

Réseaux de communications sur constellations de satellites

Par François BACCELLI
Académie des Sciences

Cet article, qui est issu du rapport de l'Académie des Sciences « Grandes constellations de satellites : enjeux et impacts », a pour objectif de décrire l'organisation, les fonctionnalités et les perspectives des réseaux de communications utilisant des constellations de satellites.

Il se concentre sur les fonctionnalités de communications haut débit. Il décrit les architectures utilisées ainsi que les caractéristiques générales des satellites qui composent ces constellations. Il décrit aussi les principes régissant les communications entre les divers éléments du réseau. Il passe en revue les perspectives à plus long terme de cette classe de réseaux.

INTRODUCTION

Le nouvel âge spatial (*New SpaceX*) marque l'avènement d'une ère nouvelle dans l'utilisation de l'espace caractérisée par une ouverture de l'espace à de nouveaux acteurs fondée sur de nouvelles technologies spatiales, par de nouvelles fonctionnalités pour les satellites mis en orbite et par le développement de constellations de satellites, principalement dans les domaines des communications et de l'observation de la Terre. Ces développements s'appuient sur des avancées scientifiques et technologiques de premier plan ainsi que sur des investissements publics et privés considérables.

Le résultat le plus visible du déploiement de ces nouveaux réseaux spatiaux est de permettre des connexions Internet à haut débit et faible latence en tout point du globe terrestre. Combinés à des capacités d'observation de la Terre, ces nouveaux moyens de communications permettent aussi d'agir en temps réel dans toute région, y compris dans celles dépourvues d'équipements autres que les terminaux.

ARCHITECTURE

L'orbite d'un satellite terrestre s'inscrit dans le plan orbital qui passe par le centre de la Terre et qui est caractérisé par son inclinaison, qui mesure l'angle que ce plan forme avec le plan équatorial, et par le point ascendant de l'orbite. Ce point ascendant est repéré par l'angle, mesuré dans le plan équatorial, entre le point où le satellite traverse le plan équatorial du sud vers le nord et un point donné sur l'équateur. Les orbites circulaires sont définies par un seul paramètre complémentaire qui est l'altitude de l'orbite.

On distingue trois types d'altitudes :

- LEO ou *Low Earth Orbit*, entre 350 et 1 000 km avec une période de l'ordre de la centaine de minutes ;
- MEO ou *Medium Earth Orbit*, typiquement entre 1 000 et 20 000 km, avec une période de quelques heures ;

- GEO ou géostationnaire, avec une altitude de 36 000 km. La période est dans ce cas égale à 24 heures et le satellite reste stationnaire par rapport à la Terre.

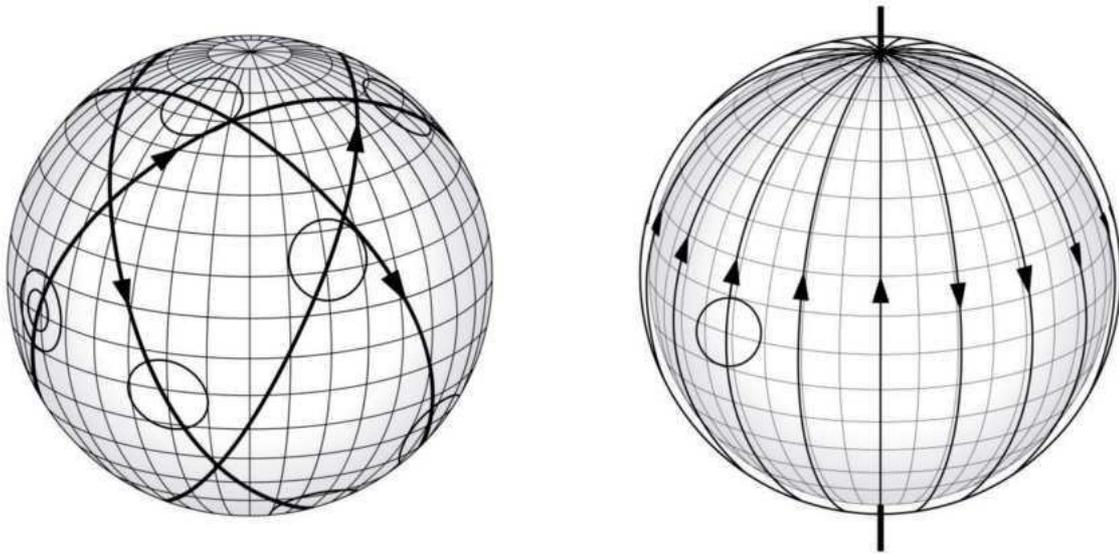


Figure 1 – À gauche : Walker delta (base de Starlink et Galileo) ;
à droite : Walker en étoile (base de OneWeb) (Source : [1]).

La classification de Walker

Deux classes de constellations de satellites, LEO ou MEO, fréquemment utilisées sont les configurations de type Walker delta et Walker en étoile (voir la Figure 1).

Dans une constellation Walker delta, tous les plans orbitaux ont la même inclinaison, les points ascendants de ces orbites sont répartis de manière périodique sur les 360 degrés de l'équateur, les altitudes des orbites sont toutes égales et les satellites d'une même orbite sont positionnés de manière périodique sur cette dernière.

Les constellations Walker en étoile utilisent des orbites avec des inclinaisons proches de 90 degrés (donc quasi polaires). Les plans orbitaux sont organisés de façon périodique sur l'équateur mais sur 180 degrés seulement, si bien que sur l'équateur, les satellites sont tous ascendants sur l'intervalle 0,180 degrés et tous descendants sur le complément.

De nombreuses variantes de ces constellations de base sont utilisées, comme par exemple des combinaisons multi-altitudes, ou star-delta, ou encore LEO-MEO-GEO.

Stations d'ancrage

Les satellites d'une constellation jouent le rôle de passerelle entre des utilisateurs et un réseau/système terrestre (Internet, base de données, etc.). Pour la voie montante, les données émises par l'utilisateur sont envoyées par ce dernier au satellite et renvoyées par le satellite vers des stations au sol qui sont connectées au réseau/système terrestre en question et qu'on appelle des stations d'ancrage.

Pour les orbites basses, en l'absence de communications entre les satellites, il faut beaucoup de stations d'ancrage si on souhaite disposer d'une couverture continue. En effet, la zone de couverture d'un satellite en orbite basse est réduite et la couverture d'un utilisateur requiert que le satellite auquel il est rattaché couvre aussi une station d'ancrage à tout moment. Cette dernière contrainte est levée s'il y a des communications directes entre les satellites permettant de relayer l'information du satellite qui couvre l'utilisateur vers un satellite qui couvre une station d'ancrage. Les communications entre

satellites permettent donc une réduction du nombre des stations d'ancrage et du nombre des satellites.

Satellites

Il y a une grande variabilité dans les caractéristiques des satellites. Il convient en particulier de bien distinguer les satellites utilisés depuis les années 1960 pour les orbites géostationnaires et ceux qui composent aujourd'hui les constellations en orbite LEO ou MEO.

La masse des satellites géostationnaires dépasse plusieurs tonnes (3 tonnes pour Eutelsat Konnect) alors que celle des micro satellites d'observation d'ICEYE est de l'ordre de 70 kg. Starlink s'oriente désormais vers des satellites de deuxième génération plus lourds, d'environ 1 500 kg.

Il faut environ 300 M€ pour la conception et la fabrication d'un satellite géostationnaire. Il faut ajouter à ceci environ 100 M€ pour le lancement et 100 M€ pour la construction de la station d'ancrage. On obtient ainsi un coût global d'environ 500 M€ pour un satellite qui a une durée de vie de 15 à 20 ans. Le coût d'un satellite en orbite basse est bien plus modeste et peut être considéré comme celui d'un consommable. Pour OneWeb, l'ordre de grandeur du coût d'un satellite est de 1 M€.

FONCTIONNALITÉS

Les constellations de satellites sont utilisées dans des contextes multiples qu'on peut classer en trois grandes catégories :

- Les télécommunications, principalement les communications haut débit de type accès Internet universel, mais aussi les communications bas débit pour l'Internet des objets. C'est l'accès Internet haut débit qui conduit aux très grandes constellations actuelles ou en projet qui s'appuient sur des dizaines de milliers de satellites LEO ou MEO.
- L'observation de la Terre : cette fonctionnalité, très diversifiée, conduit au déploiement de nombreuses constellations, chacune avec un nombre modéré de satellites.
- La géolocalisation et la distribution du temps : ce domaine déjà ancien comporte peu de constellations chacune avec un nombre réduit de satellites MEO.

Cet article se concentre sur les communications haut débit. Les très grandes constellations en orbite basse ou moyenne permettent une couverture Internet qui est à la fois universelle (malgré des contraintes en latitude pour certaines configurations), sans interruptions (il faut à cet effet beaucoup de satellites dans le cas LEO), à haut débit (sous des contraintes fortes sur le nombre d'utilisateurs par satellite), avec une latence réduite et avec une bonne efficacité spectrale (grâce aux orbites basses) et résiliente car distribuée.

Les éléments du réseau

Le réseau comporte trois types d'éléments : les terminaux, les stations d'ancrage, qui sont les éléments terrestres, et les satellites en orbite. Les terminaux sont équipés d'antennes qui permettent de communiquer directement avec les satellites. Les satellites communiquent avec les terminaux, éventuellement avec les autres satellites proches et avec les stations d'ancrage. Ces dernières sont des stations au sol qui peuvent être vues comme des premiers points d'accès vers l'Internet et ses bases de données. Le réseau a pour fonction d'interconnecter à tout moment chaque terminal avec une station d'ancrage au moyen d'une connexion comportant au moins un satellite et donc au moins deux liens radio (celui entre le terminal et le satellite et celui entre le satellite et la station d'ancrage).

Connectivité

La connexion entre l'utilisateur final et l'Internet comporte un lien utilisateur-satellite, puis une série de liens inter-satellites et enfin un lien satellite station d'ancrage. S'il n'y a pas de connexions entre satellites, pour avoir une couverture continue, il faut donc qu'à tout moment et pour tout utilisateur, il y ait au moins un satellite ayant la double propriété suivante : être en vue de l'utilisateur et être en vue d'une station d'ancrage.

La situation est différente lorsque les satellites communiquent entre eux. Dans ce cas, au prix de chemins de connexion plus longs, c'est-à-dire avec plus de liens inter-satellites, on peut obtenir un accès haut débit dans une région du globe, tant sur la voie montante que sur la voie descendante, sans avoir à s'appuyer sur des stations d'ancrage dans cette région.

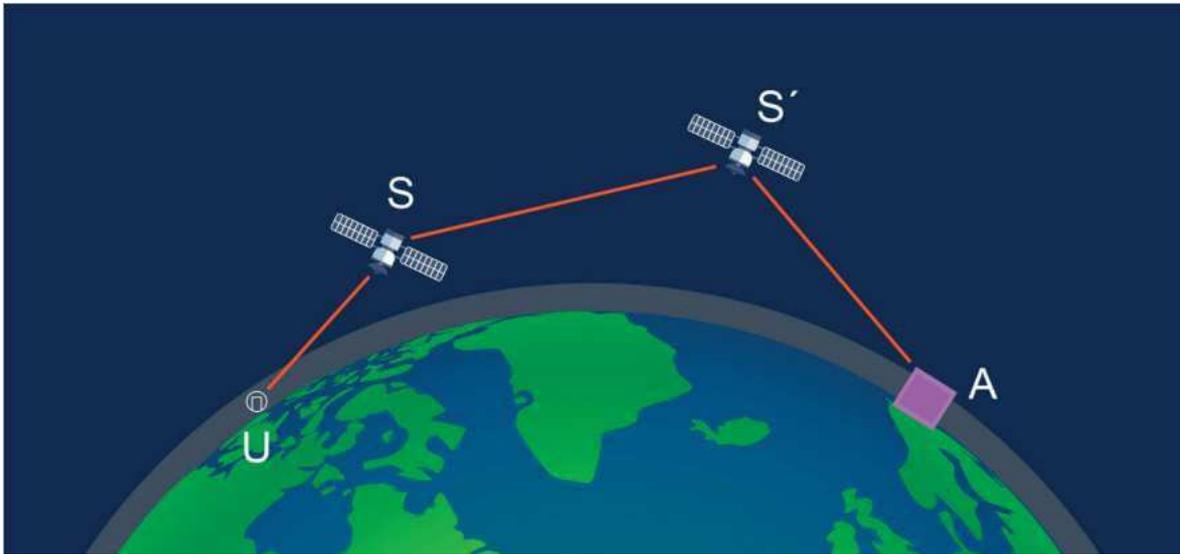


Figure 2 – Les éléments du réseau : U : *utilisateur final*, S et S' : *satellites*, A : *station d'ancrage*. Exemples de lien S-U et S'-A : *Bandes Ku et Ka*. Liens entre satellites : *Laser* (Source : [1]).

Fréquences

Communications utilisant les radiofréquences (RF)

Dans le contexte du haut débit, les constellations de satellites actuelles et bon nombre des constellations proposées utilisent ou utiliseront les bandes radiofréquences Ku (10,7-14,5 gigahertz [GHz]), Ka (17,3-30 GHz) et V (37-50,4 GHz) pour les liens radio entre les satellites et les éléments de réseau au sol. C'est le cas notamment pour Starlink. Il est aussi envisagé d'utiliser les bandes de la 5G dans le cadre d'accords avec les opérateurs terrestres des réseaux 5G.

Communications optiques et THz

Les communications entre satellites, qui doivent assurer des débits beaucoup plus importants, peuvent se faire en utilisant des faisceaux laser optiques. Cette option est celle des dernières versions des satellites de la constellation Starlink.

Une alternative qui est étudiée est la bande de fréquence dite THz qui couvre la bande (100 GHz, 10 THz). Au sol dans une atmosphère humide, ces bandes de fréquences permettent uniquement des communications sur de courtes distances (quelques km) du

fait de l'atténuation des ondes THz par la vapeur d'eau atmosphérique. Par contre, les ondes THz ne sont pas sensibles à la turbulence atmosphérique.

Antennes

Dans les cas LEO ou MEO, les antennes au sol sont plus complexes que dans le cas géostationnaire car elles doivent pouvoir suivre le satellite assurant le raccordement et changer de satellite pour maintenir la connexion.

Les antennes des stations d'ancrage gèrent de grands débits de données, possèdent une grande ouverture et sont pointées vers les satellites proches.

Les antennes situées à bord des satellites doivent pouvoir former plusieurs milliers de faisceaux simultanés vers les différents utilisateurs. Ce sont des antennes sophistiquées utilisant des réseaux multiples d'éléments répartis sur des surfaces de quelques m² capables d'orienter, en temps réel, de façon adaptative des faisceaux dans la zone géographique concernée.

Quant aux utilisateurs, ils ont, eux aussi, besoin d'antennes capables de suivre les satellites en mouvement et exploitent à cet effet des techniques adaptatives.

Capacité

Dans le contexte des télécommunications, les notions de capacité sont utilisées à divers niveaux. On distingue la capacité globale d'un satellite, la capacité globale d'une constellation ou encore la capacité effective d'un lien radio.

À titre d'exemple, les satellites de Starlink sont présentés comme ayant une capacité globale de l'ordre de 10 Gigabit/s.

Les constellations en cours de déploiement sont conçues pour offrir à chaque utilisateur, dans des conditions idéales, des débits effectifs comparables à ceux de la fibre optique. Par conditions idéales, on entend la proximité du satellite de raccordement, le contrôle des interférences et l'absence de partage des ressources radio entre un trop grand nombre d'utilisateurs.

Latence

Les satellites géostationnaires ont des délais de propagation de 500 millisecondes, ce qui conduit à des latences trop importantes pour certaines applications. Les satellites LEO réduisent ce délai à quelques millisecondes dans les cas les plus favorables. Le contrôle de la latence est essentiel dans le contexte d'applications avec des contraintes de type « temps réel ».

Résilience

Les réseaux à base de constellations LEO et MEO ont de remarquables propriétés de résilience : comme les réseaux à base de satellites géostationnaires, ces réseaux restent fonctionnels même dans le cas de situations locales dégradées, de catastrophes naturelles ou de destruction des réseaux terrestres. La nature distribuée, mobile et reconfigurable des constellations LEO et MEO rend par ailleurs leur attaque physique bien plus difficile que celle des stations au sol ou celle des satellites géostationnaires.

Universalité

Les constellations en étoile couvrent la Terre dans son ensemble y compris les régions polaires. Les constellations delta permettent une couverture en latitudes paramétrable. Celles utilisant des orbites basses ou de moyenne altitude s'appuient sur des densités de satellites élevées et des distances entre satellites réduites pour assurer un service sans interruption.

EXEMPLES

- OneWeb, initialement lancée par le Royaume-Uni, est constituée de 624 satellites configurés en étoile. OneWeb a été rachetée plus récemment par Eutelsat.
- O3b, initialement lancée aux États-Unis par Greg Wyler (un des pionniers du *New Space*) en 2007, constituée actuellement d'une trentaine de satellites produits par Thales Alenia Space en orbite MEO (7 500 km) équatoriale. Cette constellation est détenue désormais par la société SES.
- Starlink (Elon Musk, États-Unis), est la plus grande des constellations. Elle comporte début juillet 2024 environ 5 600 satellites en configuration delta avec des altitudes entre 350 et 500 kilomètres. Elle devrait en comporter 8 000 fin 2024. Elle a une autorisation pour 42 000 satellites. Starlink peut être vue comme la seule constellation en fonctionnement qui offre un accès haut débit quasi-universel à l'Internet et dont le modèle économique soit à l'équilibre.

Voici quelques-uns des projets en cours dans le domaine de l'accès à haut débit à l'Internet :

- Kuiper, constellation d'Amazon, États-Unis, qui comportera 10 000 satellites organisés en plusieurs configurations de type delta.
- IRIS2, projet de l'Union européenne qui comportera quelques centaines de satellites LEO et MEO. Cette constellation est notamment conçue pour garantir un moyen de communication sécurisé pour les gouvernements des pays de l'Union européenne.
- Guowang une constellation de satellites chinoise qui devrait comporter 13 000 satellites.

QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR

Selon l'ESO, jusqu'à 100 000 satellites LEO pourraient être lancés en orbite terrestre basse au cours de la prochaine décennie. En supposant que les plans des deux entreprises les plus avancées dans ce domaine soient réalisés, près de 80 000 satellites pourraient être présents à diverses altitudes entre 328 et 1 325 km. En 2022, G. Wyler, fondateur de OneWeb et de O3b, a créé e-space qui prévoit de lancer 100 000 à 300 000 micro satellites en orbite basse pour les besoins de communications et d'observation.

PERSPECTIVES

Internet de l'espace

Plusieurs constellations ont déjà des capacités d'interconnexion des satellites entre eux. Les satellites d'Iridium communiquent sur la bande Ka et les satellites de deuxième génération de Starlink communiquent par laser. Une autre perspective plus générique est celle des communications entre les constellations. La norme "Space Based Adaptive Communications Node", qui rend ceci possible, vient d'être proposée par la DARPA. Ceci permet d'envisager un nouvel Internet de l'espace, infrastructure dynamique composée de satellites multi-orbites et complémentaire du cœur de réseau Internet terrestre.

Les avantages d'un tel réseau sont les suivants : une capacité de projection quasi instantanée sur tout le globe, indépendamment des changements ou attaques qui pourraient avoir lieu sur le réseau terrestre ; une résilience accrue pour le réseau Internet global formé de la conjonction du réseau terrestre et du réseau spatial ; une capacité nouvelle d'observation et de communication conjointes.

Intégration logicielle des réseaux terrestres et satellitaires

Une autre perspective est celle de l'intégration des satellites dans la 5G et la 6G. Cette intégration va demander une refonte de l'organisation des communications satellitaires actuelles et augmenter la dépense énergétique à bord mais aura pour avantage à terme une complète compatibilité avec les protocoles des réseaux cellulaires.

Communications et calcul dans l'espace

Une autre perspective à plus long terme est celle d'un déplacement d'une partie de la puissance de calcul et de stockage vers ces constellations, dans le prolongement de l'idée de localiser le calcul en périphérie de réseau (*edge computing*) dans les satellites de ces constellations. Cette localisation réduit la latence et peut être utile dans le contexte d'applications temps réel.

On peut donc envisager à terme un Internet spatial qui combinera une infrastructure spatiale de routage, du calcul embarqué (notamment pour le traitement du signal et les services temps réel) et des fonctions de communication et d'observation.

ENJEUX

Une première question est celle du contrôle de ces nouvelles classes de réseaux. Les réseaux de communications fondés sur des constellations s'affranchissent de fait des règles (mécanismes d'attribution des fréquences, règles de confidentialité sur les données transmises, règles de localisation des cœurs de réseaux, etc.) qui sont imposées par les États aux opérateurs des réseaux terrestres offrant des services sur leur sol. Dès aujourd'hui, ces réseaux satellitaires peuvent se passer complètement de stations d'ancrage dans les pays qu'ils couvrent. Leur déploiement est donc une perte de souveraineté directe des États sur ce secteur.

Une seconde question est celle du modèle économique de ces nouvelles constellations. Si ces réseaux permettent d'assurer une couverture des zones blanches, ils ne pourront pas remplacer les réseaux actuels pour l'accès à internet. Ainsi, il n'est pas certain que les constellations déployées aujourd'hui puissent devenir économiquement viables à long terme. Les enjeux de souveraineté restent donc les raisons les plus fortes pour leur développement. Ils procurent en effet à ceux qui les contrôlent un moyen de communication haut débit sécurisé à faible latence, un moyen d'observation instantanée d'événements partout dans le monde et donnent donc de nouveaux moyens d'action.

Une troisième question majeure est celle de l'impact de la densification en satellites et en débris sur l'environnement atmosphérique. Dans le contexte de croissance incontrôlée qui prévaut actuellement, l'augmentation du nombre d'objets en orbite fait que les manœuvres d'évitement deviennent de plus en plus fréquentes et elle conduit à une multiplication du nombre de collisions. L'impact des constellations sur l'astronomie est également préoccupant car il touche à la fois les observations optiques et infrarouges et celles qui sont réalisées dans le domaine radio.

L'analyse des impacts négatifs fait apparaître un besoin de régulation internationale d'un domaine qui pour le moment se développe en l'absence de toute contrainte (si ce n'est celle du coût des lancements) et elle souligne la nécessité d'initiatives et d'actions engagées par les parties prenantes pour identifier des principes et des codes de bonnes pratiques qui puissent être adoptés par un nombre croissant de pays et qui permettent d'aboutir rapidement à une régulation internationale du secteur.

RÉFÉRENCE

[1] BACCELLI F., CANDEL S., PERRIN G. & PUGET J-L. (2024), « Grandes constellations de satellites : enjeux et impacts », Rapport de l'Académie des Sciences, mars 2024, <https://hal.science/hal-04607907>