12 000 satellites en orbite basse, Starlink compte le faire descendre vers dix millisecondes.

“ L’objectif du projet Starlink est de disposer à terme de 42 000 satellites, dont les trois quarts seraient en orbite basse. ”

Pollution lumineuse et embouteillage en orbite

Juste après leur lancement, les satellites sont encore suffisamment bas pour être très clairement visibles à l'œil nu. Une fois sur leur orbite, ils sont bien plus faibles et à peine discernables, avec une magnitude 6, ce qui fait néanmoins vivement protester les astronomes professionnels, car les longues traînées lumineuses des satellites Starlink (fig. 1, p. 46) rendent inutilisables les images prises en lumière visible. Le 9 mars 2020, dans une intervention donnée à la conférence Satellite 2020, Elon Musk se dit convaincu que ses satellites n'auront aucune conséquence sur les découvertes astronomiques et que, s'il le faut, leur surface sera peinte en noir. Le test effectué sur le satellite 1130 "DarkSat" n'est guère convaincant et n'a pas encore été validé, d'autant que cette proposition a des limites. En effet, les satellites sont sou-

vent réfléchissants pour limiter l'absorption du rayonnement solaire : on évite de noircir intégralement leur surface car cela les chaufferait fortement^(a).

Le modèle suivant ("VisorSat", équipé de visières) est prévu pour être sous le seuil de visibilité à l'œil nu, mais cela saturera quand même les instruments ultrasensibles des astronomes, capables d'observer des astres quatre milliards de fois plus faibles que ce seuil. L'effet de ces traînées lumineuses est particulièrement désastreux pour les télescopes à grand champ, comme le Vera C. Rubin Observatory (nouveau nom du Large Synoptic Survey Telescope), capable d'effectuer un relevé de l'ensemble du ciel en seulement trois nuits : on estime que durant les premières et les dernières heures de la nuit, quand un Soleil pas trop bas sous l'horizon rend les satellites plus brillants, 30 à 40 % des poses seront inutilisables.

>>>

1. Image montrant les trainées laissées par les satellites Starlink, obtenue par l'Observatoire interaméricain du Cerro-Tololo (Chili), spécialisé dans l'observation des galaxies les moins lumineuses.

>>>

L'inquiétude gagne aussi les autres opérateurs de satellites. La région des orbites terrestres basses, déjà utilisées par les satellites de télédétection, de télécommunications et scientifiques, mais aussi par la Station spatiale internationale, va clairement être embouteillée. L'augmentation probable des collisions spatiales et la multiplication des débris qui en résultera,

pourraient dans le pire des cas rendre inutilisables les orbites basses et l'environnement spatial proche. Le premier incident a déjà eu lieu : le 2 septembre 2019, l'Agence spatiale européenne a dû manœuvrer un de ses satellites d'observation de la Terre pour éviter une collision avec un des engins de Starlink, après que l'entreprise ait refusé de modifier l'orbite de celui-ci. Elon Musk répond que tous ses satellites sont dotés de propulseurs capables de les faire retomber sur Terre en fin de vie, ce qui ne réduit en rien le risque durant leur vie opérationnelle.

Déchets dans l'espace, déchets sur Terre

D'autres inconvénients sont plus difficiles à corriger, et sans doute plus graves encore. Depuis le premier lancement, environ 3 % des satellites Starlink sont déjà hors service ; 116 d'entre eux sont retombés et, avant de toucher terre, ont été détruits par leur entrée dans l'atmosphère. Si ce taux de

défection était maintenu durant leur vie opérationnelle estimée de 5 à 7 ans, cela ajouterait, au bout de ce délai, plusieurs centaines de débris spatiaux aux 34 000 dont la taille dépasse dix centimètres et qui font déjà l'objet d'une surveillance^(b).

Les opérateurs spatiaux privés étant soumis aux mêmes normes que les opérateurs institutionnels, Starlink a choisi d'en placer les trois quarts à moins de 600 kilomètres, altitude sous laquelle les frictions sur l'atmosphère résiduelle finissent par faire retomber un satellite sur Terre en quelques années, même en cas de panne du propulseur prévu à cet effet. Le quart restant sera placé un peu au-delà de 1000 kilomètres d'altitude, où la redescente naturelle n'est plus aussi efficace : un satellite en panne dans cette région y reste durant des siècles, provoquant une accumulation de déchets dans cette région orbitale. Ce risque est réduit depuis qu'en avril 2020, SpaceX a modifié ses plans en demandant l'autorisation à la FCC (Commission Fédérale des Communications américaine) pour qu'une plus grande fraction de ses satellites orbitent à moins de 600 kilomètres d'altitude... aux dépens de l'encombrement des orbites basses, aussi convoitées par d'autres opérateurs.

Tout aussi préoccupante est la mise en place d'infrastructures démesurées, impliquant une prédation des ressources en énergie et en matière de notre planète, tant pour construire les satellites que pour les lancer, les piloter ou les utiliser. Contrairement aux satellites géostationnaires habituellement utilisés dans les télécommunications, les satellites Starlink orbitent à basse altitude. Ils traversent le ciel visible d'un lieu donné en seulement quelques minutes. Pour les suivre et communiquer avec eux, chaque utilisateur devra acheter une antenne spéciale (dite à commande de phase). Ces antennes au sol devront être fabriquées en masse pour rendre leur prix abordable ; pour l'instant le kit de réception est vendu 499 dollars. SpaceX a déjà demandé l'autorisation d'en installer un million... pour commencer. En outre, SpaceX prévoit d'installer des raccords entre son réseau Starlink et les principaux points d'interconnexion du réseau Internet.

Articles techniques sur l'impact des constellations satellitaires :

- J. C. McDowell, "The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation", *The Astrophysical Journal Letters*, **892** (2020) L36.
- O. R. Hainaut et A. P. Williams, "Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains", *Astronomy and Astrophysics* **636** (2020) A121.

Des flottes de satellites privées et en concurrence

Comme pour les trottinettes électriques, plusieurs industriels se lancent dans l'aventure des constellations de satellites, qui nécessiteront une production matérielle désastreuse du point de vue écologique comme économique. Le but est d'être le premier à occuper le terrain pour emporter la partie, notamment pour capter le marché potentiellement colossal des objets connectés. Elon Musk a forcé l'allure pour avoir un coup d'avance. Mais il n'est pas le seul, et plusieurs systèmes redondants pourraient bientôt tourner au-dessus de nos têtes : l'Américain Kuiper promu par Amazon, le Chinois Hongyan... Il y aura tout au plus un gagnant, et peut-être même aucun. Les médias ont glosé de la constellation OneWeb du milliardaire Greg Wyler, qui a fait faillite ; le gouvernement anglais et l'opérateur indien de téléphonie Bharti Global se sont unis pour le racheter et investir un milliard de dollars dans un projet qui, comme Starlink, vise à ajouter 42 000 autres satellites au-dessus de nos têtes.

Le 9 mars 2020, Elon Musk a annoncé que grâce à Starlink, « les clients pourront regarder des films en haute définition, jouer à des jeux vidéo et faire tout ce qu'ils veulent sans être limités par le débit ». C'est aussi l'ambition de la 5G, qui s'adresse plutôt aux zones densément peuplées, alors que Starlink intéresse les régions plus isolées. Or le numérique contribue déjà pour 4% des émissions mondiales de gaz à effet de serre^(a), et l'arrivée de ces nouvelles possibilités n'arrangera certainement pas la situation. Quant à la fin de la phrase d'Elon Musk, elle est de mauvais augure : « mes clients pourront faire tout ce qu'ils veulent, comme moi je fais ce que je veux ». Elon Musk semble être en train de s'approprier l'espace.

Retour en arrière : en 1967, un traité international a déclaré l'espace « bien commun de l'humanité ». Mais une loi états-unienne votée unilatéralement sous Obama, en 2015, autorise explicitement les citoyens américains à « s'engager dans l'exploration et l'exploitation commerciales des ressources spatiales ». Désormais c'est la FCC,

l'autorité américaine chargée de réguler les communications de son pays, qui autorise une entreprise comme Starlink à privatiser l'espace au prétexte de fournir un réseau de communication. D'ailleurs la Division espace de la FCC expose sans fard ses priorités : autoriser plus de satellites, plus vite, avec moins de réglementation. En France aussi, l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep) a donné son feu vert à Starlink le 9 février 2021 pour exploiter les fréquences qui transmettront le signal du satellite à l'antenne domestique. Mais la demande de Starlink d'installer neuf antennes relais à Saint-Senier-de-Beuvron (Manche) a été refusée par la commune.

Pour l'instant il n'y a aucune régulation mondiale, chaque État est souverain dans ses lancements. Qui réagira ? Des États voudront-ils mettre fin à la surenchère spatiale tant civile que militaire ? Une association portera-t-elle devant la justice américaine cet accaparement matériel et symbolique de l'espace, comparable à celui des *enclosures* dans l'Angleterre du XVI^e au XIX^e siècles qui ont transformé l'administration des terres en un système de propriété privée, ou des compétitions coloniales des Européens en Afrique aux XIX^e et XX^e siècles ? Les conséquences de la mise en service de la constellation satellitaire Starlink ne sont pas que matérielles et énergétiques, elles sont aussi politiques, sociales et humaines. ■

(a) Pour gagner 2,5 magnitudes visuelles, soit un facteur 10 en flux lumineux reçu, il faudrait un noir typique absorbant 90 % de la puissance lumineuse reçue : la température d'équilibre du satellite serait alors de l'ordre de 110 °C.

(b) On estime à environ 900 000 le nombre de débris dans la gamme du centimètre et à 135 millions le nombre de ceux plus petits que le millimètre.

(c) Cette part est en voie d'être doublée d'ici cinq ans. Les 3,8 TWh d'électricité consommés par le numérique mondial en 2020 sont comparables aux 4 TWh de toute l'Europe !

Pour aller plus loin

► <https://cutt.ly/Starlink-le-plan-Elon-Musk>