

LES GRANDES CONSTELLATIONS DE SATELLITES, UNE INNOVATION À RÉGULER

Au-dessus de nos têtes a lieu l'avènement d'une nouvelle ère dans le secteur spatial, incarnée par de vastes réseaux de satellites opérés par des acteurs privés. Explications de **Guy Perrin**, coauteur d'un rapport de l'Académie des sciences sur ce marché en effervescence, entre formidables avancées et risques à prévenir.

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, des académiciennes et académiciens analysent et apportent leur éclairage sur les grands enjeux du monde contemporain au travers de questions scientifiques qui font l'actualité.

« **C**onstellation » : ce mot désigne un ensemble d'étoiles, au sens étymologique du terme. Parmi les plus connues figurent les 12 constellations du zodiaque, qui servaient de repères temporels dans les temps anciens. Les constellations visibles depuis l'hémisphère Nord ont été nommées par les astronomes des civilisations méditerranéennes ; celles visibles uniquement depuis l'hémisphère Sud ont été baptisées plus tard, notamment par l'abbé Lacaille au XVIII^e siècle. « Constellation » désigne par extension un ensemble, au même titre que « pléiade », qui est issu d'un groupe d'étoiles de la constellation du Taureau. C'est ainsi que « constellation » a naturellement été utilisé pour désigner des ensembles de satellites opérant soit conjointement, soit pour le compte d'un seul opérateur. Ces constellations sont mises en position par des lanceurs sur des trajectoires allant des orbites basses, à quelques centaines de kilomètres d'altitude, à des orbites géostationnaires offrant l'avantage de satellites fixes par rapport au sol et d'altitude bien

plus élevée, à 36 000 km. D'autres occupent aussi des orbites intermédiaires de 1 000 km à 20 000 km, certaines répartissant leurs satellites entre basses et moyennes altitudes.

Le premier satellite artificiel de l'histoire, Spoutnik 1, a été lancé en 1957 par l'URSS. Les États-Unis ont suivi en 1958 avec Explorer 1, puis la France avec son premier satellite, Astérix, en 1965. Ces précurseurs, essentiellement destinés à démontrer la capacité spatiale des États, ont très tôt présenté un intérêt scientifique.

LA RÉVOLUTION DU NEW SPACE

Leur intérêt commercial n'a cependant pas tardé à être perçu pour les télécommunications. En 1962, Telstar 1, lancé de Cap Canaveral, financé par des fonds privés (1), est le premier satellite de télécommunications mis en orbite, tournant historique (avec notamment la première retransmission télévisée en direct en mondovision) et brique expérimentale d'une toute première constellation de satellites commerciaux, Intelsat. Développée à partir de 1965, celle-ci est représentative des constellations des années 1960 à 2000, constituées de quelques dizaines de satellites. Le rythme annuel des mises en orbite du milieu des années 1970 jusqu'au début des années 2000 allait de 75 à 100.

Ce rythme a fortement augmenté à partir de la fin des années 2010, passant à 300 en 2019, dépassant

EN PARTENARIAT AVEC



1 000 en 2020 et atteignant 2 900 en 2023. 14 000 satellites ont été recensés début 2024, l'essentiel ayant donc été lancé au cours des toutes dernières années. Et l'accroissement de la capacité des lanceurs augure une augmentation de la cadence.

Ces dix dernières années ont vu l'avènement d'une nouvelle ère de l'utilisation de l'espace, le New Space (nouvel âge spatial), qui combine acteurs nouveaux – notamment du secteur privé, dont l'emblématique SpaceX d'Elon Musk –, réduction des coûts de lancement grâce à des vecteurs réutilisables, et baisse des coûts de fabrication des satellites faisant appel à des composants bon marché et/ou à des plateformes de petite taille lançables par des fusées à la portée de start-up (dont le nombre a quintuplé en dix ans). Ce bouleversement du secteur spatial offre la possibilité de constellations à basse altitude de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers de satellites bénéficiant de progrès technologiques et de recherches décrits dans un rapport de l'Académie des sciences paru le 30 mars 2024 (voir « En savoir plus »).

Le spatial est l'unique moyen de porter un regard extérieur sur la Terre avec un grand nombre d'applications, de la surveillance environnementale (2) au suivi des catastrophes, à la prévision météorologique et à la géolocalisation en passant par les applications agricoles et militaires, pour lesquelles un grand nombre de constellations existent, mais constituées d'un petit nombre de satellites. Autre application

PROFIL

Astronome de l'Observatoire de Paris, Guy Perrin a notamment contribué à l'instrument Gravity du Very Large Telescope et à l'étude du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée. Membre de l'Académie des sciences, il est coauteur du rapport « Grandes constellations de satellites : enjeux et impacts ».

majeure, les télécommunications mettent en relation n'importe quel point du globe terrestre au moyen de téléphones dits « satellites ». À cela s'ajoutent les constellations pour la diffusion de programmes de télévision reçus via des antennes paraboliques. La révolution du New Space ouvre la voie à des constellations constituées non plus de quelques dizaines de satellites, mais de milliers, voire de dizaines de milliers. Cette densité permet l'émergence d'applications à très faible temps de latence, qui est fonction du temps de parcours des ondes radio entre un émetteur et un récepteur à la vitesse de la lumière (3). Plus l'altitude des satellites est faible, plus le temps de latence est court. De 500 millisecondes pour des satellites géostationnaires, il passe à 30 millisecondes pour des satellites en orbite basse, avec à la clé des télécommunications quasiment instantanées et des performances Internet comparables à celles des réseaux fibrés au sol. Les satellites en orbite basse défilant très rapidement, un bien plus grand nombre fonctionnant en réseau est nécessaire pour assurer un contact permanent avec les utilisateurs.

CAPACITÉS D'INDÉPENDANCE ET D'AUTONOMIE

Ces nouvelles constellations sont donc synonymes de téléphonie mobile et d'Internet haut débit partout sur Terre, indépendamment de stations d'ancrage locales, au sol. Elles permettent ainsi à des opérateurs de s'affranchir de tout contrôle local sur les télécommunications. Et elles sont très résilientes, la destruction d'un ou de quelques satellites n'empêchant pas le fonctionnement du réseau, qui peut se reconfigurer. Des propriétés cruciales également pour les applications militaires, et qui s'appliquent aussi bien aux constellations de télécommunication qu'aux constellations d'imagerie. Ces perspectives très intéressantes dans de nombreux domaines, marchands mais aussi stratégiques, sont également un enjeu de souveraineté, disposer de telles capacités conférant indépendance et autonomie aux États sur le plan stratégique.

Mais cela ne va pas sans effets secondaires, potentiellement très préoccupants au rythme actuel des lancements, sur lesquels alertent un rapport du Government Accounting Office (GAO, organisme d'audit du Congrès américain) et celui de l'Académie des sciences (voir « En savoir plus »). Le premier d'entre eux est la conséquence de cette croissance sur l'environnement. La centaine de lancements annuels ou plus dans l'avenir va générer son lot de polluants. Ils accroissent par ailleurs le nombre de débris en orbite basse qui sont un danger pour les satellites et les lanceurs eux-mêmes compte tenu des importantes vitesses relatives (4), de plusieurs dizaines »

LES SATELLITES RÉFLÉCHISSENT LA LUMIÈRE SOLAIRE, DEVENANT DES SOURCES BRILLANTES QUI DÉGRADENT LES DONNÉES DES OBSERVATOIRES.

» de kilomètres par seconde. Et pour toute présence humaine. En conséquence, les satellites doivent corriger leurs trajectoires pour éviter des débris lorsqu'ils peuvent être détectés.

Mais, plus préoccupant encore, la densité de satellites en orbite basse devient telle que la perspective de la réalisation du syndrome de Kessler ne peut plus être écartée. Selon celui-ci, passé une densité critique, une collision entre deux satellites déclenche une réaction en chaîne incontrôlable conduisant à la production importante de débris, puis à la destruction d'un grand nombre de ces satellites percutés par ces débris, et ainsi de suite. Cela s'accompagnera de l'impossibilité, au moins temporaire, de procéder à de nouveaux lancements sans risques, y compris de missions spatiales à but scientifique.

UN CENTRE POUR LA PROTECTION DES CIEUX

Dans le domaine de l'astronomie, la présence d'un grand nombre de satellites en orbite basse génère une pollution dommageable pour les observations depuis le sol. Les satellites réfléchissent la lumière solaire, devenant des sources brillantes au coucher du Soleil et à l'aube qui dégradent les données des observatoires les plus modernes. 30 % de celles du Vera C. Rubin Observatory, télescope à grand champ qui sera mis en service en 2025 au Chili, risquent d'être en partie perdues si le nombre de satellites est triplé. C'est aussi la fin des sanctuaires qui protègent les observatoires radio des émissions des télécommunications terrestres, tels les déserts du Karoo en Afrique du Sud et de Murchison en Australie, où le réseau géant Square Kilometer Array Observatory, appelé à être le plus performant jamais conçu pour la radioastronomie basse fréquence, est en construction : il n'y sera pas à l'abri de celles qui viennent de l'espace.

Ces perspectives préoccupantes ont amené l'Union astronomique internationale (IAU) à créer le centre pour la protection des cieux (CPS) et à mener des actions auprès des industriels du spatial mais aussi du comité de l'ONU sur les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (Copuos), qui a mis le sujet à son ordre du jour pour les cinq années à venir. Cette coopération commence à porter ses fruits : par



Ces constellations permettant des télécommunications quasi instantanées partout sur Terre, des opérateurs peuvent s'affranchir de tout contrôle local.

exemple, les dernières générations de satellites de la constellation Starlink de SpaceX – qui vise 42 000 satellites – sont bien moins brillantes.

De même, des protocoles sont à l'étude entre astronomes et opérateurs pour interrompre les émissions directes au-dessus des observatoires radio, l'émission des appareils électroniques à bord elle-même restant cependant une nuisance. Si certains opérateurs jouent le jeu de la coopération, la vigilance est nécessaire, comme le rappelle l'exemple du prototype de satellite de communication BlueWalker III mis en orbite en 2022 : ses 64 m² d'antenne en font la sixième source la plus brillante du ciel !

Il demeure possible que les grandes constellations commerciales ne soient pas toutes financièrement viables et que la croissance actuelle finisse par ralentir, évitant le déclenchement du syndrome de Kessler. Cependant, la pratique du « premier arrivé, premier servi » a ses limites et une régulation internationale reposant sur des normes établies par toutes les parties prenantes – à laquelle l'Académie des sciences, selon ses missions, entend contribuer par son rapport – est plus que jamais nécessaire pour se prémunir des dérives possibles dans ce domaine en pleine effervescence. ●

(1) Développé par AT&T, leader américain du secteur, dans le cadre d'un projet associant États-Unis, Grande-Bretagne et France.

(2) Voir « Étudier depuis l'espace l'océan, ce grand régulateur du climat », par Anny Cazenave, « l'Humanité Dimanche » n° 489 du 3 décembre 2015, en partenariat avec l'Académie des sciences, en ligne sur www.academie-sciences.fr.

(3) La vitesse de propagation de la lumière dans le vide est une constante physique de l'Univers. Elle vaut 299 792 458 mètres par seconde.

(4) La vitesse relative d'un corps par rapport à un autre est la vitesse du premier considérant le second fixe. Deux TGV se croisant à 300 km/h ont des vitesses relatives de 600 km/h.

EN SAVOIR PLUS

Le site de l'Académie des sciences : www.academie-sciences.fr

« Grandes constellations de satellites : enjeux et impacts », de François Baccelli, Sébastien Candell, Guy Perrin et Jean-Loup Puget, rapport de l'Académie des sciences, 30 mars 2024. En ligne, ainsi qu'un résumé, sur son site.