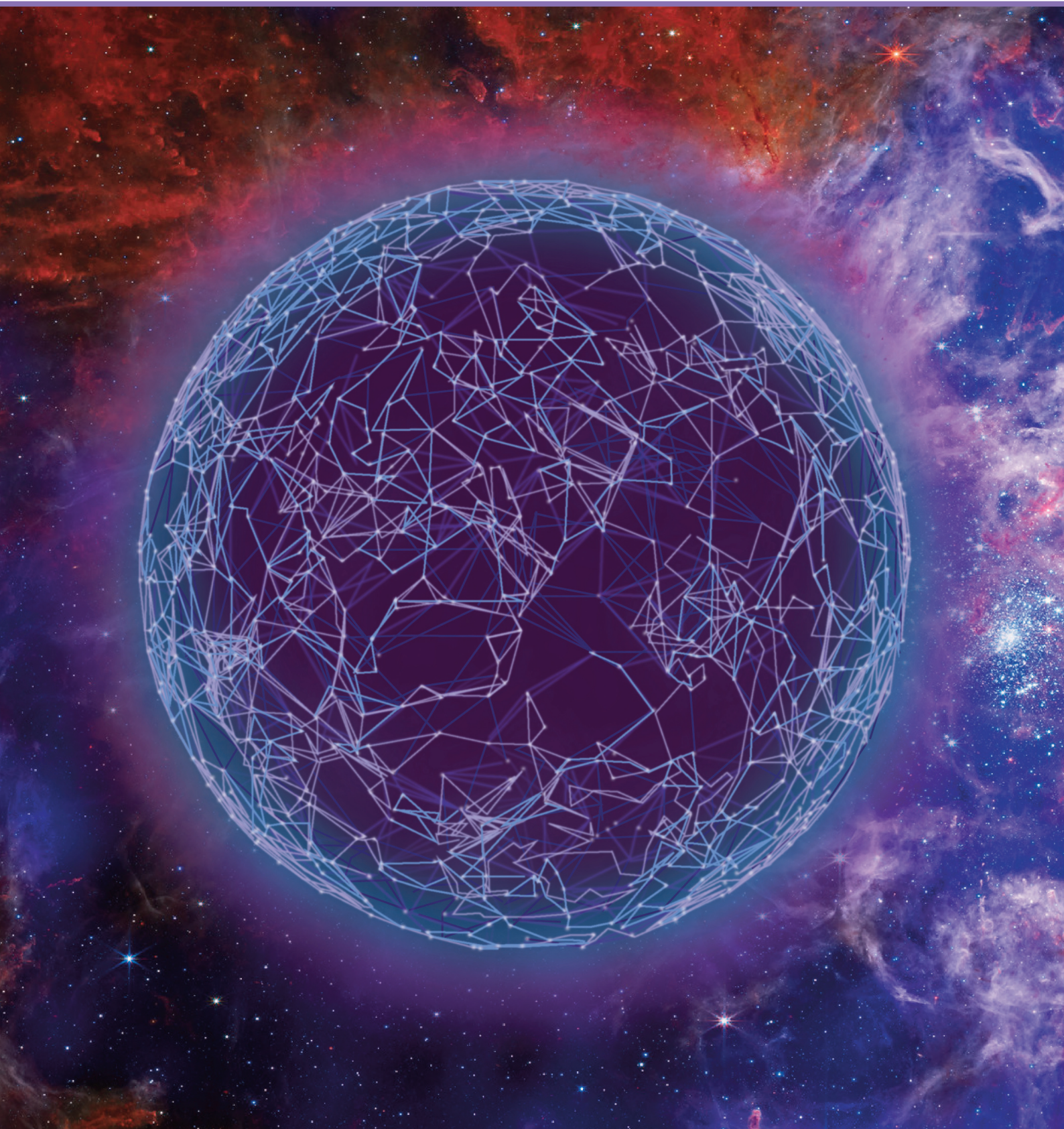




ACADÉMIE
DES SCIENCES
INSTITUT DE FRANCE

Rapport de l'Académie des sciences - 30 mars 2024

Grandes Constellations de Satellites : Enjeux et Impacts



SOMMAIRE

Résumé	4
Rapport - Grandes Constellations de Satellites : Enjeux et Impacts	5
1 Les constellations de satellites	6
1.1 Architecture	6
1.1.1 Orbites	6
1.1.2 Altitudes	6
1.1.3 La classification de Walker	6
1.1.4 Stations d'ancrage	7
1.2 Satellites	7
1.2.1 Masse	7
1.2.2 Énergie électrique disponible	8
1.2.3 Durée de vie	8
1.2.4 Coûts	8
1.3 Fonctionnalités	8
1.3.1 Télécommunications - haut débit	8
1.3.2 Observation de la Terre	13
1.3.3 Télécommunications - Internet des objets	15
1.3.4 Géolocalisation	15
1.4 Quelques ordres de grandeur	16
2 Recherche et développements, perspectives scientifiques et technologiques	17
2.1 Théorie des communications	17
2.1.1 Théorie de l'information et du codage	17
2.1.2 Focalisation adaptative et antenne utilisateur	17
2.2 Informatique	18
2.3 Propulsion	19
2.3.1 Situation des lanceurs européens	19
2.3.2 Propulsion plasmique	20
2.4 Perspectives	21
3 Impact sur l'astronomie	21
3.1 Impact sur l'astronomie optique	21
3.1.1 La nature des impacts	22
3.1.2 Débruitage par traitement du signal	25
3.2 Impact sur l'astronomie radio	25
3.2.1 Description générale du problème	25
3.2.2 Impact sur les données et les possibilités d'étalonnage	27
3.2.3 Modalités pour réduire l'impact sur les observations radio	28
3.3 Les actions engagées	29
3.4 Perspectives pour l'astronomie	30

4	Impact sur l'environnement	30
4.1	Les composantes de l'impact environnemental	31
4.2	Le problème des débris spatiaux	32
4.3	Les systèmes d'évitement des collisions	33
4.4	Le syndrome de Kessler	33
4.5	Les actions engagées	33
5	Enjeux économiques	34
5.1	Le contexte du <i>NewSpace</i>	34
5.2	La situation en France et en Europe	34
5.2.1	Les budgets	34
5.2.2	L'industrie des satellites	34
5.2.3	L'industrie des lanceurs	34
5.2.4	Le projet IRIS ²	35
5.2.5	Les nouveaux entrants	35
5.3	Les modèles économiques	35
5.3.1	Haut débit	35
5.3.2	Observation de la Terre	37
6	Enjeux de souveraineté	37
6.1	Souveraineté dans le domaine des télécommunications	37
6.2	Souveraineté européenne	38
6.3	Utilisation militaire	38
7	Régulation par les agences internationales et nationales	39
7.1	Institution impliquées	39
7.2	Nécessité d'une réglementation internationale du domaine	40
8	Conclusions	41
	Recommandations	42
	Organisation des travaux	44
	Secrétariat éditorial	44
	Contributeurs au rapport	45
	Auditions	46
	Acronymes	47
	Références bibliographiques	50

Le nouvel âge spatial (*NewSpace*) 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, notamment aux États-Unis, en Chine et dans une moindre mesure en Europe. Des flottes de petits satellites en orbite basse ou moyenne viennent remplacer ou s'ajouter aux grands satellites géostationnaires qui prédominaient dans la phase précédente. Alors que l'espace était auparavant réservé à un petit nombre d'États et de grands groupes industriels, on observe actuellement l'émergence de nouveaux États spatiaux, de nouveaux groupes industriels comme SpaceX ou Amazon, ainsi que d'un grand nombre de jeunes pousses. On note l'émergence d'entreprises disposant de capacités de lancement, de fabrication de satellites et qui prennent également le rôle d'opérateurs de télécommunications et de producteurs de contenu.

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. Ces réseaux spatiaux ont, de plus, de remarquables propriétés de résilience en comparaison des réseaux terrestres. Des considérations géostratégiques et militaires se combinent donc avec des modèles économiques en évolution rapide pour expliquer les investissements massifs en cours dans ce domaine.

Toutefois, l'absence de régulation internationale du domaine conduit à une course pour l'occupation des orbites et des fréquences, course qui a déjà de graves conséquences sur tout un ensemble de domaines. Ces constellations auront potentiellement un impact très négatif sur l'astronomie dans le domaine optique visible et infrarouge ainsi que sur la radioastronomie. Elles posent aussi un problème majeur qui est celui de l'encombrement de l'espace avec l'augmentation du nombre des débris satellisés issus des lancements ou des collisions entre satellites et avec la possible atteinte d'une phase de collisions en chaîne. De plus, d'un point de vue environnemental, les conséquences d'une multiplication des lancements et des rentrées incontrôlées dans l'atmosphère sont, elles aussi, préoccupantes. Par ailleurs, cette absence de régulation du domaine conduit aussi à une perte de souveraineté puisque ces nouveaux réseaux de communications satellitaires n'appliquent aucune des règles que les États imposent aux réseaux de communications terrestres opérant sur leurs territoires. Une solution durable et globale doit être apportée à ces problèmes, avant que des dommages majeurs et potentiellement irréversibles soient infligés à l'environnement de la planète, aux équilibres géostratégiques, à la démocratie et à la science.

Si l'Académie des sciences considère que la France et l'Europe doivent renforcer leurs actions scientifiques et industrielles dans ce domaine pour pouvoir bénéficier des avancées remarquables de ces nouveaux réseaux et disposer à terme d'un réseau de communication résilient et sécurisé, elle recommande aussi de travailler en parallèle au renforcement de la régulation du domaine dans le but de garantir un accès durable aux ressources orbitales et fréquentielles, ainsi qu'une protection des domaines négativement impactés, au premier rang desquels l'astronomie et l'environnement.

RAPPORT - GRANDES CONSTELLATIONS DE SATELLITES : ENJEUX ET IMPACTS

Introduction

Dans un contexte général de lancement accéléré de constellations de satellites en orbite basse ou moyenne, ce rapport a pour objectif de faire le point sur les possibilités ouvertes par ces nouveaux types de grands réseaux, sur les questions qu'ils soulèvent et sur les impacts négatifs de leurs développements actuels et futurs. Le rapport est structuré en sept sections.

[La section 1](#) décrit les objets de base de ces constellations, à savoir les satellites et les éléments terrestres associés, ainsi que les principales caractéristiques des réseaux dont ils sont les éléments en termes d'organisation et de fonctionnalités. Cette section décrit notamment les liaisons directes à haut débit actuellement possibles entre les terminaux au sol et des satellites en mouvement, les liaisons entre satellites d'une même constellation, ainsi que les architectures de réseau utilisant ces liaisons et permettant aujourd'hui un accès spatial à l'Internet en tout point du globe avec des débits élevés et une latence faible. Ces constellations ouvrent des perspectives au-delà du domaine des télécommunications et sont utilisées pour l'observation de la Terre, la géolocalisation, les liaisons avec des flottes de véhicules (avions, navires...), ou encore pour des interactions avec des objets connectés.

[La section 2](#) décrit les avancées scientifiques et technologiques récentes qui sont à la base du développement de ces constellations et de leurs nouvelles fonctionnalités. Elle décrit l'avancement des recherches dans le domaine des télécommunications (théorie de l'information, focalisation des antennes et contrôle des interférences, définition de protocoles de routage dynamique, architectures pour le haut débit...). Elle décrit également les nouveaux moyens de lancement et de propulsion des satellites en orbite basse ou moyenne.

Le rythme accéléré du déploiement d'un grand nombre d'objets satellisés soulève de nombreuses questions et notamment celles de la soutenabilité d'ensemble du fait de l'encombrement de l'espace et de l'impact sur l'environnement d'une part et des conséquences sur l'astronomie d'autre part.

[La section 3](#) porte sur l'impact négatif des constellations sur les capacités d'observation du ciel, avec notamment les effets du défilement de « trains » de satellites dans le champ de vision astronomique dans le domaine optique et infrarouge et l'impact des télécommunications radio et du bruit propre à l'électronique à bord des satellites sur la radioastronomie. Cette section décrit aussi les premières mesures prises pour limiter ces impacts et explique pourquoi ces mesures sont insuffisantes dans le contexte qui se dessine.

[La section 4](#) est centrée quant à elle sur les conséquences de ces déploiements sur l'environnement spatial et terrestre. Elle liste les conséquences prévisibles de la multiplication des débris issus des lancements qui sont eux-mêmes satellisés et de l'augmentation des probabilités de collision résultant de ces opérations. Elle aborde aussi la question de l'impact des lancements et des fins de vie des satellites sur la haute atmosphère et sur la Terre elle-même.

Les enjeux économiques et les enjeux de souveraineté forment le volet suivant du rapport.

Les enjeux économiques et commerciaux sont traités dans [la section 5](#). L'utilisation de l'espace a évolué en quelques années à un rythme soutenu avec l'avènement du *NewSpace* aux États-Unis. Cette évolution a conduit à l'émergence de nombreux nouveaux projets portés par des entreprises privées et qui bénéficient très souvent de financements des États. Cette évolution marquante s'appuie sur de nouveaux modèles technico-économiques. Par exemple, la suprématie de Starlink s'appuie notamment sur le développement de nouveaux lanceurs réutilisables. La question de la complémentarité avec les réseaux terrestres, qui est centrale pour le futur de ces constellations, est aussi discutée dans cette section.

Les enjeux géopolitiques et les questions de souveraineté sont traités dans [la section 6](#). La prise de contrôle des orbites et des fréquences se fait actuellement en l'absence de régulation mondiale. Elle conduit à une offre de services Internet à haut débit qui s'affranchit de fait des règles imposées par les États aux réseaux terrestres. Elle donne par ailleurs à ceux qui

contrôlent ces constellations de nouveaux moyens d'action en temps réel et cela en tout point du globe.

Enfin, les possibilités de régulation au niveau national et international complémentaires de celles qui sont discutées dans les sous-sections [3.3](#) et [4.5](#) sont décrites dans [la section 7](#).

1. Les constellations de satellites

Cette section décrit les constellations en traitant successivement des architectures, des caractéristiques générales des satellites qui composent ces constellations et de leurs diverses fonctionnalités. Elle donne en conclusion quelques ordres de grandeur globaux.

1.1 Architecture

Par architecture d'une constellation, on entend l'agencement des orbites, l'ordonnancement des satellites sur ces orbites et l'agencement des stations au sol, ainsi que l'organisation de tous ces éléments en un réseau.

1.1.1 Orbites

L'orbite d'un satellite terrestre s'inscrit dans un plan 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.

1.1.2 Altitudes

On distingue trois types d'altitudes :

- LEO ou *Low Earth Orbit*, entre 350 et 1000 km, avec une période de l'ordre de la centaine de minutes ;
- MEO ou *Medium Earth Orbit*, typiquement entre 1000 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.

Il est utile de noter que les satellites géostationnaires couvrent mal les régions polaires.

1.1.3 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. Ces deux classes de constellations sont représentées sur 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

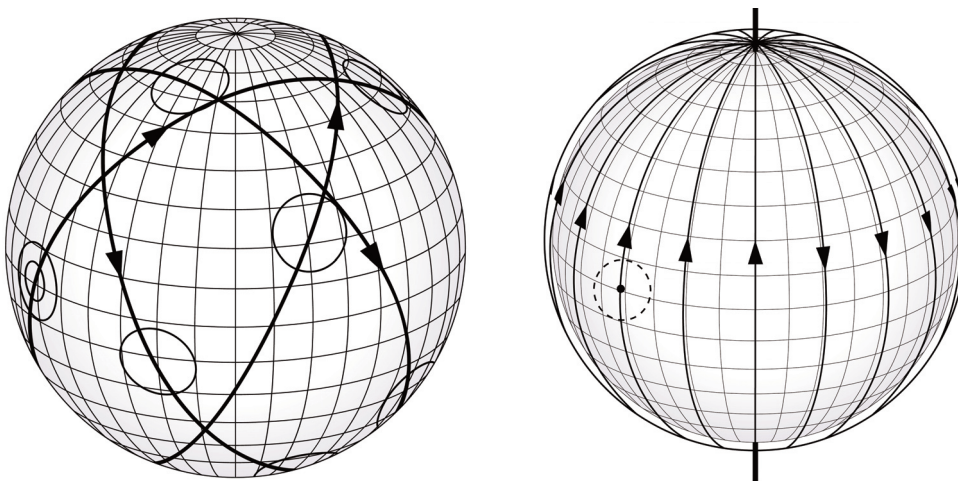


Figure 1. Gauche : Walker Delta (base de Starlink et Galileo). Droite : Walker Star (base de Oneweb).

égales et les satellites d'une même orbite sont positionnés de manière périodique sur cette dernière. Une constellation de type Walker delta est caractérisée par un quadruplet noté $i : N/M/T$, avec i l'inclinaison des plans, N le nombre total de satellites, M le nombre total de plans orbitaux et T un paramètre qui décrit les positions relatives des satellites sur deux orbites adjacentes. Le paramètre d'inclinaison est utilisé pour couvrir uniquement les régions dont la latitude n'excède pas un certain seuil. Ainsi, par exemple, le système de navigation Galileo est une constellation Walker $56^\circ : 24/3/1$. Cela signifie qu'il y a 24 satellites dans 3 plans inclinés à 56 degrés, répartis de manière périodique sur les 360 degrés de l'équateur. On peut noter que dans les constellations de type delta, un point d'observation donné peut voir passer à distance proche à la fois des satellites de trajectoire orientée sud-nord et nord-sud ; dans ce cas, la distance entre deux satellites proches mais d'orientations différentes varie fortement.

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. La constellation Iridium est une Walker en étoile $86,4^\circ : 66/6/2$.

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.

1.1.4 Stations d'ancrage

Dans la plupart des cas, 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 la voie descendante, le chemin est inversé : station d'ancrage, satellite, utilisateur.

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. Elles permettent aussi une réduction du nombre des satellites. Ces réductions sont toutefois limitées par la géométrie : il faut que chaque satellite ait un autre satellite ou une station d'ancrage en vision directe. Toute réduction de ce type conduit par ailleurs à une augmentation de la latence.

Dans les cas LEO ou MEO, les stations d'ancrage sont d'une plus grande complexité que dans le cas géostationnaire dans la mesure où les antennes doivent pouvoir suivre les satellites et changer de satellite.

1.2 Satellites

Il y a une grande variabilité dans les caractéristiques des satellites, en ce qui concerne la masse, l'énergie fournie, le coût et la durée de vie. Il convient en particulier de bien distinguer les satellites utilisés depuis les années 60 pour les orbites géostationnaires et ceux qui composent aujourd'hui les constellations en orbite LEO ou MEO.

1.2.1 Masse

La masse des satellites géostationnaires dépasse plusieurs tonnes (3 tonnes pour Eutelsat Konnect) alors que celle des micro satellites d'observation d'ICEYE (voir ci-dessous) est de l'ordre de 70 Kg. Pour OneWeb, l'ordre de grandeur est de 150 kg par satellite, celle des satellites d'O3b est de 700 kg et Starlink s'oriente désormais vers des satellites de 2^{ème} génération plus lourds, d'environ 1500 kg.

1.2.2 Énergie électrique disponible

Les capacités de transmission et de calcul sont fonctions de la puissance électrique disponible à bord. Les satellites géostationnaires ont une puissance de plusieurs kW. Le niveau de puissance des satellites en orbite basse est plus réduit, de l'ordre de 500 W pour la première génération de la constellation OneWeb. La puissance devrait être d'environ 2 à 3 kW pour la seconde génération. De manière plus générale, les besoins de puissance électrique à bord vont être multipliés par 10. La croissance de la puissance correspond à l'augmentation des besoins de calcul et de traitement des données et des signaux à bord et elle est aussi associée aux objectifs d'intégration logicielle des réseaux non terrestres dans les standards internationaux des réseaux cellulaires normalisés par le 3GPP [15]. Pour obtenir des puissances plus élevées, il faut des m² de panneaux solaires, repliables et flexibles. Il n'y a pas de limite à la surface si ce n'est la masse et le volume plié. On peut aussi jouer sur le rendement et remplacer la technologie silicium par celle à base d'arséniure de gallium (GaAs) mais qui est cependant d'un coût plus élevé.

1.2.3 Durée de vie

La durée de vie d'un satellite géostationnaire est d'une quinzaine à une vingtaine d'années. Les satellites LEO et MEO ont des durées de vie plus courtes. Ceci est notamment dû à l'utilisation de composants commerciaux non conçus pour l'environnement spatial. La durée de vie des satellites OneWeb de deuxième génération devrait être de 7 ans.

1.2.4 Coûts

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 du segment terrestre (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. Avec 3 satellites géostationnaires, on a une couverture terrestre globale (hors pôles comme déjà indiqué). Le coût d'un satellite en orbite basse est bien plus modeste et ce coût peut être considéré comme celui d'un consommable. Pour OneWeb,

l'ordre de grandeur du coût d'un satellite est de 1 M€. La dépense totale a été de l'ordre de 5Md€ pour la première génération de OneWeb et devrait être de 3 Md€ pour la seconde génération. On peut noter qu'il faut 3 ans pour produire ces satellites. On en déduit qu'une grande constellation de ce type nécessite un flux financier permanent de 1 Md€/an. Pour les grandes constellations, l'investissement est toutefois beaucoup plus important que pour des satellites géostationnaires. Il faut y ajouter le coût des lancements initiaux et de renouvellement pour maintenir la constellation (de 10 000 à 20 000 €/Kg avec cependant des valeurs plus réduites pour les lancements réalisés par SpaceX Falcon qui sont de l'ordre de 3 000 €/Kg).

1.3 Fonctionnalités

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

1. 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.
2. L'observation de la Terre (environ 1 200 satellites) : cette fonctionnalité est très diversifiée. Elle conduit au déploiement de nombreuses constellations, chacune avec un nombre modéré de satellites.
3. La géolocalisation et la distribution du temps : ce domaine déjà ancien comporte peu de constellations chacune avec un nombre modéré de satellites MEO.

Ce rapport traite principalement des fonctions de type communications, tout en abordant les autres fonctions mais d'une façon moins approfondie.

1.3.1 Télécommunications - haut débit

Cette sous-section explique pourquoi 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

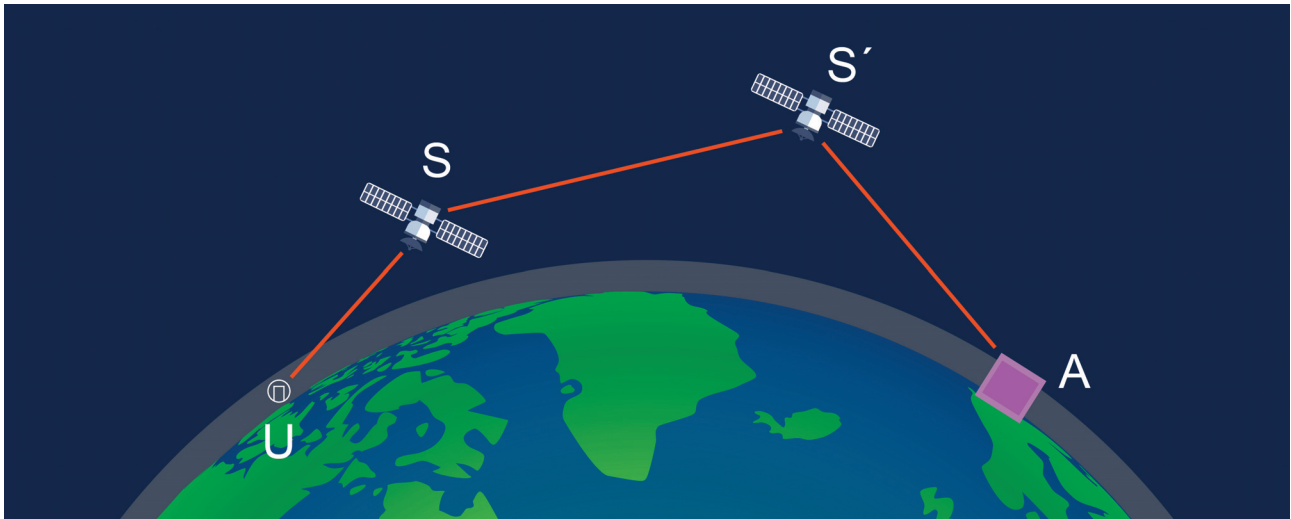


Figure 2. Les éléments du réseau (le schéma n'est pas à l'échelle) : U : utilisateur final, S et S' : satellites, A : station d'ancrage. Exemples de lien S-U et S'-A : Bandes Ku (10,7-14,5 GHz), Bandes Ka (17,3-30 GHz). Liens entre satellites : Laser.

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 (grâce à l'utilisation d'orbites basses) et avec une bonne efficacité spectrale (grâce encore une fois aux orbites basses), résiliente (ou du moins plus résiliente que les réseaux terrestres et plus résiliente aussi que la solution géostationnaire car plus distribuée).

Les éléments du réseau

Le réseau comporte trois types d'éléments : les terminaux (téléphones ou ordinateurs portables), 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. Ceci vaut à la fois pour la voie montante (transfert de données de l'utilisateur vers l'Internet) et pour la voie descendante (transfert de données de l'Internet vers l'utilisateur). 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. S'il y a plusieurs satellites ayant cette propriété, une option naturelle consiste à utiliser à tout moment les chemins (délais de propagation) les plus courts, ou encore les chemins avec les meilleurs débits. Pour un utilisateur donné, tout ceci est très dynamique, notamment dans les constellations de type Walker delta où les liens en question doivent se restructurer de façon rapide au fil du passage des satellites. On note à ce stade que pour satisfaire cette double condition, il faut une densité importante de satellites et de stations 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 intersatellites, on peut parfaitement 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. C'est ainsi, par exemple, que la constellation IRIS² devrait pouvoir assurer, pour des raisons géostratégiques, une projection mondiale en s'appuyant uniquement sur des stations d'ancrage localisées en Europe.

Fréquences

L'information qui arrive à l'utilisateur est véhiculée par des ondes porteuses de différentes fréquences. Dans le cas le plus simple (en l'absence de communications entre satellites), cette information part d'une station d'ancrage, voyage vers le satellite, où elle est retransmise par ce dernier pour atteindre finalement l'antenne de l'utilisateur.

Communications radio-fréquence (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, ce qui ouvrirait l'accès à des bandes situées en dessous de 6 GHz ainsi qu'aux bandes dites millimétriques de la 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 (de fréquence bien supérieure aux bandes RF) analogues à ceux utilisés dans les fibres optiques. Cette option est celle des dernières versions des satellites de la constellation Starlink. Les technologies de sources et de détecteurs sont très bien développées dans ces bandes optiques et du fait des faibles longueurs d'ondes optiques (de l'ordre du micron) on peut créer avec des optiques de petite taille (<10cm) des faisceaux très

directionnels entre satellites. Les communications entre station d'ancrage et satellite peuvent elles aussi se faire de façon optique mais, en pratique, la transmission optique, du sol au satellite, est affectée par les turbulences atmosphériques et les nuages, ce qui nécessite des optiques adaptatives très sophistiquées pour compenser les distorsions. Des sociétés comme Cailabs, en France, proposent des télescopes d'ouverture <1m, pour mettre en œuvre ces principes et atteindre des débits de plus de 10 Gbps.

Une autre alternative qui est désormais étudiée est la bande de fréquence dite THz qui couvre la bande (100GHz, 10THz). 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 (l'utilisation du THz est une des voies proposées pour la 6G). Par contre les ondes THz ne sont pas sensibles à la turbulence atmosphérique. Dans des endroits secs et en haute altitude, ce problème ne se pose plus. La radioastronomie submillimétrique qui utilise ces fréquences a démontré qu'avec des radio-télescopes de grande ouverture, comme le *Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA) dans les Andes chiliennes, on pouvait atteindre des débits de l'ordre du Tbps entre la Terre et un satellite. En positionnant des sites d'ancrage en altitude, fonctionnant dans le domaine THz, on devrait atteindre de grands débits dans la liaison sol/satellite. Cette même gamme de fréquence, pourra aussi être utilisées pour les liaisons inter satellites. Enfin, il faut noter qu'aujourd'hui les sources et les détecteurs d'ondes THz n'ont pas encore atteint la maturité des composants optiques.

Antennes

Dans le cas des transmissions à partir de satellites géostationnaires, les antennes au sol sont de forme parabolique avec un pointage fixe vers le satellite. La différence entre les antennes de la station d'ancrage, qui émettent vers le satellite, et les antennes utilisateurs réside principalement dans la taille de l'antenne. Dans la station d'ancrage, on utilise des paraboles de grande taille, protégées par un radôme, alors que les antennes utilisateurs qui fleurissent sur les

immeubles sont de taille bien plus réduite. Le coût des antennes utilisateurs est peu élevé. Dans les cas LEO ou MEO, les antennes au sol sont plus complexes car elles doivent pouvoir suivre le satellite assurant le raccordement et changer de satellite pour maintenir le raccordement.

Il y a donc trois types d'antennes dans les constellations de satellites LEO ou MEO : les antennes des stations, les antennes des satellites et celles des utilisateurs.

Les antennes des stations d'ancrage gèrent de grands débits de données, possèdent une grande ouverture et sont pointées vers les satellites proches. Plusieurs dizaines d'entre-elles, placées sous radôme, équipent les stations d'ancrage pour couvrir différents secteurs du ciel.

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. Du fait des lois de la diffraction, ces antennes ne sont pas parfaites et éclairent par leurs lobes secondaires des zones plus vastes que les zones souhaitées.

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 comme détaillé plus loin.

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.

La capacité globale d'un satellite de télécommunications est la somme des débits qu'il offre sur la voie descendante. À titre d'exemple, les satellites de Starlink sont présentés comme ayant une capacité globale de 10 Megabits/s. La capacité globale d'une constellation est la somme des capacités de ses satellites.

La notion de capacité effective (au sens du meilleur débit possible) d'un lien radio est définie par la théorie de l'information (voir [la section 2.1.1](#)). Cette capacité dépend de la puissance du signal reçu ainsi que de la puissance de l'interférence et de celle du bruit thermique. La puissance du signal reçu du satellite (ou par le satellite) dépend fortement de son altitude ; l'efficacité spectrale (débit par Hertz de bande passante) est donc bien meilleure pour les satellites LEO que GEO par exemple. Les interférences venant des autres satellites utilisant les mêmes bandes de fréquence jouent aussi un rôle clé dans ce cadre. Leur puissance dépend de l'organisation de la constellation ainsi que de la puissance dissipée sur les lobes secondaires. La capacité effective dépend aussi de la règle de partage des ressources globales du satellite entre les utilisateurs qui lui sont raccordés.

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.

Il est utile de donner quelques ordres de grandeur concernant la capacité globale des constellations. Les constellations actuelles, dans leur ensemble, ont une capacité globale de 50 Térabits par seconde, répartis sur l'ensemble de la planète. À titre de comparaison, la capacité globale du seul réseau 5G français est d'environ 300 Térabits par seconde, donc 6 fois plus grande. Celle des câbles intercontinentaux tous types confondus est de trois ordres de grandeur plus grande que celle des constellations. Il est donc impossible que les réseaux à base de constellations puissent remplacer à moyen terme les réseaux terrestres dans le domaine des communications à haut débit.

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 30 millisecondes. 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. Les constellations 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. Comme déjà expliqué, ce service sans interruption est possible même dans les pays ou régions qui n'abritent pas d'infrastructures de type 5G ou pas de stations d'ancrage, du moins dans le cas où la constellation permet les communications entre satellites.

Exemples

Les toutes premières constellations déployées pour les communications sont les suivantes :

- **Iridium**, initialement lancée par Motorola, États-Unis, cette constellation comprend moins d'une centaine de satellites configurés en étoile. Elle est maintenant utilisée par le Département de la Défense des États-Unis [18]. La flotte de satellites a été renouvelée avec de nouvelles plateformes développées par Thales Alenia Space (TAS). Elle comporte 66 satellites de 860 kg injectés à une altitude de 780 km sur six plans orbitaux par des lanceurs Falcon 9 entre 2017 et 2019.
- **Globalstar**, initialement lancée par Qualcomm, États-Unis en 1997, est formée

par 48 satellites placés sur des orbites MEO configurées en étoile.

Des constellations plus récentes sont :

- **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 USA par Greg Wyler (un des pionniers du *NewSpace*) en 2007, est 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, USA), est la plus grande des constellations. Elle comporte actuellement 4 000 satellites en configuration delta. avec des altitudes entre 350 et 500 kilomètres. Elle en comportera 8 000 en 2024. Elle a une autorisation pour 42 000 satellites.

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

- **Kuiper**, constellation d'Amazon, USA, qui comportera 10 000 satellites organisés en plusieurs configurations de type delta [12].
- **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, dont le planning de mise en orbite n'est pas bien connu, avec un début de déploiement en 2023.

Starlink

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'équilibre¹. Les bases de cet équilibre sont les suivantes. Starlink fonctionne avec des satellites peu coûteux, utilisant des composants et des technologies

¹. La nature de cet équilibre financier est imprécise. Par exemple, il ne semble pas qu'il prenne en compte les externalités, notamment les coûts environnementaux.

grand public. Les méthodes de fabrication adoptées par cette entreprise sont disruptives par rapport à la norme du domaine spatial et les satellites sont lancés quasi gratuitement par Space-X. Starlink s'appuie aussi sur une approche client efficace avec des terminaux commercialisés à prix réduit (250 €) faciles à installer et un abonnement à un prix de l'ordre de 50 € qui est relativement proche des tarifs proposés par les opérateurs de télécommunications terrestres. L'antenne, qui était initialement volumineuse et comportait une parabole sur un trépied, se présente désormais sous forme d'une plaque de format A5 qui est facilement positionnée et qui permet de se mettre rapidement en connexion avec la constellation. Starlink a pour objectif une constellation comprenant 42 000 satellites.

Fonctionnalités complémentaires

Les réseaux fondés sur des constellations ont des fonctionnalités qui vont bien au-delà de l'accès haut débit universel. Une constellation dense de satellites LEO ou MEO peut par exemple être utilisée comme réseau de collecte (*backhaul*) (le réseau de collecte est celui qui connecte les stations de base terrestres au réseau Internet global ; le coût de déploiement d'un réseau de collecte terrestre est élevé). Comme déjà indiqué, les constellations peuvent aussi jouer un rôle clé pour renforcer la résilience des réseaux terrestres. Certaines fonctions de calcul de type calcul en périphérie de réseau (*edge computing*) pourraient à terme être réalisées sur les satellites eux-mêmes pour réduire la latence. Il faut ajouter à tout ceci des fonctionnalités d'observation ou de détection radar qui ne sont pas incompatibles avec les fonctionnalités de communication. Ces réseaux pourront ainsi combiner des fonctions de communication et des fonctions d'observation ou de détection.

1.3.2 Observation de la Terre

Fonctionnalités

Les fonctionnalités d'observation civiles suivantes sont actuellement les plus importantes : météorologie, agriculture, foresterie, biodiversité, évaluation de la qualité des sols, gestion des risques, détection d'anomalies.

L'observation, très diversifiée, peut être réalisée dans les longueurs d'ondes optiques (de l'ultraviolet à l'infrarouge lointain) et dans le domaine électromagnétique microondes, en imagerie spectrale ou hyperspectrale, avec des radars à ouverture synthétique (SAR) en imagerie à haute résolution angulaire, avec des lidars et avec des capteurs gravimétriques.

Une spécificité importante de certaines missions d'observation et de collecte de données est qu'elles ne nécessitent pas de permanence de la couverture de l'utilisateur final par des satellites. Ceci explique pourquoi les constellations de satellites d'observation de la Terre sont généralement plus petites que celles visant à la couverture universelle pour l'accès à l'Internet.

Ce domaine en forte croissance se développe dans des directions nouvelles comme le traitement conjoint de requêtes par plusieurs constellations différentes et complémentaires, ou encore l'observation de la magnétosphère, des particules cosmiques, etc. Les implications militaires de certaines de ces questions donnent une dimension géopolitique au secteur dans son ensemble.

Exemples

Les petites constellations d'observation ont un coût de quelques dizaines de millions d'euros et leur nombre augmente rapidement. Voici quelques exemples :

- **Copernicus** (micro-ondes, radar) (UE)
Copernicus est le nom d'un programme d'observation de la Terre géré par la Commission Européenne et mis en œuvre en partenariat entre l'ESA, les États membres et diverses agences européennes comme EUMETSAT (l'organisation européenne d'exploitation des satellites météorologiques), ou encore Mercator Océan. Le programme a pour objectif de disposer de capacités d'observation globale et autonome de la Terre. Copernicus fait suite au programme GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*). Ce programme s'appuie sur une famille de satellites Sentinel 1 à 6 dotés de radars à ouverture synthétique et d'imagerie optique à haute résolution, de moyens de détection de la composition de

l'atmosphère, des émissions de surveillance de CO₂, de mesure de température de surface, d'imagerie micro-ondes radiométrique, d'imagerie hyperspectrale de l'environnement. L'objectif est de collecter des données qui peuvent aider à traiter des questions de sécurité maritime, suivre les catastrophes (incendies, inondations, séismes...), anticiper les récoltes, améliorer la gestion de l'environnement et cerner les effets du changement climatique. Six missions prioritaires (*Copernicus Expansion Missions*) sont à l'étude afin d'étendre les capacités actuelles de la composante spatiale de Copernicus, notamment en ce qui concerne la mesure du CO₂ et l'imagerie hyperspectrale.

- **METOP** (*Meteorological Operational satellite*) (UE), comprend 3 satellites météorologiques placés sur une orbite polaire héliosynchrone à une altitude 820 km avec des équipements de mesure de la distribution verticale de température, des vents, de la teneur en humidité de surface au dessus des terres. Un des instruments à bord des satellites METOP, l'interféromètre IASI (*Infrared atmospheric sounding interferometer*) (3,7 – 15,5 µm) donne accès à des mesures de températures avec une précision de 1°C et d'humidité avec une précision de 10% dans chaque tranche d'atmosphère d'un km d'épaisseur.
- **CO3D** (Constellation Optique en 3 Dimensions) (F) Cette constellation, déployée par le CNES comporte 4 mini-satellites de 300 kg d'*Airbus Defense and Space* placés sur une orbite héliosynchrone à une altitude d'environ 500 km. Elle doit fournir des images en 3 dimensions avec une précision de l'ordre du mètre dans la direction verticale et du demi-mètre dans les deux autres directions.
- **SCARBO** (*Space Carbon Observatory*) (UE) Une constellation formée de 25 petits satellites dotés de spectromètres statiques miniaturisés pour surveiller de façon journalière les émissions de CO₂ et de CH₄.
- **ICEYE** (Finlande) Une constellation destinée à l'observation de la Terre et des catastrophes naturelles au moyen d'une flotte de satellites radar à ouverture synthétique (SAR). Cette flotte qui compte 31 satellites (les quatre derniers lancés

début novembre 2023) peut fournir un accès rapide aux données avec un taux de revisite et des capacités d'imagerie à un rythme élevé avec une résolution de l'ordre du demi-mètre et un mode de collecte permettant une détection rapide des changements survenus au sol. L'imagerie SAR, utilisant les micro-ondes donne accès à des informations exploitables même dans des situations où la présence de nuages empêcherait l'imagerie optique.

- **Unseenlabs** (F) Cette constellation propose des services de renseignement issus d'une technologie innovante de détection de signaux électromagnétiques au moyen d'une constellation de nano-satellites. Les données collectées peuvent servir à la surveillance maritime à destination de clients civils et militaires français et internationaux (organismes étatiques, entreprises privées, institutions ou organisations non-gouvernementales...). Cette constellation peut servir à localiser les navires noncoopérants (les « *dark ships* », qui désactivent leur système d'identification automatique ou AIS) et ainsi lutter contre les activités illicites en mer : pêche illégale, pollution par dégazage, piraterie, contournement de sanctions internationales...
- **Topex-Poseidon (CNES-NASA) et la série Jason**. Cette constellation est constituée de satellites d'altimétrie océanique dont les mesures ont permis de mieux quantifier le relèvement du niveau des océans résultant de la fonte des glaciers et calottes polaires et de la dilatation associée à l'augmentation de la température océanique moyenne. L'élévation de température s'accélère après le début de l'ère industrielle, et de façon plus marquée après 1930. Cette corrélation est une indication forte de l'origine anthropique de cette élévation de température.

1.3.3 Télécommunications - Internet des objets

Fonctionnalités

Les constellations de satellites LEO sont aussi utilisées pour la collecte de données captées par des objets connectés et la distribution de données à ces derniers [30]. Les communi-

cations de ce type se font typiquement à bas débit et sous de fortes contraintes en dépense d'énergie par les objets. Elle repose sur des protocoles différents de ceux utilisés dans l'Internet haut-débit. Ce domaine se distingue aussi de celui de l'observation de la Terre en ce qu'il implique des transmissions bidirectionnelles entre les objets connectés et les satellites au moment de leurs passages. Ces constellations ouvrent de nouvelles perspectives dans des applications aussi diverses que la santé, la surveillance, l'intelligence économique, la logistique, domaines où des capteurs au sol sont en mesure de collecter des données qu'ils transfèrent aux satellites lors de leurs passages.

Exemples

Voici quelques exemples de projets dans ce domaine :

- **KINEIS** (F) est une constellation pour la connectivité par satellites dans l'Internet des objets comportant 25 nanosatellites de taille intermédiaire (masse 25 kg, puissance 15 W, propulsion électrique) qui seraient placés sur une orbite héliosynchrone à une altitude de 650 km. Les satellites pourront ainsi assurer une revisite en moins de 15 mn partout dans le monde. Kineis s'appuie sur la technologie exploitée sur le système Argos, un service de collecte de données de localisation et d'acquisition de données qui fonctionne depuis 1987. Les liaisons seront assurées en spectre étalé en bande UHF. Le projet, soutenu par le CNES est développé notamment par Thales Alenia Space.
- **ASTROCAST** (Suisse) est une jeune pousse suisse basée à Lausanne, soutenue par l'ESA et Airbus et qui se propose de mettre sur orbite 80 à 100 nanosatellites de type CubSat de 10 cm de côté pour offrir des services de monitoring et de géolocalisation d'objets et de communication avec ces objets. Les objets sont équipés d'un module miniaturisé (en partenariat avec Airbus, le CEA-LETI et l'ESA) à très faible consommation compatible avec les antennes « patch » en bande L peu coûteuses qui permettent d'entrer en communication bidirectionnelle avec la constellation. Une vingtaine de satellites sont déjà en orbite à des altitudes d'environ 500 km dans un plan incliné à 97,4°.

- **SWARM** (USA) La jeune pousse *Swarm technologies* exploite une constellation constituée de 72 à 120 picosatellites de taille très réduite (11×11×3 cm³, 400 grammes) placés en orbite basse pour assurer des services bas coût de communication bidirectionnelle de l'IoT.

1.3.4 Géolocalisation

Les services de géolocalisation sont basés sur les satellites du GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Cette fonctionnalité est intimement liée à la distribution du temps UTC.

GPS ("*Global Positioning System*" ou Système de positionnement mondial) est une constellation issue d'un projet lancé en 1973 sous l'égide du Département de la Défense des États-Unis avec initialement 24 satellites, mis en orbite entre 1989 et 1993 à une altitude d'environ 20 200 km, organisés initialement en 3 plans orbitaux. La constellation est maintenant répartie en 6 plans orbitaux comportant 4 satellites avec une inclinaison de 55°. Chaque satellite exécute 2 orbites par jour de telle sorte que 6 d'entre eux sont à chaque instant en vision directe et cela en tout point du globe terrestre. Tous les satellites émettent sur des bandes L1 (1,57 GHz) et L2 (1,22 GHz) des signaux codés en spectre étalé et CDMA ("*Code Division Multiple Access*") permettant la géolocalisation par le système de réception. Ce service a été ouvert à des applications civiles au début des années 90.

Galileo (UE) est un système de positionnement par satellites mis en place par l'Union Européenne à partir de 2011 sous la forme d'une constellation delta composée de 24 satellites. La mise en orbite des derniers satellites doit être effectuée en 2024. Les satellites placés dans trois plans orbitaux dont l'inclinaison est de 56° se trouvent à une altitude moyenne de 23 200 km. Les signaux émis par les satellites Galileo dans deux bandes de fréquences (1,16 - 1,21 GHz) et (1,56-1,59 GHz) peuvent être utilisés pour la géolocalisation avec une précision horizontale de 4 m. Noter que les performances des systèmes de géolocalisation dépendent des conditions de réception des signaux par l'antenne : position des satellites, effet de masque dû à des bâtiments adjacents, réflexions

des signaux directs sur des infrastructures voisines (multi-trajets) etc. Ainsi, les incertitudes sont liées à chaque station réceptrice, et la question est encore plus complexe dans le cas des antennes mobiles confrontée à des situations changeantes. On peut considérer en définitive que la précision instantanée est de l'ordre du mètre à quelques mètres selon que la mesure est multi-fréquentielle ou mono-fréquentielle. Galileo assure l'autonomie de l'Union Européenne par rapport aux services offerts par le GPS des États-Unis, la constellation russe GLONASS ou la constellation chinoise Beidou.

Glonass (Russie) Cette constellation est constituée de 24 satellites répartis sur trois plans orbitaux à une altitude de 19100 km. L'inclinaison relativement importante des plans orbitaux ($64,8^\circ$) permet une couverture mieux adaptée aux régions polaires. La précision est de quelques mètres.

Béidou (Chine) Beidou-1, opérationnelle depuis 2003, fournissait une couverture régionale (Chine et pays limitrophes) au moyen de trois satellites GEO. Beidou-3, qui fournit une couverture mondiale, est devenue opérationnelle en 2020. Elle repose sur une constellation de 27 satellites MEO, 5 satellites GEO et 3 satellites en orbite géosynchrone inclinée.

Nouvelles directions Une des nouvelles directions dans ce domaine est l'hyper géolocalisation qui consiste à modéliser en temps réel les erreurs de tous les satellites GNSS grâce à un réseau de stations terrestres positionnées de manière très précise. Cette modélisation, une fois communiquée à l'utilisateur, lui permet de corriger ses mesures propres.

1.4 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.

Il n'est pas certain que toutes ces prévisions et ces projets se réalisent. Un des problèmes actuels est celui des capacités de production de composants électroniques adaptés à l'environnement spatial qui pourraient répondre à la somme des besoins de tous les projets de constellations (IRIS², Starlink, OneWeb, Kuiper, etc.). Il n'est pas certain que l'industrie des semi-

Evolution dans le temps de la population orbitale

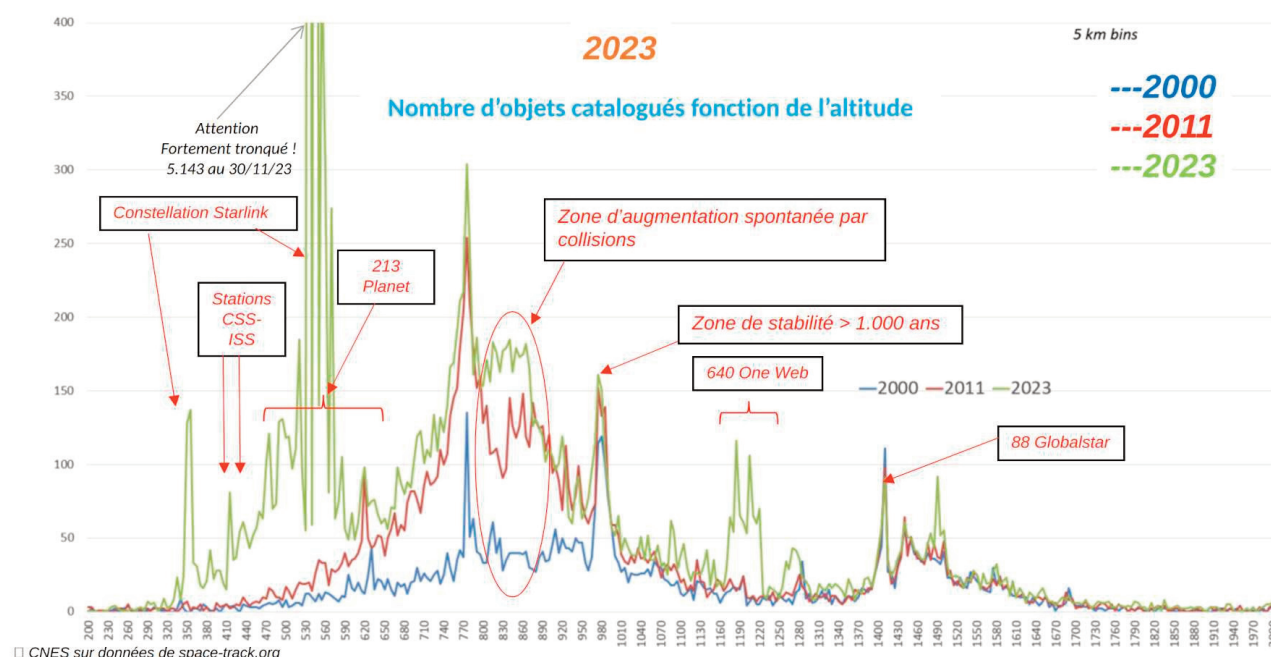


Figure 3. Évolution du nombre des satellites en fonction de l'altitude entre 200 et 2000 km (CNES).

conducteurs puisse fournir les composants dans les temps impartis. On peut penser que la demande induira une augmentation de l'offre mais les composants de qualité spatiale qui résistent aux radiations sont longs à produire.

2 Recherche et développements, perspectives scientifiques et technologiques

Cette section décrit quelques-uns des domaines de recherche et d'innovations technologiques qui permettent le développement actuel des constellations ainsi que les perspectives scientifiques associées.

2.1 Théorie des communications

2.1.1 Théorie de l'information et du codage

Capacité de Shannon

La capacité d'un lien radio (par exemple le lien entre l'utilisateur et le satellite auquel il est rattaché) est donnée par la théorie de l'information de Shannon qui dit aussi comment le signal émis doit être codé sur un canal de transmission bruité. Dans le cas le plus simple (lorsque l'interférence est traitée comme du bruit), cette capacité par Hertz de bande passante est proportionnelle à $\ln(1 + \text{SINR})$ où SINR est le rapport signal sur bruit plus interférence. Dans le cas de la voie descendante d'un lien satellite-utilisateur, le numérateur de ce rapport est la puissance du signal reçu du satellite de rattachement et le dénominateur est la somme de la puissance du bruit thermique et de la puissance de l'interférence (somme des puissances reçues des autres satellites en vue). Une formule duale vaut pour la voie montante, où cette fois, pour un utilisateur donné, les autres utilisateurs sont ceux qui contribuent à l'interférence perçue par le satellite de rattachement.

L'évolution du rôle des satellites prend aussi en compte les avancées de la théorie de l'information multi-utilisateurs. Dans la situation actuelle, sur la voie montante par exemple, le satellite est uniquement un réflecteur intelligent qui transmet à la fois le signal reçu des utilisateurs et le bruit vers la station d'ancrage. Il peut être bien plus efficace de procéder selon le principe « décoder et retransmettre » de la théorie de l'information (du canal à relais) où le

satellite décode chacun des signaux et les retransmet une fois décodés vers la station d'ancrage. Ceci requiert toutefois des satellites plus intelligents, dits régénératifs, et donc plus de calculs et plus d'énergie.

Partage des ressources radio

À tout moment, on rattache usuellement un utilisateur final au satellite le plus proche (ou le plus proche en visibilité d'une station d'ancrage s'il n'y a pas de communications entre les satellites). S'il y a plus d'un utilisateur attaché à un satellite à un moment donné, on partage, par exemple, dans le temps l'accès au satellite entre ces utilisateurs. Dans le cas le plus simple, sur la voie descendante, le débit effectif instantané d'un utilisateur est donc fonction à la fois de la capacité définie ci-dessus et du nombre d'utilisateurs attachés au satellite à cet instant.

Mesures de performance

Les mesures de performance globales retenues sont des moyennes, dans le temps ou dans l'espace, de ces capacités ou débits effectifs [28]. On voit immédiatement sur l'exemple Walker delta que ces moyennes temporelles dépendent fortement de la latitude. Ces indicateurs doivent être corrigés en prenant en compte les interruptions au moment des changements de topologie des connexions de bout en bout (entre l'utilisateur et la station d'ancrage). Comme déjà expliqué, on utilise aussi comme indicateur la somme de ces débits effectifs sur l'ensemble des liens du réseau.

2.1.2 Focalisation adaptative et antenne utilisateur

Pour les constellations LEO et MEO, les antennes des utilisateurs doivent permettre le suivi en temps réel, du ou des satellites en mouvement rapide sur leurs orbites. On distingue les antennes dans lesquelles ce suivi est mécanique, les antennes semi-électroniques et les antennes électroniques. Les systèmes mécaniques doivent permettre le basculement entre les satellites de rattachement, ils sont lourds (entre 50 et 200 kg) et coûteux (au minimum 10 000 Euros). Les systèmes semi-électroniques s'appuient sur la motorisation d'un réseau matriciel d'antennes dont chaque élément dispose d'une commande

permettant de changer la phase du signal. Les antennes électroniques de nouvelle génération fonctionnent sans motorisation. Elles sont constituées d'un réseau de plusieurs centaines d'antennes individuelles (*beamforming antennas* ou antennes à formation de faisceaux) qui sont contrôlées en phase, pour réaliser une opération de conjugaison de phase dans le but de pointer à chaque instant dans la direction d'un satellite. Starlink exploite cette solution à partir de composants ST Micro-électronique suivant un « *codesign* » défini par Starlink et STM. C'est une des clés de leur succès commercial. Une autre solution prometteuse, qui consomme nettement moins d'énergie, consiste à remplacer ces réseaux d'antennes par une antenne unique placée devant une surface intelligente (metasurface) qui joue le rôle de miroir électromagnétique déformable où le circuit de commande de chaque élément d'antenne se limite à une commutation de type arrêt-marche. Analogie des miroirs optiques à conjugaison de phase, ce type de dispositif permet d'obtenir l'équivalent de plusieurs antennes paraboliques orientables en temps réel. C'est la solution proposée par Greenerwave, une jeune pousse française.

2.2 Informatique

Dans les grandes constellations, la planification des tâches et l'optimisation des ressources devient d'une extrême complexité. Ces fonctions sont prises en charge par des systèmes informatiques de contrôle de plus en plus élaborés s'appuyant sur les acquis de la 5G [1], sur l'intelligence artificielle et sur l'informatique distribuée. L'informatique joue aussi un rôle clé dans le contexte des systèmes d'évitement de collisions (voir [la section 4](#)).

Ordonnancement des ressources

L'opération du réseau est fondée sur divers outils issus de la théorie du contrôle, de la recherche opérationnelle ou encore de la théorie des files d'attente, qui permettent de concevoir des algorithmes efficaces pour l'ordonnancement des flux d'information, le partage des ressources radio, le contrôle de la puissance d'émission, ou encore la réutilisation spatiale des fréquences. Ces algorithmes ont pour fonction de partager cette capacité globale de transmission entre les utilisateurs présents à un moment donné dans le

réseau, de manière à maximiser une certaine grandeur collective, par exemple la somme des débits. La gestion de ces ressources au moment des basculements d'un satellite au suivant (*handover*) est particulièrement délicate dans ce contexte.

Virtualisation

On entend par virtualisation la définition entièrement logicielle des fonctions du réseau. Cette virtualisation permet de gérer dynamiquement les ressources. Ceci permet notamment d'offrir des tranches de réseau (*Network Slicing*) spécifiques à chaque usage. Les opérateurs peuvent ainsi créer facilement des réseaux virtuels sécurisés et étanches en nombre arbitraire à partir d'un seul réseau physique, chacun dédié à un groupe d'utilisateurs. La possibilité de reconfigurer à distance après le lancement est essentielle dans le contexte satellitaire.

Cybersécurité

La cybersécurité des communications par constellations de satellites en orbite basse est encore peu satisfaisante, comme le montre l'arrêt, une heure avant l'invasion de l'Ukraine par la Russie, du réseau VIASAT qui était utilisé par l'armée ukrainienne. VIASAT est une société américaine qui commercialise des services de télécommunications satellitaires civils et militaires et dont le réseau a été saboté au moyen d'une mise à jour forcée des terminaux rendue possible par une intrusion dans le réseau d'administration de l'opérateur. La directive européenne NIS 2 vise à améliorer le niveau de sécurité des communications par satellites. Des initiatives sont également en cours aux États Unis d'Amérique dans le même but.

Traitement de données massives et intelligence artificielle

Avec l'augmentation du nombre des satellites d'observation de la terre, les images à haute résolution deviennent disponibles en grand nombres et les volumes de données à traiter deviennent de plus en plus massifs. Il s'agit de stocker ces données, de les interroger et analyser, ce qui constitue des défis considérables pour les systèmes informatiques. Ceci concerne par exemple les données de nature géopolitique (surveillance des frontières ou des zones de conflits)

et celles de nature environnementale (détection d'émission de gaz à effet de serre). L'intelligence artificielle tout comme l'analyse de données massives sont essentielles pour réaliser ces tâches.

2.3 Propulsion

La mise sur orbite des satellites nécessite des lanceurs dont le système de propulsion doit pouvoir fournir des niveaux de poussée considérables (1 300 tonnes au décollage pour Ariane 5, 800 tonnes pour Ariane 62 dotée de 2 boosters et 1 500 tonnes pour A64 dotée de quatre boosters). Ces niveaux de poussée ne peuvent être atteints qu'avec des moyens thermochimiques. Il faut aussi disposer à bord des satellites de moteurs permettant le contrôle d'altitude et d'orbite. Pendant longtemps la propulsion à bord était assurée par des moteurs chimiques alimentés en ergols stockables. Elle s'appuie désormais, pour une bonne partie des véhicules sur des propulseurs plasmiques. Le développement dans ce domaine revêt aussi une importance stratégique. Une bonne partie (30 à 50%) des charges utiles devrait dans l'avenir disposer d'une propulsion électrique.

2.3.1 Situation des lanceurs européens

Après la fin des tirs d'Ariane 5, l'Europe spatiale est passée par une phase difficile en attendant le premier vol d'Ariane 6. Les essais préalables et notamment celui du 23 novembre 2023, réalisé avec succès, ont permis de tester le moteur Vulcain 2.1 sur une durée de 8 mn correspondant à celle d'un vol réel. Le moteur de l'étage supérieur a lui aussi été testé en septembre 2023, ce qui permet désormais d'envisager un premier vol pour 2024 avec un retard d'environ quatre années sur l'agenda initial, l'Europe pourrait ainsi retrouver dans un avenir proche des capacités de lancement. Au-delà de 2030, Ariane 6 serait remplacé par ArianeNext, un lanceur réutilisable. Les développements actuels portent notamment sur le moteur Prometheus à ergols liquides cryotechniques de la classe des 100 tonnes de poussée. L'objectif est de remplacer le moteur Vulcain 2 actuel par un moteur dont le coût de production serait divisé par un facteur 10. Ce moteur sera alimenté en oxygène et méthane, stockés sous forme cryotechnique. Ce couple d'ergols permet d'atteindre un niveau d'impulsion

spécifique de 360 secondes, une valeur plus faible que celle du moteur Vulcain dont l'Isp est de 434 s, pour une poussée de 135 tonnes. La perte de performance en termes d'impulsion spécifique est compensée par une simplification de la cryogénie, le méthane pouvant être stocké sous forme liquide à des températures inférieures à -162°C alors qu'il faut descendre à -253°C pour le stockage de l'hydrogène sous forme liquide. La densité du méthane est aussi beaucoup plus élevée (420 kg/m³ contre 70 kg/m³ pour l'hydrogène liquide), ce qui permet une réduction notable de la taille du réservoir. On peut aussi utiliser une seule turbopompe alors qu'il en faut deux dans le cas LOx/H₂. La poussée du moteur Prometheus est modulable entre 30 et 110%, il serait utilisé sur l'étage principal, en grappe de 7 à 9 unités, et sur l'étage supérieur. Cela pourrait ainsi permettre la réutilisation de l'étage principal, une caractéristique importante dans la compétition engagée dans ce domaine dans laquelle SpaceX a pris une avance notable. Dans ce cadre, plusieurs programmes sont engagés en Europe pour développer les concepts de réutilisation :

- Callisto, un projet du CNES en partenariat avec la JAXA (agence spatiale japonaise) et le DLR (agence spatiale allemande) est un démonstrateur destiné à réaliser des vols d'essai à échelle réduite (une fusée de 15 m pour un mètre de diamètre dotée d'un moteur cryotechnique réutilisable) pour maîtriser le retour sur Terre et valider et chiffrer les opérations de remise en état entre deux vols. Le premier vol est prévu pour 2024.
- Themis, un démonstrateur de premier étage réutilisable, conçu par ArianeWorks pour préfigurer l'étage principal du futur lanceur ArianeNext. D'une hauteur de 30 m pour 3,5 m de diamètre, Themis sera équipée de trois moteurs Prometheus alimentés en LOx/méthane. Themis s'appuiera sur les avancées réalisées sur le véhicule expérimental Callisto.

2.3.2 Propulsion plasmique

Le développement de la propulsion électrique est relativement ancien mais son application au domaine spatiale est plus récente. Des satellites de télécommunication utilisent des propulseurs électriques pour assurer le placement et le



Figure 4. À gauche : Moteur plasmique (Safran). À droite : Moteur plasmique PPS®1350-G en fonctionnement. Crédits Eric Drouin/Snecma/Safran.

maintien sur l'orbite géostationnaire ou sur tout autre type d'orbite. La propulsion électrique permet aussi la mise à poste du satellite en remplacement de la propulsion chimique. Il est intéressant de comparer ces deux options pour ce type d'opération. On considère d'une part un moteur d'apogée typique (le Mage 2) avec une masse de propergol solide de 500 kg et développant une poussée de 30 kN et un propulseur plasmique produit par Safran (le PPS®1350) développant une poussée bien plus faible de 0,1 N. Le moteur chimique va fonctionner pendant 30 s et générer une impulsion (le produit de la poussée par la durée de fonctionnement) d'environ $9 \cdot 10^5$ Ns. Le propulseur plasmique va de son côté fournir une poussée sur une durée de 4000 heures et ainsi assurer une impulsion de $14 \cdot 10^5$ Ns supérieure à celle issue du moteur chimique. Ce résultat est obtenu en consommant 80 kg de xénon. L'avantage en termes de masse est important mais il est obtenu au prix d'un allongement de la durée de mise à poste d'environ 6 mois. D'une façon générale, la propulsion électrique permet des gains significatifs en termes de masse au décollage. Pour des satellites en orbite géostationnaire dont les durées de vie sont d'environ 15 ans, on peut gagner plusieurs centaines de kilogrammes sur une masse initiale d'environ 3 tonnes. La propulsion électrique peut aussi servir à prolonger la durée de vie de satellites en orbite basse qui subissent les effets de l'atmosphère résiduelle et ont tendance à descendre en altitude. Une compétition existe actuellement entre deux types d'architectures de propulseurs électriques [21] avec d'une part des moteurs ioniques à grille (« *Grid Ionic Thrusters* ») et d'autre part des moteurs à effet Hall (« *Hall Effect Thrusters* ») aussi désignés sous le nom de

propulseurs plasmiques. Ces deux technologies utilisent le même gaz, du xénon injecté dans le corps du moteur. Sous l'effet d'un bombardement d'électrons, ce gaz forme un plasma partiellement ionisé. Les ions sont éjectés à grande vitesse (10 à 20 km/s) par un champ électrique établi dans le propulseur. Dans les moteurs ioniques, le champ électrique est formé par des grilles polarisées. Dans les moteurs à effet Hall, une différence de potentiel est appliquée entre une cathode et une anode en présence d'un champ magnétique. Ce champ sert à piéger les électrons à la sortie du propulseur mais il n'a qu'une influence réduite sur les ions qui sont éjectés librement. Les moteurs plasmiques développés notamment par Safran et choisis par *Airbus Defense and Space*, et par Thales Alenia Space sont plus simples que leurs concurrents ioniques, retenus par Boeing pour des missions interplanétaires. La gamme des propulseurs plasmiques développés par Safran couvre des puissances de 300 W à 5 kW. Le propulseur le plus puissant (PPS®5000), qui détient le record mondial de durée de vie de près de 20 000 heures, est conçu pour équiper les satellites géostationnaires de télécommunications, assurer leur mise à poste et leur contrôle orbital. Un autre moteur PPS®X00 est conçu pour répondre aux besoins des constellations de petits satellites et assurer le transfert d'orbite, la compensation de la traînée induite par l'atmosphère résiduelle et la désorbitation en fin de vie. Ces développements impliquent des efforts de recherche & développement engagés très souvent en partenariat avec des laboratoires CNRS, à la fois par Safran et par des jeunes pousses comme Exotrail qui développe des moteurs à effet Hall miniature pour des gammes de puissance de 50 à 100W.

2.4 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 de construire à terme un nouvel Internet de l'espace, infrastructure dynamique composée de satellites multi-orbites (LEO, MEO et géostationnaires) et complémentaire du cœur de réseau Internet terrestre. Comme déjà expliquée, les avantages d'un tel réseau en complément du réseau terrestre 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 seconde perspective, liée à la première, 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, ce qui ouvre de nombreuses nouvelles perspectives.

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 [22]. 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 qui combinera des fonctions de communication et d'observation. Les difficultés restent toutefois considérables. Il y a d'une part les limites définies par la puissance moyenne qu'il est possible d'obtenir par unité de surface de panneaux solaires et d'autre part le problème de la dissipation de la chaleur produite par les calculateurs.

3 Impact sur l'astronomie

Le lancement de dizaines de milliers de satellites en orbite basse dégrade l'accès au ciel nocturne et handicape sérieusement l'astronomie au sol. À l'observatoire du Cerro Paranal dans le désert d'Atacama au nord du Chili, site des quatre télescopes de 8 m de diamètre qui composent le *Very Large Telescope* (VLT) de l'Observatoire Européen Austral (ESO), un grand nombre de satellites en orbite basse sont déjà visibles depuis l'observatoire. En considérant 19 constellations qui comprendront jusqu'à 48 000 satellites dans les dix prochaines années, le nombre de satellites visibles depuis Cerro Paranal à un instant donné peut être estimé. Près de 2000 seront illuminés en début ou en fin de nuit dont 260 auront un éclat comparable à celui de l'étoile la plus faible visible à l'œil nu et dont près d'une centaine seront au moins 30° au-dessus de l'horizon (simulations d'Olivier Hainaut [10]). Les conséquences pour la plus ancienne des sciences concernent à la fois l'astronomie optique et l'astronomie radio et seront dramatiques si rien n'est fait vu les perspectives de développement des constellations. On peut noter que même les observatoires spatiaux en orbite basse commencent à être affectés par les constellations.

3.1 Impact sur l'astronomie optique

Par optique, on entendra ici le domaine de l'ultraviolet à l'infrarouge moyen. Le principal problème est celui de la réflexion du flux solaire par les satellites, plus particulièrement au lever et au coucher du Soleil et pour les instruments à grand champ de vue. L'astronomie solaire ou l'observation diurne de planètes ne sont pas concernées par ce problème.

3.1.1 La nature des impacts

Les conséquences directes de la multiplication des constellations sont les suivantes :

- la formation de traces de lumière induites par la réflexion vers le sol du rayonnement solaire par les satellites en orbite basse ;
- l'augmentation de la brillance du ciel nocturne par diffusion et réflexion de la lumière lunaire par les débris spatiaux.

L'effet dominant est de très loin le premier et il est le plus marqué à la tombée de la nuit et au lever du Soleil. Le second effet est dû à l'accroissement du nombre de débris spatiaux. Il est actuellement inférieur de 6 à 7 ordres de grandeurs au fond de ciel naturel. Il pourrait cependant ne plus être négligeable, voire être important en cas de déclenchement du syndrome de Kessler pour une population bien plus importante de satellites (voir la [sous-section 4.4](#)).



Figure 5. Exemple de traces produites en astronomie optique par 25 satellites Starlink en mai 2019 sur le groupe de galaxies NGC 5353/4. Crédits : V. Girgis/Lowell Observatory.

Les traces

Les observations astronomiques se déroulent en général du crépuscule à l'aube astronomiques, lorsque le Soleil se trouve à au moins 12° sous l'horizon. L'observation est possible juste avant le crépuscule ou juste après l'aube astronomiques pour des objets suffisamment brillants mais pas pour le ciel le plus profond, ce qui motive en grande partie la réalisation des plus grands télescopes. Ce temps d'observation astronomique est également affecté par des sources naturelles brillantes dont la plus importante est la Lune qui nécessite de faire la distinction entre temps (d'observation) sombre et temps brillant, les observations des objets les plus faiblement lumineux se faisant par temps sombre. Le premier impact des constellations est donc de réduire la fraction de temps sombre.

Les constellations de satellites en orbite basse sont visibles en début et fin de nuit, aux environs du crépuscule astronomique puisque leurs traces sont le reflet de la lumière solaire par les satellites. L'impact est d'autant plus important que les satellites sont hauts. Les satellites de One Web, qui se trouvent sur des altitudes de 1 200 km sont visibles plus longtemps que ceux de Starlink dont les orbites sont situées entre 350 et 500 km.

Les plus forts impacts : les télescopes à grand champ de vue et la détection des sources transitoires

La vitesse de défilement des satellites étant rapide (0,4 degrés par seconde soit environ le diamètre de la Lune par seconde pour des satellites à 500 km d'altitude), l'impact des traces est d'autant plus important que le champ des instruments est grand. C'est le cas des instruments effectuant aujourd'hui, et surtout dans les décennies à venir, des relevés dans de grands champs. Parmi les principaux objectifs scientifiques de ces télescopes et instruments se trouve la recherche d'événements transitoires rares, liés par exemple à l'émission d'ondes gravitationnelles, à des sursauts gamma, à des sursauts radio rapides, à des astéroïdes qui pourraient être potentiellement des géo-croiseurs, à des transits d'exoplanètes, etc. Les programmes les plus ambitieux s'attendent aussi, en déployant des moyens d'observations qui

n'existaient pas auparavant, à faire des découvertes inattendues de nouveaux phénomènes. La capacité d'observation de phénomènes transitoires et/ou exceptionnels pose un problème particulier puisque la possibilité de revisite est par définition nulle et la perte par conséquent totale.

D'autres objectifs importants des télescopes à grand champ sont l'imagerie extragalactique profonde pour, par exemple, la cosmologie (matière et énergie sombres). Ces programmes seront impactés négativement par les traces dues aux constellations et peut-être aussi par l'augmentation de la brillance du ciel nocturne, avec une sensibilité forte aux non-linéarités résultant de la soustraction des biais, rendant encore plus difficile ces programmes.

Des télescopes de relevés équipés de caméras grands champs existent d'ores et déjà et on peut mentionner par exemple VISTA à Paranal. Le télescope phare de ce type est le *Vera Rubin Observatory* (VRO)², un télescope de 8,4 m de diamètre au Chili, équipé d'une caméra à très grand champ, à la réalisation de laquelle la France a participé, qui entrera en opération en 2024. Doté d'un champ d'environ 10 degrés carrés, soit 40 fois la surface de la Lune, cet instrument est capable de balayer l'intégralité du ciel austral (18 000 degrés carrés) en un peu plus de trois jours avec une sensibilité atteignant la magnitude³ visible de 24.

En dix années d'opérations prévues au minimum, cela signifie 825 visites de chaque partie du ciel austral assurant à la fois la détection de phénomènes transitoires et une augmentation de la sensibilité de près de 4 magnitudes par rapport aux relevés actuels. Les pertes de données anticipées pour VRO sont les plus

importantes juste après le coucher du Soleil et juste avant l'aube, moments les plus propices à la détection des géocroiseurs. La présence de traces de satellites pourrait donc être systématique dans les images de VRO pour ce sujet. De manière générale, VRO estime que 30% des images prises seront contaminées par des traces avec 42 000 satellites simulés pour Starlink et quasiment toutes les images pour 400 000 satellites [23]. D'autres simulations [16] faites avec 26 000 satellites montrent des résultats similaires dont on peut déduire que plus de 10% des images seront affectées, chiffres qui montent à près de 20% avec ce nombre de satellites pour des observations démarrant juste avant le crépuscule nautique (Soleil à 12° sous l'horizon). Ces chiffres sont à mettre en regard des pourcentages de nuits perdues en raison de la météo : moins de 20% de temps perdu au Maunakea, à Hawaï (source télescope japonais Subaru), moins de 12% de temps perdu au VLT (avril-septembre 2022), sachant que ces observatoires sont construits sur des sites lointains notamment choisis pour la transparence du ciel et la fréquence de temps clair ainsi que pour leur éloignement de sources lumineuses anthropiques, ce qui représente un surcoût non négligeable pour ces projets.

Impact sur les spectrographes à grand champ

Le *Vera Rubin Observatory* est le premier télescope à grand champ de cette génération. D'autres suivront ; des projets en gestation utiliseront des spectrographes grands champs aux capacités complémentaires. Les pertes sont moins importantes pour les spectrographes mais dépendent de la résolution avec des perturbations induites par le spectre solaire réfléchi. Ainsi sur le VLT, la perte de données pour le spectrographe FORS, l'un des instruments en

². Le *Vera Rubin Observatory* est un télescope de 8,4 mètres de diamètre à très grand champ instantané installé au Cerro Pachón au Chili. Doté d'une caméra de 3,2 milliards de pixels, il observera de l'ultraviolet à l'infrarouge proche. Son objectif est de réaliser un relevé, le *Legacy Survey of Space and Time*, en une dizaine d'années au cours desquelles il couvrira l'intégralité du ciel avec une caméra à très grand champ à la réalisation de laquelle la France a participé, qui entrera en opération en 2024. Doté d'un champ d'environ 10 degrés carrés, soit 40 fois la surface de la Lune, cet instrument est capable de balayer l'intégralité du ciel visible tous les 3 ou 4 jours. Cette cadence rapide de revisite de l'intégralité du ciel observable depuis le Chili en fera un instrument extrêmement efficace pour la détection de sources transitoires comme les supernovæ ou les astéroïdes. Les très longs temps d'intégration sur les dix années d'opération permettront aussi d'explorer la toile cosmique et de caractériser la matière sombre dans l'Univers, matière dont l'existence a notamment été établie par Vera Rubin.

³. L'échelle des magnitudes est une échelle logarithmique qui augmente de 2,5 lorsque l'éclat diminue d'un facteur 10. Un objet 1000 fois moins brillant qu'un autre a donc une magnitude plus grande de 7,5. L'étoile Véga définit la magnitude 0. L'œil peut détecter des objets jusqu'à la magnitude 6, c'est-à-dire environ 250 fois moins brillants que Véga.

fonction du VLT, est de l'ordre du pourcent en début et en fin de nuit et inférieure à 0,1% en milieu de nuit en été. Elle sera de 0,7% pour l'instrument HARMONI du futur *Extremely Large Telescope* de l'ESO (ELT) en début de nuit [2]. De manière générale, la perte sera bien moindre pour l'ELT par rapport à des observatoires du type VRO du fait du champ beaucoup plus petit des très grands télescopes.

L'impact sur les télescopes spatiaux

Ces pertes n'affectent pas que les télescopes au sol comme le montre une étude parue dans *Nature Astronomy* [20] où l'on voit que la prise d'images par le *Hubble Space Telescope*, qui évolue à 538 km d'altitude, est affectée par des traces de satellites dont la présence augmente avec le temps. Le pourcentage d'images marquées qui est de 2,7% actuellement pourrait être multiplié par un facteur 10 avec les futures constellations. Il est probable qu'à l'avenir il n'y ait plus de télescopes sur ces orbites basses qui présentent beaucoup d'inconvénients pour les observations.

Comparaison à la brillance du ciel nocturne

La brillance du ciel est augmentée en début et fin de nuit par la lumière réfléchiée et diffusée par les débris résultant des collisions entre satellites et/ou éléments des lanceurs. Elle augmente aussi en-dehors de la nouvelle Lune du fait de la lumière lunaire diffusée par les débris. La brillance du ciel nocturne a été estimée à partir d'un modèle simplifié pour obtenir un ordre de grandeur de ce fond artificiel par pleine Lune. Le fond est dimensionné par les débris d'environ 1 mm qui sont statistiquement dominants. Il est inférieur de 6 ordres de grandeur au fond émis par la luminescence de l'atmosphère par excitation et désexcitation d'espèces chimiques dont le flux correspond environ à une magnitude de 22 par seconde d'angle carrée. Il est également inférieur de 7 ordres de grandeur à la lumière zodiacale qui a pour origine la lumière du Soleil renvoyée par les petits grains de poussière interplanétaire et dont la magnitude visible aux hautes latitudes écliptiques est de 20 par

seconde d'angle carrée. Le fond artificiel produit par les débris est donc pour l'instant très faible mais si le nombre de débris augmentait plus rapidement que le nombre de satellites en cas de déclenchement du syndrome de Kessler alors son effet pourrait ne plus être négligeable.

Les réductions de sensibilité et du temps d'accès aux sources astronomiques

Les observatoires astronomiques optiques ont l'habitude de prendre en compte les contraintes de temps (observabilité d'une source), de luminosité du ciel (phases de la Lune) et de transparence du ciel pour programmer les observations. À cela s'ajoute, pour les observations nécessitant une correction de la turbulence atmosphérique (observation à la limite de diffraction du télescope ou avec une résolution meilleure que le *seeing*⁴), une contrainte sur la hauteur des sources pour minimiser l'épaisseur d'atmosphère afin de minimiser l'amplitude des fluctuations de phase de l'onde lumineuse causées par la turbulence atmosphérique. L'ensemble de ces contraintes conduit déjà à une limitation du temps d'accès aux sources astronomiques. L'exclusion de la présence de traces lumineuses de constellations que ce soit par programmation des observations sur la base d'éphémérides précises de satellites, en temps-réel par fermeture d'un obturateur ou *a posteriori* par traitement de données, est une limitation supplémentaire du temps d'observation et donc de la sensibilité des instruments astronomiques. Étant donné le coût de construction de ces grands observatoires (un peu moins de 1,5 milliards d'euros pour l'ELT) et celui d'une nuit d'observation (environ 1€/s pour un télescope de classe 8-10 m), le plus long temps d'opération nécessaire pour atteindre un même résultat (qui parfois même devient hors de portée dans le cas de phénomènes transitoires) ainsi que le travail supplémentaire de dépouillement des données se chiffreront par une perte économique en plus des pertes scientifiques. Des coûts additionnels peuvent par ailleurs être à prévoir pour des instruments imageurs pour la détection des satellites si les éphémérides ne sont pas suffisamment précises.

⁴. Le *seeing* est la limite de résolution angulaire imposée par la turbulence de l'atmosphère en absence de correction. Il est de l'ordre de la seconde d'angle dans les sites astronomiques et atteint quelques dixièmes de seconde d'angle pour les meilleurs d'entre eux.

Les domaines impactés

Les études astronomiques dans le domaine optique qui pourraient être durablement affectées par la multiplication des constellations de satellites ont trait aux événements transitoires rares, à l'imagerie extragalactique profonde, aux astéroïdes (potentiellement géocroiseurs), aux objets étendus faibles dans le visible, aux transits d'exoplanètes, aux découvertes de nouveaux phénomènes. Cette liste non exhaustive concerne à la fois des observations à grand champ et à petit champ, des observations récurrentes et des observations exceptionnelles. Comme indiqué plus haut, la capacité d'observation de phénomènes transitoires ou de phénomènes exceptionnels est ainsi diminuée sans qu'il soit possible de la compenser par une revisite.

À cela s'ajoute l'impact sur l'astronomie amateur et sur les sciences participatives alliant travaux professionnels et participation du public.

3.1.2 Débruitage par traitement du signal

S'agissant d'observations astronomiques, les signaux additionnels dans les mesures sont à la fois une source de bruits supplémentaires (bruit de photons des traces, fluctuations spatiales et temporelles des signaux) et une source de biais additionnels (saturation des détecteurs, réponse non-linéaire des détecteurs lorsqu'ils fonctionnent au voisinage de la saturation). On peut imaginer pouvoir retirer une partie des biais après modélisation mais il est fort probable que l'intégralité des biais ne pourra être éliminée des données, générant donc une dégradation des données d'origine purement humaine. Ces perspectives de traitement du signal peuvent permettre de réduire l'impact des traces sur les données astronomiques, mais il est certain que cela ne résoudra pas 100% des problèmes affectant les données, une partie d'entre elles étant perdues.

3.2 Impact sur l'astronomie radio

Par radio, on entendra ici le domaine allant des basses fréquences à 50 MHz et s'étendant jusqu'au THz. Cette sous-section montre en quoi la perspective d'une pollution permanente

venant de la multiplication des constellations est gênante pour la radio astronomie. La notion de sanctuaire radio local (qui consiste à ne pas émettre de signaux en direction des observatoires radio terrestres et à arrêter les transmissions dans certains canaux lorsqu'un observatoire radio est en vue), qui est acceptée par certains opérateurs, amoindrit fortement le flux sur les stations mais ne l'élimine pas. Compte tenu de la largeur des lobes primaires et secondaires des antennes équipant les satellites et celles des radiotélescopes, les satellites sont vus en pratique par les radiotélescopes sur l'essentiel de la voûte céleste. Par ailleurs, les électroniques des satellites peuvent émettre à basse fréquence et donc constituer des sources de bruit y compris lorsqu'ils n'émettent pas de signaux de télécommunication selon les observations de Starlink par LOFAR. Enfin, la protection des observations en mode interférométrique intercontinental (comme celles qui ont permis à l'Event Horizon Telescope d'obtenir des images directes des trous noirs super-massifs M87* et Sagittarius A*) pourrait nécessiter des actions coordonnées en différents points des constellations.

3.2.1 Description générale du problème

Nature des perturbations

Les observatoires millimétriques et submillimétriques travaillent dans des gammes de fréquences allant par exemple pour NOEMA à l'IRAM de 71 à 276 GHz (1,09-4,23 mm de longueur d'onde) et de 35 à 950 GHz (0,3-8,6 mm) pour ALMA. Quant aux basses fréquences, elles s'étendent par exemple pour le *Square Kilometer Array* de 50 MHz à 15,4 GHz (soit des longueurs d'onde de 1,95 cm à 6 m), avec pour objectif une extension à 24 GHz (1,25 cm). On peut estimer que les observatoires millimétriques actuels représentent un investissement d'environ 2,5-3 milliards d'euros et que les programmes à venir correspondront à un investissement également de cet ordre. Concernant les basses fréquences, la construction de SKA représente un investissement de l'ordre de 2 milliards d'euros. Certains de ces télescopes réaliseront des relevés grand champ voire seront spécialisés dans ce type de relevé comme c'est le cas du projet millimétrique CMB-S4 pour la mesure de la

polarisation du fond diffus cosmologique (les modes B engendrés par les ondes gravitationnelles primordiales) dont le signal est extrêmement faible. Des effets comparables à ceux du domaine optique sont donc à craindre. À la différence du domaine optique cependant, ce n'est pas la réflexion du Soleil par les constellations qui perturbe les observations radio mais l'émission radio des satellites, qu'elle soit intentionnelle pour les télécommunications ou le fait des émissions radio des électroniques de bord. Ces émissions sont donc indépendantes du cycle diurne et affectent les observations à tout moment de la journée ou de la nuit puisque les observations radio peuvent être faites aussi bien de nuit que de jour à l'exception des observations dans des bandes sub-millimétriques très sensibles à l'humidité de l'air, il n'y a donc pas de moindre sensibilité pour les observatoires radio en fonction de l'heure d'observation.

Insuffisance de la protection radio

Certains observatoires radio sont construits dans des sanctuaires soumis, ainsi que leurs alentours, à un régime strict de protection contre les émissions radio humaines. Malgré cela, les observations radio sont gênées par ces émissions qui sont aujourd'hui la première source de perturbations des données radio devant les perturbations satellitaires. Cependant, l'existence de sources radio satellitaires et leurs perspectives de croissance sont une gêne potentielle importante. Ainsi, pour le très grand interféromètre radio en cours de construction, le *Square Kilometer Array* (SKA)⁵, des sanctuaires radio ont été établis dans le désert du Karoo en Afrique du Sud (moyennes fréquences) et dans celui de Murchison en Australie (basses fréquences). Les émissions des satellites, qui sont dans la bande de fréquences 10,7-12,7 GHz empiètent sur une sous bande (Mid Band 5b 8-15 GHz) parmi les 7 bandes retenues pour SKA. Ceci entraînera une perte de sensibilité dans la gamme de fréquences utilisée par les constellations, les observations astronomiques prenant alors au minimum plus de temps. L'impact scientifique sera le plus significatif pour

les études des raies spectrales moléculaires et atomiques à ces fréquences.

Les télécommunications au sol ou celles qui s'appuient sur des constellations ne sont pas les seules sources de perturbations puisque la bande entre 70 et 116 GHz est par exemple utilisée par les radars militaires ou civils (radars équipant les voitures par exemple), ce qui impacte l'IRAM. Il est par ailleurs à noter que les constellations et les télécommunications au sol sont aussi des sources de nuisances indirectes. La fréquence de 22 GHz est utilisée dans le millimétrique pour la radiométrie de la vapeur d'eau à des fins d'étalonnage de la phase de l'onde. Seule une toute petite bande est protégée alors que les flancs sont nécessaires pour atteindre une très bonne sensibilité sur l'estimation de la quantité de vapeur d'eau. La préservation de bandes radio pour l'astronomie a été rapidement perçue comme une nécessité dès les années 1970 sous l'égide de l'ITU qui a mis en place le service de radio astronomie. Mais cette protection reposait sur un partage de bandes autour des longueurs d'onde d'intérêt pour l'astronomie données par des transitions atomiques et moléculaires. Depuis, la radioastronomie a fait d'énormes progrès en sensibilité. Du fait de l'expansion de l'Univers, la raie située à 21 cm de la structure hyperfine de l'hydrogène est ainsi détectée dans l'Univers proche de 21 cm (1 420 MHz) mais aussi à des longueurs d'onde beaucoup plus grandes au plus près du Big Bang décalant cette raie du GHz vers le MHz en remontant dans le temps. Un autre exemple concerne les progrès réalisés dans l'étude du milieu interstellaire avec l'identification de raies et de bandes insoupçonnées voire inconnues dans l'Univers comme les raies diffuses du milieu interstellaire ou encore celles des hydrocarbures polycycliques aromatiques dont l'étude nécessite l'accès à de vastes plages spectrales (en particulier pour l'identification de molécules spécifiques) qui ne sont plus limitées aux bandes définies dans les années 1970. L'idée que les études se limiteraient à de petites fenêtres spectrales autour de quelques raies particulières est donc dépassée, ce qui rend encore plus nécessaire l'existence de sanctuaires

⁵. Le *Square Kilometer Array* est le plus important observatoire radio en cours de construction. L'objectif final est d'atteindre une surface collectrice de 1 km carré. Il est constitué de deux réseaux interférométriques situés dans l'hémisphère Sud : l'un en Australie, dans le désert de Murchison, pour la partie basse fréquence (SKA-LOW, 50 – 350 MHz), l'autre en Afrique du Sud, dans le désert du Karoo, pour la partie moyenne fréquence (SKA-MID, 350 MHz – 15 GHz). Le projet a été conçu par un consortium international pour étudier des questions scientifiques essentielles allant de la naissance de l'Univers aux origines de la vie. Il sera par exemple capable de détecter la naissance des premières étoiles au sein des premières galaxies, marquant la fin des âges sombres de l'Univers quelques centaines de millions d'années après le Big Bang.

radio, où les astro-nomes aient accès à une grande partie des fréquences radio. Ailleurs, les parties du spectre hors bandes protégées sont presque totalement occupées aujourd'hui du fait de l'explosion de l'exploitation des bandes radio pour les télécommunications. Cette pression continue sur l'exploitation du spectre radio augmente la probabilité de fuite vers des bandes spectrales protégées de radioastronomie, adjacentes ou proches.

3.2.2 Impact sur les données et les possibilités d'étalonnage

Un téléphone portable émettant depuis la Lune produit un signal de 63 Jy (le Jansky (Jy) est une unité utilisée en radioastronomie pour mesurer le flux d'énergie des signaux radio, 1 Jy correspondant à $10^{-26} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) et le flux d'énergie de celui d'un satellite de télécommunications est de l'ordre de plusieurs millions de Jansky, là où la sensibilité de SKA se mesure en micro-Jansky. Cela pourrait conduire à une saturation des détecteurs et au minimum à des effets non-linéaires induits extrêmement difficiles à étalonner. À titre d'exemple, l'état de l'art de la réjection du signal pour la mesure du fond diffus cosmologique dans le domaine millimétrique est de 10^{10} pour la mission Planck, alors qu'ici une réjection de 10^{12} est nécessaire, soit 100 fois mieux. Mais ces effets de nonlinéarité sont fortement affaiblis si les satellites ne pointent pas dans la zone à protéger. Des simulations de la phase 2 de Starlink ont été faites par SKAO pour déterminer la probabilité qu'un satellite se trouve dans un faisceau de 1° près d'une source pendant une observation [7]. Cette probabilité, qui atteint au maximum 6% dans certaines zones du ciel, va aller en augmentant avec la multiplication des constellations et du nombre de satellites par constellation.

Effets sur les bandes protégées

Ainsi, les bandes protégées pour la radio astronomie à 10,6-10,7 GHz qui sont juste adjacentes à celles utilisées pour les signaux descendants des constellations, entre 10,7 et 12,7 GHz, pourraient ne plus être utilisables avec l'augmentation du nombre de satellites du fait de la contamination par des harmoniques des signaux de télécommunication. Pour l'éviter, certains opérateurs de constellations acceptent

de ne pas utiliser le canal entre 10,6 et 10,7 GHz, et de se contenter de l'autre moitié de leur bande. La sensibilité actuelle des interféromètres basse fréquence n'est pas encore nécessairement limitée par ces pollutions et les techniques de traitement sont pour l'instant efficaces [27]. C'est le cas par exemple pour la détection du signal de l'époque de ré-ionisation avec LOFAR avec 500 heures de pose [14]. Mais la soustraction supplémentaire des signaux de constellations sera coûteuse en temps d'observation au prix d'une perte en efficacité et donc en sensibilité au final. À noter que les interféromètres radio bénéficient d'un avantage par rapport aux télescopes radio utilisés individuellement en ce qu'ils mesurent des signaux corrélés spatialement et rejettent donc naturellement les signaux non-corrélés émis par des satellites indépendants. Plus problématique encore, il a été montré récemment, grâce à des mesures faites à basse fréquence, entre 110 et 180 MHz, par l'observatoire LOFAR, que les émissions radio des électroniques à bord des satellites Starlink, en plus de celles utilisées pour les télécommunications, étaient aussi à prendre en compte dans le bilan de pollution radio des constellations [6]. Les émissions les plus fortes mesurées dépassent d'un facteur 10 le plafond prévu par l'UIT [32], les plus faibles détectées étant déjà supérieures à ce plafond. Des recherches – par les auteurs de l'article [6] – sont en cours pour disposer de meilleurs modèles et statistiques de ces émissions.

À cela pourrait s'ajouter le problème potentiel des réflexions des signaux radio terrestres par les satellites.

Conséquences des émissions radio

La conséquence directe des émissions radio des constellations sur les observatoires dans ce domaine de longueurs d'onde est donc d'ajouter aux signaux astrophysiques le bruit de photons associé aux signaux électromagnétiques d'origine humaine ainsi que des biais dus à une soustraction imparfaite de signaux ou à des non-linéarités de détection. Si dans la situation actuelle les sources dominantes restent les perturbations liées aux télécommunications depuis le sol et dans certains cas les avant-plans astrophysiques eux-mêmes, l'accroissement des émissions radio depuis l'espace va conduire à des

signaux et à des biais de plus en plus importants qui au fil de l'augmentation de la sensibilité des observations astronomiques deviendront dominants. S'agissant du bruit de photon des pollutions radio qui est un bruit fondamental, il ne peut être retiré et la seule solution pour le compenser est donc d'augmenter le temps d'intégration. Les effets des biais pourraient être estimés en mesurant et en modélisant les émissions radio des satellites. Mais cela nécessiterait des instruments à part entière avec des observations faites en parallèle des observations astronomiques, leur soustraction pouvant être imparfaite. Il n'est pas envisagé aujourd'hui de tenter de faire ces corrections. Ceci aurait potentiellement un coût important qui viendrait s'ajouter à celui des observatoires et de leurs instruments que les communautés scientifiques auront des difficultés à financer. Ceci nécessiterait des ressources additionnelles, qui réduiront celles nécessaires à la réalisation de l'instrumentation scientifique. On peut aussi noter qu'il est difficile d'étalonner ces signatures sur des durées d'intégrations de centaines d'heures difficilement répétables. Dans ce contexte, par exemple pour SKA, il sera difficile d'atteindre certains des objectifs scientifiques qui font appel à la partie du spectre qui est menacée, à une partie de la bande 5b pour SKA MID et peut-être aussi à une bande de fréquences pour SKA LOW. Le problème est différent selon qu'il s'agit de constellations en orbite basse ou en orbite géostationnaire. Pour ces dernières, des techniques de démixage des signaux sont au point alors que pour les satellites en orbite basse les schémas d'interférences changent rapidement. Enfin, les futures générations d'observatoires comme SKA qui fonctionnent en mode réseau phasé ne peuvent conserver l'intégralité de leurs données brutes pour traitement *a posteriori* du fait des débits de données importants (plusieurs téra-octets par seconde pour SKA), ce qui rend l'étalonnage des données pour des sources de biais rapidement variables encore plus difficile voire impossible à ce stade.

3.2.3 Modalités pour réduire l'impact sur les observations radio

Observations mono-sites

La mesure la plus simple à prendre pour réduire l'impact des constellations sur les observations radio serait de cesser l'émission à l'aplomb des

observatoires ou au moins de s'assurer qu'elles ne pointent jamais vers les zones protégées. Du fait de l'émission dans les lobes secondaires (voire dans des lobes d'ordres supérieurs étant donné la sensibilité des observatoires modernes), un angle d'évitement de l'ordre de 10° ou plus est indispensable pour que cette technique d'*overfly switch-off* soit efficace. Pour ce qui concerne les émissions propres des électroniques de bord, des discussions avec les opérateurs et les régulateurs ont lieu pour tenter d'atténuer ces émissions dans les prochaines séries de satellites. Dans le même ordre d'idée, les communications entre satellites pourraient être un problème pour les mêmes raisons si elles sont faites par radio. La correction des biais et la programmation des observations dans les bandes incriminées seront facilitées comme dans le domaine optique si l'on connaît à l'avance ou au moins *a posteriori* la position en temps réel des satellites. Il faudrait donc que les régulateurs et les opérateurs de satellites prennent en compte les effets nuisibles des constellations sur la radioastronomie et acceptent de produire ou de suivre une série de règles en cours d'établissement (voir [la section 7](#)).

Observatoires intercontinentaux

La particularité des observatoires radio est de pouvoir être utilisés en mode interférométrique intercontinental pour obtenir la résolution la plus fine possible sur Terre aux longueurs d'onde utilisées. C'est ainsi par exemple qu'a été obtenue la première image résolue d'un trou noir, M87*, par l'*Event Horizon Telescope* en recombinaison des données de 8 observatoires radio millimétriques répartis sur plusieurs continents et observant à 1,3 mm de longueur d'onde (230 GHz). Dans ce type d'observation, la source est nécessairement basse sur l'horizon pour au moins l'un des observatoires. Certains observatoires peuvent bénéficier d'une interruption d'émission car ils sont situés au-dessous des satellites. Ce n'est pas le cas de ceux qui observent quasiment à l'horizon. Ils ne reçoivent pas *a priori* de faisceaux de ces satellites qui sont trop bas pour eux sur l'horizon. Mais, dépendant de la fréquence d'observation, ces antennes peuvent collecter l'émission propre des électroniques de ces satellites ou des signaux radar réfléchis. La détection spatialement cohérente des signaux devrait aider pour le filtrage des biais à condition d'être hors régime de saturation. Les constellations sont donc potentiellement une

source supplémentaire de limitations pour les observatoires radio.

3.3 Les actions engagées

Dans le domaine optique

La communauté astronomique, regroupée au sein de l'Union Astronomique Internationale (UAI) a engagé plusieurs actions dès le lancement des premiers satellites Starlink en 2019. C'est ainsi que les travaux réalisés au sein de plusieurs groupes réunissant 150 astronomes et experts de l'industrie ou en politique spatiale ont abouti à l'organisation de l'atelier SATCON 1 et de la conférence *Dark & Quiet Skies 1* qui a permis d'identifier les problèmes et d'élaborer de premières recommandations pour réduire l'impact des constellations. SATCON 2 et *Dark & Quiet Skies 2* ont poursuivi ce travail pour identifier comment implémenter les recommandations. Ces recommandations constructives ont pour but de faire comprendre au public, à la classe politique et à l'industrie les risques que présentent les constellations pour l'astronomie. Cette démarche a permis d'ouvrir des canaux de discussion avec l'industrie dans l'objectif de minimiser l'impact par l'optimisation de la conception des satellites. Ces conférences ont aussi été l'occasion pour la communauté astronomique de définir des actions communes pour la prise en compte des constellations dans le design des observatoires astronomiques, définir des campagnes collectives de mesures d'impact et des logiciels communs pour s'affranchir des conséquences des constellations. Ces actions ont posé les jalons de la création au 1^{er} avril 2022 de l'IAU *Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky from Satellite Constellation Interference* (CPS), porté par NOIRLab pour le domaine optique et SKAO pour le domaine radio. Le CPS est une structure opérationnelle sans murs qui incarne la volonté des astronomes de réagir et de se battre pour faire connaître les impacts nuisibles des constellations sur les recherches astronomiques. Au titre de l'UAI et de son CPS, les astronomes ont pu faire prendre en compte la nécessité de la préservation des cieux astronomiques dans le cadre des discussions du COPUOS, le comité de l'ONU pour l'utilisation pacifique de l'espace. Ces démarches, outre la prise de conscience nécessaire, ont permis l'établissement d'un

dialogue avec les industriels, au premier rang desquels Starlink, ce qui a déjà conduit à des évolutions de leurs satellites pour réduire leur réflectivité (des satellites Starlink de 2^{ème} génération ont des magnitudes plus faibles que 7 [24]). Les solutions ont de plus été publiées pour utilisation par d'autres constructeurs et opérateurs [11]. À noter aussi que les industriels participent directement au CPS, le groupe de travail *Industry & Technology* étant par exemple co-présidé par un cadre d'Amazon. Ces démarches permettent aux États de comprendre l'impact des constellations sur la recherche astronomique. Les astronomes souhaitent idéalement que soit discutée par le COPUOS la mise en place de règles internationales ou au moins de lignes directrices prenant en compte l'astronomie et conduisant les États à réguler les constellations pour en minimiser l'impact. Le traité de l'espace de 1967 de l'ONU définit la responsabilité des États mais ne contraint pas directement les industriels et n'intègre aucune disposition pour la protection de l'observation.

Dans le domaine radio

Le CPS de l'UAI est une nouveauté pour l'astronomie optique. Il existe en revanche des instances internationales de régulation des fréquences radio. Le spectre radio est régi internationalement par l'UIT pour le sol et l'espace qui régule également les orbites géostationnaires pour les télécommunications. L'UIT ne joue en revanche aucun rôle pour l'utilisation d'orbites basses et ne reconnaît pas les zones de silence radio au niveau international. Les radio-astronomes européens sont regroupés au sein du CRAF (*Committee On Radio Astronomy Frequencies*) de la Fondation Européenne pour la Science pour défendre leurs intérêts. Le CRAF est observateur au CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) qui comprend l'ECC (*Electronic Communication Committee*). Au niveau national, l'astronomie radio est représentée par le MESR qui siège à l'ANFR. Les décisions prises aux différents niveaux internationaux sont à appliquer par les agences dans le cadre des lois nationales auxquelles elles sont soumises. Concernant les observatoires, SKAO est par exemple présent à l'UIT et au CRAF. S'agissant du volet spatial, le COPUOS est l'organe idoine à l'ONU où SKAO est également observateur avec l'UAI, l'ESO et la Société

Européenne d'Astronomie EAS, et participe à ce titre aux travaux du STSC (*Scientific and Technical SubCommittee*).

Premiers résultats

Ces premières actions ont déjà eu un effet positif grâce au dialogue engagé avec SpaceX, OneWeb ou Amazon-Kuiper. La NSF et SpaceX ont par exemple signé un accord limitant l'éclat des satellites à la magnitude 7 afin de les rendre invisibles à l'œil nu et de ne pas saturer les détecteurs du VRO [4]. SpaceX s'est également engagé à respecter les mesures de protection standard pour l'astronomie radio. Mais c'est un premier cas qui reste modeste car ce niveau réduit de brillance conduit quand même à la contamination anticipée de 30% des données du VRO pour 42 000 satellites. Toutes ces actions dépendent de la bonne volonté d'industriels dans un marché qui n'est pas régulé et où les considérations stratégiques et économiques sont fortes. Le lancement du satellite BlueWalker III en 2022 est le type d'événement que l'on peut craindre à l'avenir. Ce prototype est doté d'une antenne d'une surface de 64 m² qui réfléchit la lumière solaire avec un éclat qui en fait la sixième source la plus brillante du ciel avec une magnitude visible de 0,4, à égalité avec Procyon [26]. L'UAI, par l'intermédiaire du CPS, a réagi à la mise en orbite de ce satellite par un communiqué de presse [17]. La prolifération de ce type de satellites serait bien entendu catastrophique pour l'astronomie.

3.4 Perspectives pour l'astronomie

Le futur est donc loin d'être sous contrôle avec la multiplication des interlocuteurs et des constellations stratégiques et commerciales. Alors que peu de constellations ont aujourd'hui été lancées, la plus importante étant Starlink, le bilan est déjà critique pour la prochaine génération d'observatoires optiques. L'impact sur la détection de sources transitoires pourrait, par exemple, être très dommageable. La voie du dialogue engagée par la communauté astronomique internationale est à poursuivre mais un soutien des pouvoirs publics est nécessaire si l'on veut éviter que des investissements importants voient leur impact scientifique réduit tant ce dialogue est soumis aux aléas de la diplomatie internationale et de la compétition économique. On peut toutefois placer quelques espoirs dans une déclaration des

Nations Unies faite au cours de sa 61^{ème} session (Vienne du 29 janvier au 9 février 2024) et adoptée récemment par les délégations représentant 102 pays dans le cadre du COPUOS. Le sous-comité scientifique et technique du COPUOS a accepté d'ajouter un cinquième point à l'ordre du jour pour les cinq prochaines années afin de discuter des questions et des défis émergents pour l'astronomie liés aux grandes constellations de satellites.

4 Impact sur l'environnement

Il y a aujourd'hui 14 000 satellites en orbite dont environ 35% ont été lancés au cours des trois dernières années. Le nombre de satellites placés en orbite par an, qui était relativement stable entre 1975 et 2013, de l'ordre de 75 à 100, a été de 300 en 2019 et il est passé à plus de 1 000 en 2020, 1 600 en 2021, 2 250 en 2022. Les nombres de lancements ont aussi progressé mais dans une moindre mesure. Il y avait en 2012 environ 75 lancements orbitaux. Le nombre est de l'ordre de 200 en 2023 et chaque lancement correspond très souvent à la mise en orbite de plusieurs satellites. La mise sur orbite d'une centaine de milliers de satellites est prévue pour la décennie à venir. L'augmentation du nombre des satellites en orbite conduit à une augmentation du nombre des fins de vies opérationnelles de ces satellites et à une multiplication des retours sur Terre. Elle conduit aussi à une augmentation du nombre des débris qui pourrait atteindre une phase surcritique préoccupante. De plus cette croissance de l'utilisation de l'espace a un impact sur la haute atmosphère et sur l'environnement qui est insuffisamment pris en compte à l'heure actuelle. Un rapport récent du GAO (*Government Accountability Office*, l'organisme d'audit du Congrès des États-Unis) [13] souligne les dangers environnementaux résultant de la multiplication des lancements, de la mise en place des constellations d'une part, et de la rentrée des satellites dans la haute atmosphère d'autre part.

4.1 Les composantes de l'impact environnemental

Cette sous-section passe successivement en revue l'impact des lancements, de la propulsion en orbite et des rentrées atmosphériques des

satellites en fin de vie. Elle aborde aussi la question des débris spatiaux, celle de l'évitement des collisions et celle de la multiplication possible du nombre de débris au travers du syndrome de Kessler.

Impact des lancements

Les lancements sont accompagnés d'émissions qui dépendent des types de motorisation et des couples d'ergols qui alimentent les moteurs. Le couple oxygène/hydrogène, utilisés sur l'étage principal et sur le second étage des lanceurs Ariane 5 (moteurs cryotechniques Vulcain et HM7B) et sur Ariane 6 (moteurs cryotechniques Vulcain et Vinci), produit essentiellement de la vapeur d'eau. Cependant, les étages d'accélération à poudre P230 (les EAP) qui équipent Ariane 5 et les P120 montés par groupes de deux ou de quatre sur Ariane 6 (A62 et A64) émettent de plus des particules d'alumine et des produits chlorés. Ces derniers et notamment l'acide chlorhydrique ont un impact important sur la zone du pas de tir. L'acide chlorhydrique HCl et les particules d'alumine vont aussi intervenir dans l'évolution chimique de la haute atmosphère [5]. Les lanceurs Falcon de SpaceX, le lanceur lourd Starship et plus généralement tous les lanceurs qui utilisent un couple oxygène/kérosène ou oxygène/méthane émettent du dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau, des hydrocarbures imbrûlés et des particules de suie. Ces particules, très souvent désignées par le terme "*black carbon*" (BC), sont émises en quantités importantes par les moteurs LOx/kérosène du fait d'une combustion incomplète dans une ambiance riche en combustible. Les émissions de particules BC sont de ce fait bien plus importantes en proportion que celles des moteurs d'avion dans lesquels l'oxydant est largement en excès [31]. Les émissions de chaque lanceur sont de l'ordre du millier de tonnes, environ 1400 t pour chaque fusée Falcon 9. La centaine de lancements des fusées Falcon de Space X au cours de l'année 2023 a conduit à l'émission d'environ 140 ktonnes et les quantités de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone issues de ces lancements restent bien plus faibles que la somme des émissions des vols transatlantiques de l'aviation civile. Cependant la forte proportion de BC dans les gaz issus des moteurs fusées, mesurée par unité de masse de combustible, est bien plus

importante que celle qui existe dans les échappements de moteurs d'avions. Le rapport serait d'après [31] de l'ordre de 10^4 . Cette forte proportion de BC issue des lanceurs et la multiplication des lancements font que les particules de suie ont un impact qui mérite d'être pris en compte [31]. C'est le cas aussi des particules d'alumine qui, en réfléchissant le rayonnement solaire incident, ont un effet refroidissant mais qui peuvent aussi absorber le rayonnement terrestre émis vers l'espace à partir du sol. Comme les émissions des lanceurs ont lieu dans la haute atmosphère et notamment au dessus de la tropopause où les temps de séjour des molécules et des particules sont importants, et où les aérosols peuvent s'accumuler pendant plusieurs années, cette modification de la composition chimique pourrait interagir avec la couche d'ozone, réduire la concentration d'ozone en créant de sites favorisant la réaction de décomposition de l'ozone [25], modifier le bilan radiatif et changer la distribution de température. Il y a des incertitudes sur ces effets par manque de données car la mesure est difficile lorsque les fractions volumiques impliquées sont très réduites. Comme les quantités de combustibles utilisés par les lanceurs sont relativement faibles par rapport à celles de l'aviation civile ou du transport automobile, cette question a reçu d'une façon générale moins d'attention.

Propulsion en orbite

Dans le domaine de la propulsion à bord des satellites, des avancées ont été réalisées avec la mise en œuvre de la propulsion plasmique en remplacement de moteurs à ergols stockables comme l'hydrazine et le tétraoxyde d'azote. La propulsion plasmique utilise cependant des gaz rares comme le xénon ce qui induit des problèmes de disponibilité et la nécessité de trouver des solutions de remplacement. Le problème de la ressource pourrait conduire à utiliser des ergols alternatifs comme l'argon ou l'iode à l'état solide.

Rentrée non contrôlée dans l'atmosphère

Ce problème est de manière prédominante lié à la rentrée des satellites de constellations. On trouve pour l'année 2022 un chiffre de 2 400 objets rentrant dans l'atmosphère avec une

masse totale de 340 t et une surface équivalente de 3 500 m² [8], p.44. Il est intéressant de comparer ce chiffre à celui de la masse de météorites qui pénètrent chaque année dans l'atmosphère terrestre qui serait de l'ordre de 15 à 20 000 t par an. Les risques associés à une rentrée atmosphérique incontrôlée sont connus : il y a d'abord une fragmentation aléatoire du satellite entre 90 et 60 km due à la pression dynamique, puis une fusion partielle entre 70 et 50 km due au flux thermique. Ces objets brûlent dans l'atmosphère, mais pas complètement : de 10 à 40% de la masse survit à la rentrée et impacte la surface du globe. Ceci concerne notamment le moteur électrique, les batteries et les roues à inertie. Le reste se vaporise dans les hautes couches de l'atmosphère. Une partie importante de la masse atteint donc la surface de la Terre où la chute peut entraîner des destructions et des pertes humaines.

4.2 Le problème des débris spatiaux

Par débris spatiaux, on entend tout objet spatial non fonctionnel d'origine humaine y compris les fragments en orbite terrestre ou rentrant dans l'atmosphère. La multiplication des débris spatiaux est particulièrement préoccupante [3].



Figure 6. Objets catalogués de plus de 10 cm - NASA, 2022.

Il y aurait déjà en orbite terrestre

- dix mille tonnes de débris ;
- 28 000 objets de plus de 10 centimètres. L'United States Strategic Command (STRATCOM) tient à jour un catalogue répertoriant environ 15 000 objets (de plus de 10 cm en orbite basse et de plus de 1 m en orbite géostationnaire) ;
- un demi-million de débris de la taille d'une bille ;
- cent millions mesurant environ un millimètre.

L'effet de diffusion gravitationnelle se combine avec la diffusion associée aux collisions pour engendrer une distribution quasi isotrope des débris.

Ces débris, aux origines multiples, sont notamment issus de :

- Tests de destruction de satellites par certains pays (USA, Russie, Chine) ; la destruction d'un satellite par explosion crée des milliers de nouveaux débris spatiaux ;
- Collisions entre satellites (un exemple remarquable par ses effets est celui de la collision, le 10 février 2009, entre Iridium 33 et Kosmos-2251). L'énergie de l'impact est très élevée, en raison de la vitesse relative (qui peut atteindre 15 km/s).

Un débris en aluminium de 1 mm de rayon a une énergie d'1 kJ, soit celle d'une boule de bowling à 100 km/h. Un débris de 1 cm de rayon a une énergie de 1 MJ, soit celle d'une voiture lancée à 130 km/h. Un débris de 10 cm de rayon a une énergie de 1 GJ, ce qui correspond à 40 kg de TNT.

À ce stade, 97% des débris actuels ont pour origine les trois pays suivants : États-Unis, Russie et Chine. La multiplication des lancements avec une croissance de 27% entre 2021 et 2022 ne peut qu'aggraver cet état de fait et le risque existe d'une multiplication non contrôlée de ces débris.

4.3 Les systèmes d'évitement des collisions

Avec la multiplication des satellites et des débris spatiaux, les manœuvres d'urgence pour éviter les collisions sont indispensables. Il faut pour cela

que les satellites soient dotés de moyens de propulsion adaptés et que des systèmes centralisés de suivi et de surveillance de l'espace soient développés (*Space Surveillance and Tracking*). Les fonctions de ces derniers sont de conserver et mettre à jour les éphémérides des satellites et des débris catalogués, de calculer les probabilités de collision et d'informer en temps les opérateurs pour qu'ils puissent mettre en oeuvre les mesures d'évitement. La multiplication du nombre des satellites et des débris en orbites basses et moyennes rend cette tâche très complexe. L'intelligence artificielle pourrait permettre une prévention plus efficace des risques de collisions.

4.4 Le syndrome de Kessler

Donald J. Kessler, consultant à la Nasa, envisage dès 1978, la possibilité d'un processus, désigné aujourd'hui sous le nom de "Syndrome de Kessler", selon lequel l'augmentation du nombre des satellites et des débris en orbite pourrait conduire à une multiplication des collisions et même à une réaction en chaîne avec une augmentation exponentielle du nombre de débris. La région la plus directement concernée est celle située entre 300 et 1 100 km d'altitude. Plusieurs facteurs pourraient concourir au déclenchement de ce syndrome :

1. le lancement incontrôlé d'un trop grand nombre de nouveaux satellites (si on prend ce syndrome en compte, les coûts indirects de ces lancements incontrôlés pourraient être colossaux) ;
2. le développement de l'utilisation d'armes anti-satellites, qui génèrent des débris en très grands nombres ;
3. les difficultés de prédiction des collisions et de mise en oeuvre des procédures d'évitement de ces dernières.

Diverses simulations cherchent à déterminer les densités de satellites et de débris qui conduisent à cette réaction en chaîne. Cette dernière, qui est de nature stochastique, est encore peu étudiée et assez mal comprise.

4.5 Les actions engagées

Débris

Il est impératif que le problème des débris soit pris en compte sur la base des principes suivants :

- Interdiction des opérations anti-satellites ;
- Contrôle de la génération des débris, notamment par une gestion de la fin de vie des satellites ;
- Évitement des collisions par le maintien d'éphémérides et l'obligation de motorisation des satellites.

À ce stade, cette question est seulement l'objet d'un forum de discussion entre agences avec élaboration de bonnes pratiques, mais il n'y a pas de contrainte légale ou de pénalités. Le standard ISO/DTS6434 réunit toutefois des normes qui s'appuient sur les principes énoncés ci-dessus. Les États-Unis envisagent aussi de mettre en place des règles contraignantes, portant notamment sur les processus de désorbitation et sur la protection des orbites. L'Europe et la France sont précurseurs en la matière grâce à la Loi Spatiale Française. Chaque satellite doit pouvoir être désorbité en fin de vie. Une question fondamentale dans ce cadre est celle de l'organisation du suivi et de la surveillance de l'espace.

Activités spatiales et environnement

L'analyse effectuée dans cette section souligne la nécessité d'une prise en compte plus approfondie de l'impact des activités spatiales sur l'environnement. Du côté des lancements, on note que les quantités d'ergols utilisées sont faibles par rapport aux quantités de kérosène consommées par l'aviation mais il a aussi été noté que les proportions d'aérosols BC et sont bien plus élevées que dans les gaz s'échappant des moteurs d'avion (il y aurait un facteur 10^4 entre les deux). Des actions de même nature que celles décrites plus haut seraient souhaitables dans le domaine de la pollution engendrée par les lancements et par les rentrées des satellites dans l'atmosphère. Ceci nécessite à la fois de recueillir des données et de s'appuyer sur ces données pour construire des modèles et ainsi estimer les effets des émissions, notamment ceux associés aux aérosols de particules de suie et d'alumine, sur la haute atmosphère en termes d'évolution chimique et de réchauffement.

5 Enjeux économiques

Les questions économiques doivent être abordées dans le contexte de l'apparition de nouveaux

États spatiaux, de nouveaux acteurs industriels comme SpaceX ou Amazon, et plus généralement du développement du *NewSpace* aux États-Unis et de l'accroissement des budgets de R&D en Europe. Tout ceci conduit au déploiement d'un tissu de nouveaux entrants de type jeune pousse en complément des grands projets. Cette section décrit ce nouveau contexte avant de passer en revue les modèles économiques des diverses fonctionnalités des constellations. Ces modèles économiques sont difficilement séparables de la compétition pour l'occupation des orbites et des fréquences et plus généralement des enjeux de souveraineté qui sont l'objet de la section suivante.

5.1 Le contexte du *NewSpace*

Avant l'avènement du *NewSpace*, l'espace était de fait réservé aux militaires et aux États. Les satellites dont la mission n'était ni scientifique ni militaire étaient principalement utilisés pour la diffusion des chaînes de télévision et de radio. Ce type de service offert par des satellites géostationnaires est en diminution pour la télévision, mais reste en croissance pour les chaînes radio (*digital radio*). Le *NewSpace* apparaît comme le point d'inflexion majeur par rapport à cette situation. Dans ce contexte, on assiste à la création d'un nouveau tissu industriel visant à la softwerisation de l'espace avec à la fois des géants comme Starlink, des jeunes pousses et des SME (*small and medium enterprises*) en très grand nombre (12 000 entreprises, principalement aux États-Unis, grâce à d'importants financements étatiques, à l'action du *National Space Council* et à l'intervention de plusieurs milliers d'investisseurs). Les États-Unis représentent 84% des investissements étatiques dans le cadre du *NewSpace* mondial. Prendre des parts de marché dans le domaine des communications est un des objectifs du *NewSpace* parmi d'autres.

5.2 La situation en France et en Europe

5.2.1 Les budgets

Lors de la conférence ministérielle de l'Agence spatiale européenne qui s'est tenue à Paris les 22 et 23 novembre 2022, les États membres de l'ESA ont décidé d'un investissement européen global de 17 Md€. La France a ciblé deux objectifs

prioritaires dans le cadre de cette souscription : renforcer l'autonomie européenne dans le secteur spatial, notamment en matière d'accès à l'espace, de télécommunications et de compétitivité du secteur spatial européen, et améliorer la connaissance du changement climatique. La France reste le plus gros contributeur au spatial en Europe⁶. En matière de lanceurs, la France assure le financement d'Ariane 6 (523 M€), de la poursuite du démonstrateur de premier étage réutilisable Themis (50 M€) ainsi que du moteur Prometheus (156 M€). Défini le 7 décembre 2021, le volet spatial du plan d'investissement France 2030 était doté de 1,5 Md€ avec comme priorités de rattraper le retard dans des domaines clés comme les lanceurs réutilisables ou les constellations et d'investir dans les nouveaux usages.

5.2.2 L'industrie des satellites

Plusieurs grands groupes européens comme Airbus, Thales Alenia Space, OHB font référence.

5.2.3 L'industrie des lanceurs

Il y a de grandes compétences en Europe dans le domaine des lanceurs et une réussite dans le domaine des lanceurs Ariane. Le remplacement

d'Ariane 5 est actuellement en cours et le premier vol d'Ariane 6 devrait avoir lieu avant la fin 2024. Cependant Ariane 6 ne permet pas la réutilisation qui est désormais pratiquée de façon régulière par SpaceX et a conduit à une réduction des coûts de lancement. Comme indiqué plus haut, plusieurs projets actuels ont pour objectif de doter les lanceurs européens de capacités de réutilisation avec le développement du moteur Prometheus d'une poussée de 100 tonnes qui pourrait remplacer le Vulcain sur Ariane Next. Des dizaines de jeunes pousses en Europe sont sur le créneau des lanceurs de taille réduite pour assurer le remplacement de petits satellites à la demande.

5.2.4 Le projet IRIS²

Le projet IRIS² (*Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite*) est conçu pour assurer un moyen de communication

⁶. La France consacre 3 Md€/an sur 3 ans au spatial, ce qui est le plus gros budget européen.

sécurisé à haut débit pour les gouvernements, les entreprises et les citoyens de l'Union Européenne (voir aussi la fin de [la sous-section 1.3.1](#)).

5.2.5 Les nouveaux entrants

Les nouveaux entrants européens lancent des flottes de petits satellites ou de nano satellites avec des coûts de développement qui sont bien moins élevés que ceux des satellites géostationnaires⁷.

En voici, quelques exemples à titre d'illustration :

- **U SPACE** : Une jeune pousse française, basée à Toulouse, soutenue par le CNES, la DGA et la BPI, qui développe des cubesats, se donne pour ambition de monter en gamme sur les constellations et propose des services de maintien de systèmes spatiaux en conditions opérationnelles.
- **AEROSPACELAB** : Une entreprise, soutenue par la Belgique, dont les usines dédiées à la fabrication de satellites à des cadences élevées visent une production de deux satellites par jour en utilisant des technologies du secteur automobile.
- **ASTROCAST** : Une jeune pousse suisse déjà décrite plus haut qui propose des services de monitoring, de géolocalisation et de communication avec des objets et qui dispose déjà d'une vingtaine de micro-satellites en orbite basse.
- **CONSTELLATION TECHNOLOGIES** : Une jeune pousse incubée par l'ESA déjà décrite plus haut qui vise au lancement d'une constellation pour le haut débit et opérant dans les bandes millimétriques de la 5G et donc en synergie avec les opérateurs terrestres.

5.3 Les modèles économiques

5.3.1 Haut débit

Une question clé dans le domaine des constellations est celle de la viabilité économique de leur offre de couverture haut débit universelle. Les constellations initiales, qui peut-être n'offraient pas vraiment le haut débit et exigeaient des antennes de taille importante peu

compatible avec la mobilité, ont toutes échoué d'un point de vue économique avant de se réorienter vers des applications "professionnelles". Les échecs économiques de Globalstar ou d'Iridium s'expliquent en partie par le fait que ces réseaux nécessitaient une mise en œuvre de terminaux dédiés, lourds et coûteux. Le potentiel des communications satellitaires aurait pu être différent si ce verrou avait été levé et si les téléphones mobiles grand public (les "smart-phones") avaient pu assumer le rôle de terminaux pour les connexions.

Même pour les constellations de grande taille, le service de couverture Internet par liaison satellitaire ne peut entrer en compétition avec celui qui est offert dans les zones bien couvertes par les réseaux terrestres, notamment lorsque la 5G est déployée. Les constellations peuvent cependant compléter les réseaux terrestres pour la couverture des zones blanches et celle des territoires enclavés (un bon exemple est celui de la Guyane Française) où le coût du déploiement de la fibre optique est très élevé, et la couverture par des constellations est économiquement justifiée. Toutefois, le marché associé à la couverture des zones blanches reste de petite taille car le nombre d'utilisateurs n'est pas grand (s'il en était autrement, la couverture serait assurée par le réseau 5G). De plus, la plupart des zones blanches sont économiquement défavorisées et ne peuvent donc être des sources de revenu majeures pour les opérateurs de réseaux satellitaires.

Le modèle économique de Starlink

A ce stade, il est intéressant de considérer le cas de Starlink. Ce réseau rassemble, à l'heure actuelle, un à deux millions de clients, ce qui correspond à un chiffre d'affaires de l'ordre d'un milliard de dollars qui est relativement modeste mais permet d'être à l'équilibre ou de se rapprocher de l'équilibre financier. À noter que l'utilisation de la fusée Starship pour la mise en orbite de satellites pourrait permettre de réduire encore les coûts de lancement. Pour Elon Musk, fondateur de Starlink et SpaceX, ce qui distingue Starlink des autres constellations serait les atouts suivants :

⁷. Noter que si les coûts de développement des satellites LEO sont moins élevés que ceux des satellites géostationnaires, les durées de vie des premiers sont plus courtes que celles des derniers.

- Des coûts de lancement réduits et maîtrisés grâce au choix de la réutilisation des lanceurs ;
- La capacité de Starlink à jouer le rôle de fournisseur d'accès à l'Internet temps-réel global pour les automobiles Tesla ;
- Des satellites Starlink qui s'appuient sur l'utilisation de technologies électroniques grand public et une différence dans les méthodes de fabrication et de gestion des ressources humaines par rapport à celles qui prévalaient jusqu'à récemment dans l'industrie spatiale, conduisant à une réduction des coûts ;
- Une évolution vers des satellites de 2^{ème} génération plus lourds (1 500 kg) et qui communiquent entre eux par laser.

La réutilisation des lanceurs pratiquée de façon routinière est effectivement un avantage concurrentiel. Le second point pourrait aussi être un atout et il est intéressant de noter l'intérêt potentiel d'industriels allemands de l'automobile d'investir dans des constellations pour cette même raison. Il n'est pas certain que Starlink puisse devenir un jour la source de profit qui permettrait de financer le projet de conquête de Mars. Cependant pour y parvenir, le nouveau pari de SpaceX est celui du Starship avec une masse au décollage de 6 500 à 7 000 tonnes et 33 moteurs Raptor utilisant de l'oxygène liquide et du méthane. La gestion du fonctionnement des moteurs serait assurée par intelligence artificielle pour éviter les phénomènes collectifs qui peuvent apparaître dans des configurations qui utilisent un grand ensemble de systèmes propulsifs. La structure du lanceur est réalisée en acier, un matériau plus lourd mais plus résistant que les alliages légers.

On peut ajuster la poussée en changeant le nombre de moteurs. Ce véhicule pourrait réduire les coûts de lancement d'un facteur 20.

Cependant les deux premiers essais n'ont pas été totalement réussis. Le premier lancement de Starship réalisé le 20 avril 2023 s'est soldé par l'explosion de la fusée quelques minutes après le décollage, la séparation des étages n'ayant pas eu lieu. Trois puis six moteurs du premier étage n'ont pas fonctionné. Le second lancement (18

novembre 2023) s'est aussi soldé par une explosion mais après la séparation du second étage. SpaceX compte sur les échecs pour corriger Starship, ces essais révèlent beaucoup de problèmes de mise en œuvre pour ce lanceur géant. Les dommages importants du pas de tir observés à l'issue du premier tir ont conduit à des mesures correctives avec notamment l'injection de trombes d'eau au décollage. L'impact sur l'environnement de la base de lancement reste cependant non négligeable.

Elon Musk serait pour certains à la tête de la première puissance spatiale mondiale et si Starship atteint ses objectifs, cela induirait une nouvelle révolution dans la réduction des coûts de lancements des constellations.

Interactions potentielles des constellations avec les réseaux cellulaires 5G/6G

Un des modèles économiques envisagés est celui d'accords entre les opérateurs terrestres et les opérateurs de constellations permettant à ces derniers d'utiliser les fréquences de la 5G. Le 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) qui assure le développement des spécifications techniques des réseaux de téléphonie mobile, va proposer prochainement une norme pour un *chipset*⁸ 5G avec une fonctionnalité de communication non-terrestre. Les interactions entre réseaux terrestres et réseaux satellitaires en orbites basses ou moyennes seront pleinement normalisées dans le contexte de la 6G. Ceci ouvre des perspectives nouvelles et en cours d'étude (*offloading, backhauling*). Par exemple, Constellations Technologies, une jeune pousse incubée par l'ESA, mise sur l'utilisation des bandes millimétriques de la 5G. Une question clé dans ce cadre est celle des antennes des terminaux. Il faut noter l'existence de projets avec un potentiel d'interaction directe entre le satellite et un téléphone standard, comme BlueWalker 3, un prototype de satellite d'AST SpaceMobile doté d'une antenne de 60 mètres carrés pour établir une connexion directe avec les téléphones portables via des fréquences standards. BlueWalker 3, placé en orbite en 2022, préfigure les satellites commerciaux dénommés "*BlueBirds*". Apple et Samsung vont par ailleurs commercialiser des smartphones permettant une couverture Internet directe par

⁸. Un *chipset* ou jeu de puces, est un groupe de circuits intégrés qui peut être utilisé pour remplir une seule fonction, dans le cas présent la communication avec un réseau 5G. Les *chipsets* sont fabriqués et commercialisés comme un tout.

réseaux satellitaires pour certaines applications. Apple offre un service de SMS par satellites dans ses nouvelles générations de smartphones.

Concurrence et retour sur investissement dans le domaine du haut débit

Dans la concurrence engagée entre les constellations pour les communications haut débit, on peut penser que « *the winner takes all* » (que « le gagnant ramasse la mise ») et qu'il sera difficile de concurrencer Starlink. Aucune autre entreprise ne dispose en effet de l'avantage concurrentiel qu'apporte le faible coût des lancements. Starlink suit un modèle de monopole du type de celui de Microsoft dont le système d'exploitation pour ordinateur personnel est devenu incontournable.

Même si de nouveaux marchés se développent aujourd'hui dans le domaine du haut débit comme le service aux entreprises de transport (maritime et aérien) ou encore comme ceux fondés sur une utilisation des mêmes bandes de fréquences que les réseaux terrestres et un accès à leur marché, il est difficile de voir ce qui pourrait permettre aux concurrents de compenser des investissements qui se chiffrent en milliards d'euros et de faire des bénéfices.

5.3.2 Observation de la Terre

La question des modèles économiques est moins centrale dans le domaine de l'observation de la Terre que pour le haut débit car une partie importante de ces observations sont à but essentiellement scientifique. La collecte de données dans certains des domaines listés dans [la sous-section 1.3.2](#) conduit cependant au lancement de constellations fondées sur des modèles économiques classiques de commercialisation de ces données, voire de réponse à des commandes de données. Les constellations associées étant de taille réduite (puisque la continuité de couverture n'est pas nécessaire), ces constellations demandent des investissements bien moins importants que pour le haut débit. Ceci ouvre donc des perspectives nouvelles pour ce type d'activité.

6 Enjeux de souveraineté

Au delà de l'offre commerciale de haut débit universel, la recherche de souveraineté pourrait

être la principale raison du déploiement des constellations de satellites en orbites LEO et MEO. Les atouts de ces constellations sont de ce point de vue les suivants :

- leur résilience, corollaire du déploiement d'un très grand nombre de satellites reconfigurables. On peut détruire l'un d'entre eux mais il est difficile d'attaquer l'ensemble ;
- leur couverture des régions polaires (du moins pour les configurations en étoile). Cette couverture n'est pas bien assurée par les satellites géostationnaires ;
- leur latence faible qui peut jouer un rôle central pour des applications dans lesquelles les délais de transmission sont critique ;
- leur couverture universelle qui donne accès à l'observation continue d'événements partout dans le monde et à de nouveaux moyens d'action ;
- l'absence de réglementation contraignante et par conséquent la flexibilité qui en résulte dans leur mise en œuvre.

6.1 Souveraineté dans le domaine des télécommunications

Les réseaux de communications fondés sur des constellations s'affranchissent de fait de toutes les règles qui sont imposées par les États aux opérateurs des réseaux terrestres opérant sur leur sol :

- Un opérateur de satellites en orbite basse peut déployer des services de communications haut débit dans un pays sans passer par les autorités de régulation de ce pays, alors que les fréquences des réseaux 5 et 6G sont contrôlées par ces autorités. Cette forme de concurrence ne met toutefois pas en péril pour l'instant les opérateurs terrestres des réseaux 5G pour les raisons déjà évoquées (les services satellitaires ne sont actuellement concurrentiels que dans les zones blanches).
- Les constellations actuelles dérogent aux règles de souveraineté qui s'appliquent aux réseaux terrestres de type 5G. Par exemple, la règle que le cœur de réseau soit hébergé en France ne s'applique pas. On peut noter à ce sujet que le cœur de réseau de Starlink est hébergé aux États-Unis chez Amazon Web Services ce qui fait qu'il n'est pas possible de contrôler la confidentialité des communications des utilisateurs de ce réseau. Le déploiement de ces réseaux dans

leurs formes actuelles (Starlink, Amazon) ne peut donc être vu que comme une perte de souveraineté directe des États sur ce secteur.

6.2 Souveraineté européenne

La France soutient fortement le projet Européen IRIS². Cette constellation est vue comme une nécessité pour son indépendance et pour son accès à un réseau de communication résilient et sécurisé. L'industrie européenne a les compétences pour développer un tel projet. Un consortium avec Thalès et Airbus va répondre à l'appel d'offre de la Commission Européenne visant au lancement d'une constellation européenne souveraine ayant à la fois des activités commerciales et des fonctions de défense. Les États qui maîtriseront ces systèmes de communications sécurisées, universels et indépendants des conditions locales disposeront d'un atout géopolitique majeur. L'autre priorité pour l'Europe est de retrouver un lanceur fiable permettant l'accès indépendant à l'espace pour des missions de tout type.

6.3 Utilisation militaire

Utilisation militaire des constellations

Dans le domaine militaire, l'observation de la Terre et les communications sécurisées jouent un rôle clé, en temps de paix comme en temps de guerre. Ces deux fonctions sont actuellement réalisées au moyen de constellations spécifiques et de constellations à caractère dual. La couverture globale des constellations présente un intérêt majeur pour les applications militaires. C'est ainsi par exemple que les activités de Starlink sont largement subventionnées par le Département de la Défense (DoD) des États-Unis. L'exemple de l'utilisation de Starlink en Ukraine illustre la capacité qu'ont les constellations de ce type d'apporter une couverture haut débit et des moyens d'action y compris opérationnels dans des pays en situation de crise ou de guerre. Dans ce contexte la rapidité de survol et d'obtention d'images et de données sur le pays concerné est de première importance. De même que la capacité de revisite rapide 24h/24 pour la détection d'anomalie ou la conduite d'opérations pour n'importe quel théâtre, que ne permettent ni les satellites géostationnaires, ni les constellations classiques

à faible nombre de satellites. Le fait que les armées puissent acheter des données à des opérateurs privés offrant des services globaux pour des besoins opérationnels est également un fait nouveau qui est à la fois source de résilience et de dépendance. Cette dépendance est cependant réduite si le nombre de constellations privées indépendantes est important. À terme, des constellations très denses de satellites en orbites basses pourront aussi permettre une meilleure coordination de divers types de systèmes d'armes pour du combat collaboratif qui nécessite des latences faibles et une couverture continue du terrain d'opération.

Attaques physiques et cyberattaques des constellations

Dans le contexte actuel qui est celui d'une multiplication des acteurs du domaine spatial (et la présence de pays qui jusque là étaient absents comme la Corée du Nord par exemple), l'espace est plus que jamais devenu un lieu de conflictualité où les questions de sécurité des satellites et de cybersécurité des systèmes embarqués doivent être prises en compte. Plusieurs pays étudient les moyens de neutraliser une constellation, notamment au moyen de cyberattaques, de méthodes de brouillage, voire par la destruction des satellites. Les tirs de missiles réalisés sur des satellites en orbite basse sont des exemples d'attaque physique lourds de conséquences sur la question des débris. Dans le cas des constellations, les cyberattaques sont les plus prometteuses car le caractère spatialement distribué de la constellation rend les attaques physiques bien plus difficiles que pour les infrastructures terrestres. Comme déjà dit, un réseau Internet spatial est nettement plus résilient que le système actuel de câbles et de domaines autonomes. La cyberattaque sur le réseau de communications satellitaires VIASAT qui était utilisé par les militaires ukrainiens juste avant le déclenchement de la guerre est une illustration récente du fait qu'une telle attaque bien conduite pourrait dans le principe interrompre les fonctions de communications de constellations constituées de milliers de satellites. La question de la sûreté des constellations étant essentielle pour les applications militaires, les possibilités de liaisons laser entre les satellites d'une constellation sont d'intérêt pour la renforcer car elles ne sont ni interceptables ni

brouillables depuis le sol ou à partir de satellites, contrairement aux communications radio.

7 Régulation par les agences internationales et nationales

L'accès à l'espace et les conditions d'utilisation de l'espace sont régulés aux États-Unis. Il en est de même en France, ce qui définit d'ailleurs la régulation pour l'Europe puisque c'est la nationalité du site de lancement - Kourou - qui détermine le droit applicable et notamment ce qui a trait à la gestion des débris spatiaux. À titre d'exemple, citons les règles de fragmentation des étages de fusée existant en France et aux États-Unis mais pas en Chine. Les règles internationales d'accès aux orbites géostationnaires sont anciennes. L'organisme en charge de cet accès est l'UIT. Il y a par contre très peu de régulation internationale aujourd'hui dans le domaine des constellations LEO et MEO et les grandes puissances spatiales (Chine, États-Unis, Russie) sont libres d'agir comme elles le souhaitent.

7.1 Institution impliquées

Les institutions impliquées au niveau international et national sont les suivantes :

UIT

L'Union Internationale des Télécommunications (UIT), qui rassemble 70 pays, est en charge des opérateurs non-terrestres. L'UIT gère de manière satisfaisante les orbites géostationnaires. Dans les domaines LEO et MEO, c'est aussi cet organisme qui alloue les orbites ainsi que les bandes de fréquences Ka et Ku. Le principe retenu est celui qui est le premier arrivé est aussi le premier servi. Cette pratique conduit à une occupation de fait de l'espace dans ces bandes de fréquences par les opérateurs les plus prompts à déposer une demande. La seule contrainte est d'utiliser effectivement le droit acquis. Si les satellites ne sont pas installés sur les orbites attribuées, le droit est perdu.

3GPP

Le *3rd Generation Partnership Project* intègre des normes satellitaires dans le cadre de la 5G depuis 2017 et vise à une intégration complète des réseaux terrestres et satellitaires dans les normes

de la 6G. La prévalence des normes du 3GPP dans le domaine des *smartphones* devrait permettre, à terme, une forme d'uniformisation internationale du domaine pour tout ce qui concerne le logiciel. Les satellites auront donc certainement, à terme, des interfaces normalisées selon des normes du 3GPP du moins pour les constellations qui se donnent pour objectif un accès direct aux *smartphones* 5G ou 6G.

Les agences de réglementation aux États Unis

Les agences de réglementation américaines concernées par le développement de réseaux de communication satellitaires ou impliquées dans l'octroi de licences sont les suivantes :

- FCC : la commission fédérale des communications et de l'information travaille avec l'UIT ;
- NTIA : l'administration nationale des télécommunications et de l'information (NTIA, gouvernement fédéral américain) est impliquée dans l'octroi de licences d'utilisation des fréquences radio soumises à licence ;
- NOAA : la *National Ocean and Atmospheric Administration* ;
- FAA : la *Federal Aviation Administration*.

L'EUSPA

L'EUSPA ("*European Union Agency for the Space Programme*") a pour fonction de proposer :

- des services de navigation par satellites par la constellation Galileo ;
- des services d'observation de la Terre à partir des satellites et des données recueillies par Copernicus ;
- des services et des moyens de communication sécurisés par satellites avec la future constellation IRIS² ;
- et dans un avenir proche des services de réception (*front desk*) pour EuSST (le service de surveillance et de "*tracking*" européen).

7.2 Nécessité d'une réglementation internationale du domaine

Les organismes listés dans ce qui précède ne couvrent que partiellement et de façon fragmentée les questions soulevées par les constellations.

Comme indiqué dans ce qui précède, l'accès aux orbites terrestres basses et moyennes est essentiellement libre : toute entité, étatique ou privée, qui souhaite lancer une constellation le peut, sans devoir respecter une réglementation. Les longueurs d'onde et les orbites sont attribuées selon le principe du « premier arrivé premier servi » par l'UIT, ce qui conduit à une course à l'occupation des ressources en question sans aucune prise en compte des impacts négatifs. Les organismes internationaux ayant une compétence partielle sur tel ou tel aspect de la mise en place et du fonctionnement des constellations n'ont à ce jour émis que des recommandations sans force contraignante. Par exemple, la question des débris fait l'objet d'une norme internationale publiée en janvier 2024 (voir [la sous-section 4.5](#)), qu'on peut voir comme un label de qualité qui sera adopté par les États et les industriels qui le veulent bien. S'il est notamment recommandé d'interdire les armes anti-satellites, aucune autorité n'est habilitée à sanctionner une violation en la matière. Cependant, les risques que présentent les débris sont suffisamment évidents et encourus par toutes les parties prenantes, en sorte que l'intérêt les pousse à respecter certaines précautions. Le problème de l'impact sur l'astronomie est pris en charge au niveau scientifique dans le cadre d'organisations comme l'IAF pour identifier la nature des problèmes et élaborer des bonnes pratiques, mais de même sans force contraignante.

Le problème posé par le déploiement prévu des constellations doit être envisagé dans son ensemble, sous toutes ses dimensions : une approche globale de l'impact des constellations doit se substituer à la fragmentation actuelle. Une solution durable et globale doit être apportée au problème, avant que des dommages majeurs et irréversibles aient été infligés à l'environnement de la planète, aux équilibres géostratégiques, à la démocratie et à la science.

Sans attendre qu'un accord international soit trouvé et qu'une loi couvrant l'ensemble des dimensions engagées ait été promulguée, ce qui prendra plusieurs années, il est de première urgence que tout nouveau déploiement de constellations LEO et MEO respecte un impératif de réversibilité. Cela implique principalement que la fin de vie des satellites soit programmable, en sorte qu'ils disparaissent sans laisser de traces durables dans l'espace. Ce qui implique qu'ils soient éliminés de manière contrôlée en rentrant

dans l'atmosphère, cette rentrée se conformant à des règles strictes destinées à réduire les risques et nuisances.

La question est alors de savoir comment imposer aux acteurs du domaine des règles de bonne conduite, destinées dans un premier temps à assurer pour la période qui s'ouvre la réversibilité des déploiements à venir, et dans un second temps à instaurer un code de déontologie fondé sur un équilibre de coordination que chacun a intérêt à respecter. Une première étape consisterait à établir un comité de liaison international entre académies et organismes de recherche civils et militaires, qui serait chargé de proposer un code de bonne conduite, assorti de mesures propres à motiver les parties prenantes à respecter ce code. Ce genre de dispositif relève de la *soft law* en droit international. On pourrait s'inspirer de l'expérience acquise dans d'autres domaines. On peut songer notamment au processus qui a conduit au Traité sur l'Antarctique, antérieur à l'émergence de la notion de *soft law*, ou encore à l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, une option envisageable compte tenu de la conjonction des aspects civils, militaires, économiques et environnementaux, mais aussi aux tentatives encore imparfaites pour imposer des limites intangibles en matière d'ingénierie génétique.

8 Conclusions

Le domaine du spatial est passé en quelques années dans une nouvelle phase désignée sous le nom de “*NewSpace*” caractérisée par une plus grande facilité dans l'accès à l'espace, un foisonnement de projets, une multiplication des mises en orbite de satellites de petites tailles, le développement de constellations comportant de très grands nombres de satellites. D'une façon générale, la majeure partie des projets ont trait à l'exploitation des orbites de basse et de moyenne altitude pour les possibilités qu'elles offrent dans le domaine des télécommunications, de la géolocalisation et de l'observation de la Terre.

Parmi ces applications, celle qui a trait aux communications pour l'accès à haut débit universel à l'Internet est aussi celle qui soulève le plus de questions car sa généralisation à un grand nombre d'utilisateurs nécessite la mise en orbite d'un nombre très élevé de satellites. La constellation qui permet à l'heure actuel cet accès à haut débit, Starlink, comporte déjà plus de 5000 satellites et il est prévu de la compléter avec plusieurs dizaines de milliers de satellites supplémentaires. Les chiffres envisagés par les réseaux concurrents qui ne sont pas encore opérationnels sont aussi du même ordre et les lancements prévus au cours des prochaines années pourraient conduire à la mise en orbite d'une centaine de milliers de satellites. Cette évolution est liée à des perspectives économiques et géostratégiques dans le domaine des télécommunications et à une variété d'autres applications au premier rang desquelles on trouve celles qui ont trait à l'observation de la Terre. Pour les télécommunications, l'atout majeur des réseaux de satellites réside dans leur résilience et dans leur capacité à permettre un accès en tout point du globe avec un minimum d'infrastructures terrestres, les stations d'ancrage qui connectent les satellites à l'Internet. Lorsque les satellites communiquent entre eux, ces stations d'ancrage peuvent se trouver à grande distance des utilisateurs. Cet atout est important puisqu'il permet la couverture de régions isolées ainsi que des connexions même dans des conditions dégradées consécutives à des catastrophes naturelles ou des situations de guerre. Les

événements récents, comme la guerre en Ukraine, ont montré l'intérêt de la combinaison des communications satellitaires des observations satellitaires et de la géolocalisation pour communiquer et agir alors même que les infrastructures terrestres sont endommagées.

Il ressort toutefois de ce rapport que l'utilisation de l'espace dans le domaine des orbites basses et moyennes se fait actuellement dans un cadre trop peu régulé dans lequel la compétition est engagée pour occuper les orbites et les bandes de fréquence. Cette absence de réglementation internationale a de nombreux aspects négatifs. Dans le domaine des télécommunications, ces constellations font apparaître une perte de souveraineté des États dans la gestion des communications issues de leurs territoires puisque les stations d'ancrage et le cœur du réseau d'une constellation peuvent être localisés à n'importe quel endroit et que les règles de protection des données échangées et d'utilisation des fréquences ne sont plus celles des régions ou États desservis. Dans le domaine spatial, l'augmentation du nombre de lancements a un coût environnemental encore très mal compris et pris en compte. De plus, la multiplication des satellites conduit à des problèmes inquiétants de densification de l'espace, un encombrement des orbites par la présence des satellites et des débris issus de leur lancement ou de collisions. Dans le domaine de l'astronomie, l'ensemble de tous les objets satellisés et ceux à venir auront un fort impact négatif dans le domaine optique et infrarouge qui est analysé dans ce rapport si rien n'est fait pour en corriger les effets. L'impact sur la radioastronomie est lui aussi très préoccupant à cause des interférences résultant des communications et de celles créées par les électroniques à bord des satellites dont le fonctionnement continu rend difficile la préservation des zones de silence dans l'environnement des observatoires radioastronomiques.

Le rapport décrit aussi certaines des initiatives qui sont actuellement prises pour traiter ces problèmes d'impact négatif et pour développer des bonnes pratiques dans ce domaine.

1. Constat : L'évolution très rapide du domaine des constellations de satellites s'appuie sur des innovations dans le domaine industriel, qui ont conduit à une réduction du coût des satellites et des lancements, et sur des avancées dans le domaine de la recherche scientifique portant sur la théorie des communications, l'informatique et l'électromagnétisme.

Recommandation : Il est important d'appuyer la recherche et l'innovation française et européenne dans une variété de domaines incluant notamment la théorie de l'information, la focalisation des liaisons radio, les liaisons optiques entre satellites, la conception des antennes, l'amélioration des propulseurs, les systèmes de suivi pour l'évitement des collisions et de manière plus générale, la conception d'architectures durables pour ces réseaux spatiaux.

2. Constat : Les grandes constellations de satellites ouvrent de nouvelles perspectives très variées pour les communications et l'observation. Composées d'un grand nombre de satellites, elles ont des propriétés de résilience supérieures à celles des réseaux terrestres et ouvrent des possibilités de connexion à l'Internet dans les régions où des infrastructures terrestres seraient difficiles à déployer.

Recommandation : L'Académie considère que la France et l'Europe doivent s'engager à développer une constellation pour disposer de connexions à l'Internet sécurisées, couvrir les besoins géostratégiques, assurer la souveraineté européenne dans ce domaine et permettre une exploitation commerciale, maîtrisée sur le plan économique, qui ne soit pas totalement dépendante d'intérêts privés ou étatiques extra-européens.

3. Constat : Un accès à des lancements à coûts réduits est une condition clé pour la mise en œuvre de constellations comprenant un grand nombre de satellites.

Recommandation : Les efforts engagés dans le domaine pour doter l'Europe d'un lanceur disposant de capacités de réutilisation ainsi

que les programmes de démonstrateurs développés à cet effet méritent d'être soutenus dans la durée pour qu'il soit possible à terme de réaliser des lancements avec réutilisation des premiers étages.

4. Constat : L'impact à venir sur l'astronomie du développement sans véritable régulation internationale des constellations de satellites en orbites basses et moyennes est particulièrement préoccupant. Les constellations auront à la fois un impact sur les observations dans le domaine optique, à cause des traces engendrées par le défilement de grands nombres de satellites réfléchissant la lumière du Soleil, et dans le domaine radio qui sera potentiellement fortement impacté par les interférences électromagnétiques associées aux communications radio et par l'émission propre de l'électronique équipant ces satellites.

Recommandation : L'Académie recommande de poursuivre les actions déjà lancées et d'engager de nouvelles initiatives pour que les impacts négatifs des constellations sur les observations astronomiques soient pris en compte et pour que des moyens soient mis en œuvre pour que cet impact soit minimal et contrôlable et ne conduise pas à une remise en cause des capacités d'observation depuis le sol.

5. Constat : Un des défis majeurs pour l'avenir est d'assurer un accès durable aux ressources orbitales et fréquentielles permettant de bénéficier des possibilités remarquables des constellations en orbite basse ou moyenne en termes de connexion à l'Internet, d'observation de la Terre et de nouvelles applications, cela tout en protégeant l'espace et l'environnement. La multiplication des lancements a conduit à une augmentation de la pollution et du nombre d'objets en orbite, satellites et débris. L'encombrement de l'espace fait qu'il est déjà nécessaire de procéder à des manœuvres d'évitement régulières et en plus grand nombre et peut conduire à terme à rendre certaines orbites inutilisables, voire à des phénomènes de collisions en chaîne.

Recommandation : L'Académie considère que le problème de la densification de l'espace doit être traité avec une grande priorité, par le biais notamment de la mise en forme de normes de bonnes pratiques destinées à préserver l'environnement spatial et terrestre, tout particulièrement en ce qui concerne les lancements et l'organisation de la fin de vie des satellites. Elle recommande de poursuivre toutes les actions qui pourraient conduire à l'adoption de ces normes par toutes les parties prenantes. Elle recommande aussi que la France et l'Europe se dotent d'une capacité indépendante de surveillance de l'espace pour assurer la sécurité des flottes de satellites.

ORGANISATION DES TRAVAUX

Un groupe de travail interdisciplinaire sur les constellations de satellites a été mis en place au sein de l'Académie des sciences en février 2023, est constitué de membres de l'Académie des sciences des sections de physique (Catherine Bréchnignac, Mathias Fink), des sciences de l'univers (Catherine Césarsky, Hervé Le Treut,

Guy Perrin, Jean-Loup Puget) et des sciences mécaniques et informatiques (Serge Abiteboul, François Baccelli et Sébastien Candel), ainsi que d'un membre de l'Académie des sciences morales et politiques (Daniel Andler). François Baccelli et Jean-Loup Puget sont co-présidents.

SECRÉTARIAT ÉDITORIAL

Juliette ROCHET

Directrice des comités, avis et rapports de l'Académie des sciences.

Florent GOZO

Adjoint de la directrice des comités, avis et rapports de l'Académie des sciences.

Illustrations

Oksana PISCHKO

Auteurs (ordre alphabétique)

François BACCELLI

INRIA et Télécom-Paris, membre de l'Académie des sciences

Sébastien CANDEL

Centrale Supélec, membre de l'Académie des sciences

Guy PERRIN

Observatoire de Paris, membre de l'Académie des sciences

Jean-Loup PUGET

CNRS, membre de l'Académie des sciences

Autres membres du groupe de travail

Serge ABITEBOUL

INRIA, membre de l'Académie des sciences

Daniel ANDLER

Sorbonne Université, membre de l'Académie des sciences morales et politiques

Catherine BRÉCHIGNAC

CNRS, membre de l'Académie des sciences

Catherine CESARSKY

CEA, membre de l'Académie des sciences

Mathias FINK

ESPCI, membre de l'Académie des sciences

Hervé LE TREUT

Sorbonne Université, membre de l'Académie des sciences

AUDITIONS

Le rapport s'appuie sur les auditions suivantes effectuées en 2023 :

- 1 - **Maria GUTA**, direction des systèmes de télécommunications, ESA/ESTEC (PaysBas).
- 2 - **Jean-Yves LE GALL**, ancien Président du CNES.
- 3 - **Philippe BAPTISTE**, Président du CNES.
- 4 - **Gilles BERGAMETTI**, CNRS, Président du Comité des Programmes Scientifiques du CNES.
- 5 - **Éric LAGADEC**, astronome adjoint à l'Observatoire de la Côte d'Azur (astronomie optique).
- 6 - **Jean-Jacques JUILLET**, ex directeur de Countries Programs Coordination, Thales Alenia Space.
- 7 - **Carole VACHET**, Sous-directrice du spatial, de l'électronique et du logiciel (DGE).
- 8 - **Chiara FERRARI**, astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur (Radio basses fréquences).
Karl SCHUSTER, directeur de l'IRAM (Institut de radio astronomie millimétrique).
- 9 - **Estelle MALAVOLTI**, enseignant-chercheur à l'ENAC à Toulouse, chercheuse à TSE.
- 10 - **Jean BOLOT**, directeur de la Recherche d'Orange.
- 11 - **Bernard ROSIER**, directeur de programme Systèmes Orbitaux (ONERA).
- 12 - **Renaud LABELLE**, sous-directeur Expertise (ANSSI).
- 13 - **Arnaud DE ROSNAY**, responsable de l'ingénierie des engins spatiaux et des systèmes (Airbus).
- 14 - **Geoffroy LEROSEY**, CEO/CSO de Greenerwave.
- 15 - **Piero BENVENUTI**, directeur du CPS (UAI).
- 16 - **Général Philippe ADAM**, commandant de l'espace.
- 17 - **Christophe BONNAL**, expert sénior débris spatiaux (CNES).

3GPP	3 rd Generation Partnership Project - Coopération mondiale de normalisation des télécommunications mobiles
5G	Norme de réseau de téléphonie mobile de 5e génération
6G	Norme de réseau de téléphonie mobile de 6e génération
AFP	Agence France-Presse
ALMA	Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array - Grand réseau d'antennes millimétrique et submillimétrique de l'Atacama (Chili)
ANFR	Agence nationale des fréquences
ANSSI	Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information
Bande Ka	Bande Kurz-above - Bande de fréquences comprise entre la bande K et la bande Q, soit entre 26,5 et 40 GHz
Bande Ku	Bande Kurz-unten - Bande de fréquences micro-ondes comprise entre 12 gigahertz (GHz) à 18 GHz
BPI	Banque Publique d'Investissement
CDMA	Code Division Multiple Access - Accès multiple par répartition en code
CEO	Chief Executive Officer - Directeur général
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations - Conférence européenne des administrations des postes et télécommunications
CMB-S4	Cosmic Microwave Background Stage 4
CNES	Centre national d'études spatiales
CO3D	Constellation optique en 3 dimensions
COPUOS	Committee on the Peaceful Uses of Outer Space - Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique
CPS	Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky from Satellite Constellation Interference - Centre pour la protection du ciel sombre et silencieux contre les interférences des constellations de satellites
CRAF	Committee On Radio Astronomy Frequencies - Comité des fréquences de radioastronomie
CSO	Chief Scientific Officer - Directeur scientifique
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency - Agence fédérale des États-Unis d'Amérique pour les projets de recherche avancée de défense
DGA	Direction générale de l'armement du ministère des Armées
DGE	Direction Générale des Entreprises du ministère de l'Économie et des finances
DLR	Deutsches Zentrum für Luftund Raumfahrt - Agence spatiale allemande
DoD	Department of Defense - Département de la Défense des États-Unis d'Amérique
ECC	Electronic Communication Committee - Comité des communications électroniques
ELT	Extremely Large Telescope - Télescope terrestre géant européen
ENAC	École nationale de l'aviation civile
ESA	European Space Agency - Agence spatiale européenne
ESO	European Southern Observatory - Observatoire Européen Austral
ESTEC	European Space Research and Technology - Centre - Centre européen de recherche et de technologie spatiales
EUSPA	European Union Agency for the Space Programme - Agence de l'Union européenne pour le programme spatial
FAA	Federal Aviation Administration - Agence gouvernementale chargée des réglementations et des contrôles de l'aviation civile aux États-Unis d'Amérique
FCC	Federal Communications Commission - Commission fédérale des États-Unis d'Amérique des communications et de l'information
FORS	FOcal Reducer and low dispersion Spectrograph Spectro - imageurs pour le très grand télescope de l'Observatoire européen austral
GAO	Government Accountability Office - Organisme d'audit, d'évaluation et d'investigation du Congrès des États-Unis d'Amérique chargé du contrôle des comptes publics du budget

GEO	Geostationary Orbit - Orbite géostationnaire
GNSS	Global Navigation Satellite System - Système de positionnement par satellites
GPS	Global Positioning System - Système de positionnement mondial
HARMONI	High Angular Resolution Monolithic Optical and Near infrared Integral field - Le spectographe HARMONI
IAU	International Astronomical Union - Union Astronomique Internationale (UAI)
IoT	Internet of Things - Internet des objets
IRAM	Institut de RAdioastronomie Millimétrique
IRIS	Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite
Isae-SupAéro	Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace
Isp	Impulsion spécifique
ITU	International Telecommunication Union - Union internationale des télécommunications (UIT)
JAXA	Japan Aerospace Exploration - Agency Agence spatiale japonaise
LEO	Low Earth Orbit - Orbite terrestre basse
LH2	Dihydrogène liquide
LOFAR	LOW Frequency Array - Interféromètre radio Européen
LOX	Oxygène liquide
M87*	Messier 87, galaxie elliptique supergéante
MEO	Medium Earth Orbit - Orbite terrestre moyenne
MESR	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
MetOp	Meteorological Operational satellite - Satellites météorologiques
MIMO	Multiple Input, Multiple Output - Entrées multiples, sorties multiples
NIS	Network and Information Security - Directive de l'Union européenne relative à la protection des réseaux informatiques et des informations
NOAA	National Ocean and Atmospheric Administration - Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique
NOEMA	NORthern Extended Millimeter Array - Observatoire astronomique de l'Institut de radioastronomie millimétrique
NOIR	Lab National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory -
NSF	National Science Foundation - Fondation nationale pour la science du gouvernement des États-Unis d'Amérique
NTIA	National Telecommunications and Information Administration - Administration nationale des télécommunications et de l'information
O3B	Other 3 billion - Opérateur de satellites de télécommunications
OCA	Observatoire de la Côte d'Azur
OHB	Orbitale Hochtechnologie Bremen
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales
ONU	Organisation des Nations Unies
PC	Personal Computer - Ordinateur personnel
R & D	Recherche et Développement
SAR	Synthetic-aperture radar - Radar à ouverture synthétique
SATCON	Satellite Constellations - Constellations de satellites
SCARBO	Space Carbon Observatory
SINR	Signal-to-interference-plus-noise ratio
SKA	Square Kilometer Array - Réseau d'un kilomètre carré, plus grand radiotélescope mondial
SME	Small and Medium-sized Enterprises - Petites et moyennes entreprises (PME)
SMS	Short message service - Service de messages court
Société SES	Société Européenne des Satellites, le premier fournisseur de services de télécommunications par satellites au monde
SpaceX	Space Exploration Technologies Corporation

STM	Multinationale franco-italienne qui conçoit, fabrique et commercialise des puces électroniques (ou ST Micro-électronique)
StratCom	United States Strategic Command
STSC	Scientific and Technical SubCommittee - Sous-comité scientifique et technique
THEMIS	Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms
UE	Union européenne
UHF	Ultra hautes fréquences
UTC	Universal Time Coordinated - Temps Universel Coordonné
VISTA	Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy – Un télescope de l’Observatoire européen austral
VLT	Very Large Telescope - Très Grand Télescope
VRO	Vera Rubin Observatory - Observatoire Vera Rubin

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Académie des sciences. Rapport sur la 5G et les réseaux de communications mobiles (2021).
- [2] C.G. Bassa, O.R. Hainaut & D. Galadí-Enríquez, "Analytical simulations of the effect of satellite constellations on optical and near-infrared observations", *Astronomy & Astrophysics*, 657, A75 (2022).
- [3] [G. Brachet "Les enjeux d'un développement durable des activités spatiales" Géoéconomie 2012/2 \(n° 61\), pages 95 à 106, \(2012\).](#)
- [4] <https://cps.iau.org/news/nsf-and-spacex-sign-agreement-to-mitigate-impact-of-starlink-satellites-on-ground-based-astronomy/>
- [5] J.A. Dallas, S. Raval, J.P. Alvarez Gaitan, S. Saydam and A.G. Dempster, "The environmental impact of emissions from space launches : a comprehensive review", *Journal of Cleaner Production*, 255, 120209 (2020).
- [6] F. Di Vruno et al., "Unintended electromagnetic radiation from Starlink satellites detected with LOFAR between 110 and 188 MHz", *Astronomy & Astrophysics* 676, A75 (2023).
- [7] F. Di Vruno, communication personnelle.
- [8] ESA's Annual space environment report, 12 septembre 2023.
- [9] <https://www.esa.int/Space%20Safety/Space%20Debris/Space%20debris%20by%20the%20numbers>
- [10] <https://www.eso.org/~ohainaut/satellites/index.html>
- [11] F. Fankhauser, J.A. Tyson & J. Askari, "Satellite Optical Brightness", *The Astronomical Journal*, 166, 59 (2023).
- [12] [Federal Communications Commission, "Kuiper systems, LLC application for authority to deploy and operate a Ka-band non geostationary satellite orbit system," no. SAT-LOA-20190704-00057, Jul 30, \(2020\).](#)
- [13] GAO (United States Government Accountability Office) "Large constellations of satellites, Mitigating environmental and other effects". GAO-22-105166 (2022).
- [14] B. K. Gehlot et al., "Transient RFI environment of LOFAR-LBA at 72-75 MHz : Impact on ultra-widefield AARTFAAC Cosmic Explorer observations of the redshifted 21-cm signal", à paraître dans *Astronomy & Astrophysics*, ArXiv :2311.03023 (2023).
- [15] A. Guidotti, A. Vanelli-Coralli, M. Conti, S. Andrenacci, S. Chatzinotas, N. Maturo, B. Evans, A. Awoseyila, A. Ugolini, T. Foggi, L. Gaudio, N. Alagha, and S. Cioni, "Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 3, pp. 2624-2639, (2019).
- [16] O.R. Hainaut & A.P. Williams, "Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains", *Astronomy & Astrophysics* 636, A121, (2020).
- [17] <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau2211/>
- [18] Iridium Communications, Inc, "History of Iridium," <https://www.iridiummuseum.com/timeline/> [online]
- [19] O. Kodheli, E. Lagunas, N. Maturo, S. K. Sharma, B. Shankar, J. F. Mendoza Montoya, J. C. Merlano Duncan, D. Spano, S. Chatzinotas, S. Kisseleff, J. Querol, Lei Lei, Thang X. Vu , and G. Goussetis. "Satellite Communications in the New Space Era : A Survey and Future Challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 23, pp. 70-109 (2021).
- [20] S. Kruk, P. García-Martín, M. Popescu, B. Aussel, S. Dillmann, M.E.Perks, T. Lund, B. Mer'in, R. Thomson, S. Karadag, M.J. McCaughrean, "The impact of satellite trails on Hubble Space Telescope observations", *Nature Astronomy*, 7, 262-268, 2023.
- [21] I. Levchenko, S. Xu, S. Mazouffre, D. Lev, D. Pedrini, D. Goebel, L. Garrigues, F. Taccogna, and K. Bazaka, "Perspectives, frontiers, and new horizons for plasma based space electric propulsion", *Physics of plasmas*, 27, 020601 (2020).
- [22] S. Liu, Z. Gao, Y. Wu, D. W. Kwan Ng, X. Gao, K.-K. Wong, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, "LEO satellite constellations for 5G and beyond : How will they reshape vertical domains ?" *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 7, pp. 30-36, (2021).
- [23] <https://www.lsst.org/content/lsst-statement-regarding-increased-deployment-satellite-constellations>
- [24] A. Mallama, "The newest and largest starlink satellites are also the faintest", *Sky & Telescope*, (2023).

- [25] C. Malaoney, R.W. Portmann, M.N. Ross, K.H. Rosenlof, "The climate and ozone impacts of black carbon emissions from global rocket launches", *JGR Atmospheres*, 127, e2021JD036373 (2021).
- [26] S. Nandakumar et al., "The high optical brightness of the BlueWalker 3 satellite", *Nature*, 623, 938-941 (2023).
- [27] A. R. Offringa, F. Mertens & L. V. E. Koopmans, "The impact of interference excision on 21-cm epoch of reionization power spectrum analyses", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 2866 (2019).
- [28] N. Okati, T. Riihonen, D. Korpi, I. Angervuori, and R. Wichman, "Downlink coverage and rate analysis of low earth orbit satellite constellations using stochastic geometry," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 8, pp. 5120–5134, (2020).
- [29] <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/faq/>
- [30] Z. Qu, G. Zhang, H. Cao, and J. Xie, "LEO satellite constellation for Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18 391–18 401, (2017).
- [31] M.N. Ross and P.M. Sheaffer. "Radiative forcing caused by rocket engine emissions", *Earth's Future*, 2, 177-196 (2014).
- [32] Recommandation UIT-R RA.769-2 sur les "Critères de protection applicables aux mesures en radioastronomie".



ACADÉMIE
DES SCIENCES

23, quai de Conti - 75006 Paris
academie-sciences.fr