



Retour sur les communications spatiales

Le double challenge : augmentation du volume des communications et prise en compte de la mobilité

L'histoire des 70 dernières années des communications spatiales est marquée par des améliorations continues des performances des composants électroniques et des techniques conçues afin de répondre aux besoins du transfert d'information. Chercheurs et développeurs ont utilisé diverses technologies pour augmenter les flux d'informations nécessaires à toutes les populations en complétant les réseaux de communications terrestres par de multiples liens à travers l'espace vers des terminaux fixes ou mobiles.

Daniel Battu

Ingénieur Télécom, consultant

Suzanne Debaille

Membre émérite SEE

Avant-propos

L'expression de la diversité des besoins en information a provoqué un développement considérable du marché des satellites de télécommunications, grâce à la disponibilité et la fiabilité de composants

spécifiques, de dispositifs performants de communication et à de nouvelles stratégies en gestion des services et des réseaux terrestres. L'amélioration des performances techniques et de la fiabilité des réalisations de ce domaine a progressé dans un climat alterné de rivalités, de concurrences commerciales et de coopérations internationales [1].

Le Tableau 1 qui décrit ces évolutions techniques, est découpé en trois sections correspondant aux étapes des années 1957, 2015 et 2025. Il illustre pour chacun des

volets concernés, les caractéristiques des orbites sur lesquelles gravitent les véhicules spatiaux, l'originalité des diverses technologies des communications spatiales et terrestres et le besoin de répondre à la demande des utilisateurs en mouvement ou en poste fixe.

A ce jour, trois familles de satellites de communication ont été développées (figure 1) :

- Les **GEOs** (géostationnaires), à 36 000 km d'altitude sur le plan terrestre

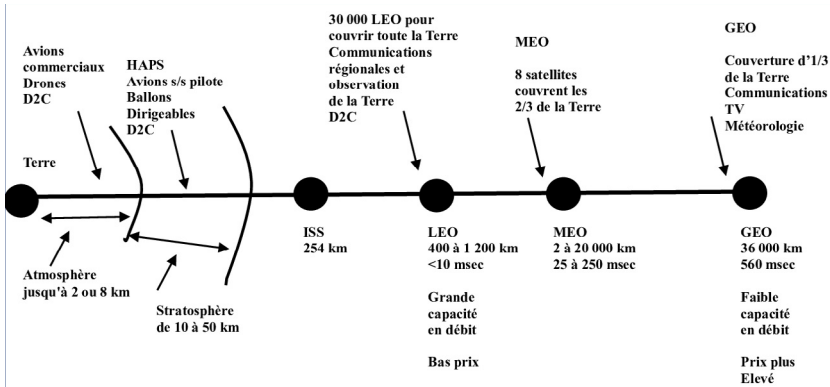


Figure 1 : Positionnement respectif des satellites.

équatorial, qui sont stables au-dessus d'un même point géographique et dont les positions orbitales ont vite été saturées. Un seul satellite GEO couvre le tiers du globe terrestre ;

- Les MEOs, d'altitude moyenne (20 000 km) réservés à la géolocalisation, pour laquelle leur position intermédiaire permet une triangulation efficace des signaux et donne l'avantage d'avoir une empreinte au sol plus large que celle des LEOs ;



Thèmes	1957-2000	2000 - 2015	2016-2024	2025 et futur proche
Domaines	Premières approches : les GEOS	Coopération internationale	Les LEOS en priorité	Technologies en compétition
Technologies	1957 : Transistors et TWT 1962 : CMOS - 1971 : Microprocesseurs - Composants VLSI et ASIC 1977 : Modèle OSI - 1980 : Minitel	1998 : ISS 2011 : Navette Spatiale 1999 : VoIP	2016 : Fabrication en chaîne de satellites LEOS normés 2024 : Etudes de composants optiques pour FSO	1,7 million de projets de satellites LEO Gestion en IA des satellites en orbite avec des liens en fréquence ou en FSO Normalisation des CubSats
Lanceurs majeurs	1946 : Atlas 1960 : Soyouz 1970 : Longue Marche 1973 : Ariane 1989 : Atlas	2006 : Ouverture du marché vers les lanceurs privés 2014 : 1 000 LEOS actifs	2016 : Soyouz 2019 : SpaceX 2024 : Plus de 20 nouveaux lanceurs de LEOS 2024 : 10 000 satellites actifs	LEO, Ballon, dirigeable, avion électrique sans pilote 2026 : Heart Aerospace 2028 : Dirigeable Flying Whales 2035 : 30 000 satellites actifs
Orbites	GEOS et VSAT	Etudes des orbites et trajectoires	LEOS en dominance (7 fois plus de satellites en dix ans)	LEOS, HAPS, LAPS, eVTOL. Transfert orbital possible
Réseaux Télécoms fixes	1962 : TV par satellite 1965 : Intelsat 1 1984 : Intelsat V Télévision analogique HDTV et MPEG	2000 : Intelsat 9 2013 : Normes de TV H 264 et H.265	2024 : Essais de FSO 2024 : Création de LEO équipés de Cloud Computing à la demande	NTN (Non Terrestrial Network) comme réseau de secours Gestion des liaisons FSO avec IA
Télécoms Mobiles	1973 : Motorola (mobile terrestre) 1985 : Radiocom 2000 (mobile terrestre) 1990 : Iridium (satellite) 2001 : Naissance de la carte SIM	1998 : Globalstar (mobile satellite) 2012 : Création de la Nano SIM 2014 : eSIM (ou eUICC) pour les M2M	2017 : Iridium Next Raccordement direct à la 4G et à la 5G (D2C) 2022 : eSIM Only sur iPhones Multiplication des eSIM devices	2025 : Globalstar (Apple) Partage des ressources entre les acteurs - 2025 : 150 pays adoptent eSIM Réglementations complexes HAPS et LAPS : pour la 5G souveraine
Géolocalisation (GNSS)	1968 : Lancement du projet GPS aux Etats-Unis 1978-1995 : GPS II et III	2002 : Inmarsat (Etats-Unis) 2002 : Beidou (Chine) 2011 : GLONASS (Russie)	2018 : QZSS (Japon) 2020 : Galileo (Europe) 2018 : Emergency Call	2025 : Meilleure précision de Galileo 2025 : GNSS turc et indien 2028 : « Aronis New » remplacera GPS

Tableau 1 : Synthèse chronologique de l'évolution du monde des satellites.

- Les LEOs circulant selon des plans polaires ou inclinés, sur des orbites de basse altitude entre 400 et 700 km.

1957 – 2015 – A la recherche des meilleures techniques numériques

Priorité aux GEOs

La mise au point des lanceurs de satellites de télécommunications tire profit des connaissances acquises dans le domaine des missiles militaires. Puis, la priorité s’est orientée en faveur de lanceurs pour des satellites géostationnaires (GEO) situés sur une orbite équatoriale à 36 000 km d’altitude par rapport à la Terre afin de conférer à ceux-ci une durée d’exploitation la plus stable et la plus longue possible. Les lanceurs sont organisés en deux, trois ou quatre étages de diamètre réduit (entre 3 à 6 mètres), et d’une hauteur et d’un poids sans cesse croissants. Il faut compter un rapport voisin de 100 entre le poids total du lanceur et la charge utile. La technologie des lanceurs a atteint assez rapidement un taux de fiabilité proche de 96 %.

La « course à l’espace » a d’abord mobilisé une dizaine de pays (tableaux 1 et 2). Le satellite soviétique Spoutnik 1

réalisa le premier vol orbital de l’histoire en 1957. Suivirent successivement les Etats-Unis (1960, avec Discover 13), le Royaume-Uni (1960, Ariel 1), le Canada (1962, Alouette 1), la France (1965, Astérix), l’Australie (1967 WRESAT-1), le Japon (1970, Ōsumi), la Chine (1970), etc. C’est au cours de cette période de démarrage des activités spatiales, en 1958, que fut découverte la ceinture de radiations Van Allen qui entoure la Terre. Entre juin 2004 et juin 2014, le nombre de satellites actifs, géostationnaires et en couche basse, est passé de 1 000 à 10 000.

Architecture

L’architecture des réseaux satellitaires se compose de trois segments : spatial, terrestre et de contrôle. Le secteur spatial comporte le satellite et l’ensemble des moyens de contrôle situés au sol, c’est-à-dire l’ensemble des stations de poursuite, de télémessure et de télécommande ainsi que le centre de contrôle du satellite, où sont décidées toutes les opérations liées au maintien à poste et de vérification des fonctions vitales du satellite.

Le satellite est constitué d’une charge utile et d’une plate forme. La charge utile comporte les antennes de réception et

d’émission et l’ensemble des équipements électroniques assurant la transmission des signaux. La plate-forme comporte l’ensemble des sous-systèmes permettant à la charge utile de fonctionner [2].

L’élément d’amplification du répéteur de communications analogiques en hyperfréquences a longtemps été le TWT (tube à ondes progressives) jusqu’en 2006. La technologie CMOS, née en 1962, a permis une forte densité d’intégration des composants dont les performances doublient à chaque nouvelle génération. Sont utilisés aujourd’hui les amplificateurs à état solide ¹ (pour les petites puissances et les amplificateurs de puissance d’émission et de réception et de l’ensemble [MPA]). Les répéteurs régénérateurs sont réalisés aujourd’hui avec des nouveaux composants VLSI et ASIC. Une grande variété d’antennes est apparue au fil du temps : antenne active, antenne à flux séparés ou contigus, antenne avec ou sans polarisation, antenne réseau à commande de phase, faisceaux d’antenne. Les améliorations ont porté progressivement sur la réduction de la puissance des émetteurs embarqués et sur une meilleure sélectivité en réception, ce qui a eu pour conséquence de pouvoir augmenter le nombre de canaux sur chaque satellite.

Les segments

Les communications par satellite empruntent toujours les composantes émission et réception des deux segments terrestres (départ et arrivée) et celles du segment spatial (figure 2). Ce dernier est représenté par le satellite lui-même, avec ses antennes et ses dispositifs d’émission-réception à gain élevé. Le segment terrestre comprend les équipements d’émission-réception fixes ou mobiles et les équipements auxiliaires terrestres. Les récepteurs au sol comportent aussi les équipements de réception directe par satellite, qu’il s’agisse de téléviseurs, d’équipements de communication personnelle privée ou publique.

1957	Lancement du satellite russe Spoutnik.
1958	Création de la NASA, agence spatiale américaine.
1958	Découverte de la ceinture de radiations de Van Allen (zone toroïdale de la magnétosphère terrestre).
1961	Création du CNES (Centre National d’études spatiales) à Toulouse.
1962	Telstar – Premier satellite d’observation américain réalisé par AT&T.
1963	Syncom 1 à 3 – Premiers satellites de télécommunications placés en orbite géosynchrone.
1965	Asterix A1 – Premier satellite français lancé par une fusée Diamant A en Algérie.
1969	Apollo 11 et 12 – Missions américaines. « On a marché sur la Lune ».
1973	Lancement du programme de la fusée Ariane par le CNES.
1975	Apollo-Soyouz, première mission spatiale conjointe entre l’Union soviétique et les États-Unis.
1976	Comstar – Lancement du premier satellite américain GEO commercial de la COMSAT.
1977	Lancement de Meteosat-1.

Tableau 2 : Rappel de quelques performances spatiales marquantes.

1 SSPA : Solid State Power Amplifier

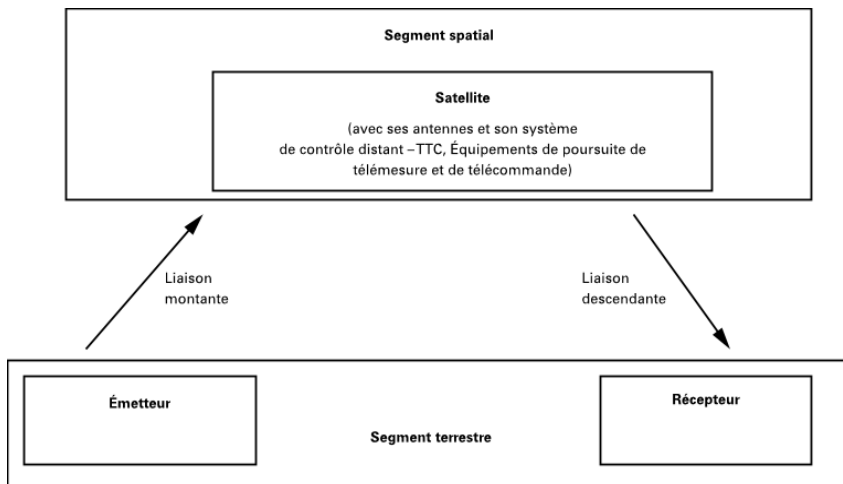


Figure 2 : Architecture générale d'un réseau satellite.

Un signal analogique est un signal qui varie de façon continue dans le temps. La qualité d'un signal analogique s'exprime en décibel par le logarithme décimal du rapport signal bruit S/N , S étant la puissance du signal utile et N étant celle de la puissance de bruit présent dans le signal. Un signal numérique est composé d'une suite de symboles M -aires de durée finie et à nombre fini d'états. Si $M=2$, le symbole binaire est appelé « bit ». La qualité d'une liaison numérique s'exprime en taux d'erreur binaire (TEB), rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre de bits transmis en un temps prédéterminé.

Pour ce qui concerne le segment spatial, en analogique comme en numérique, le satellite se comporte comme un simple amplificateur de signaux en réception comme à l'émission, effectuant au passage un simple, mais nécessaire, changement de fréquence et au besoin parfois, à une affectation des canaux multiplexés vers les antennes adéquates.

Communications entre stations terriennes et satellites

Depuis l'origine, les communications entre stations terriennes et satellites sont portées par les ondes radioélectriques, les liaisons en infrarouge étant encore d'usage limité. Ce transport s'effectue le plus souvent en mode duplex, c'est-à-dire qu'à chaque instant, deux fréquences différentes servent de porteuses à l'émission et à la réception. Dans le sens Terre Espace, la gamme des

fréquences utilisées est supérieure à celle du sens Espace Terre, afin d'éviter les diaphonies (figure 3).

La transmission des groupes de circuits à grande distance s'est d'abord effectuée en mode analogique. Les techniques de gestion numérique de l'information (codage, transmission, commutation, archivage, gestion) ne sont apparues qu'avec les processeurs et les circuits mémoire en 1971 et il a fallu attendre 1977 pour qu'apparaissent la publication des premières normes relatives au « modèle OSI » (*Open Systems Interconnection*).

La station d'émission du segment terrestre procède au formatage des signaux avant de les moduler s'il s'agit de signaux analogiques ou de les coder en cas de signaux numériques, puis les transmet à son antenne. L'UIT recommande l'emploi de

techniques de dispersion de l'énergie des signaux numériques avant modulation afin d'éviter les interférences entre bandes de fréquences d'émission contigües. L'équipement du segment terrestre d'émission est caractérisé par la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) qui résulte du produit de la puissance de l'émetteur par le gain de l'antenne d'émission. Ce qui n'est pas fourni par l'amplificateur est donné par l'antenne.

En réception, le signal analogique est amplifié, filtré et démodulé afin de restituer le signal original. En numérique, les opérations de réception sont particulières, car le démodulateur doit retrouver la phase de la porteuse et en déduire la valeur des éléments binaires du flux reçu. Différents types de démodulations sont utilisables à cet effet (cohérente, différentielle). Il est possible de réduire le taux d'erreur en mettant en œuvre des procédés de codage et de modulation (par exemple, la modulation de phase et d'amplitude à plusieurs niveaux associée au codage en treillis), plus en rapport avec les caractéristiques des services envisagés ou au mode de réception dans des régions à fortes perturbations atmosphériques. Ceci explique la richesse de la palette des systèmes de codage utilisés dans le domaine des communications numériques par satellite.

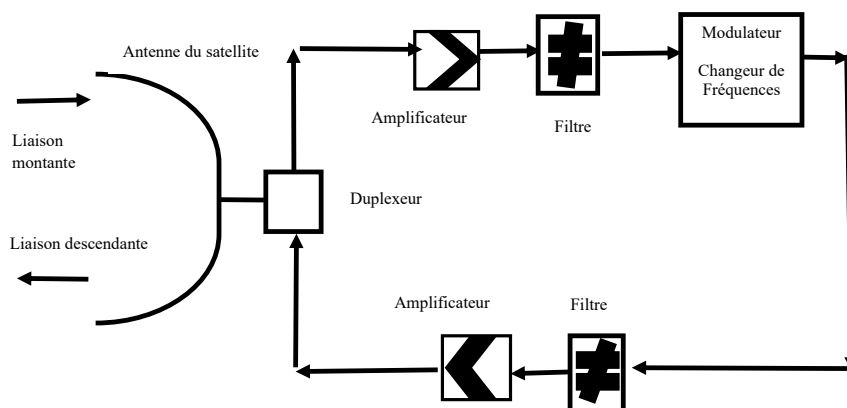


Figure 3 : Gestion des modulations/démodulations satellites.

L'accès à un canal satellite s'effectue par accès multiple, soit par réservation en



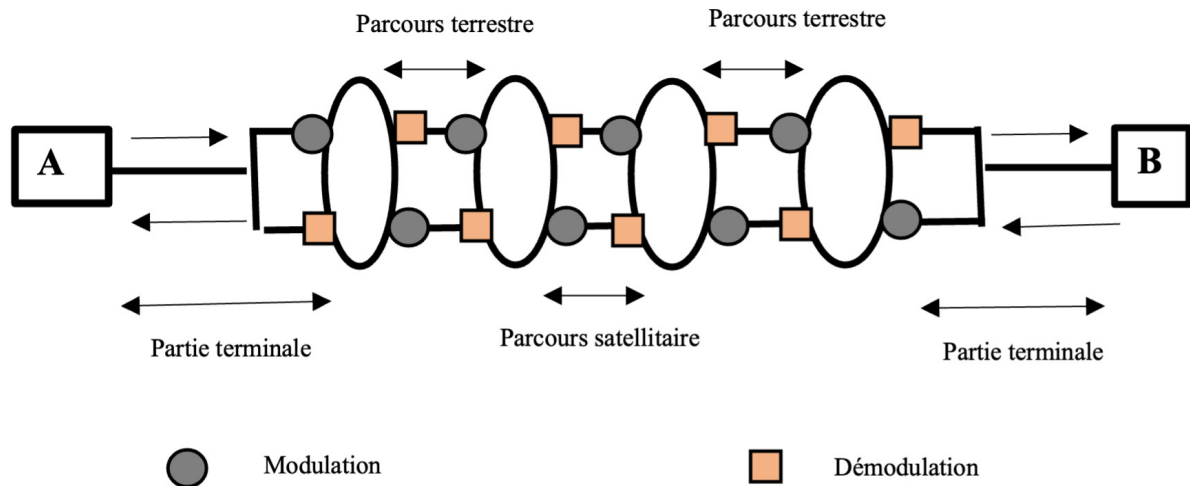


Figure 4: Exemple de liaison entre A et B utilisant des tronçons de nature hybride.

●●● fréquence, dans le temps, ou par code (AMRF, AMRT, AMRC), par accès aléatoire (par exemple Aloha), ou par paquets ou datagrammes. La diversité de ces protocoles est née d'un souci d'économie de la largeur de bande en fréquence, associée à la spécificité des besoins de la clientèle.

Liaisons hybrides

Une liaison hybride est une liaison à grande distance qui comporte au moins une section sur support satellitaire s'ajoutant à son parcours terrestre ou sous-marin (figure 4). Toute application de cette liaison hybride doit emprunter une passerelle qui effectue la transition nécessaire afin de maintenir la qualité de service propre à cette application. En effet, les délais de transmission sur l'ensemble de chacun des deux sens de transmission du parcours doivent rester compatibles avec les paramètres attachés à l'intégrité des services offerts aux abonnés. En cas d'impossibilité, ce sont les performances de terminaux des abonnés qui doivent être adaptées au profil de ces liaisons hybrides. Par exemple, sur les liaisons des circuits vocaux satellitaires GEO, sont placés des supprimeurs d'écho.

Pour les services de télévision, une configuration hybride typique permet d'utiliser le satellite pour assurer une couverture mondiale malgré la diversité des protocoles de transmission utilisés. Ainsi sont associées sur un même canal, la diffusion

directe par satellite, celle en OTT (*Over-The-Top*), la vidéo à la demande (VOD), et les services unifiés dans une offre centrée sur des décodeurs compatibles avec les technologies basées sur IP. Cette hybridation permet de combiner la fiabilité et la portée de l'infrastructure de diffusion télévisuelle traditionnelle.

Services de communications fixes

La réglementation internationale distingue les communications de service fixe et celles de service mobile, selon que l'utilisateur est en situation fixe ou mobile.

Le monde des satellites a évolué afin d'assurer tous ces échanges de trafic, en synergie avec les offres du domaine des câbles sous-marins et des réseaux terrestres fixes et mobiles :

- **Le réseau télex** - Il était devenu à partir de 1975, le réseau mondial des affaires pour toute transaction économique, du fait d'un système automatique d'identification des correspondants. Du fait de sa robustesse, du respect des identités en présence et de son faible coût, le Télex demeure utilisé dans un certain nombre de relations terrestres et maritimes.

- **Circuits vocaux** - L'année 1990 marque le succès des communications téléphoniques internationales par satellite GEO. Progressivement, la capacité des répé-

teurs des satellites s'étend, alors que le numérique fait son apparition dans les réseaux terrestres.

- **Messageries** - Les satellites ont assuré d'abord des liaisons à grande distance pour la téléphonie en mode duplex, avant de répondre aux besoins des réseaux mobiles en messagerie en mode texte et en mode vocal.

- **Vidéo et images** - La numérisation et la compression des signaux vocaux et vidéo permettent de transmettre une centaine de chaînes de télévision sur un seul et unique satellite. La norme internationale de télévision DVB (Digital Vidéo Broadcasting), née en 1993, offrit la compatibilité avec les différentes définitions d'images numériques, dont celles des normes MPEG-2, de modulations QPSK et OFDM, ainsi que différents types d'accès conditionnels.

La numérisation a gagné progressivement tous les services de communication. Par ailleurs, la capacité en circuits numériques des satellites a progressé sensiblement. Ainsi, le satellite Intelsat 9, d'un poids voisin de 4 tonnes, lancé en 2000, présentait une capacité de 160 000 circuits, soit quatre fois plus que son homologue 5A, d'un poids de 2 tonnes, lancé en 1985. En 2007, la norme de télévision DVB a évolué à nouveau et permis sept possibilités de réalisation sur liens satellitaires spécifiques associés aux satellites

GEO. La norme H.265/HEVC, définie en 2013, a succédé à la norme H.264 de 2003, permettant une diminution significative du volume des données des vidéos à transmettre.

Les systèmes VSAT (*Very Small Aperture Terminal*, « terminal à très petite ouverture ») utilisent une technique de communication bidirectionnelle à l’alternat par satellite qui s’appuie au sol sur des centaines d’antennes de petit diamètre pointant sur un satellite géostationnaire. Les réseaux VSAT, nés aux Etats-Unis en 1984, en bande C, pour la gestion de la vente de service, demeurent très utilisés en raison de leur faible coût de revient. D’autres systèmes VSAT sont utilisés pour la géolocalisation sur récepteur maritime, dans les bandes de fréquence Ku ou Ka.

Communications avec les mobiles

Le domaine des communications avec les mobiles itinérants et les navires s’est partagé entre plusieurs satellites dont Eutelsat et Inmarsat, dès le début des années 1980, avec des débits encore modestes. Il nécessitait des antennes aux dimensions importantes et de sources d’énergie suffisantes en puissance et en durée d’utilisation.

C’est pourquoi les fréquences des premières applications ont été réservées en priorité aux navires par l’Organisation Internationale Inmarsat. Pour les journalistes en mission, la « valise Inmarsat », créée dans les années 1990, abritait le terminal indispensable.

Les premières tentatives d’Iridium (88 satellites LEO à 780 km d’altitude) et de Globalstar, (52 satellites LEO à 1 412 km d’altitude), lancés entre 1995 à 2002, connurent des échecs commerciaux, du fait de l’absence d’un marché suffisant.

Géolocalisation

Le service de « géo-positionnement par satellite » (ou GPS) repose depuis 1978 sur les vingt-quatre satellites américains MEO, situés à 24 000 km d’altitude. Il est totalement opérationnel depuis 1995 et fournit une précision de la position horizontale à 10 m près (Cf. REE 2025-1, Dossier Géolocalisation, pages 46 à 83).

En 2002, Inmarsat-C (*International Mobile Satellite Organisation*) a ouvert un service de positionnement GNSS à bas débit pour les navires en mer qui repose sur l’association des performances de trois satellites GEO et de plusieurs stations terriennes. En 2011, a été ouvert le service russe de géolocalisation GLONASS.

2016 à 2024 – Arrivée des LEOs pour la téléphonie mobile

Lanceurs et propulsion

Cette période a assisté à l’essor des constellations de satellites LEO défilant à basse altitude, lancés par groupe de 20 à 60 (tableau 4). Les orbites basses permettent de bénéficier de temps de latence courts, compatibles avec des connexions directes à haut débit avec les terminaux

mobiles 4 et 5G. La fabrication en série de ces satellites selon des gabarits prédéfinis comme les CubSats, permet de réduire les coûts de fabrication et de lancement. En quelques années, le prix du kg satellisé en LEO aurait été divisé par 40, ce qui explique que depuis 2012, le nombre de lancements de satellites LEO de moins de 50 kg ait augmenté de 30 % par an.

Cette orientation du marché accompagne le développement de petits lanceurs moins onéreux, bien que la série des lanceurs lourds se maintienne en raison des projets scientifiques. Entre 2013 et 2022, les petits satellites ont représenté 87 % du nombre des vaisseaux spatiaux lancés et le nombre de satellites en service est passé de 1 000 environ en 2014 à 12 000 en 2024.

A la fin de cette période, chacun des industriels avait amélioré ses lanceurs (tableau 3). Une vive compétition s’est instaurée entre deux sociétés concurrentes : SpaceX qui a développé le lanceur Falcon et Blue Origin, qui gère le projet New Glenn.

Constellations

Une constellation se définit par les objectifs assignés à sa mission, lesquels participent à la définition de son orbite et à la conception de ses satellites. Ainsi sont prises en compte la couverture totale au sol et la capacité de répondre à la demande en débit, en latence, en portée, en visibilité et en fiabilité. Ceci impose, en fonction des fréquences allouées et de l’altitude autorisée, de disposer d’une densité de flux de puissance rayonnée ●●●

Lanceur	Année	Nbre étages	Hauteur (m)	Masse décollage (tonnes)	Charge utile LEO (tonnes)	Charge utile GEO (tonnes)
Electron (Nlle Zélande)	2017	2/3	18	12	0,15	-
Falcon Heavy	2018	2	70	1 421	63	26
Launcher One	2021	2	16	25	0,5	-
Ariane 6	2024	2	63	860	21	11

Tableau 3 : Caractéristiques de quelques lanceurs entre 2017 et 2024 (Source AWST).

Constellations	Exploitant	Satellites en orbite	Satellites prévus	Poids Sat. (kg)	Début	Coût
Globalstar	US Telnor	25 LEO	25	700	2010	-
Iridium Next	US Mobil	82 LEO	95	860	2017	-
Kepler	Canada IoT	18	150	10	2018	200 M\$
Fleet Space	Australie	10 LEO	140	10	2018	70 M\$
OneWeb Eutelsat	UK UE Bdbd	720 LEO	6 372	150	2019	7 G\$
SpaceX Starlink	US Bdbd	8 608 LEO	12 000, puis 30 000	De 227 à 1 250	2019	10 G\$
AST Space Mobile	US	1 LEO	243	1 500	2022	-
O3b SES	SES	10 MEO	13	1 700	2022	
Lynk Global	US	5 LEO	5 000	-	2023	50 G\$
Kuiper Amazon	US Bdbd	129 LEO	3 236	700	2024	10 G\$
Rivada Space Ntk	Allemagne	LEO	600	500	2025	2,4 G\$
Telesat Lightspeed	Canada Bdbd	GEO LEO	198/1 600	700	2026	4 G\$
IRIS 2	EU Bdbd	MEO, LEO et VLEO	170/292	-	2030	2,4 G€-

Tableau 4 : Constellations LEO/MEO annoncées (selon les revues AWST et SatNews).

- adéquate dans les deux sens de transmission pour tous les émetteurs.

La "fauchée" ou couloir couvert par un satellite LEO défilant, peut selon son altitude, balayer au sol une largeur comprise entre 10 et 200 km à une vitesse de l'ordre de 4,3 à 7 km/s. Une altitude de 1 500 km et une élévation de 30 degrés assurent un temps de transit de 8 ms.

Le projet d'internet par satellite Starlink fut initié par la société américaine SpaceX au début de 2015. Le projet prévoit 12 000 à 30 000 satellites LEO desservant déjà 150 pays. Le 19 octobre 2025, SpaceX a lancé son dix-millième satellite Starlink depuis la Californie, égalant son record annuel de 132 lancements de Falcon 9.

Chaque satellite dispose d'une capacité totale de 96 Gbit/s, dont 20 Gbit/s dans la bande Ku pour les liaisons avec les terminaux des utilisateurs, ainsi que dans la bande Ka pour les liaisons vers les stations terriennes. Le satellite est équipé d'un moteur ionique pour maintenir sa position sur

orbite, lui autorisant une durée de vie de 5 ans et, en fin de vie, un désorbitage télécommandé afin de ne pas polluer l'atmosphère (tableau 4).

La constellation européenne IRIS 2 (Infrastructure de résilience, d'interconnectivité et de sécurité par satellite) sera composée de 18 satellites MEO à 8 000 km d'altitude, associés à 264 LEO à 1 200 km d'altitude et de 10 satellites VLEO (400 -

750 km). Il y a cinq ans, la Chine a ouvert simultanément six projets de constellations totalisant 50 730 satellites, principalement des LEOs, qui sont en cours de mise en place (tableau 5).

Communications avec des mobiles

En 2017, le 3GPP, organisme international chargé de la normalisation des communications mobiles, a proposé des améliorations

Noms des constellations	N de satellites lancés	Nombre de satellites prévus
Quianfan - G60 (Mille voiles)	108	15 000
Guowang	24	13 000
Honghu-3	-	10 000
Geely Future Mobility	64	6 012
Trianqi	37	3 918
3 Body Computing (Ada Space)	12	2 800

Tableau 5 : Les constellations chinoises en cours [selon www.china-in-space.com].

afin d'optimiser l'accès par satellite. En particulier, une architecture de réseau non terrestre (NTN) avec des fonctions système à bord du satellite a été normalisée, pour la 4G et la 5G. Elle autorise un transfert automatique des appels établis, sans passer par le relais d'une station terrestre (service « *Direct-to-Device* », D2D ou Direct to Cell, D2C), et permet de se connecter à un réseau 5G, sous réserve de la qualité effective de transmission.

Fréquences

L'UIT-R, à l'occasion de la réunion de la CMR-23, a adopté en décembre 2023, le plan de partage du spectre des fréquences utilisées pour les communications spatiales, tant sur Terre que dans l'espace. De nouvelles fréquences pour la connectivité à large bande, la sécurité de la vie, l'espace et l'observation de la Terre ont été attribuées. Les largeurs de bande de fréquences, constituant une ressource limitée, l'UIT attribue les fréquences et enregistre les positions orbitales et les paramètres des satellites afin d'éviter les brouillages préjudiciables entre les stations de différents pays.

Les premiers systèmes fixes de télécommunications par satellite ont été déployés dans les bandes de fréquences « C » (4-6 GHz), puis « Ku » (10-15 GHz) qui constituent aujourd'hui encore la majeure partie de la flotte de satellites en opération. Afin de rester compétitif par rapport aux réseaux terrestres et de réduire le coût du bit transmis, la bande « Ka » (20-30 GHz) est utilisée depuis le milieu des années 2000 pour fournir des services Internet par satellite, à haut débit (dits « HTS » pour *High Throughput Satellite*).

A plus long terme, des bandes de fréquences plus élevées (bande « W ») ou le recours à l'Optique permettront d'atteindre des débits plus élevés de manière à rester compatible avec le déploiement des différentes étapes de la 5G et de la 6G.

Communications optiques et laser entre satellites

L'utilisation de nouveaux composants de transmission optique (modulateurs,

amplificateurs, détecteurs ultrarapides) ouvre la voie aux liaisons optiques en espace libre (FSO). Des émetteurs lasers et des détecteurs adaptés sont disponibles dans une longueur d'onde comprise entre l'infrarouge et le bleu. Si la portée utile des FSO en liaison terrestre est de l'ordre de quelques km du fait des facteurs atmosphériques (humidité, pollution, chaleur), elle est de plusieurs milliers de km en espace extra-atmosphérique, associée à une largeur de bande de l'ordre de 2 000 THz.

Le perfectionnement des méthodes de filtrage et l'application de techniques de correction du front d'onde pour compenser les effets de la diffusion et de la turbulence sont également à l'étude.

Des communications optiques sécurisées devraient être bientôt opérationnelles entre satellites, entre satellites et des stations au sol, sur mer ou sous l'eau. N'étant pas utilisables à travers les couvertures nuageuses, les liaisons optiques devront être dupliquées afin de faire face à la possibilité d'occultation par les nuages.

Géolocalisation

Opérationnel depuis 2016, Galileo est le système global de navigation par satellite (GNSS) européen. Avec ses 30 satellites MEOs placés à 23 222 km d'altitude, Galileo permet une précision de 20 cm en horizontal et de 40 cm en vertical, ainsi qu'une référence de temps universel, à près de quatre milliards d'utilisateurs [6].

La mise à jour de Galileo permettra en 2026, d'ouvrir le service par satellite d'alerte et de gestion des urgences (EWSS). Galileo est complémentaire au système EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*). Des systèmes de localisation par satellite sont également opérationnels en Chine (Beidou), aux Etats-Unis (GPS), en Inde (IRNSS), au Japon (QZSS), en Russie (Glonass) et en Turquie (TürK-SAT).

Observation de la Terre

Depuis 2014, les satellites Sentinel du programme européen Copernicus fournissent de façon périodique des observations scientifiques dans le domaine de la surveillance de l'environnement et d'autres domaines essentiels, dont l'estimation de la biomasse, du rendement des cultures, de la surveillance de la phénologie², le suivi des catastrophes et les interventions d'urgence (feux de forêts, tremblements de terre, inondations). A l'image du projet européen Copernicus, de nombreux pays ont développé des systèmes satellitaires à des fins d'observation du sol de leur territoire, de leurs océans et de l'atmosphère.

2025 et le futur - Diversité des initiatives

Ingénierie des composants et des systèmes

Des progrès sensibles ont été accomplis récemment en poids et en performances dans les équipements essentiels à la collecte de données IoT (Internet des objets), à la télé-détection, aux communications maritimes par satellite, aux systèmes d'échange de données VHF / VDES, aux piles à combustible et aux communications optiques [3].

Dans la gamme de capteurs et de détecteurs optiques à hautes performances ont été développés des tubes photomultiplicateurs (PMT) pour la détection ultra-sensible de la lumière, de photodiodes et de photodiodes à avalanche (APD) pour des mesures rapides et précises, et de capteurs d'images CCD/CMOS pour l'imagerie haute résolution [4]. D'ici à cinq ans, des terminaux optiques de communication bidirectionnelle à haut débit vont équiper des centaines de nouveaux satellites en couche basse (LEOs).

Propulsion et lanceurs

De nouveaux systèmes miniaturisés de propulsion électrique, alimentés à l'iode, sont ●●●

² La phénologie est l'étude des événements périodiques affectant le monde du vivant en lien avec les variations saisonnières du climat.

●●● en cours d'expérimentation sur des petits satellites. La propulsion spatiale à base de nucléaire thermique est en étude aux Etats-Unis, en Chine et en Europe. Des moteurs ioniques devraient permettre à tout satellite de bénéficier d'une durée de vie plus longue.

Flexibilité des satellites

Des satellites flexibles à haut débit figurent en bonne place au sein des programmes des exploitants de réseau. Cette flexibilité est obtenue à partir du changement par logiciel des fréquences, de l'acheminement des faisceaux de circuits, de la couverture et de la puissance de chaque satellite. L'ajustement dynamique du déploiement de la capacité satellitaire vise à rendre son fonctionnement plus efficace, sur le plan de la flexibilité de la fourniture de services et du ciblage des zones ayant besoin de capacité, sous réserve de l'emploi de normes bien définies pour chaque interface.

Les réseaux mobiles 6G de nouvelle génération sont prévus autour de 2030 avec des débits de l'ordre de 900 Gbit/s. Les fournisseurs de terminaux portables de téléphonie estiment que des fonctions d'intelligence artificielle pourront en faciliter l'exploitation et la maintenance. Des "centres de données orbitaux décentralisés" pour la gestion des cryptomonnaies et celle de l'intelligence artificielle sont à l'étude pour résoudre les questions de fourniture d'énergie, de refroidissement des équipements et de desserte rapide des demandes.

NTN et sécurité nationale

Face à d'éventuels dangers, plusieurs industriels se proposent de déployer à

l'horizon 2030 des satellites LEO, MEO et GEO, chargés de la détection et de la surveillance des liens infrarouge FSO. L'objectif consisterait, par la constitution d'un réseau mondial NTN (*Non Terrestrial Network*), à sécuriser les artères terrestres et sous-marines de communication par un réseau spatial. Les normes de la version 17 du 3GPP ont attribué les bandes de fréquences « S » et « L » pour les NTN.

Conclusion

L'espace jusqu'à 100 km d'altitude est désormais ouvert aux investissements privés dans le cadre du New Space. Plus de 90 pays possèdent un satellite en 2025 et la création d'accès simultanés à l'Internet à haut débit et à faible latence et à des réseaux 5G nationaux est en cours dans plus de 150 pays. Selon une étude publiée par Novaspace, 43 000 satellites devraient être lancés d'ici à 2035 au rythme de 12 satellites et de 8 tonnes de charge utile chaque jour.

Cette occupation massive de l'espace par des constellations de satellites concurrentes soulève cependant des inquiétudes relatives aux risques de brouillages électromagnétiques, aux collisions possibles, à la gestion des débris spatiaux et à la pollution lumineuse du ciel. La désorbitation des débris de satellite et l'impact négatif de l'activité satellitaire (syndrome de Kessler) sur l'astronomie optique et radio font actuellement l'objet d'études poussées [5].

Le marché du spatial international, qui devrait atteindre 1,8 milliard de dollars d'ici 2035, demeure encore un marché fragmenté par les réglementations qui varient selon les pays (fréquences, positionnement, autorisation du service et des terminaux,

Les auteurs

Daniel Battu : Ancien Ingénieur en chef et ancien consultant ECTI, Daniel Battu a été chargé de cours à l'Université Paris Dauphine dans le cadre du DESS 226. Il a participé à diverses missions internationales pour le compte de l'Administration des Postes et Télécommunications. Il est l'auteur d'une vingtaine d'ouvrages et publications techniques et il a reçu en 2015 le Prix Spécial IREST Jacques Dondoux.



Suzanne Debaille : Elle est titulaire d'un Doctorat en Mathématiques Appliquées, portant sur les méthodes de résolution d'équations différentielles récurrentes du second ordre, destinées à l'optimisation de réseaux. Elle participe activement à la vie de la SEE en tant qu'administrateur depuis 2017. Elle est membre du comité de rédaction de la REE depuis 2018 et co-rédacteur en chef de la revue depuis 2023. Depuis 2018, elle fait partie du Comité Scientifique du LNE (Laboratoire National d'Essais), où elle représente les industriels de la FIEEC et la SEE. Elle bénéficie d'une vaste expérience professionnelle dans le domaine des technologies IT et réseaux de télécom en Europe et à l'International.



règles de désorbitation et d'anticollisions, agrément carte SIM, services commerciaux en monnaie locale, etc.). La concertation internationale devra s'efforcer de porter des remèdes à cette situation. ■

Références

- [1] Techniques de l'Ingénieur - D. Battu (E7560 v3 - TE7561 v1 - TE 7628 - TE 7629) – N. Kuhn [TE 7626] (2024).
- [2] G. Maral, M. Bousquet, Zhili Sun. - Satellite Communications Systems. Wiley, 2020.
- [3] M. Coradini. Conquête spatiale, Eldorado du 21^{ème} siècle. FYP Editions, 2018.
- [4] A. K. Majundar. Laser Communication with Constellation Satellites, UAVs, HAPS and Balloons. Springer 2022.
- [5] Académie des Sciences (Rapport sur les satellites, Mars 2024) – 28^e édition de « Satellites to Be Built and Launched »
- [6] Dossier Géolocalisation. REE 2025-1