

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Saad Dahlab Blida 1

Institut d'Aéronautique et des Études
Spatiales



Département Études Spatiales

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : Télécommunications Spatiales

THEME

Etude et simulation du système O3B mPOWER

Proposé et dirigé par :

Mr. DJEZZAR Salim;

Mr. ZABOT Amar

Réalisé par :

Mr. ARROUCI AKRAM;

Mr. MENDJEL YAKOUB;

Promotion: 2018 / 2023

Abstract

This study focuses on O3b mPOWER's revolutionary satellite communications technology. It includes an in-depth analysis of the architecture and operation of the O3b mPOWER system, which is based on a constellation of satellites in medium-Earth orbit. These satellites offer high-speed, low-latency connectivity, making them the solution of choice for remote and underserved areas. The study also examines the system's key components, such as earth stations and the ground network, as well as the benefits offered, including global coverage and outstanding performance.

Keywords: GEO, Medium Earth Orbit (MEO), o3b-MEO, o3b mPOWER, efficiency, communication delays, low-latency, Satellites, MBB, BBM, Satellite Communications.

Résumé

Cette étude se concentre sur la technologie révolutionnaire d'O3b mPOWER dans le domaine des télécommunications par satellite. Elle comprend une analyse en profondeur de l'architecture et du fonctionnement du système O3b mPOWER, qui repose sur une constellation de satellites en orbite terrestre moyenne. Ces satellites offrent une connectivité à haut débit et à faible latence, ce qui en fait une solution de choix pour les zones éloignées et mal desservies. L'étude examine également les composants clés du système, tels que les stations terriennes et le réseau au sol, ainsi que les avantages offerts, notamment une couverture mondiale et une performance exceptionnelle.

Les mots clés : GEO, MEO, o3b-MEO, Haut débit, faible latence, Orbite terrestre moyenne, Les orbites, o3b mPOWER , Communications par Satellite, une couverture mondiale, MBB, BBM.

ملخص

تركز هذه الدراسة على تكنولوجيا الاتصالات الفضائية الثورية لـ O3b mPOWER. تتضمن دراسة مفصلة للهندسة المعمارية وعملية نظام O3b mPOWER، الذي يعتمد على كوكبة من الأقمار الصناعية في المدار الأرضي المتوسط. تقدم هذه الأقمار اتصالات عالية السرعة ومنخفضة التأخير، مما يجعلها الحل الأمثل للمناطق البعيدة والمهمشة. تتناول الدراسة أيضاً المكونات الرئيسية للنظام، مثل محطات الأرض والشبكة الأرضية، بالإضافة إلى الفوائد المقدمة، بما في ذلك التغطية العالمية والأداء المتميز.

الكلمات المفتاحية : المدار الأرضي الجيوستاسيوني، المدار الأرضي المتوسط، الاتصالات الفضائية، الأقمار الصناعية، أوقات سفر الإشارة، التأخير، كفاءة الاتصال.

Remerciements

Au nom de la grâce divine d'Allah, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements sincères à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail de recherche.

En premier lieu, je voudrais remercier Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la persévérance et la sagesse nécessaires pour mener à bien ce projet. Sa guidance a été ma lumière tout au long de ce parcours académique.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mes encadreurs, Monsieur Djeddar et Monsieur Zobot, dont l'expertise, les conseils avisés et l'encouragement constant ont été essentiels pour la réussite de ce mémoire. Leur dévouement à mon égard a été une source d'inspiration et de motivation.

Je tiens également à remercier Monsieur Tahraoui, chef de département, pour son soutien institutionnel tout au long de notre études. Aussi RABAH pour son soutien administratifs

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ma famille, mes amis et tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce voyage académique.

Ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour sans la contribution de chacun d'entre vous, et je suis honoré de vous avoir comme guides et mentors dans cette étape cruciale de ma vie.

Que vos bénédictions et vos conseils continuent de m'accompagner dans ma quête de connaissance et d'excellence.

Merci infiniment.

Dédicaces

Louange à Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé et la détermination nécessaires afin d'entamer et de compléter ce mémoire. En signe de gratitude, nous proclamons "Alhamdulillah". Par Sa guidance, nous avançons vers de nouveaux horizons, inspirés par Son soutien indéfectible, Inshallah.

- À mes parents et mes petites sœurs, en parcourant les pages de ce mémoire, je ne peux m'empêcher de reconnaître que cette réalisation n'aurait pas été possible sans votre soutien inébranlable, votre encouragement constant et votre amour inconditionnel. Chacun de vous a été une étoile brillante dans mon ciel, illuminant mon chemin tout au long de ce voyage exaltant. Chaque ligne de ce mémoire est un hommage à votre dévouement.

- À mes amis et frères, Ibrahim Belhaouas, Selmane bennamane, Raouf Bousaid, Lotfi Chemini, Abdelwahid Merzoug, Hicham Bachir, Ahmed Aissaoui, Ayoub bennacer, Akram Chegrani et Mohamed Yahiaoui, merci d'avoir partagé des rires, des doutes et des moments précieux. Votre présence a rendu cette route moins solitaire, et vos encouragements m'ont insufflé la confiance nécessaire pour aller de l'avant. À travers nos rencontres, nos discussions passionnantes et nos aventures communes, vous avez fait de ces années une période exceptionnelle.

À la famille Arrouci et la famille Tamer, dont l'amour est une boussole infallible, me guidant dans les moments de doute,

Aussi à ma lune mon amour et My World, merci pour votre soutien, votre amour et vos encouragements. Merci d'être vous, merci d'être dans mon cœur d'une manière si spéciale. Ta simple existence illumine mes jours et me motive à aller de l'avant.

Et enfin, à mon binôme amis, compagnon de travail et de réflexion, dont la collaboration et l'engagement ont contribué de manière significative à la réussite de ce mémoire. Notre travail d'équipe a été inestimable, et je suis reconnaissant de t'avoir à mes côtés tout au long de ce projet.

Avec toute ma gratitude et mon amour,

ARROUCI AKRAM

Dédicaces

À mes précieux parents, Dans le doux foyer de vos bras aimants, j'ai trouvé le réconfort et la sécurité. Votre amour a été le feu qui a réchauffé mon âme tout au long de ma vie. À travers les hauts et les bas, votre soutien indéfectible a été mon ancre dans la tempête,

À ma sœur, mes frère, compagnons inséparables de ma vie et gardiens de mes rires.

À la famille Sayad et la famille Mendjel, dont l'amour est une boussole infallible, me guidant dans les moments de doute,

Et enfin, à mes amis, compagnons de folie et frères d'une autre mère, avec qui chaque instant devient une épopée mémorable, et dont la présence a fait briller les étoiles les plus sombres de ma vie.

Et enfin, à mon binôme, compagnon de travail et de réflexion, dont la collaboration et l'engagement ont contribué de manière significative à la réussite de ce mémoire. Notre travail d'équipe a été inestimable, et je suis reconnaissant de t'avoir à mes côtés tout au long de ce projet.

Ce mémoire est tissé des fils de vos sourires, de vos encouragements et de votre amour inconditionnel. Chacun de vous est une étoile brillant dans le firmament de ma vie, éclairant le chemin de ma quête de connaissance et de réussite.

MENDJEL YAKOUB

Acronymes et Annotations

3GPP	3rd Generation Partnership Project.
AC	Alternating current.
ACU	Antenna Control Unit.
AMIP	ASCII Message-Based Protocol.
AMRC	Accès Multiple à Répartition par Code.
ARC	Adaptive Resource Control.
BER	Bit Error Rate.
BUC	Block Up Converter.
BBM	Break Before Make.
BSS	Broadcasting Satellite Service.
CAPEX	Capital Expenditure.
CDMA	Code Division Multiple Access.
CNO	Network Operations Center.
CU	Charge Utile.
DVB	Digital Video Broadcasting.
ECG	ElectroCardioGrammes.
EEG	ElectroEncéphaloGrammes.
ESA	European Space Agency.
EVP	Executive Vice President.
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power.
FAMA	Fixed Assignment Multiple Access.
FDMA	Frequency Division Multiple Access.
FEC	Forward Error Correction.

FSK	Frequency Shift Keying.
FSS	Fixed Satellite Service.
GEO	Geostationary Equatorial Orbit.
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema.
GNSS	Global Navigation Satellite System.
GPS	Global Positioning System.
GW	Gateway.
HTS	High-Throughput Satellite.
ICS	Inter-Satellite Communication System.
IDU	Indoor Unit
INMARSAT	International Maritime Satellite.
ISR	Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance
IP	Internet Protocol.
LDPC	Low-Density Parity Check.
LAN	Local Area Network
LEO	Low Earth Orbit.
LHCP	Left-Hand Circular Polarization
LNB	Low Noise Block.
MAC	Media Access Control
MBB	Make Before Break.
MEO	Medium Earth Orbit.
MIMO	Multiple Input Multiple Output.
MNO	Mobile Network Operator.
NSW	New South Wales.

NTN	Non-Terrestrial Networks.
O3B	Other 3 Billion.
ODU	Outdoor Unit
OTE	Organismos Tilepikinonion Ellados.
PIRE	Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente.
PoP	Point of Presence.
PSK	Phase Shift Keying.
RAAN	Right Ascension of Ascending Node.
RF	Radio fréquence.
RHCP	Right-Hand Circular Polarization.
SCPC	Single Channel Per Carrier.
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition.
SES	Société Européenne des Satellites.
SFL	Space frame length.
SCAO	Système de commande d'attitude et d'orbite.
STDMA	Space-Time Division Multiple Access.
TFL	Time frame length.
TLE	Two-Line Element.
TMR	Transfer Management Routine.
TT&C	Telemetry, Tracking & Control.
TDMA	Time Division Multiple Access.
TMR	Terminal Manager.
UT	User Terminal
QoS	Quality of Service.

UIT Union Internationale des Télécommunications.

VSAT Very Small Aperture Terminal.

WCDMA Wideband Code-Division Multiple Access.

Table De Matières

<i>Dédicaces</i>	4
Acronymes et Annotations	6
Table De Matières	10
Liste des Figures	13
Liste des Tableaux	15
Introduction générale :	16
1----- Chapitre 01: Généralités sur les Télécommunications par satellite	18
1.1 Introduction	18
1.2 Naissance des communications par satellite	19
1.3 Principes de base des télécommunications par satellite	20
1.4 Règlementations et bandes de fréquence.....	22
1.5 Architecture d'un satellite de télécommunication	23
1.5.1 La plate-forme	24
1.5.2 La Charge utile d'un Satellite Télécommunications	25
1.5.2.1 Le sous-système d'antenne	26
1.5.2.1.1 Les antennes filaires.....	26
1.5.2.1.2 Les antennes à cornet	27
1.5.2.1.3 Les antennes réflectrices	28
1.5.2.1.4 Les antennes matricielles.....	30
1.5.2.2 Le sous-système Transpondeur.....	31
1.6 Classification des satellites de télécommunications	35
1.7 Les réseaux satellitaires.....	36
1.7.1 Qu'est-ce qu'un réseau de satellites ?	36
1.7.2 Les téléports satellites.....	37
1.8 Les modes d'accès dans les satellites de télécommunications	37

1.8.1	Les méthodes d'accès FAMA (Fixed Assignment Multiple Access)	37
1.8.1.1	L'Accès Multiple à Répartition en Fréquence (AMRF) ou FDMA.....	37
1.8.1.2	L'Accès Multiple à Répartition dans le Temps (AMRT) ou TDMA.....	38
1.8.1.3	Accès multiple par répartition spatio-temporelle (STDMA)	39
1.8.1.4	L'Accès Multiple à Répartition par Code (AMRC) ou CDMA	40
1.8.1.5	Multiplexage par Code à Large Bande ou WCDMA	41
1.8.2	Les méthodes d'accès aléatoire	41
1.9	Les techniques dans la transmission par satellite	42
1.9.1	Modulation	42
1.9.1.1	Frequency Shift Keying (FSK).....	42
1.9.1.2	Phase Shift Keying (PSK)	43
1.10	La correction d'erreur	43
1.11	Conclusion	44
2	----- Chapitre 02 : L'O3B mPOWER satellite	47
2.1	Introduction à l'O3b mPOWER	47
2.2	Architecture du système O3b mPower.....	49
2.2.1	Présentation de l'architecture générale du système O3b mPOWER	49
2.2.2	Description des composants du système O3b mPOWER	50
2.2.2.1	Satellites O3b mPOWER	51
2.2.2.2	Les stations au sol	53
2.2.2.3	Les terminaux utilisateurs.....	55
2.2.2.3.1	Les terminaux au sol O3b mPOWER	57
2.2.2.3.2	Terminal utilisateur Transferts et commutations	57
2.2.2.3.3	Modems et plates-formes pris en charge : Voir annexe B	60
2.2.2.3.4	Configurations matérielles du terminal utilisateur.....	60
2.3	Les Performances du Système o3b mPOWER	62
2.4	Comparaison avec les autres systèmes.....	63

2.4.1	O3b Classic vs O3b mPOWER	63
2.4.2	Différences par rapport aux LEO	64
2.5	Les avantages.....	64
2.6	Limites.....	65
2.7	Conclusion	65
3	----- Chapitre 03 : Simulation Numérique du O3B mPOWER	68
3.1	Introduction	68
3.2	Présentation du langage de programmation matlab	68
3.2.1	Aerospace Toolbox	68
3.2.2	La Satellite Communications Toolbox	68
3.2.3	Satellite Scenario Toolbox.....	69
3.3	Diagramme de l'algorithme de simulation O3B mPOWER sure MATLAB	70
3.4	Données et Paramètres utiliser dans la simulation	72
3.4.1	Les stations au sol utilisées dans la simulation	73
3.4.1.1	Les passerelles utilisées	73
3.4.1.2	Les terminaux d'utilisateurs utilisés	74
3.5	Résultat de la simulation	75
3.5.1	La constellation	75
3.5.2	Intervalles d'accès pour certains des Terminaux utilisateurs	76
3.5.3	Statut d'accès à l'ensemble du système pour certains des Terminaux utilisateurs	78
3.6	Conclusion	80
4	----- Conclusion générale et Les perspectives	81
<i>ANNEXE A</i>	<i>.....</i>	<i>83</i>
<i>ANNEXE B</i>	<i>.....</i>	<i>89</i>
<i>ANNEXE C</i>	<i>.....</i>	<i>92</i>
Références	95

Liste des Figures

Figure 1-1: Évolution croissante de la demande des satellites [1].....	18
Figure 1-2: Communication par Satellite [3].....	21
Figure 1-3: Architecture d'Un Satellite de Télécommunication Avec Ses Différents Sous-Systèmes..	23
Figure 1-4 : Description d'un satellite de télécommunication [9].	24
Figure 1-5: La plate-forme d'un satellite de télécommunication.....	25
Figure 1-6: Antennes dans les satellites de télécommunications.....	26
Figure 1-7: Les différents types des antennes filaires.....	27
Figure 1-8: Conception d'une antenne à cornet	28
Figure 1-9: Une antenne cornet	28
Figure 1-10: Les différents types des antennes cornet	28
Figure 1-11: Diagramme de l'antenne à réflecteur.....	29
Figure 1-12: Les différents types des antennes réflectrices.....	30
Figure 1-13: Une Antenne Matricielle.	30
Figure 1-14: Ka-Band Deep Space Transponder	31
Figure 1-15 : charge utile du MEO (o3b) satellite Components – Photo [18].....	34
Figure 1-16: Synoptique simplifié d'une charge utile de satellite de télécommunications.	34
Figure 1-17: Slot Graphique de FDMA	38
Figure 1-18: illustration graphique d'un slot codée par TDMA	38
Figure 1-19: illustration graphique de STDMA	40
Figure 1-20: illustration graphique de CDMA.	41
Figure 2-1: The Journey MEO to mPOWER	48
Figure 2-2: L'O3b mPOWER Constellation Africa [27].	49
Figure 2-3: La charge utile intégrée o3b mPOWER [28].....	51
Figure 2-4: O3B mPOWER getaway in Greece	52
Figure 2-5: O3b-mPOWER couverture globale.	55
Figure 2-6: Extension du réseau central de l'opérateur de réseau mobile avec Mobile Backhaul mPOWERED.....	56
Figure 2-7: Les deux antennes suivent le satellite actif actuel.	57
Figure 2-8: L'antenne secondaire revient sur ses pas pour capter un satellite en phase .ascendante.	58
Figure 2-9: Transporteur actif sur le satellite de départ et d'arrivée pendant la fenêtre de transfert.	58
Figure 2-10: Les deux antennes suivent les nouveaux satellites actifs actuels.....	59
Figure 2-11: Timeline de transfert "Make Before Break" - Deux antennes.....	59
Figure 2-12: Break Before Make Handover.....	60
Figure 2-13: Architecture physique d'une seule antenne.....	60

Figure 2-14: Modem à double antenne, Architecture physique.....	61
Figure 3-1: logigramme de l'algorithme de simulation O3B mPOWER.....	71
Figure 3-2: AUSTRALIE gateways.....	73
Figure 3-3 : EUROPE et AFRIQUE gateways.....	73
Figure 3-4: EUROPE Terminal-utilisateur	74
Figure 3-5: AFRIQUE User-Terminals	74
Figure 3-6: Constellation satellitaire du O3B mPOWER.....	75
Figure 3-7 : l'accès satellite -Gateway	76
Figure 3-8: Etat de connexion du Annaba UT pendant 12h.	78
Figure 3-9: Etat de connexion du la Croisière UT pendant 12h.	79
Figure 3-10:Illustration Graphique de Technique Make Before Break (MBB).	79
Figure 0-1:INTELLIAN mP130.....	84
Figure 0-2: Intellian mP85NX.....	85
Figure 0-3: Intellian X130D PM.....	86
Figure 0-4: AvL 2.4m X-Y	87
Figure 0-5:VIASAT 2.4M.....	88

Liste des Tableaux

Tableau 1-1: Les principales bandes de fréquences des télécommunications par satellite.	22
Tableau 1-2: Classification des différents types de satellites [19]	35
Tableau 2-1:SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN m P 1 3 0	84
Tableau 2-2: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN mP85NX	85
Tableau 2-3: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN X130D PM.....	86
Tableau 2-4: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN AvL 2.4m X-Y	87
Tableau 2-5: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN VIASAT 2.4M	88
Tableau 3-1:Paramètres et valeurs utilisées lors de la simulation.....	72
Tableau 3-2:Annaba UT Etat de connexion.....	77
Tableau 3-3: Croisière sur 00 UT Etat de connexion.	77
Tableau 3-4: Japon UT Etat de connexion.....	77
Tableau 3-5:Antigua et Barbuda UT Etat de connexion.	77

Introduction générale :

Les communications par satellite ont joué un rôle fondamental dans la transformation des communications mondiales, en permettant une connectivité à grande échelle dans des domaines aussi variés que les télécommunications, les médias, la défense et la recherche scientifique. Ces satellites en orbite autour de la Terre ont servi de relais indispensables pour surmonter les obstacles géographiques et fournir des services de communication essentiels.

Cependant, l'utilisation de satellites en orbite géostationnaire (GEO) pour les télécommunications par satellite a présenté des défis significatifs au fil des années. Tout d'abord, la latence élevée résultant de la grande distance entre les satellites GEO et la Terre a entravé les applications nécessitant une communication en temps réel. De plus, la capacité limitée de ces satellites en termes de bande passante a imposé des restrictions sur la quantité de données pouvant être transmises. Les coûts élevés associés au déploiement, à la maintenance et au remplacement des satellites GEO ont également constitué une préoccupation majeure pour l'industrie. Les contraintes réglementaires et la gestion complexe du spectre radioélectrique ont ajouté une couche de complexité supplémentaire.

Pour relever ces défis, l'industrie des télécommunications par satellite s'est tournée vers de nouvelles solutions, notamment les constellations de satellites en orbite basse (LEO) et en orbite moyenne (MEO). Une solution innovante qui a émergé pour répondre à ces problèmes est le système O3b mPOWER, basé sur une constellation de satellites en orbite terrestre moyenne (MEO). Cette approche offre des avantages significatifs, tels qu'une réduction notable de la latence, une capacité accrue et une meilleure résilience du réseau.

Dans cette étude, nous examinerons en détail la technologie O3b mPOWER et son rôle essentiel dans l'amélioration des télécommunications par satellite. Nous explorerons l'architecture, le fonctionnement et les avantages de cette constellation MEO, en mettant particulièrement l'accent sur la manière dont elle résout les défis associés aux satellites GEO. De plus, nous présenterons une simulation du système de constellation O3b mPOWER réalisée à l'aide de MATLAB, illustrant ainsi son fonctionnement en temps réel et son impact sur la connectivité mondiale.

Cette étude approfondie nous permettra de mieux comprendre comment les constellations de satellites en orbite terrestre moyenne, telles qu'O3b mPOWER, contribuent à façonner l'avenir des communications par satellite en surmontant les limitations des systèmes GEO traditionnels.

Chapitre 01



1 Chapitre 01: Généralités sur les Télécommunications par satellite :

1.1 Introduction :

Les télécommunications par satellite permettent de repousser les limites de la transmission de données par voie terrestre. Ainsi, une audience de millions de foyers et d'entreprises peut être desservie par un même satellite même lorsque les utilisateurs sont situés dans des régions hostiles aux moyens classiques de transmission et de diffusion.

La position en haute altitude des émetteurs autorise, bien évidemment, des zones de couverture très étendues. Avec seulement trois satellites, il est possible de transmettre sur la quasi-totalité du globe. Pour obtenir une couverture équivalente avec des moyens terrestres, il faudrait un réseau d'émetteurs au sol très dense et très coûteux.

L'évolution de la demande des charges utiles des satellites de télécommunication est toujours en croissance.

Des innovations importantes dans les applications de communication et de navigation telles que les systèmes de charge utile par radiofréquence (**RF**), les charges utiles flexibles et les charges utiles régénératives avancées contribuent à la croissance de l'industrie. Cependant, les coûts élevés de conception et de fabrication devraient représenter un sérieux défi pour la croissance du marché au cours des prochaines années (voir figure 1.1)

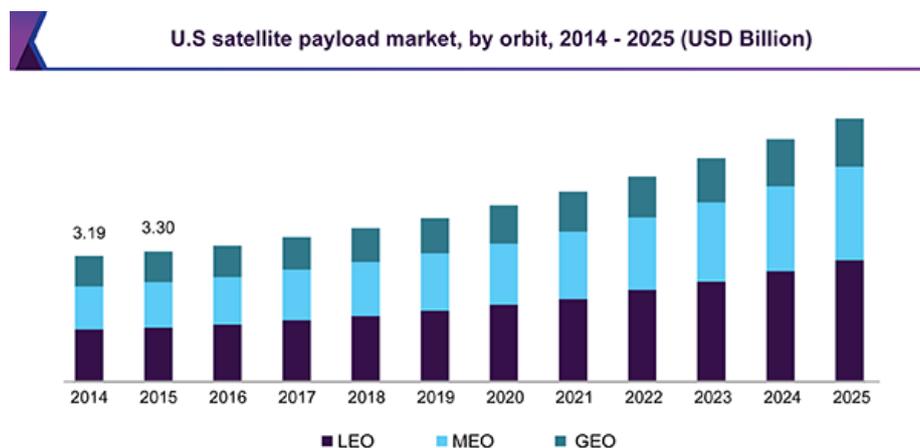


Figure 1-1: Évolution croissante de la demande des satellites [1]



Le segment des communications et de la navigation a contribué de manière significative à la croissance de l'industrie en 2016, le segment des télécommunications ayant connu une forte adoption de charges utiles flexibles. L'émergence des satellites à haut débit (HTS) est l'une des tendances clés qui anime le segment de la communication et de la navigation. La baisse significative du prix des données et l'augmentation massive de l'efficacité des CAPEX des satellites ont transformé l'industrie des communications.

Les charges utiles de communication ont été témoins de nouvelles tendances technologiques, notamment la canalisation, l'antenne à réflecteur gonflable spatiale, les routeurs Internet dans l'espace et le développement d'amplificateurs de puissance. Les charges utiles ont contribué à fournir des informations sur des domaines de niche tels que la couverture aérienne et maritime en s'intégrant aux systèmes terrestres.

Le secteur commercial a dominé l'industrie avec une part des revenus de plus de 30% en 2016. La demande accrue de charges utiles commerciales peut être attribuée au besoin croissant de services Internet à large bande et de vidéos haute définition. Le besoin de telles vidéos hautes définitions a augmenté la demande pour une plus grande capacité satellite, permettant aux joueurs d'élargir leurs flottes en orbite.

1.2 Naissance des communications par satellite :

Les communications par satellite sont le résultat de recherches dans le domaine des communications et des technologies spatiales, visant à atteindre des portées et des capacités de plus en plus grandes tout en réduisant les coûts. La Seconde Guerre mondiale a stimulé le développement de deux technologies très distinctes : les missiles et les micro-ondes. L'expertise acquise dans l'utilisation combinée de ces deux techniques a ouvert l'ère des communications par satellite. Ce service complète de manière utile les réseaux terrestres utilisant les ondes radio et les câbles, qui assuraient auparavant la majeure partie des communications [2].

L'ère spatiale a débuté en 1957 avec le lancement du premier satellite artificiel (Sputnik). Les années qui ont suivi ont été marquées par diverses expérimentations, notamment : les vœux de Noël du président Eisenhower diffusés par le satellite Score (1958), le satellite réflecteur ECHO (1960), la transmission différée par le satellite Courier (1960), les satellites relais alimentés (Telstar et Relay en 1962), et le premier satellite géostationnaire Syncom (1963) [2].



En 1965, le premier satellite commercial géostationnaire, Intelsat I (ou Early Bird), a inauguré une longue série de satellites Intelsat ; la même année, le premier satellite de communication soviétique de la série Molniya a été lancé [2].

1.3 Principes de base des télécommunications par satellite :

Le développement des télécommunications est une caractéristique fondamentale des sociétés modernes. Il conditionne de nombreux aspects de la vie du monde contemporain. Les télécommunications spatiales ont ainsi conduit à une amélioration et un développement considérable du téléphone, du télégraphe, de la télécopie, des téléconférences, la composition simultanée de journaux, les transmissions de données numériques entre filiales d'entreprises, et de nombreuses autres applications. Les télécommunications spatiales contribuent également à la sauvegarde de vies humaines en permettant la localisation rapide des appels de détresse.

Un satellite placé sur l'orbite géostationnaire couvre environ un tiers de la surface du globe terrestre. Il peut donc mettre en liaison des stations quelconques se trouvant dans cette zone. Cette possibilité a permis de mettre en place des télécommunications intercontinentales.

Les systèmes de télécommunications par satellite sont formés de plusieurs éléments : un élément spatial, un centre de contrôle et des infrastructures au sol. L'élément spatial comprend les satellites, qui servent de relais dans l'espace pour acheminer un signal en provenance d'un terminal terrestre vers un point de destination, finale ou intermédiaire, à la surface de la Terre. Le centre de contrôle au sol est chargé de surveiller l'état et la situation de chaque satellite ainsi que de le maintenir à sa place. Les infrastructures permettent de contrôler tout ce qui relève du réseau dans le système de télécommunications, d'enregistrer la durée d'une communication à des fins de facturation et d'attribuer des canaux de communication aux divers usagers (Voir figure 1.2).

Le domaine des satellites de télécommunications est très vaste. On convient de les classer selon le type de service qu'ils rendent :



- **Le service de communication avec les mobiles (MSS : Mobile Satellite Service)** pour les avions, les bateaux, les véhicules terrestres et les personnes. Exemple : le système de communications **INMARSAT** (INternational MARitime SAellite), le système américain de positionnement par satellite **GPS** (Global Positionning System) et le système européen Galiléo.
- **Le service fixe par satellite (FSS : Fixed Satellite Service)** pour la téléphonie fixe, la transmission de données et la télévision point à point. Exemples : les satellites Intelsat pour les réseaux mondiaux ou Télécom pour le réseau français.
- **La radiodiffusion directe par satellite (BSS : Broadcast Service Satellite)** pour la télévision directe et la radiodiffusion sonore.
- **La transmission de données à haut débit** (Internet, applications multimédia, télémédecine...).
- **Les télécommunications militaires** permettent de transmettre des informations sécurisées et protégées. Ils servent aussi à la reconnaissance, à l'alerte précoce, à la navigation et au positionnement.

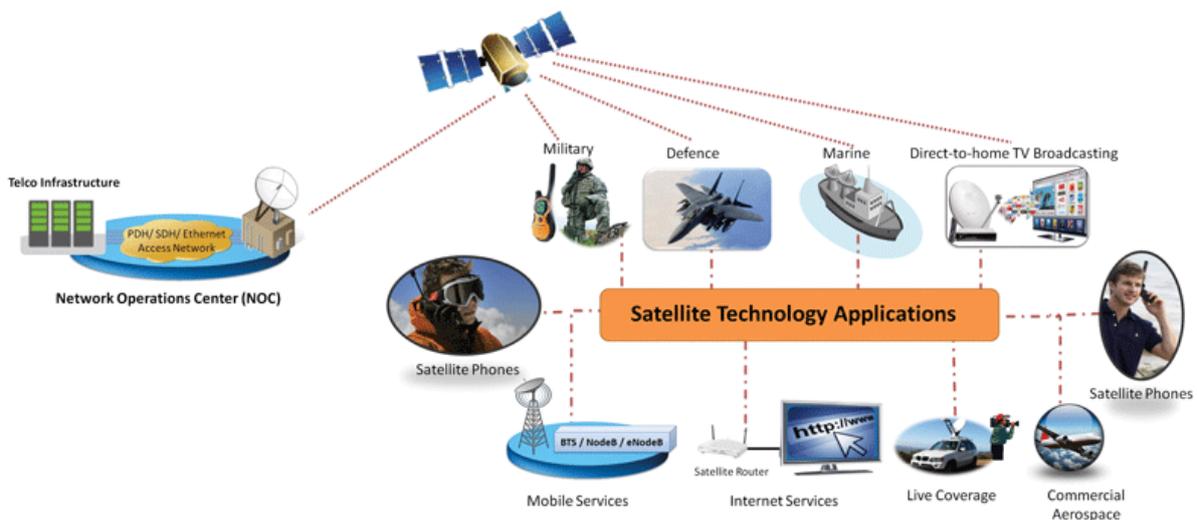


Figure 1-2: Communication par Satellite [3]



1.4 Règlements et bandes de fréquence :

Deux fréquences sont nécessaires pour la communication entre une station au sol et un satellite ; une pour la communication de la station terrestre vers le satellite, appelée la fréquence de liaison montante et une autre fréquence pour la communication du satellite à une station terrestre, appelée fréquence de liaison descendante. Ces fréquences, réservées à la communication par satellite, sont divisées en plusieurs bandes dans la gamme de fréquences gigahertz (micro-ondes) telles que les bandes L, S, Ku, etc. comme indiqué dans Le Tableau 1-1. En général plus la fréquence est élevée, plus la bande passante disponible est élevée [4].

• Règlements des radiocommunications :

La réglementation des radiocommunications est nécessaire pour assurer une utilisation efficace et économique du spectre des fréquences radioélectriques par tous les systèmes de communication par satellite et terrestres. Ce faisant, le droit souverain de chaque État de réglementer ses télécommunications doit être préservé. L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) a pour rôle de promouvoir, coordonner et harmoniser les efforts de ses membres en vue de la réalisation de ces objectifs éventuellement contradictoires [5].

Le Tableau 1-1 récapitule les différentes bandes de fréquences utilisées dans les télécommunications par satellite et présente les services et les fonctions associés ainsi que leur degré de saturation.

Tableau 1-1: Les principales bandes de fréquences des télécommunications par satellite.

Bande	Fréquence montante	Fréquence descendante	Type de service	Applications
P	200 – 400 MHz		MSS	Militaires
L	1,452 – 1,492 GHz		BSS	TV, radio
L	1,61 – 1,66 GHz	1.525 – 1.559 GHz	MSS	Services mobiles civils
S	2.67 – 2.69 GHz	2.16 – 2.52 GHz	BSS	TV, radio, data pour mobiles
C	5.7 - 7 GHz	3.4 – 4.8 GHz	FSS	TV, radio, data, internet
X	7.9 - 8.4 GHz	7.25 – 7.75 GHz	FSS	Radionavigation, data, Militaires
Ku	12.75 – 18.1 GHz	10.7 – 12.75 GHz	FSS/BSS	TV, radio, data, internet
Ka	27.5 – 31 GHz	17.7 – 21.2 GHz	FSS/MSS	Services IP, radio, data internet
Q & V	42.5 - 51 GHz	37.5 – 42.5 GHz	FSS	En développement



Les communications par satellite s'effectuent sur une large gamme de bandes de fréquences. Les bandes typiques considérées pour les petits satellites sont UHF, S, X et Ka. Ces dernières années, on a assisté à une évolution vers les bandes S et X, la bande Ka étant également utilisée pour les communications par petits satellites récentes et futures. Le passage à des bandes de fréquences plus élevées a été motivé par le besoin de débits de données plus importants. Aux fréquences plus élevées, l'atténuation due à l'atmosphère et à la pluie est généralement plus importante et s'ajoute à la perte d'espace libre. Ce phénomène doit être compensé par une transmission plus puissante et/ou des antennes à gain élevé avec des largeurs de faisceau plus étroites. Le passage à des antennes à gain plus élevé augmente la précision de pointage nécessaire pour fermer la liaison [6].

1.5 Architecture d'un satellite de télécommunication :

Pour répondre à de nombreuses applications, le satellite embarque une multitude d'équipements, il est essentiellement constitué de deux éléments comme présenté dans la (Figure 1-3) : une charge utile (PAYLOAD) constituée par les instruments liés aux objectifs de la mission et une plateforme de service comportant tout ce qui est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement des instruments pendant la durée de vie prévue. La plateforme regroupe principalement les sous-systèmes énergie de bord, propulsion, contrôle thermique, structure et mécanismes, TTC (télémessure, télécommande et localisation) et contrôle d'attitude et d'orbite [7–8].

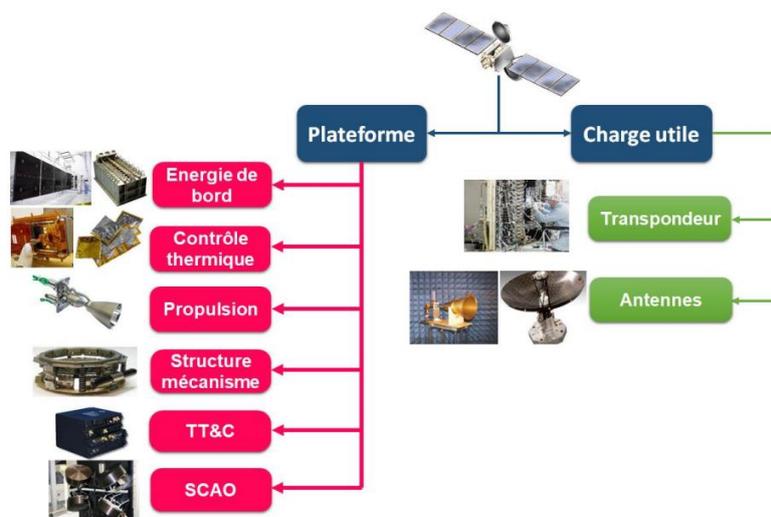


Figure 1-3: Architecture d'Un Satellite de Télécommunication Avec Ses Différents Sous-Systèmes.



La Figure 1-4 montre, à titre d'exemple, une vue éclatée du satellite HOT BIRD™ 6, construit par Alcatel Alenia Space [9].

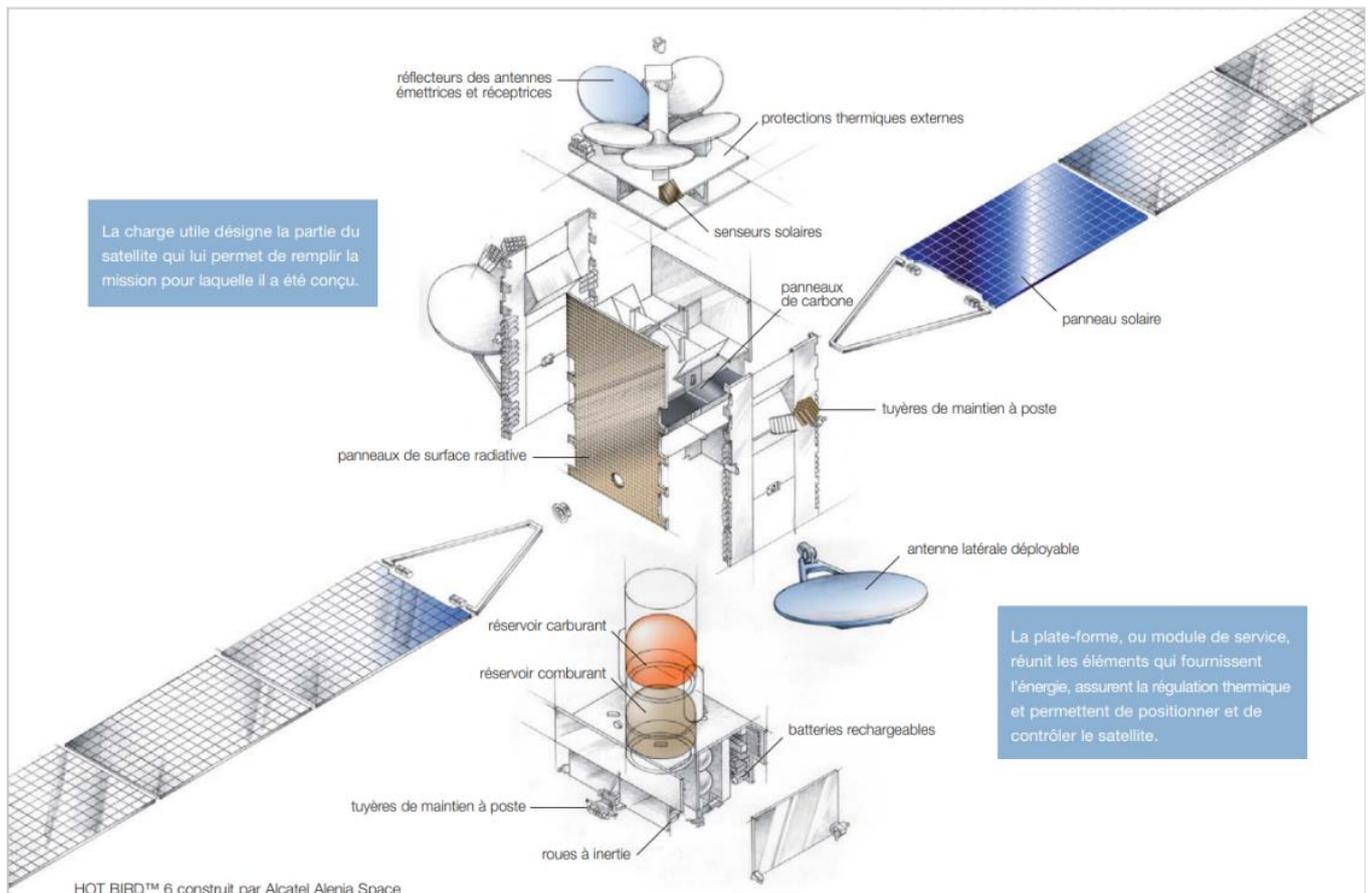


Figure 1-4 : Description d'un satellite de télécommunication [9].

1.5.1 La plate-forme :

La plate-forme (bus en anglais) assure des fonctions sans rapport direct avec la mission première du satellite mais lui permet de vivre dans l'espace sans intervention extérieure. Parmi les services fournis par une plate-forme, nous pouvons citer ceux qui permettent [8],[10],[11]

- ❖ D'assurer l'interface avec le lanceur (sous-système structure porteuse et mécanismes),
- ❖ D'isoler et contrôler thermiquement les parties sensibles du satellite,
- ❖ De contrôler l'attitude et la position orbitale (sous-système de contrôle d'attitude et d'orbite) en utilisant le sous-système de propulsion,



- ❖ De générer l'énergie électrique (via les panneaux solaires), la stocker (dans des batteries) et la distribuer vers les équipements,
- ❖ D'assurer les liaisons avec le sol pour le suivi (télémessures), le contrôle (télécommande) et la localisation par les responsables du projet.

Dans les satellites de télécommunication MEO et même dans les géostationnaires, en utilisant la propulsion chimique pour réajuster leur trajectoire, à peu près 50 % de leur masse est constituée par le propergol (Figure 1-5).



Figure 1-5: La plate-forme d'un satellite de télécommunication.

1.5.2 La Charge utile d'un Satellite Télécommunications :

Une charge utile de télécommunication a pour but d'assurer la réception et la réémission des signaux de télécommunication issus des stations terriennes de connexion au réseau, des terminaux utilisateurs et éventuellement d'un ou plusieurs satellites tiers. Les liaisons terminal/satellite et satellite/terminal sont couramment appelées « liaisons de service », les liaisons satellite/station de connexion au réseau et station de connexion au réseau/satellite sont appelées « liaisons de connexion » et les liaisons entre satellites sont appelées « liaisons inter-satellites ». Au satellite, la mise en œuvre de ces différentes liaisons se fait à l'aide d'équipements distincts adaptés à la fréquence porteuse, à la largeur de bande et éventuellement à la forme d'onde des signaux associés à ces liaisons. L'ensemble de ces équipements constitue la charge utile (CU) de télécommunication.

Par opposition à la plate-forme, la charge utile désigne quant à elle, la partie d'un satellite qui lui permet de remplir la mission pour laquelle il a été conçu. Elle a pour rôle d'échanger



avec le sol (par voie radioélectrique) les informations spécifiques de la mission. Elle comprend deux sous-systèmes : les antennes et les répéteurs ou transpondeurs.

1.5.2.1 Le sous-système d'antenne :

Les antennes satellites remplissent deux types de fonctions. Elles reçoivent des signaux en provenance d'une station terrestre et transmettent des signaux à une ou plusieurs stations terrestres en fonction des besoins. En d'autres termes, les antennes satellites captent des signaux montants et émettent des signaux descendants. On sait que la longueur des antennes satellites est inversement proportionnelle à la fréquence de fonctionnement. La fréquence de fonctionnement doit être augmentée afin de réduire la longueur des antennes satellites. Par conséquent, les antennes satellites fonctionnent dans une gamme de fréquences de l'ordre de Giga- Hertz.

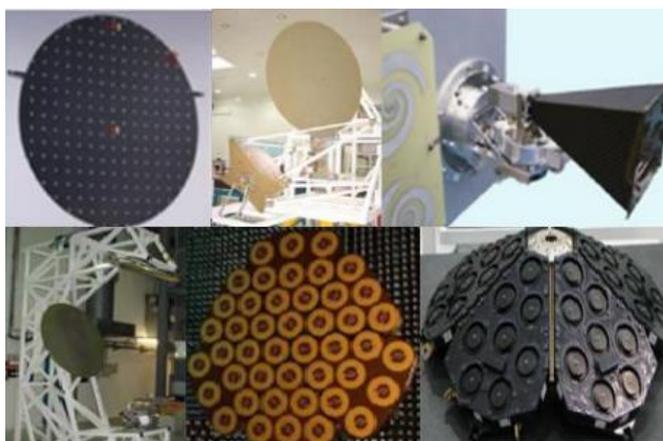


Figure 1-6: Antennes dans les satellites de télécommunications

Il y a principalement **quatre types of Antennes**. Elles sont :

1.5.2.1.1 Les antennes filaires

Une antenne filaire est un type d'antenne radio qui comprend un long fil suspendu au-dessus du sol. Le fil dans l'antenne capte les signaux et les rayonne plus loin.

Les antennes filaires ont été utilisées sur les premiers satellites opérationnels tels que INTELSAT I et II avec un gain d'antenne d'environ **4 dBi** pour la réception et environ **9 dBi** pour l'émission. Maintenant, elles sont principalement utilisées comme antennes de poursuite, de télémétrie et de commande (**TT&C**) en raison de leur largeur de faisceau.



Ces antennes sont classées en différents types (Figure 1-7) :

- Antenne dipôle courte.
- Antenne dipôle.
- Antenne boucle.
- Antenne dipôle demi-onde.
- Antenne trèfle.
- Dipôles à large bande.
- Antenne hélicoïdale.
- Antenne monopôle.
- Antenne dipôle repliée.



Figure 1-7: Les différents types des antennes filaires.

1.5.2.1.2 Les antennes à cornet

Une antenne cornet est un type d'antenne à ouverture spécialement conçue pour les fréquences micro-ondes. L'extrémité de l'antenne est élargie ou en forme de corne. En raison de cette structure, il y a une directivité plus grande de sorte que le signal émis peut être facilement transmis à de longues distances (Figure 1-8).

Les antennes cornet sont l'une des antennes directionnelles les plus simples. Selon leur forme, il existe plusieurs types d'antennes cornet : pyramidal, sectoriel, conique, double mode, ondulé, etc (Figure 1-10). Le cornet pyramidal et le cornet conique sont simples et faciles à fabriquer, mais ils ont l'inconvénient que le motif de rayonnement n'est pas circulairement symétrique et donc l'efficacité de l'antenne est faible. Ils sont également utilisés comme éléments de réseau d'antennes en réseau en raison de leurs petites tailles [12].

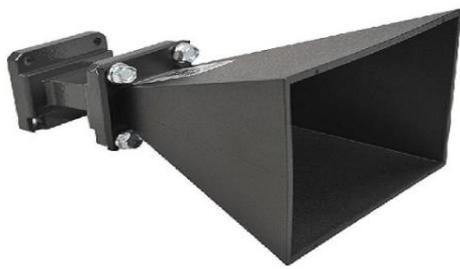


Figure 1-9: Une antenne cornet

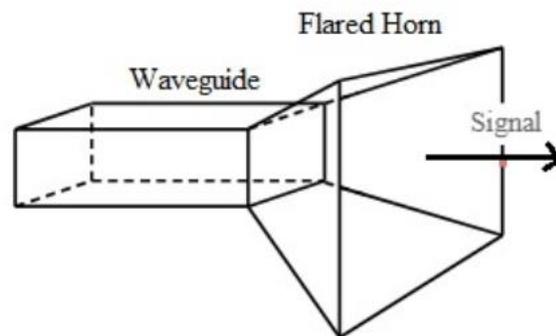


Figure 1-8: Conception d'une antenne à cornet

Les antennes cornet sont classées en différents types (Figure 1.10) :

- Antenne cornet pyramidal.
- Antenne cornet sectorielle.
- Antenne cornet conique.
- Antenne cornet exponentielle.
- Antenne cornet à rainures.

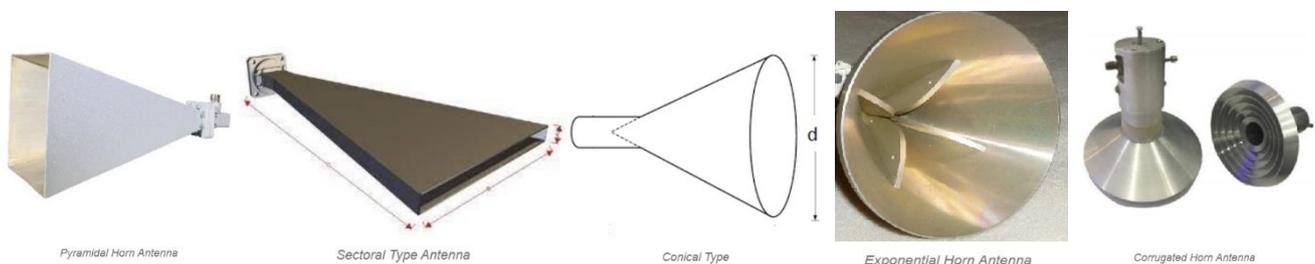


Figure 1-10: Les différents types des antennes cornet

1.5.2.1.3 Les antennes réflectrices

L'antenne réflectrice la plus simple se compose de deux composants : une surface réfléchissante et une antenne d'alimentation beaucoup plus petite au point focal du réflecteur. Les constructions plus complexes impliquent un réflecteur secondaire (un sous-réflecteur) au point focal, qui est éclairé par une alimentation primaire. Ceux-ci sont appelés antennes à double réflecteur [13].



Une antenne réflectrice est une antenne conçue pour réfléchir les signaux électromagnétiques incidents provenant d'une source distincte. Cette antenne est principalement conçue pour fonctionner à des fréquences micro-ondes élevées. Elle est très populaire dans les systèmes d'antennes des engins spatiaux en raison de sa légèreté et de la simplicité de sa structure. Cette antenne est composée de différents réflecteurs dont la surface est hyperbolique, parabolique, sphéroïde ou ellipsoïde. L'antenne parabolique est la plus fréquemment utilisée. Le diagramme de l'antenne à réflecteur est illustré ci-dessous (figure 1-11).

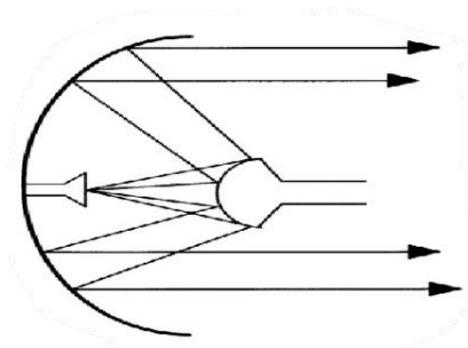


Figure 1-11: Diagramme de l'antenne à réflecteur

Les antennes réflectrices sont classées en différents types, et elles sont (Figure 1-12) :

- Réflecteur plan.
- Réflecteur d'angle.
- Réflecteur cylindrique.
- Réflecteur sphérique.
- Réflecteur parabolique.
- Réflecteur à tige.

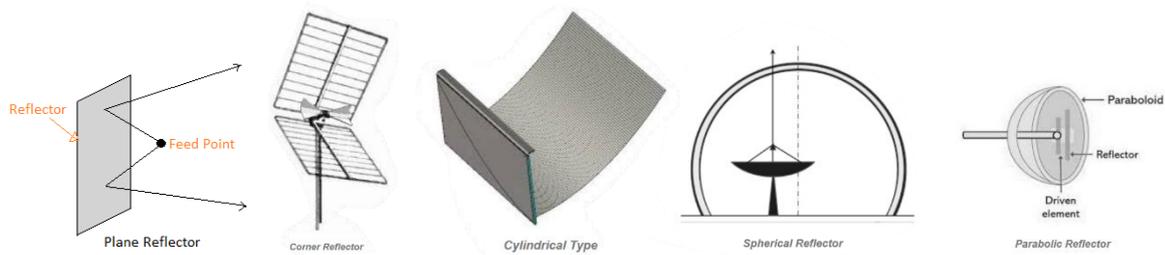


Figure 1-12: Les différents types des antennes réflectrices

1.5.2.1.4 Les antennes matricielles

Une antenne matricielle (ou antenne en réseau) est un ensemble de plusieurs antennes connectées qui fonctionnent ensemble comme une seule antenne, pour émettre ou recevoir des ondes radio. Les antennes individuelles (appelées éléments) sont généralement connectées à un seul récepteur ou émetteur par des lignes d'alimentation qui alimentent les éléments dans une relation de phase spécifique (Figure 1-13).

Une antenne matricielle peut atteindre un gain plus élevé (directivité), c'est-à-dire un faisceau d'ondes radio plus étroit, que ne pourrait être atteint par un seul élément. En général, plus le nombre d'éléments d'antenne individuels utilisés est grand, plus le gain est élevé et plus le faisceau est étroit [14].

Les antennes matricielles sont développées comme une architecture clé pour les systèmes de communication sans fil, avec des réseaux d'antennes **MIMO** (Multiple Input Multiple Output) inclus dans les normes pour les réseaux cellulaires et les réseaux locaux sans fil. Dans les communications par satellite **HTS** (High Throughput Satellite) de nouvelle génération, ces réseaux d'antennes actifs joueront un rôle fondamental [15].



Figure 1-13: Une Antenne Matricielle.



1.5.2.2 Le sous-système Transpondeur

Un transpondeur est un dispositif qui, lorsqu'il reçoit un signal, émet un signal différent en réponse. Le terme est une combinaison de transmetteur et de répondeur. Les transpondeurs sont généralement utilisés pour détecter, identifier et localiser des objets, mais ils peuvent également être utilisés dans d'autres technologies, telles que les satellites.

Un transpondeur satellitaire reçoit des signaux sur une gamme de fréquences montantes, généralement d'une station au sol du satellite ; le transpondeur les amplifie et les retransmet sur un ensemble différent de fréquences descendantes vers des récepteurs sur Terre, souvent sans changer le contenu du signal ou des signaux reçus [16] (Figure 1-14). Il sert à la communication par satellite pour la télévision, la radio, l'internet ou la téléphonie.



Figure 1-14: Transpondeur Spatiale en bande Ka

Un transpondeur satellitaire est composé de :

- Un filtre passe-bande d'entrée qui limite la bande de fréquence du signal reçu,
- Un amplificateur à faible bruit d'entrée qui amplifie le signal reçu de la station au sol (normalement très faible à cause de la grande distance),
- Un traducteur de fréquence qui convertit la fréquence du signal reçu en la fréquence du signal à émettre,
- Un filtre passe-bande de sortie qui limite la bande de fréquence du signal émis,
- Un amplificateur de puissance qui augmente la puissance du signal émis.

Un satellite de communication peut avoir plusieurs transpondeurs, chacun avec une bande passante de plusieurs mégahertz. Il existe différents types de transpondeur satellitaire selon le mode de transmission, la bande de fréquence et la bande passante utilisés.

Et on a deux modes:



- Le mode Bent-pipe (ou u-bend) est le mode le plus simple qui consiste à retransmettre le signal reçu sans modification. Il nécessite une synchronisation entre les stations au sol et le satellite.
- Le mode régénératif est le mode qui consiste à démoduler, décoder, recoder et moduler le signal à bord du satellite. Il permet d'améliorer la qualité du signal et de traiter les données de manière sélective. Il nécessite une puissance de traitement plus importante.

La bande passante est la largeur du canal ou du transpondeur utilisé pour transmettre le signal. Elle détermine le débit et le nombre de services possibles sur un transpondeur. Elle peut varier de quelques mégahertz à plusieurs dizaines de mégahertz selon le type de modulation et de codage utilisés [17].

Pour calculer la bande passante d'un transpondeur satellitaire, il faut connaître le débit de données, le facteur de modulation et les taux de correction d'erreurs utilisés pour le signal transmis. Il existe une formule de base pour calculer la bande passante du transpondeur :

$$SR = \frac{DR}{m \times CRv \times Crc}$$

Où :

SR = taux symbole, c'est-à-dire le nombre de symboles transmis par seconde en bauds

DR = débit de données, c'est-à-dire le nombre de bits transmis par seconde en bits par seconde (bps).

m = facteur de modulation, c'est-à-dire le nombre de bits codés par symbole selon le type de modulation utilisé (par exemple, $m = 2$ pour la modulation BPSK, $m = 4$ pour la modulation QPSK, etc.).

CRv = taux de correction d'erreurs Viterbi, c'est-à-dire le rapport entre le nombre de bits utiles et le nombre de bits codés par l'algorithme de Viterbi (par exemple, $CRv = 1/2$ signifie qu'un bit utile est codé par deux bits).

Crc = taux de correction d'erreurs Reed Solomon, c'est-à-dire le rapport entre le nombre de symboles utiles et le nombre de symboles codés par l'algorithme de Reed Solomon (par exemple, $Crc = 188/204$ signifie que 188 symboles utiles sont codés par 204 symboles).



Le répéteur ou (transponder) est constitué d'équipements de télécommunications situés entre l'antenne d'émission et celle de réception [8]. Le satellite doit avoir un très grand gain pour compenser des pertes en espace libre d'environ 200 dB sur les trajets montants et descendants. Ce gain est obtenu grâce aux antennes (Figure 1.6) et aux amplificateurs embarqués de la charge utile (Figure 1.14). Les paramètres qui dimensionnent celle-ci sont :

- La sensibilité d'entrée qui s'exprime par le facteur de mérite G/T , rapport entre le gain (G) de l'antenne de réception et la température équivalente de bruit total (T) du système ramené à l'interface de l'antenne (ce rapport devant être le plus élevé possible, on a tout intérêt à maximiser le gain de l'antenne),
- La puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) qui permet de caractériser la puissance rayonnée par l'antenne d'émission dans la zone de couverture et le niveau admissible des signaux parasites générés par le satellite. La charge utile est conçue pour limiter ce type de brouillages (ils sont directement liés aux caractéristiques des équipements de télécommunications qui constituent le sous-système répéteurs et sont d'autant plus importants que les puissances recherchées sont élevées. C'est pourquoi on trouve dans les satellites les technologies de transistors les plus évoluées et les composants à plus faible bruit. La recherche dans ce domaine est d'un intérêt capital pour améliorer les rapports signaux à bruits).

Les performances de l'antenne ont un impact direct sur la charge utile et sur l'ensemble du satellite en termes de coût. Du fait qu'en améliorant le rendement de l'antenne utilisée et par conséquent, son gain, il faudra fournir moins de puissance à la charge utile, et il sera possible de diminuer le nombre d'étages d'amplification et la consommation globale du système [2],[8].

Les transpondeurs satellitaires utilisent des codes pour identifier les signaux qu'ils reçoivent et qu'ils émettent. Ces codes sont appelés codes transpondeur ou TPE (transponder equivalent). Ils indiquent le nombre de transpondeurs utilisés si on utilisait seulement des transpondeurs de 36 MHz. Par exemple, le satellite ARSAT-1 à 24 transpondeurs en bande Ku : 12 avec une bande passante de 36 MHz, 8 avec 54 MHz et 4 avec 72 MHz, ce qui fait un total de 1152 MHz ou 32 TPE.



Figure 1-15 : charge utile du MEO (o3b) satellite Components – Photo [18].

Le schéma général de la figure 1.16 présente un synoptique d'une charge utile d'un satellite de télécommunications.

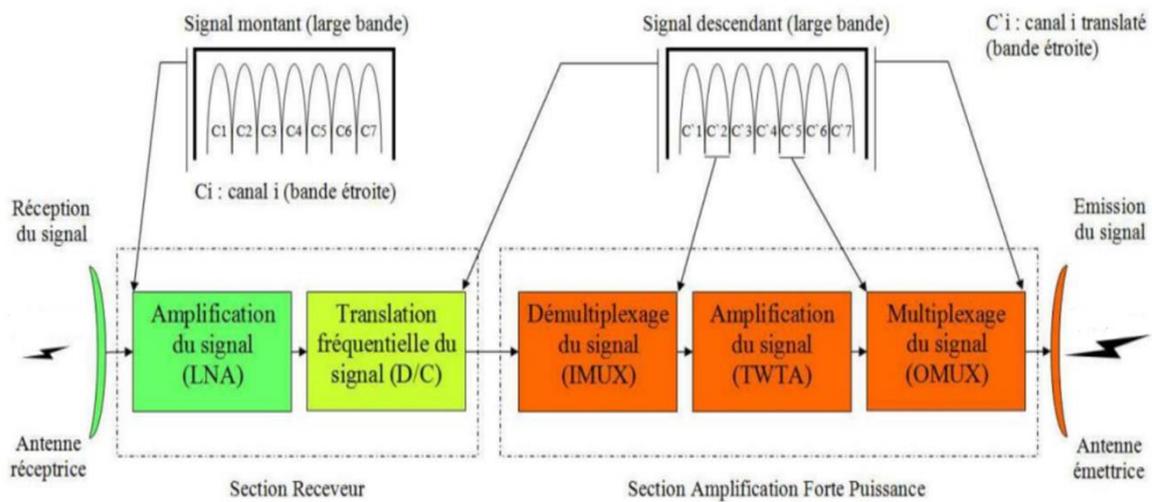


Figure 1-16: Synoptique simplifié d'une charge utile de satellite de télécommunications.



1.6 Classification des satellites de télécommunications

Il existe de nombreux types de satellites de télécommunications, dont la conception varie en fonction de leur fonction. Ils utilisent différentes orbites, différentes fréquences et transmettent des types de signaux très différents en utilisant une variété de niveaux de puissance. Les satellites sont généralement classés en un certain nombre de classes différentes en fonction de leur poids au lancement (ou masse séparée).

Ces catégories vont de 1200 kilogrammes et moins pour les petits satellites, de 1201 à 2500 kilogrammes pour les satellites moyens, 2501 à 4200 kilogrammes pour les satellites intermédiaires, 4200 à 5400 pour les grands satellites, 5401 à 7000 kilogrammes pour les satellites lourds et 7001 kilogrammes et plus pour les extra-lourds satellites (voir Table 2-1). De plus, la classe « petit » est encore divisée en six sous-catégories allant de Femto (moins de 0,1 kilogramme) à petit ou (small) (601 à 1 200 kilogrammes).

Tableau 1-2: Classification des différents types de satellites [19]

Classe	Kilogrammes
Femto	0.01 - 0.1
Pico	0.10 - 1.0
Nano	1.10 - 10
Micro	11.0 - 200
Mini	201 - 600
Small	601 - 1200
Medium	1201 - 2500
Intermediate	2501 - 4200
Large	4201 - 5400
Heavy	5401 - 7000
Extra Heavy	7001+

La différence de taille entre les plus grandes et les plus petites classes de satellites reflète une révolution dans la technologie satellite et d'un changement dans la conception des satellites



1.7 Les réseaux satellitaires

Actuellement, la majorité des principaux réseaux Internet, ainsi que les réseaux locaux, sont des réseaux câblés terrestres, tels que les réseaux à fibre optique, les réseaux câblés et les lignes téléphoniques, qui offrent également une connectivité sans fil.

Cependant, les chercheurs se penchent depuis plusieurs années sur la prochaine génération d'Internet, qui doit être capable de prendre en charge des applications à large bande passante et une informatique omniprésente grâce aux réseaux mobiles et sans fil. Parmi ces réseaux, les réseaux satellitaires offrent un énorme potentiel pour les applications multimédias, car ils sont capables de transmettre et de diffuser en simultané de grandes quantités de données sur une vaste étendue, permettant ainsi une connectivité mondiale

1.7.1 Qu'est-ce qu'un réseau de satellites ?

Un réseau de satellites est un système de communication de données qui utilise un ou plusieurs satellites de communication en orbite terrestre pour faciliter les transmissions. Il se compose de deux segments distincts : l'espace et le segment terrestre [20]

- Le segment spatial d'un réseau de satellites comprend le matériel du satellite lui-même ainsi que la charge utile de communication. L'équipement de communication intégré au satellite est utilisé pour transmettre et recevoir des signaux entre la Terre et l'espace. Dans le cas où le réseau satellite comprend plusieurs satellites, le segment spatial peut également inclure des liaisons de communication intersatellites (ICS) pour faciliter les communications entre les satellites.
- Le segment terrestre d'un réseau de satellites comprend des stations au sol, des téléports et des centres d'exploitation du réseau (CNO). Les stations au sol sont équipées d'antennes satellites, généralement de forme parabolique, ainsi que de matériels et logiciels de communication permettant de transmettre et recevoir des informations depuis les satellites. Les stations au sol servent également d'interface externe du réseau satellite lorsqu'elles sont connectées à d'autres réseaux en tant que routeurs et passerelles. De cette manière, le CNO contrôle le fonctionnement des satellites et gère les ressources du réseau



1.7.2 Les téléports satellites

Un téléport satellite est une installation terrestre qui fait partie intégrante du réseau mondial de satellites. Son rôle principal est de permettre aux réseaux terrestres d'accéder aux répéteurs d'antenne des satellites en orbite, situés à une altitude de 36 200 kilomètres au-dessus de l'équateur. Ces téléports sont stratégiquement situés à travers le monde afin d'établir une communication avec les satellites dans leur champ de vision

Dans un téléport satellite, on peut observer de grandes antennes paraboliques orientées vers le ciel depuis une position fixe, car les satellites avec lesquels elles communiquent sont en orbite géostationnaire. Cela signifie que le satellite reste toujours à la même position dans le ciel. Outre les antennes satellites, le téléport satellite comprend également des équipements réseau et des connexions à fibre optique qui relient le site aux centres de données.

1.8 Les modes d'accès dans les satellites de télécommunications :

Les modes d'accès sont des techniques qui permettent aux utilisateurs de communiquer avec les satellites de manière efficace et fiable. Ils sont conçus pour répondre aux besoins spécifiques des applications et des utilisateurs, en tenant compte de facteurs tels que la bande passante requise, le débit de données, la capacité du réseau et la gestion des ressources

Voici quelques-uns des modes d'accès couramment utilisés :

1.8.1 Les méthodes d'accès FAMA (Fixed Assignment Multiple Access):

Les méthodes d'accès FAMA (Fixed Assignment Multiple Access) sont des techniques utilisées dans les systèmes de communication pour attribuer de manière fixe des ressources de communication à chaque utilisateur. Dans les méthodes d'accès FAMA, les ressources de communication, telles que les fréquences ou les créneaux temporels, sont allouées de manière prédéterminée à chaque utilisateur et restent fixes pendant la durée de la communication.

1.8.1.1 L'Accès Multiple à Répartition en Fréquence (AMRF) ou FDMA:

Le premier mode d'accès utilisé, qui tend à devenir obsolète, convient particulièrement aux transmissions analogiques. Son principe consiste à diviser la bande passante du transpondeur du satellite en plusieurs sous-bandes, correspondant au nombre de stations du système de communication (par exemple, 500 sous-bandes de fréquence par transpondeur).



Chaque sous-bande est attribuée à une station, lui permettant d'émettre simultanément mais de manière indépendante des autres stations. Pour mettre en œuvre cette technique, chaque station est équipée d'un modulateur, d'un émetteur, de plusieurs récepteurs et de plusieurs démodulateurs. De plus, chaque satellite doit avoir la capacité d'amplifier simultanément les porteuses correspondant au nombre de stations.

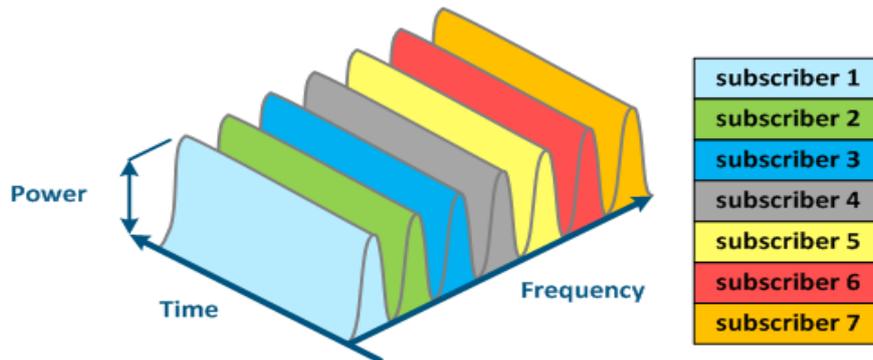


Figure 1-17: Slot Graphique de FDMA

1.8.1.2 L'Accès Multiple à Répartition dans le Temps (AMRT) ou TDMA:

Actuellement, cette méthode d'accès est largement utilisée dans les transmissions par satellite, offrant des performances bien supérieures à celles de l'AMRF. De plus, en cas d'ajout de nouvelles stations dans le système de communication, il est facile de créer de nouveaux intervalles de temps.

On peut distinguer deux types d'AMRT : l'AMRT statique, qui est le plus simple, et l'AMRT dynamique.

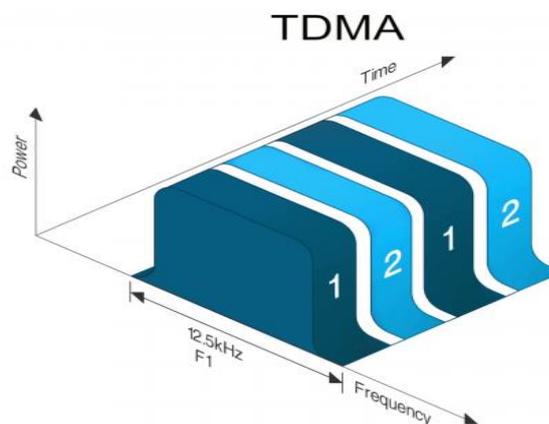


Figure 1-18: illustration graphique d'un slot codée par TDMA



a- L'AMRT statique :

Le concept de cette technique consiste à diviser le temps en plusieurs intervalles qui sont assignés aux stations terrestres. Dans ce cas, toutes les stations émettent sur le même canal avec la même fréquence, mais de manière successive, en utilisant la totalité de la bande passante. Contrairement à l'AMRF, les stations ne sont équipées que d'un récepteur-démodulateur. De plus, cette technique nécessite une station de synchronisation temporelle pour coordonner le début de chaque intervalle et éviter les chevauchements de signaux. Un intervalle est réservé à cet effet entre chaque tranche de temps. Chaque tranche de temps comprend un en-tête, dont les premiers bits sont utilisés pour l'acquisition des circuits de récupération de porteuse et de rythme du démodulateur. L'en-tête sert également à identifier la station émettrice. Plus les tranches de temps sont grandes, moins l'en-tête occupe d'espace par rapport aux données à transmettre, ce qui augmente le taux d'utilisation du canal satellite.

Cependant, des problèmes peuvent survenir si une station n'utilise pas son intervalle de temps pour émettre, entraînant une perte de cet intervalle. C'est ainsi que l'AMRT dynamique est introduite.

b- L'AMRT dynamique :

L'AMRT dynamique a été développée afin de permettre aux stations qui en ont réellement besoin d'accéder au canal. Dans l'AMRT statique, si une station ne transmettait pas de données pendant sa tranche de temps assignée, cette dernière restait inutilisée. L'objectif de cette technique est donc d'allouer des tranches de temps aux stations en fonction de leurs demandes et de leurs besoins. Cependant, cette allocation dynamique complexifie la gestion du système et entraîne un temps de réponse plus long, car il faut au moins deux échanges avant que les stations terrestres obtiennent les tranches de temps demandées de la part de la station de gestion. En résumé, la technique AMRT est simple et sa gestion est moins complexe que celle des méthodes ultérieures que nous aborderons. Cependant, son taux d'utilisation du canal est encore loin d'être optimal.

1.8.1.3 Accès multiple par répartition spatio-temporelle (STDMA) :

La STDMA est la généralisation pour les réseaux mobiles ad hoc du TDMA cellulaire avec le paradigme d'allocation de bande passante à réutilisation spatiale rencontré dans les réseaux TDMA cellulaires. Dans le STDMA, l'espace est divisé en cellules géographiques virtuelles appelées emplacements spatiaux qui sont regroupés dans des trames virtuelles périodiquement



répétées (trames spatiales) afin de faciliter la réutilisation spatiale, et des créneaux horaires sont attribués aux emplacements spatiaux (Figure 1-21). Chaque créneau horaire est conçu pour accueillir la transmission d'un paquet de taille fixe et d'un temps de garde correspondant au retard de propagation différentiel maximum entre les paires de nœuds du réseau.

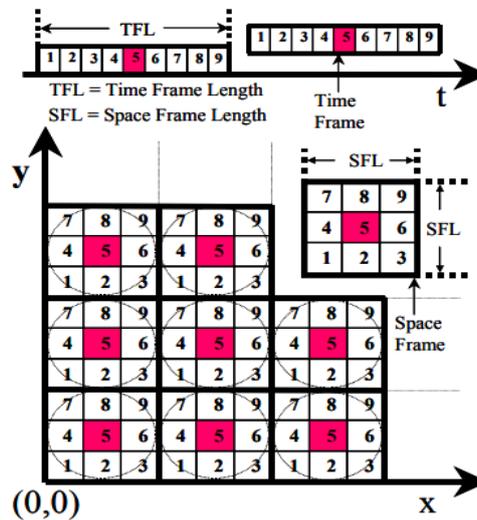


Figure 1-19: illustration graphique de STDMA

1.8.1.4 L'Accès Multiple à Répartition par Code (AMRC) ou CDMA :

La CDMA est une technologie largement utilisée dans les télécommunications par satellite pour permettre une communication efficace et simultanée entre plusieurs utilisateurs sur la même bande de fréquences. Dans les systèmes satellitaires basés sur le CDMA, chaque utilisateur se voit attribuer un code de répartition unique qui est utilisé pour moduler ses signaux (figure 1-20)

Le CDMA permet à plusieurs utilisateurs de transmettre leurs signaux simultanément en les répartissant sur une large bande passante. Les codes de répartition utilisés par différents utilisateurs sont conçus pour être orthogonaux, c'est-à-dire qu'ils ne s'interfèrent pas mutuellement. Cette propriété orthogonale permet au récepteur satellite de séparer et de démoduler les signaux individuels des utilisateurs, même en présence d'interférences, les satellites agissent comme des stations relais, recevant les signaux de plusieurs utilisateurs sur Terre et les retransmettant à leurs destinations respectives. Les codes de répartition sont utilisés pour distinguer les signaux des différents utilisateurs au niveau du satellite, garantissant ainsi une démodulation précise et une livraison aux destinataires prévus.

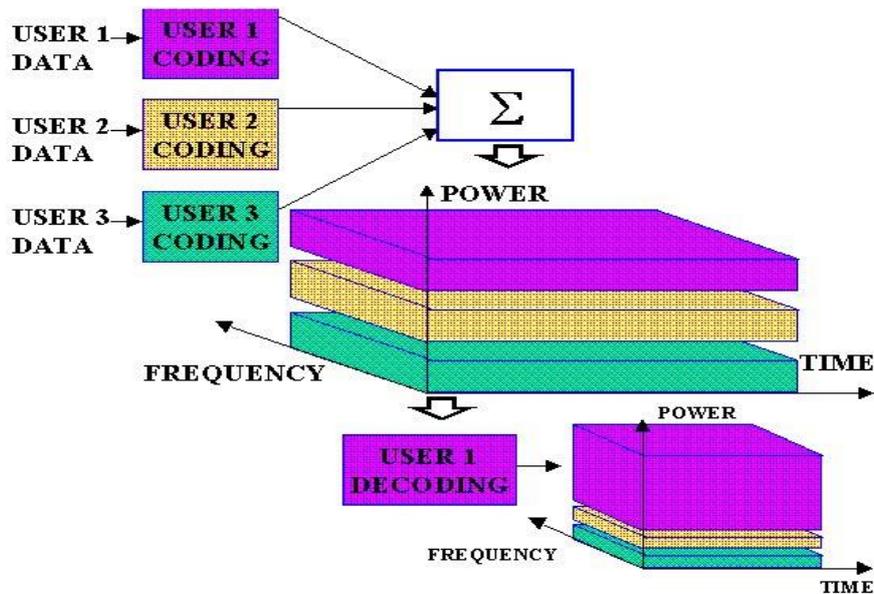


Figure 1-20: illustration graphique de CDMA.

1.8.1.5 Multiplexage par Code à Large Bande ou WCDMA :

L'acronyme WCDMA, qui signifie Wideband Code-Division Multiple-Access, est l'une des technologies principales utilisées dans les systèmes cellulaires de troisième génération (3GPP). Cette technologie a été développée pour répondre aux besoins des services multimédias qui nécessitent différentes qualités de service en termes de délais de transfert et de taux d'erreur binaire (BER).

Dans cette méthode d'accès multiple, les données de l'utilisateur sont étalées sur toute la bande passante disponible, qui est d'environ 5 MHz. Cette large bande passante permet de prendre en charge des débits utilisateur élevés et offre de bonnes performances grâce à la diversité de fréquences utilisée.

1.8.2 Les méthodes d'accès aléatoire :

Contrairement aux méthodes d'accès fixes, les méthodes d'accès aléatoire ne nécessitent pas une planification préalable des ressources pour chaque utilisateur.

Dans les méthodes d'accès aléatoire, les utilisateurs peuvent accéder au canal de communication de manière aléatoire, sans coordination centrale. Chaque utilisateur a une certaine probabilité d'accéder au canal, et en cas de collision (lorsque plusieurs utilisateurs tentent d'accéder au canal en même temps), des mécanismes de résolution de collision sont utilisés pour éviter les interférences et garantir une communication fiable.



- ❖ **Aloha** ; La politique d'accès utilisée repose sur le principe selon lequel chaque station et chaque satellite transmettent les informations dont ils disposent dès qu'ils sont prêts, sans vérifier la disponibilité du canal. Si une collision se produit entre deux signaux, ce qui peut être détecté seulement 480 ms après l'envoi des informations, la station ne renvoie pas immédiatement ses données pour éviter une nouvelle collision. Au lieu de cela, elle les renvoie après un délai défini de manière aléatoire.
- ❖ **Aloha par tranche** ; Aloha par tranche est une variante du protocole Aloha qui découpe le temps en tranches régulières. Dans cette méthode, les stations sont autorisées à émettre uniquement au début de chaque tranche de temps. Cela permet de détecter les collisions sur l'ensemble de la tranche, plutôt que sur quelques données seulement, ce qui réduit le risque de collisions au milieu d'un paquet d'informations.
- ❖ **Aloha par réservation** est une variante du protocole Aloha qui vise à améliorer l'efficacité et la gestion des collisions. Contrairement aux méthodes précédentes où les stations peuvent émettre à tout moment, Aloha par réservation introduit un mécanisme de réservation préalable du canal de transmission.

1.9 Les techniques dans la transmission par satellite :

1.9.1 Modulation :

Lorsqu'il n'y a que deux états du signal, c'est-à-dire 1 et 0, la modulation se fait en utilisant l'une des deux méthodes suivantes : Frequency Shift Keying (FSK) qui utilise deux fréquences porteuses, f_1 et f_2 , pour représenter les deux états, ou Phase Shift Keying (PSK) qui consiste à modifier la phase entre les deux états.

1.9.1.1 Frequency Shift Keying (FSK)

Le FSK est utilisé pour moduler les signaux numériques avant leur envoi via les ondes électromagnétiques vers le satellite. Le processus de modulation FSK consiste à alterner entre deux fréquences porteuses prédéterminées pour représenter les bits de données. Par exemple, une fréquence porteuse plus élevée peut être utilisée pour représenter un 1, tandis qu'une fréquence porteuse plus basse peut être utilisée pour représenter un 0.



1.9.1.2 Phase Shift Keying (PSK)

le PSK est utilisé pour moduler les signaux numériques avant leur envoi via les ondes électromagnétiques vers le satellite. Le processus de modulation PSK consiste à associer différentes phases de la porteuse à chaque état binaire. Par exemple, une phase de 0 degré peut représenter un 0, tandis qu'une phase de 180 degrés peut représenter un 1.

1.10 La correction d'erreur

La transmission d'informations par ondes électromagnétiques n'est pas exempte d'erreurs, en particulier lorsqu'elles traversent de longues distances, y compris l'atmosphère terrestre. Toutefois, ces erreurs surviennent généralement en groupe et de manière localisée

Pour remédier à cela, on utilise l'algorithme de correction d'erreur FEC (Forward Error Correction), qui permet d'améliorer les conditions de réception dans un canal satellite.

L'algorithme FEC introduit de la redondance d'information. Lorsque les données sont prêtes à être transmises, elles sont encodées à l'aide de l'algorithme FEC, puis le signal modulé est émis. Ce signal est soumis aux perturbations de l'atmosphère terrestre, ce qui entraîne des modifications légères. À la réception, le signal est démodulé et l'information est décodée à nouveau à l'aide de l'algorithme FEC. Étant donné que l'information est redondante, les données initiales peuvent être récupérées (avec une limite de seuil, bien sûr).

En utilisant le FEC, il est possible de détecter et de corriger les erreurs lors de la réception du signal. Cela permet d'améliorer la qualité de la transmission et de garantir une meilleure intégrité des données transmises. La redondance introduite par l'algorithme FEC joue un rôle crucial dans la correction des erreurs et assure une réception plus fiable des informations transmises via le canal satellite.

Il existe plusieurs types d'algorithmes FEC, notamment Reed-Solomon, Turbo Codes et Low-Density Parity Check (LDPC). Chacun de ces algorithmes fonctionne d'une manière légèrement différente, mais tous utilisent le même principe de base qui consiste à ajouter des données redondantes au message d'origine.



➤ Avantages de la FEC :

L'un des principaux avantages du FEC est qu'il est relativement peu coûteux à mettre en œuvre. Il ne nécessite pas non plus une grande puissance de traitement, ce qui permet de l'utiliser dans des dispositifs à faible puissance. De plus, il peut être utilisé dans pratiquement tous les types de systèmes de communication, y compris les réseaux sans fil.

➤ Limites du FEC :

Le FEC n'est pas parfait et ne peut corriger qu'un certain nombre d'erreurs. Il n'est pas non plus conçu pour corriger toutes les erreurs, car cela nécessiterait d'ajouter trop de données supplémentaires au message d'origine.

1.11 Conclusion :

En conclusion, l'étude générale des télécommunications par satellite nous a permis de comprendre différents aspects essentiels de cette technologie. Nous avons examiné les bandes de fréquences utilisées, qui sont réglementées par des normes internationales pour assurer une répartition efficace et éviter les interférences.

Nous avons également exploré les différents modes d'accès utilisés dans les communications par satellite, tels que l'AMRF, l'AMRT et l'AMRC, qui permettent de gérer la transmission des signaux entre les stations terrestres et les satellites de manière efficace.

En outre, nous avons étudié les principes de base des télécommunications par satellite, y compris la modulation et la correction d'erreur, qui sont des éléments clés pour assurer la qualité et l'intégrité des transmissions.

En ce qui concerne l'architecture des satellites de télécommunication, nous avons examiné les composants et les fonctions essentiels d'un satellite, tels que les transpondeurs, les antennes et les systèmes de contrôle, qui permettent de fournir des services de communication à partir de l'espace.

Enfin, pour améliorer les télécommunications par satellite, nous avons mentionné la solution O3b (Other 3 billion), qui propose un réseau de satellites en orbite moyenne (MEO) pour fournir une connectivité haut débit à des régions du monde qui ne sont pas suffisamment desservies par



les infrastructures terrestres. Cette solution permet d'offrir une connectivité fiable et à haut débit pour les services de communication, l'accès à Internet et d'autres applications dans des régions mal desservies.

les télécommunications par satellite sont un domaine complexe et en constante évolution, offrant des solutions de communication essentielles à l'échelle mondiale. Les avancées technologiques dans les bandes de fréquences, les modes d'accès, les réseaux satellites et les architectures de satellites continuent d'améliorer la qualité, la fiabilité et la portée des services de télécommunication par satellite. La solution O3b représente une étape importante vers une connectivité mondiale plus étendue et une inclusion numérique accrue.

Chapitre 02



2 Chapitre 02 : L'O3B mPOWER satellite :

2.1 Introduction à l'O3b mPOWER :

Le système O3b "Other 3 billion" (les autres 3 milliards), est un réseau de télécommunications par satellite conçu pour fournir une connectivité à haut débit dans les régions du monde qui n'ont pas un accès facile aux infrastructures terrestres traditionnelles. Son objectif principal est de combler la fracture numérique en offrant une connectivité fiable et rapide aux populations mal desservies.

Le concept O3b consiste à connecter ce qui n'est pas connecté. Les constellations en orbite terrestre géostationnaire (GEO), situées à 36 000 km au-dessus de la Terre, ont un délai d'acheminement plus long. Pour O3b, il exploite l'orbite terrestre moyenne (MEO) afin de réduire ce délai d'aller-retour - ou latence - et l'utilisation de la bande Ka. La capacité d'O3b à tirer parti de la faible latence de l'orbite terrestre moyenne et des capacités de débit élevé de la bande Ka nous permis de fournir des niveaux de connectivité sans précédent aux utilisateurs. Cela a rapidement fait d'O3b le plus grand fournisseur de services de données dans le Pacifique et l'opérateur de satellites à la croissance la plus rapide au monde.

L'O3b vise spécifiquement à fournir des services de communication aux deux tiers de la population mondiale qui n'ont pas accès à Internet ou à des services de télécommunication de haute qualité. Le système se concentre sur les régions éloignées, les îles, les zones rurales et les pays en développement, où les infrastructures terrestres sont limitées ou inexistantes

En utilisant une constellation de satellites en orbite terrestre moyenne (Medium Earth Orbit, MEO), le système O3b offre des performances similaires à celles des réseaux terrestres à fibre optique, avec des débits élevés et une faible latence. Les satellites O3b sont positionnés à une altitude d'environ 8 000 kilomètres, ce qui permet de réduire considérablement la latence par rapport aux satellites en orbite géostationnaire (GEO)[25].

Il y a ensuite le "O3B mPOWER" qui constitue la deuxième génération de satellites MEO de SES, offrant une plus grande flexibilité, performance et échelle que la première génération (Figure 2-1). Selon Stewart Sanders, EVP of Technology chez SES, "avec O3b mPOWER, nous capitalisons sur notre constellation MEO O3b existante, mais nous augmentons considérablement nos capacités." Aujourd'hui, O3b MEO est capable de fournir 10 faisceaux utilisateurs par satellite. Avec O3b mPOWER, nous serons en mesure de fournir des milliers de faisceaux utilisateurs par satellite."[26]

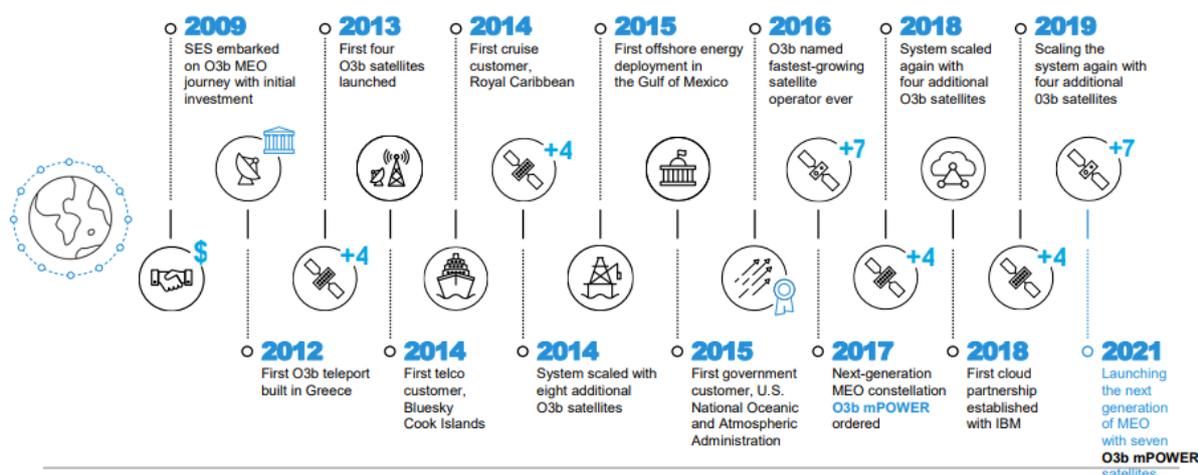


Figure 2-1: The Journey MEO to mPOWER

le système O3b mPOWER de satellites de communication actuellement en construction et en déploiement. Les deux premiers satellites ont été lancés le 16 décembre 2022 et les troisième et quatrième satellite ont été lancés avec succès le 28 avril 2023 à l'aide d'une fusée **Falcon 9** depuis le complexe de lancement spatial 40 (SLC-40) de la station spatiale de Cap Canaveral en Floride (États-Unis). Le service commercial devrait commencer au troisième trimestre 2023. De propriété et exploité par SES, O3b mPOWER comprend initialement 11 satellites à haut débit et à faible latence en orbite terrestre moyenne (MEO), ainsi qu'une infrastructure au sol et un logiciel intelligent, pour fournir plusieurs téraoctets de connectivité à large bande mondiale pour des applications telles que le backhaul cellulaire vers des emplacements ruraux éloignés et le trunking IP international simultané. Les satellites O3b mPOWER utilisent des faisceaux ponctuels entièrement modulables et orientables qui peuvent être déplacés et ajustés en temps réel pour s'adapter aux besoins individuels des utilisateurs. Depuis l'orbite MEO, les satellites O3b mPOWER peuvent fournir une connectivité à large bande entre les latitudes 50° N et 50° S (couvrant 96% de la population mondiale) vers des terminaux mobiles et/ou éloignés.

Ce système peut fournir des centaines de gigabits par seconde de capacité, avec des capacités multi téraoctets sur l'ensemble du système, grâce à ses satellites qui peuvent fournir jusqu'à 5000 faisceaux ponctuels adaptés aux besoins des utilisateurs. Il assure également une faible latence et une disponibilité de service inégalée, en utilisant le spectre Ka-band complet et en exploitant l'orbite MEO. Il peut fournir des services de connectivité aux organisations gouvernementales et aux entreprises basées dans les régions les plus reculées, ainsi que des



services à faible latence qui peuvent rapidement rétablir les réseaux de communication critiques en cas de catastrophes naturelles. Enfin, il offre une flexibilité unique aux utilisateurs, qui peuvent contrôler leur bande passante et le segment spatial avec des satellites définis par logiciel.

Fabriqués par Boeing et lancés par SpaceX, les satellites O3b mPOWER réunissent plus de 30 partenaires de technologies allant des systèmes sol (par ex., Intellian, AvL, Isotropic Systems, Gilat, ST Engineering iDirect, Comtech) aux développements logiciels (Amdocs, Kythera Space Solutions, Microsoft).[25]

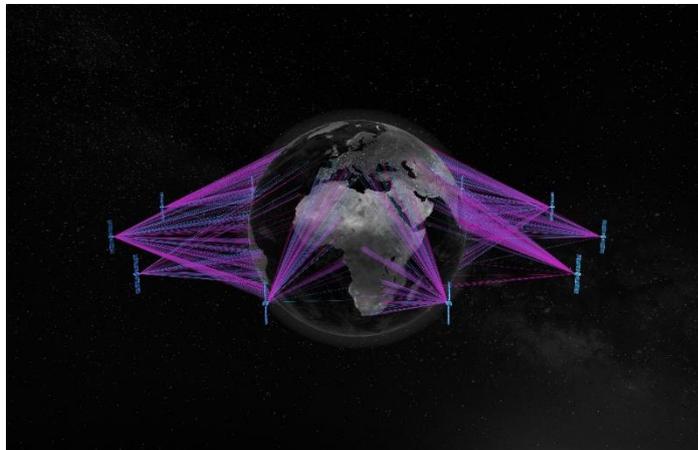


Figure 2-2: L'O3b mPOWER Constellation Africa [27].

2.2 Architecture du système O3b mPower :

2.2.1 Présentation de l'architecture générale du système O3b mPOWER :

La technique O3b mPOWER repose sur une architecture innovante et efficace pour fournir une connectivité mondiale haut débit. Et en somme, L'architecture du système O3b mPOWER est construite autour de trois composants clés : la constellation de satellites, les stations au sol et les terminaux utilisateurs. Chacun de ces éléments joue un rôle crucial dans la mise en œuvre de ce réseau de communication avancé. O3b mPOWER se positionne ainsi comme une solution novatrice pour répondre aux besoins croissants de connectivité dans un monde de plus en plus interconnecté.



La constellation de satellites occupe une position centrale dans l'architecture d'O3b mPOWER. Positionnée en orbite terrestre moyenne, à environ 8 000 kilomètres d'altitude, cette constellation est conçue pour fournir une connectivité mondiale étendue. Les satellites O3b mPOWER utilisent des trajectoires orbitales spécifiques qui les maintiennent au-dessus de l'équateur, permettant ainsi une couverture efficace des régions éloignées et mal desservies. Cette configuration optimisée garantit des latences réduites et une vitesse de transmission élevée pour des communications en temps réel.

Les stations au sol constituent un autre élément vital de l'architecture. Stratégiquement positionnées à des emplacements clés autour du globe, ces stations sont équipées d'antennes à haut gain. Ces antennes permettent d'établir des liaisons montantes et descendantes avec les satellites en orbite, assurant ainsi la communication fluide entre le réseau au sol et la constellation spatiale. De plus, ces stations jouent un rôle essentiel dans la gestion du trafic de données, garantissant une utilisation optimale des ressources disponibles.

Enfin, les terminaux utilisateurs complètent l'architecture d'O3b mPOWER. Ces terminaux, déployés chez les clients et les utilisateurs finaux, sont conçus pour se connecter au réseau satellite. Ils sont conçus pour fournir une connectivité à large bande, des performances fiables et une latence minimale. Les terminaux sont adaptés à une variété d'applications, allant des services Internet haut débit aux communications critiques en temps réel dans des secteurs tels que l'aviation, la navigation maritime et les services gouvernementaux.

Les clients d'O3b mPOWER peuvent bénéficier d'une bande passante globale de plusieurs téraoctets pour des applications variées, telles que la téléphonie mobile, l'accès à Internet en zones rurales, les communications gouvernementales ou les services maritimes. Ils peuvent également profiter d'une latence aller-retour inférieure à 150 millisecondes et d'une disponibilité de service garantie [29].

2.2.2 Description des composants du système O3b mPOWER :

L'architecture du système O3b mPOWER combine plusieurs éléments pour offrir une connectivité haut débit fiable et à faible latence aux régions qui en ont besoin, contribuant ainsi à réduire la fracture numérique et à améliorer l'accès à l'Internet dans des zones reculées ou mal desservies .

Voici les éléments clés de l'architecture du système O3b mPOWER :



2.2.2.1 Satellites O3b mPOWER :

Les satellites O3b mPOWER sont les composants clés du système. Ils sont positionnés en orbite terrestre moyenne (MEO) et fonctionnent en tant que relais de communication entre les terminaux utilisateurs au sol et les passerelles terrestres. Ces satellites utilisent des faisceaux à haute capacité pour fournir une large couverture géographique et des débits de données élevés. Les satellites O3b mPOWER intègrent des technologies de pointe pour offrir des performances optimales, réduire la latence et maintenir une connectivité stable[26].

L'architecture du satellite du système O3b mPOWER est composée de plusieurs éléments et équipements clés qui travaillent ensemble pour fournir une connectivité Internet haut débit et à faible latence. Voici les principaux équipements et composants de l'architecture du satellite O3b mPOWER :

- **Charge utile (Payload) :** La charge utile du satellite O3b mPOWER est l'ensemble des équipements et des systèmes dédiés à la communication. Elle comprend des antennes, des émetteurs-récepteurs radio, des processeurs de signal et des dispositifs de formation de faisceaux.

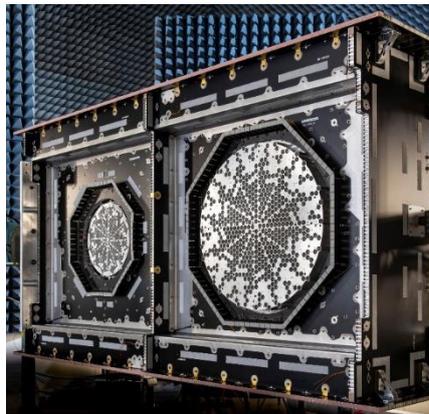


Figure 2-3: La charge utile intégrée o3b mPOWER [28].

- **Antennes à haute performance :** Les satellites O3b mPOWER sont équipés d'antennes paraboliques à haute performance qui permettent d'établir des liaisons de communication avec précision vers les terminaux au sol (voir Figure 2-4). Ces antennes peuvent être orientées de manière dynamique pour suivre les mouvements des utilisateurs et optimiser la qualité du signal.

les équipes technologiques de SES testent une variété de terminaux intégrés, y compris des terminaux de passerelle(gateway) d'Intellian et de Comtech, des antennes maritimes d'Orbit, des panneaux plats optiques d'Isotropic Systems, ainsi que d'autres antennes de fabricants



tels que ViaSat, AvL et GetSat. Ces sociétés co-développent des antennes avec SES afin d'offrir un nouveau niveau de capacités de communications interopérables à travers le système O3b mPOWER pour les clients des secteurs de l'entreprise, du gouvernement et de la mobilité.

Les satellites sont équipés d'une antenne permettant de pointer 5000 faisceaux distincts fournissant chacun avec un débit de 50 mégabits par seconde . Le temps de latence (aller-retour) est inférieur à 150 millisecondes et un client donné peut disposer d'un débit de plusieurs gigabits par seconde[32]. Ces antennes peuvent offrir une couverture étendue entre les latitudes 50° N et 50° S.



Figure 2-4: O3B mPOWER passerelle in Greece

- **Émetteurs-récepteurs (Transceivers) :** Les émetteurs-récepteurs radio à bord des satellites assurent la transmission et la réception des signaux de communication. Ils opèrent dans la bande de fréquences Ka, permettant des débits de données élevés.
- **Processeurs de signal :** Les processeurs de signal à bord traitent les données et les signaux reçus des terminaux au sol. Ils effectuent des opérations de modulation, de démodulation, de correction d'erreurs et d'autres traitements pour assurer une communication fiable.
- **Systèmes de formation de faisceaux (Beamforming Systems) :** Les satellites O3b mPOWER utilisent des systèmes de formation de faisceaux pour concentrer la puissance du signal vers des zones spécifiques de la Terre. Cela permet d'optimiser la connectivité en dirigeant la capacité là où elle est nécessaire.
- **Systèmes de gestion et de contrôle :** Les satellites O3b mPower utilisent un système logiciel appelé Adaptive Resource Control (ARC). L'ARC permettra une gestion dynamique des demandes de services et des ressources disponibles en orbite et au sol. SES travaille sur



l'ARC avec Kythera Space Solutions depuis septembre 2019, date à laquelle ils ont annoncé conjointement le développement.

- **Batteries et panneaux solaires :** Pour alimenter les équipements à bord du satellite, celui-ci est équipé de panneaux solaires qui convertissent l'énergie solaire en électricité. Les batteries stockent l'énergie pour une utilisation pendant les périodes où le satellite est dans l'ombre de la Terre.
- **Systèmes de communication inter-satellites :** Certains satellites O3b mPOWER peuvent être équipés de capacités de communication inter-satellites pour améliorer la coordination entre les satellites de la constellation et faciliter le transfert de données.
- **Systèmes de propulsion :** le satellite O3b mPower est doté d'un système de propulsion entièrement électrique, de panneaux solaires personnalisés fabriqués par Spectrolab et de la charge utile 702X définie par logiciel.
- **Systèmes de redondance :** Pour garantir la fiabilité du service, les satellites O3b mPOWER comportent des mécanismes de redondance, tels que des systèmes de contrôle de l'attitude et des composants de rechange, permettant de faire face à d'éventuelles défaillances.

L'ensemble de ces équipements et composants est conçu pour assurer une connectivité Internet haut débit stable, à faible latence et à large bande passante à travers les faisceaux de communication à haute capacité des satellites O3b mPOWER.

2.2.2.2 Les stations au sol

Alors que les nouveaux satellites et les nouvelles capacités dans l'espace suscitent toujours un grand enthousiasme, la volonté de créer une infrastructure au sol améliorée et plus efficace est également mise en avant. SES a construit les huit premières stations terrestres du satellite O3b mPOWER. La construction de ces stations terrestres de technologie avancée a déjà commencé et elles seront opérationnelles au cours du second semestre de cette année(2023). Les huit sites fourniront des capacités de télémétrie, de suivi et de contrôle pour permettre à SES de gérer la constellation en orbite terrestre moyenne (MEO) [30].

Deux des stations terrestres sont situées à Dubbo, NSW, Australie (exploitées par Pivotel) et Thermopylae, Grèce (exploitées par OTE). Les autres sites sont Merredin à Perth, en Australie, Phoenix, en Arizona, le Chili, les Émirats arabes unis, le Sénégal, ainsi que la station terrestre de SES à Hawaï. Quatre des huit sites seront colocalisés et exploités avec les centres de données Azure de Microsoft [30].



Cependant, cela ne signifie pas que ce sont les seules passerelles d'O3b mPOWER, d'autres seront annoncées ultérieurement. Le concept des passerelles O3b mPOWER change de manière significative puisque les satellites O3b mPOWER ont des charges utiles entièrement numérisées et des capacités de formation de faisceau complètes. La flexibilité de la charge utile O3b mPOWER est telle que n'importe quel point peut être connecté à n'importe quel point dans le champ de vision du satellite, ce qui signifie que n'importe quel point d'extrémité peut également être une passerelle si la prestation de service l'exige.

Les stations terrestres du satellite O3b mPOWER présentent de nombreuses caractéristiques techniques avancées par rapport aux stations terrestres existantes du satellite O3b. Elles comprennent une nouvelle génération d'antennes en fibre de carbone de 5,5 mètres à installation rapide, qui peuvent être installées sans qu'il soit nécessaire de recourir à une photogrammétrie coûteuse et fastidieuse. En outre, elles utiliseront des amplificateurs de puissance à semi-conducteurs économes en énergie et une faible charge électrique pour l'unité de contrôle d'antenne (ACU).

Les stations terrestres du satellite utiliseront le système de gestion des passerelles de SES pour des opérations et des transferts automatisés, qui sont étroitement intégrés avec la capacité unique de gestion des ressources de SES, Adaptive Resource Control (ARC) et d'autres sous-systèmes logiciels de SES. Grâce à cette configuration, SES peut gérer et optimiser dynamiquement les ressources spatiales et terrestres pour répondre aux besoins changeants de ses clients. Ces avancées technologiques combinées permettent d'améliorer l'efficacité et de réduire le coût total de possession.

Les passerelles O3b mPOWER sont différentes des passerelles de données pures. Contrairement à ces dernières, où l'on construit des passerelles pour fournir un support client ou être connecté à d'autres infrastructures, les passerelles O3b mPOWER sont également destinées à des fins de TT&C. Cela signifie que les passerelles doivent être situées à des endroits stratégiques, afin de maintenir le contrôle des satellites O3b mPOWER. Cela signifie que les passerelles doivent être situées à des endroits stratégiques, de manière à pouvoir maintenir la commande et le contrôle des satellites O3b mPOWER. Étant donné la nature dynamique des satellites O3b mPOWER, qui peuvent se reconfigurer de manière flexible pour répondre aux besoins des clients, l'emplacement de ces passerelles a dû faire l'objet d'un processus assez rigoureux. Ils se sont assurés d'avoir des choix alternatifs pour chacune d'entre elles et ont examiné divers aspects tels que le partenaire et les entreprises avec lesquelles ils travaillent,



l'emplacement, l'historique du partenariat, l'infrastructure, la tarification, la connectivité à la fibre, les coûts de la fibre, etc. Tous ces facteurs ont été pris en considération lors du choix.

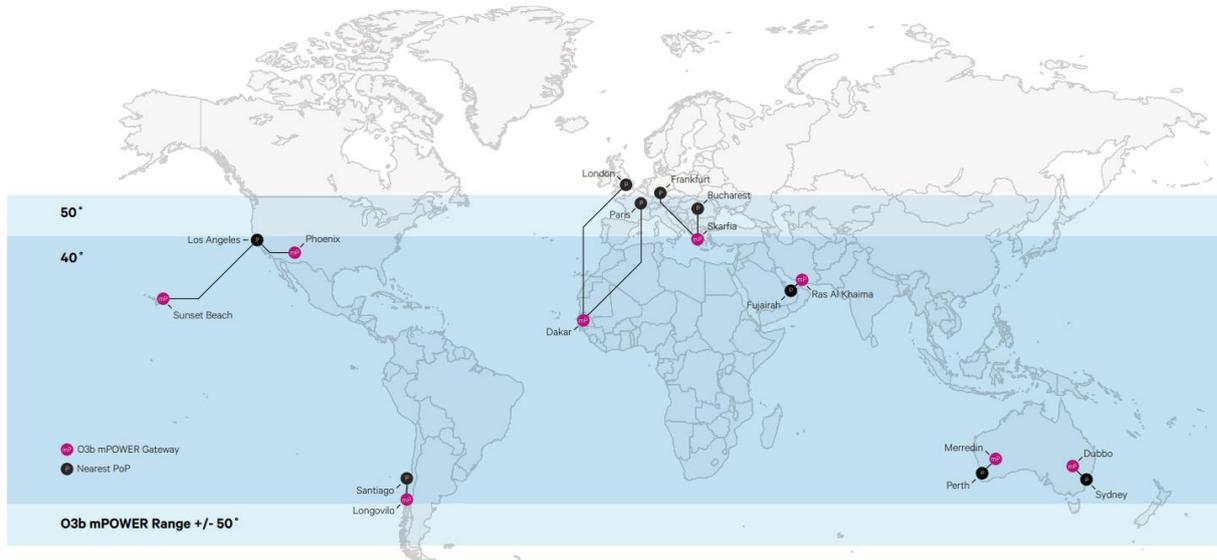


Figure 2-5: O3b-mPOWER couverture globale.

2.2.2.3 Les terminaux utilisateurs

Les terminaux utilisateurs sont des antennes plus petites qui permettent aux clients d'accéder aux services de connectivité à haut débit et faible latence offerts par le système de télécommunications par satellite de nouvelle génération d'SES.

Voici les principaux composants de l'architecture du terminal utilisateur d'O3b mPOWER :

- **L'antenne** : est le dispositif qui reçoit et émet les signaux des satellites O3b mPOWER en orbite terrestre moyenne (MEO). Elle peut être fixe ou mobile, selon les besoins des clients. Elle est conçue par différents partenaires technologiques d'SES, comme Intellian, AvL, Isotropic Systems, Gilat et ST Engineering iDirect. Elle est compatible avec les standards du marché, comme le DVB-S2X et le Mx-DMA [31].
- **Le modem** est le dispositif qui convertit les signaux analogiques en signaux numériques et vice versa. Il assure également le chiffrement, la compression, la modulation et la démodulation des données. Il est fourni par des partenaires comme ST Engineering iDirect, Newtec et Gilat. Il peut supporter des débits allant jusqu'à 50 mégabits par seconde par faisceau.



- **Le routeur** est le dispositif qui assure la connexion entre le terminal utilisateur et le réseau local ou Internet. Il gère le routage, la qualité de service, la sécurité et la configuration du réseau. Il peut être intégré au modem ou être un équipement séparé. Il peut être fourni par des partenaires comme Cisco, Juniper ou MikroTik.
- **Le logiciel intelligent** est l'application qui optimise l'utilisation des ressources du système O3b mPOWER et offre une expérience personnalisée aux clients. Il est développé par des partenaires comme Amdocs, Kythera Space Solutions et Microsoft[31]. Il permet de reconfigurer les faisceaux satellitaires, d'adapter la bande passante aux besoins des clients, de gérer les services et les facturations, et d'intégrer le système O3b mPOWER avec d'autres réseaux.

Le terminal utilisateur d'O3b mPOWER est donc un élément clé pour fournir une connectivité à haut débit et faible latence à travers le monde. Elle est basée sur une collaboration étroite entre SES et ses partenaires technologiques.

Et en général, le terminal d'utilisateur pour les données fixes se compose des entités physiques suivantes :

- Modem - Au minimum un par poste distant avec possibilité d'agrégation
- Gestionnaire de terminal (TMR) - Peut résider sur le modem ou être un dispositif autonome.
- Antennes - Une ou plusieurs par télécommande.
- Émetteurs-récepteurs de radiofréquences (RF) - Un par antenne ou, à défaut, un convertisseur de bloc ascendant séparé et (BUC) convertisseur ascendant à faible bruit (LNB).

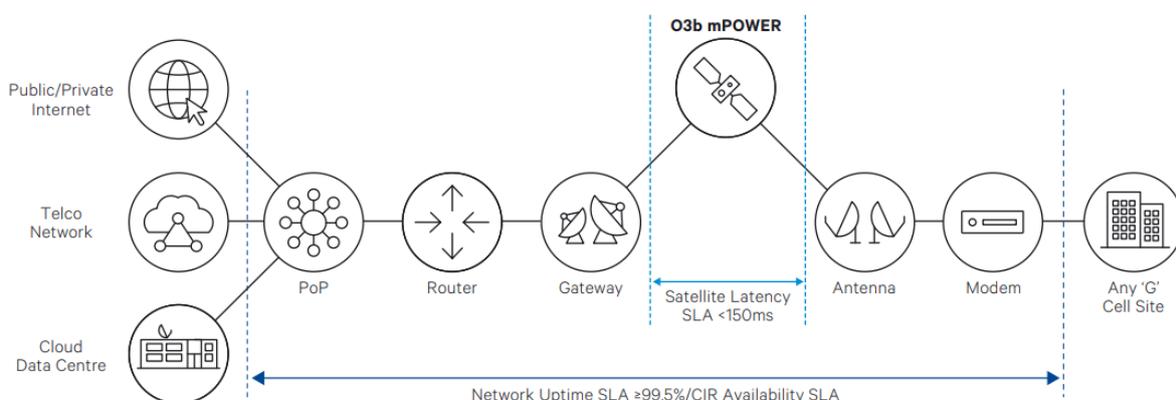


Figure 2-6: Extension du réseau central de l'opérateur de réseau mobile avec Mobile Backhaul mPOWERED.



2.2.2.3.1 Les terminaux au sol O3b mPOWER :

Les terminaux au sol sont un composant essentiel du système, permettant aux utilisateurs de se connecter aux satellites et d'accéder au réseau. Les terminaux sont conçus pour être installés par des équipes locales accréditées par SES en seulement une journée . Les systèmes terrestres sont constamment innovés avec des partenaires technologiques pour établir de nouvelles normes de performance et de fiabilité. Les nouveaux systèmes de terminaux permettent une bande passante avec une grande variété de tailles et de formes d'antennes. Pendant ce temps, les utilisateurs peuvent choisir d'atterrir le trafic sur une passerelle gérée ou privée, ou sur un centre de données cloud[33] .Voir les principaux terminaux au sol du SES pour l'O3b mPOWER en annexe A :

2.2.2.3.2 Terminal utilisateur Transferts et commutations :

Les transferts sont essentiels à la continuité du service sur l'ensemble de l'orbite MEO. Le TMR gère les scénarios de transfert et de basculement suivants via la commande OpenAMIP :

✚ Transferts de satellite à satellite :

Les transferts programmés/planifiés dans le cadre de l'orbite normale de la constellation, qui peuvent être "Make Before Break" (MBB) ou "Break Before Make" (BBM).

- L'MBB assure une transition transparente (pas de perte de connectivité / pas de perte de paquets) entre le satellite en place et le satellite ascendant et constitue le comportement obligatoire pour les systèmes dans lesquels deux antennes ou plus sont disponibles pour le suivi.

1. L'une des antennes, ou les deux (ou trois), suivent le satellite actuel. L'antenne primaire est la seule autorisée à émettre. L'antenne secondaire (si elle suit également le satellite) est en réception uniquement, pour permettre la combinaison de la diversité au niveau du modem (voir Figure 2-12).

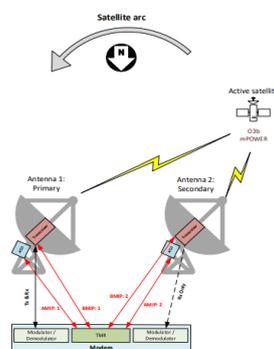


Figure 2-7: Les deux antennes suivent le satellite actif actuel.



2. L'une des antennes continue à suivre le satellite qui se couche, tandis que l'antenne secondaire revient sur ses pas, et commence à suivre le satellite ascendant, en étant sur la cible au plus tard à l'heure de transfert. Avant la réorientation de l'antenne secondaire, la combinaison en diversité est désactivée si elle est utilisée (voir Figure 2-13).

3. La nouvelle liaison via le satellite ascendant est établie parallèlement à la liaison

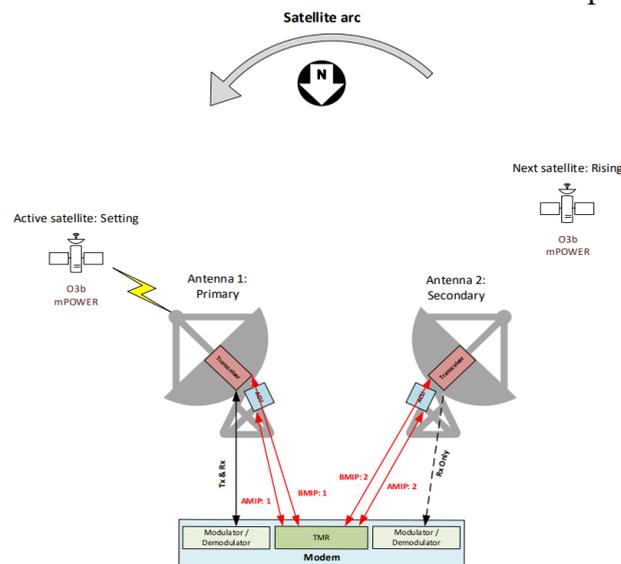


Figure 2-8: L'antenne secondaire revient sur ses pas pour capter un satellite en phase

existante, via le satellite descendant. À ce point, les deux antennes sont autorisées à émettre.

4. Le trafic est réacheminé du satellite de réglage vers le satellite ascendant de manière que la continuité soit maintenue.

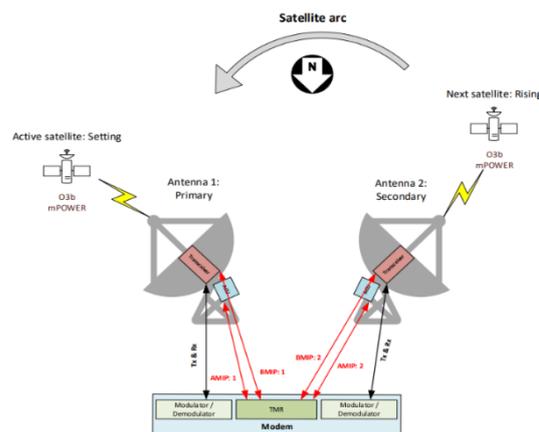


Figure 2-9: Transporteur actif sur le satellite de départ et d'arrivée pendant la fenêtre de transfert.



5. Une fois le transfert terminé, dans la fenêtre de transfert, l'antenne qui suit le satellite en place cesse d'émettre. L'antenne secondaire peut revenir sur ses pas pour rejoindre l'antenne primaire (et reprendre la combinaison en diversité), ou se tenir prête pour le prochain transfert.

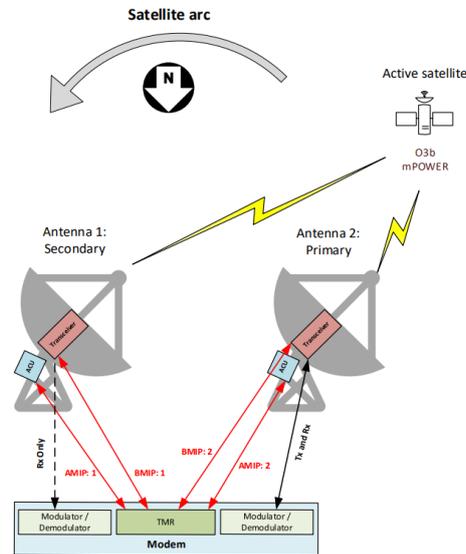


Figure 2-10: Les deux antennes suivent les nouveaux satellites actifs actuels.

Le figure suivante (figure 2-16) illustre les délais d'un transfert entre deux antennes sur plusieurs satellites.

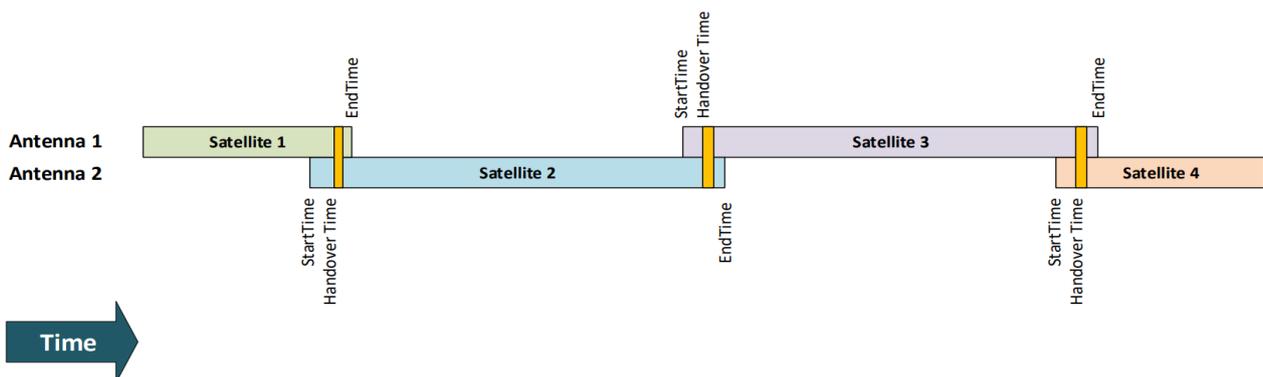


Figure 2-11: Timeline de transfert "Make Before Break" - Deux antennes.

- Le BBM est autorisé exclusivement dans le cas où il n'y a qu'une seule antenne disponible pour le suivi. Une brève interruption a lieu avant que la liaison ne soit rétablie sur le satellite ascendant lorsque l'antenne revient sur ses pas (figure 2-17).



Au moment du transfert, l'antenne retourne vers le satellite qui monte et y établit la liaison.

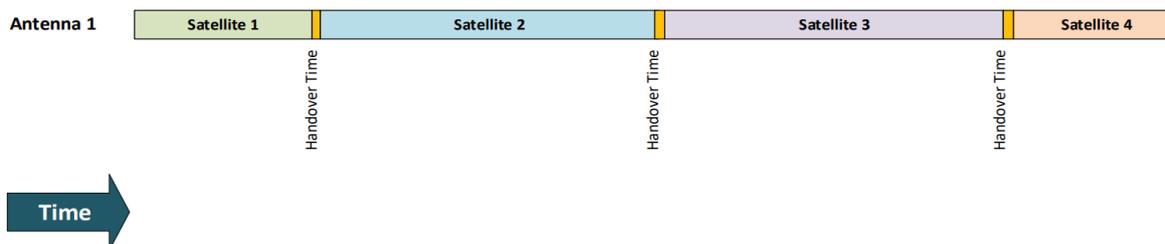


Figure 2-12: Break Before Make Handover.

2.2.2.3.3 Modems et plates-formes pris en charge : Voir annexe B

2.2.2.3.4 Configurations matérielles du terminal utilisateur

Les configurations physiques génériques du système sont détaillées dans la partie suivante pour les antennes simples et doubles.

1) Antenne simple :

Un terminal d'utilisateur distant à antenne unique est la plus simple des architectures (figure 2-18) et n'assure que les transferts avant rupture (BBM) . Le gestionnaire de terminal (TMR) offre des fonctionnalités supplémentaires et permet de contrôler le système, en facilitant l'échange d'informations entre l'ACU et le modem satellite.

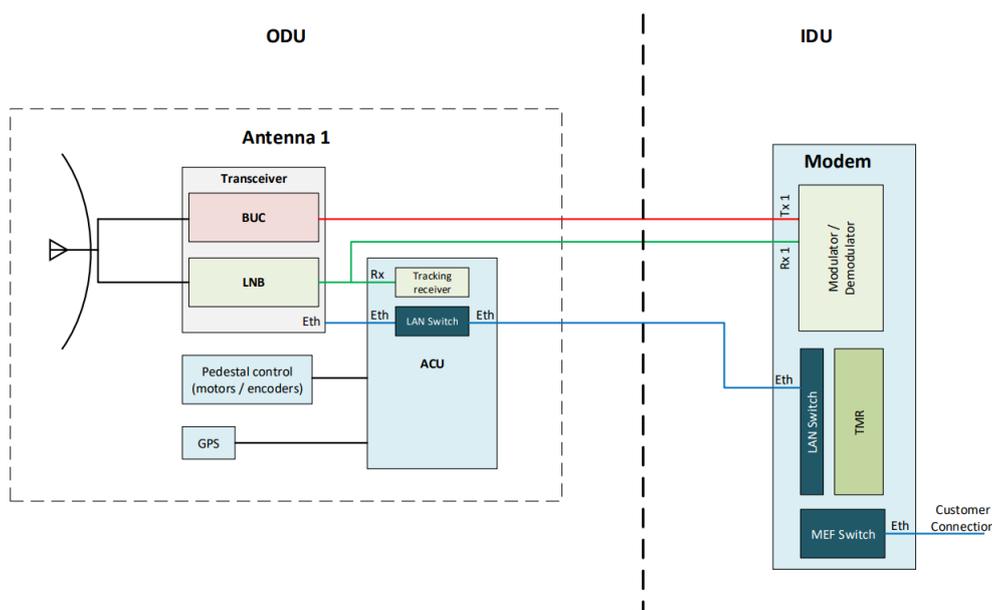


Figure 2-13: Architecture physique d'une seule antenne.



2) Double antenne :

L'architecture de base du terminal utilisateur à distance est le terminal utilisateur à distance à double antenne. Il s'agit de l'architecture minimale pour permettre les transferts "Make-Before-Break" (MBB).

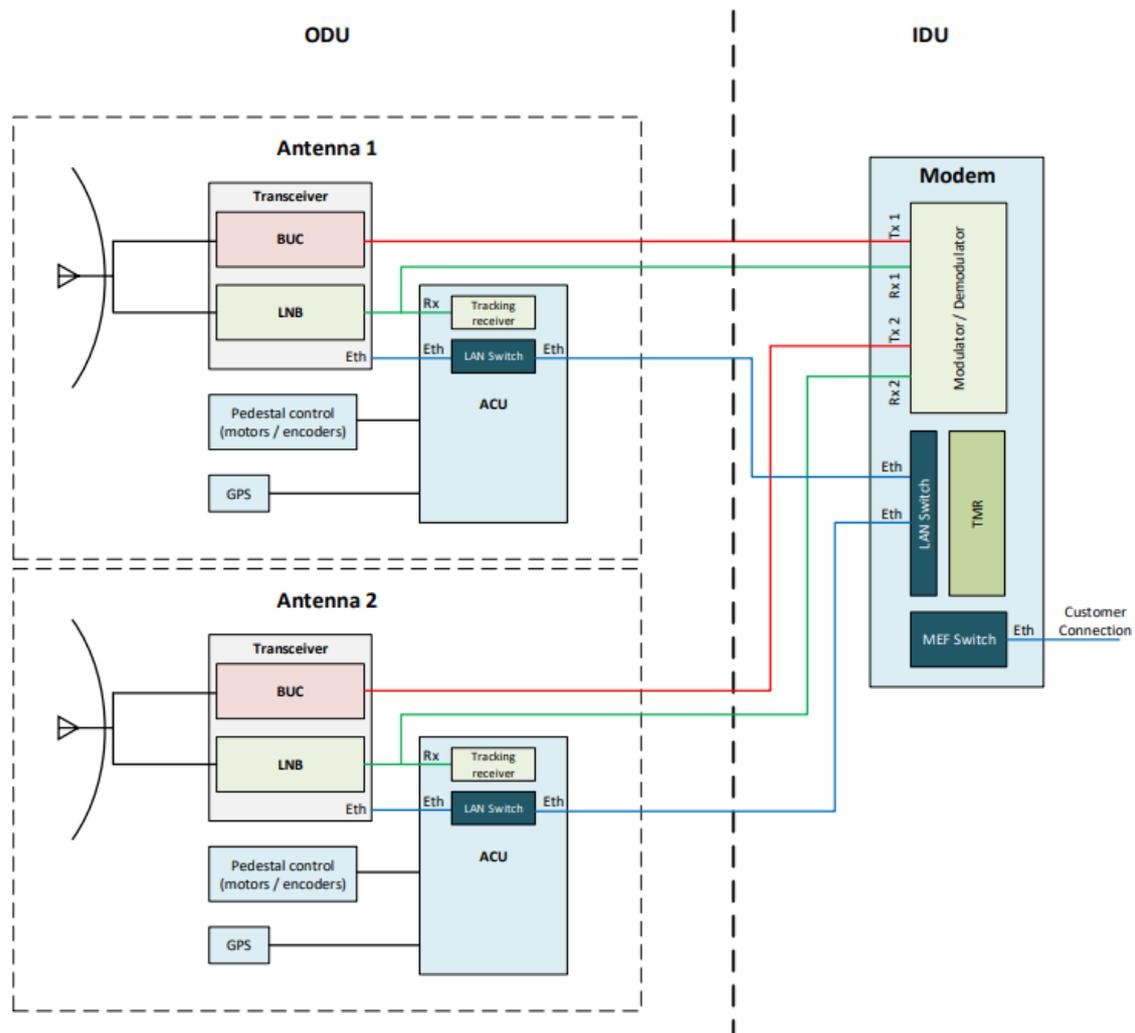


Figure 2-14: Modem à double antenne, Architecture physique

On peut utiliser un modem intérieur ou extérieur. Un modem extérieur est installé sur l'une des antennes, et la deuxième antenne est reliée à la première.

- **Éléments de l'unité ODU et IDU :**

- a) **Le BUC** (Block Up converter) : il est utilisé dans un système de communication par satellite UP LINK, Il convertit les signaux radio d'une fréquence plus basse à une fréquence plus élevée pour les transmettre au satellite.



- b) **Le LNB** (Low Noise Block Converter) : il est utilisé dans un système de communication par satellite DOWN LINK. Il collecte les ondes radio du satellite et les convertit en un signal envoyé au modem à l'extrémité du réseau par l'intermédiaire d'un câble.
- c) **Le Piédestal control** : Sa fonction première est de contrôler et de gérer le mouvement d'une parabole ou d'une antenne satellite.
- d) **Le commutateur LAN** (Local Area Network) dans le contexte du VSAT (Very Small Aperture Terminal) fait référence à un commutateur de réseau qui est utilisé en conjonction avec la technologie VSAT pour faciliter la communication en réseau local au sein d'une organisation ou à un endroit spécifique.
- e) **Modulation (Modulateur)** : Lorsque des données doivent être transmises, le modulateur du modem prend les signaux numériques (composés de 0 et de 1) et les convertit en signaux analogiques. Ce processus est appelé modulation
- f) **Démodulation** (démodulateur) : Au niveau de la réception, le modem est chargé de démoduler le signal analogique entrant. La démodulation consiste à extraire les données numériques d'origine du signal analogique.
- g) **Un commutateur LAN** : est un dispositif matériel qui fonctionne au niveau de la couche de liaison de données (couche 2) et qui est principalement utilisé pour connecter et gérer des dispositifs au sein d'un réseau local. Il utilise les trames Ethernet pour transmettre les données à l'appareil approprié au sein du réseau en fonction de l'adresse MAC (Media Access Control) de l'appareil. Les commutateurs LAN sont essentiels pour créer des réseaux locaux efficaces et rapides.

2.3 Les Performances du Système o3b mPOWER :

- 1) **Latence Réduite** : L'une des caractéristiques majeures d'O3b mPOWER est sa faible latence (<150 ms). Grâce à sa constellation de satellites en orbite terrestre moyenne (MEO), l'O3b mPOWER permet de réduire considérablement la latence des communications par rapport aux systèmes de satellites en orbite géostationnaire. Cela est particulièrement crucial pour des applications nécessitant une communication en temps réel, comme la téléphonie, les jeux en ligne et les applications industrielles.
- 2) **Haut Débit** : L'O3b mPOWER offre Haut débit (jusqu'à 10 Gbit/s) par liaison. La combinaison de satellites MEO et d'une technologie de pointe permet de fournir des capacités de bande passante importantes, ce qui est essentiel pour les transferts de données volumineux, la diffusion de contenu en haute définition et les applications gourmandes en données.



- 3) **Couverture Mondiale** : Grâce à sa constellation de satellites en orbite terrestre moyenne, l'O3b mPOWER offre une couverture mondiale. Couverture de 100 millions de km² par satellite, Cela signifie qu'il peut fournir des services de communication dans des zones éloignées, mal desservies ou difficiles d'accès, ce qui en fait une solution précieuse pour la connectivité dans les régions reculées.
- 4) **Flexibilité** : L'O3b mPOWER est conçu pour être flexible et adaptable aux besoins changeants. Flexibilité totale, quelques 5000 faisceaux par satellite Les satellites de la constellation peuvent être ajustés pour fournir une capacité de communication plus élevée dans des régions spécifiques en fonction de la demande. Cette flexibilité permet d'optimiser l'utilisation des ressources en fonction des besoins des utilisateurs.
- 5) **Faible Coût** : Comparé à certains autres systèmes de communication par satellite, l'O3b mPOWER peut offrir des coûts d'exploitation et d'utilisation plus bas. Cela est en partie dû à la réduction de la latence, qui réduit la nécessité de mettre en œuvre des solutions de contournement coûteuses pour les applications sensibles à la latence.

2.4 Comparaison avec les autres systèmes :

2.4.1 O3b Classic vs O3b mPOWER :

Tableau 2-1: Comparaison Entre l'O3b et l'O3b mPOWER.

O3b Classic	O3b mPOWER
<ul style="list-style-type: none">• Faisceaux utilisateur dédié et GW	<ul style="list-style-type: none">• Connectivité entre tous les UE's
<ul style="list-style-type: none">• 10 faisceaux utilisateur ~ 700 km par faisceau	<ul style="list-style-type: none">• Flexibilité totale de 4000+ faisceaux par satellite
<ul style="list-style-type: none">• 4 à 7 millions de km² de couverture par satellite	<ul style="list-style-type: none">• Couverture de 100M km² par satellite
<ul style="list-style-type: none">• 4,4 GHz de spectre total par pôle	<ul style="list-style-type: none">• 2,5 GHz (FWD) et 2,5 GHz (RET) par faisceau
<ul style="list-style-type: none">• 10 Gbit/s par satellite jusqu'à 2,4 millions• Bornes	<ul style="list-style-type: none">• 100 Gbps par satellite jusqu'à un terminal de 2,4 m
	<ul style="list-style-type: none">• Partage flexible de la puissance/du débit entre les faisceaux



Marchés les mieux desservis :	
O3b Classic	O3b mPOWER
• Trunks (Telcos/ISP)	• Entreprise
• Croisière	• Gouvernement (ISR, Marine, Flyaways)
• Gouvernement (Bases, Marine, Flyaways)	• Maritime
• Maritime	

2.4.2 Différences par rapport aux LEO :

- Petit nombre de passerelles (seulement 8 passerelles nécessaires au démarrage de service).
- Bent-Pipe/Architecture ouverte.
 - Prise en charge de toute forme d'onde.
 - Supporte toute antenne utilisateur orientable.
 - Services souverains pour les gouvernements du monde entier.
- Flexibilité pour déplacer la capacité entre les faisceaux dans un très grand champ de vue.
- Pas besoin de liaisons inter-satellites puisqu'une passerelle est toujours en vue.

2.5 Les avantages

Le O3b mPOWER offre une gamme variée d'avantages qui la rend extrêmement polyvalente pour répondre aux besoins de divers secteurs et applications. Dans le domaine du backhaul, elle permet une connectivité fiable et à haut débit pour les réseaux de télécommunications, améliorant ainsi la connectivité mondiale. Pour les opérations de trunking, elle offre une large bande passante et une latence réduite, idéale pour les applications exigeantes en bande passante. O3b mPOWER est également une solution économe en énergie, ce qui la rend adaptée aux régions éloignées où l'accès à l'électricité peut être limité. Dans le secteur de la croisière et de l'aérospatiale, elle garantit une connectivité à haut débit pour les passagers et les équipages, améliorant ainsi l'expérience globale. Les gouvernements peuvent bénéficier de son réseau sécurisé pour des communications fiables dans des zones critiques. En résumé, O3b mPOWER offre une connectivité de qualité opérateur dans une variété de domaines, répondant ainsi aux besoins de connectivité modernes.



2.6 Limites

Bien qu'O3b mPOWER offre de nombreux avantages, il présente également certaines limites. L'une de ces limites réside dans sa couverture géographique. Bien qu'elle puisse fournir une connectivité à de nombreuses régions du monde, elle n'est pas en mesure de couvrir les zones polaires extrêmes en raison de l'inclinaison de l'orbite des satellites en orbite terrestre moyenne (MEO). De plus, bien que la latence soit considérablement réduite par rapport aux satellites géostationnaires, elle reste légèrement supérieure à celle des réseaux terrestres, ce qui peut avoir un impact sur les applications nécessitant une latence ultra-faible, telles que les jeux en ligne en temps réel. Enfin, comme pour toute technologie satellitaire, les conditions météorologiques extrêmes peuvent également perturber la connectivité. Malgré ces limites, O3b mPOWER reste une solution polyvalente et performante pour de nombreuses applications de connectivité à travers le monde.

2.7 Conclusion :

En conclusion, l'avènement d'O3b mPOWER représente une étape majeure dans l'innovation des télécommunications spatiales. Avec son architecture novatrice, sa constellation de satellites en orbite moyenne et sa capacité à répondre aux exigences variées des communications modernes, O3b mPOWER ouvre la voie à une connectivité mondiale plus rapide, fiable et performante que jamais auparavant.

Les avantages de ce système sont indéniables : des latences réduites pour des interactions en temps réel, une efficacité économique grâce à une utilisation optimisée des ressources, une bande passante généreuse pour des transferts de données rapides, une capacité étendue pour servir des régions éloignées, une flexibilité adaptée aux demandes en constante évolution, une performance stable garantie par la redondance et la résilience, ainsi qu'une couverture mondiale pour réduire les écarts numériques, offrir une solution pour la mobilité (yacht, croisière), pour militaires (aéro-ISR, naval, Entreprise fixe, communication en mouvement), pour l'exploitation minière.

O3b mPOWER élargit les horizons des communications par satellite en surmontant les problèmes traditionnels de latence, de coût élevé et de couverture limitée. Sa capacité à répondre aux besoins croissants des applications modernes, allant de la connectivité Internet haut débit aux services critiques en temps réel, en fait une solution polyvalente et incontournable.

Chapitre 02: L'O3B mPOWER satellite.



En embrassant l'ère de la 5G et au-delà, O3b mPOWER s'inscrit en tant que précurseur des communications spatiales améliorées. Grâce à son architecture innovante, il a le potentiel de transformer fondamentalement la manière dont les individus, les entreprises et les collectivités interagissent, se connectent et innovent à l'échelle mondiale.

Chapitre 03



3 Chapitre 03 : Simulation Numérique du O3B mPOWER :

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre dédié à la simulation de l'architecture d'O3b mPOWER avec la technique "Make Before Break," nous franchissons une étape cruciale pour comprendre en profondeur le fonctionnement de ce système de télécommunications par satellite révolutionnaire. Après avoir exploré les bases de l'architecture d'O3b mPOWER, nous allons maintenant utiliser l'Aerospace Toolbox de Matlab pour simuler son comportement dans des scénarios diversifiés.

3.2 Présentation du langage de programmation matlab :

Le langage de programmation MATLAB, abréviation de MATrix LABoratory, est un environnement de développement largement utilisé dans le domaine de l'analyse numérique, du calcul scientifique et de la modélisation mathématique. Conçu par MathWorks, MATLAB offre une combinaison puissante d'outils, de fonctions et de fonctionnalités permettant aux chercheurs, aux ingénieurs et aux scientifiques de résoudre une variété de problèmes complexes

3.2.1 Aerospace Toolbox :

La "Aerospace Toolbox" est une boîte à outils logicielle spécialisée développée par MathWorks pour le logiciel MATLAB. Elle est conçue pour faciliter la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes et des phénomènes aérospatiaux. Cette boîte à outils offre une gamme d'outils et de fonctions pour les ingénieurs et les chercheurs travaillant dans le domaine de l'aérospatiale, leur permettant de concevoir, simuler et analyser des systèmes tels que les véhicules spatiaux, les avions, les satellites et les systèmes de navigation.

3.2.2 La Satellite Communications Toolbox :

La Satellite Communications Toolbox est une boîte à outils MATLAB qui fournit des outils basés sur des normes pour la conception, la simulation et la vérification de systèmes et de liaisons de communications par satellite . La boîte à outils vous permet de modéliser et de visualiser les orbites des satellites, d'effectuer des analyses de liaison et des calculs d'accès. Vous pouvez également concevoir des algorithmes de couche physique avec des composants RF et des récepteurs de stations terrestres, générer des formes d'onde de test et effectuer une vérification de conception de référence dorée . Avec la boîte à outils, vous pouvez configurer, simuler, mesurer et analyser des liaisons de communication par satellite de bout en bout. Vous pouvez également créer et réutiliser des tests pour vérifier que vos conceptions, prototypes et



implémentations sont conformes aux normes de communication et de navigation par satellite telles que O3b , O3B mPOWER , DVB-S2X, DVB-S2, CCSDS et GPS [40].

La boîte à outils offre une gamme de fonctionnalités telles que la propagation et la visualisation de l'orbite, l'analyse de l'accès et de la liaison, l'analyse du budget de la liaison, la génération de formes d'onde, la modélisation du canal et la simulation au niveau de la liaison . Vous pouvez utiliser la boîte à outils pour simuler des constellations de satellites, des réseaux de stations terrestres et des analyses d'accès entre les satellites et les stations terrestres. Les résultats peuvent être visualisés pour une meilleure compréhension [40].

La boîte à outils pour les communications par satellite fait partie de la suite logicielle MATLAB développée par MathWorks [40].

3.2.3 Satellite Scenario Toolbox

L'objet `satellite Scenario` est une arène 3D qui modélise les interactions entre les satellites et les stations au sol. Il peut être utilisé pour simuler des constellations de satellites, des réseaux de stations terrestres et des analyses d'accès entre les satellites et les stations terrestres. Les résultats peuvent être visualisés pour une meilleure compréhension ¹. Le flux de travail pour la simulation de scénarios de satellites se compose de ces cinq éléments principaux :

1. L'objet « satelliteScenario » représente une arène tridimensionnelle composée de satellites, de stations terrestres et de leurs interactions. Cet objet permet de modéliser des constellations de satellites, des réseaux de stations terrestres, d'effectuer des analyses d'accès entre les satellites et les stations terrestres, et de visualiser les résultats.
2. La fonction `satellite` ajoute des satellites au scénario en utilisant des fichiers d'éléments à deux lignes (TLE) ou des éléments orbitaux.
3. L'objet « groundStation » ajoute des stations terrestres au scénario en utilisant les paramètres par défaut ou la latitude et la longitude spécifiées.
4. La fonction « satelliteScenarioViewer » crée un visualiseur 3D pour le scénario.
5. La fonction « play » simule le scénario satellite et affiche les résultats dans la fenêtre de visualisation spécifiée par « satelliteScenarioViewer ».

L'objet « satelliteScenario » fait partie de la boîte à outils Satellite Communications Toolbox et Aerospace Toolbox dans MATLAB [41].



3.3 Diagramme de l'algorithme de simulation O3B mPOWER sure MATLAB :

Ce diagramme d'étapes que nous présentons ci-dessous est conçu pour expliquer le processus de simulation d'un système O3b mPOWER à l'aide de MATLAB. Il s'agit d'une ressource essentielle pour comprendre la séquence d'actions nécessaires à la réalisation de simulations précises et informatives. Chacune de ces étapes est minutieusement élaborée pour nous permettre de tirer le meilleur parti de l'outil MATLAB dans le contexte de notre projet.

Veillez consulter le diagramme ci-dessous pour avoir un aperçu des principales étapes que nous suivrons pour modéliser et simuler le système O3b mPOWER :

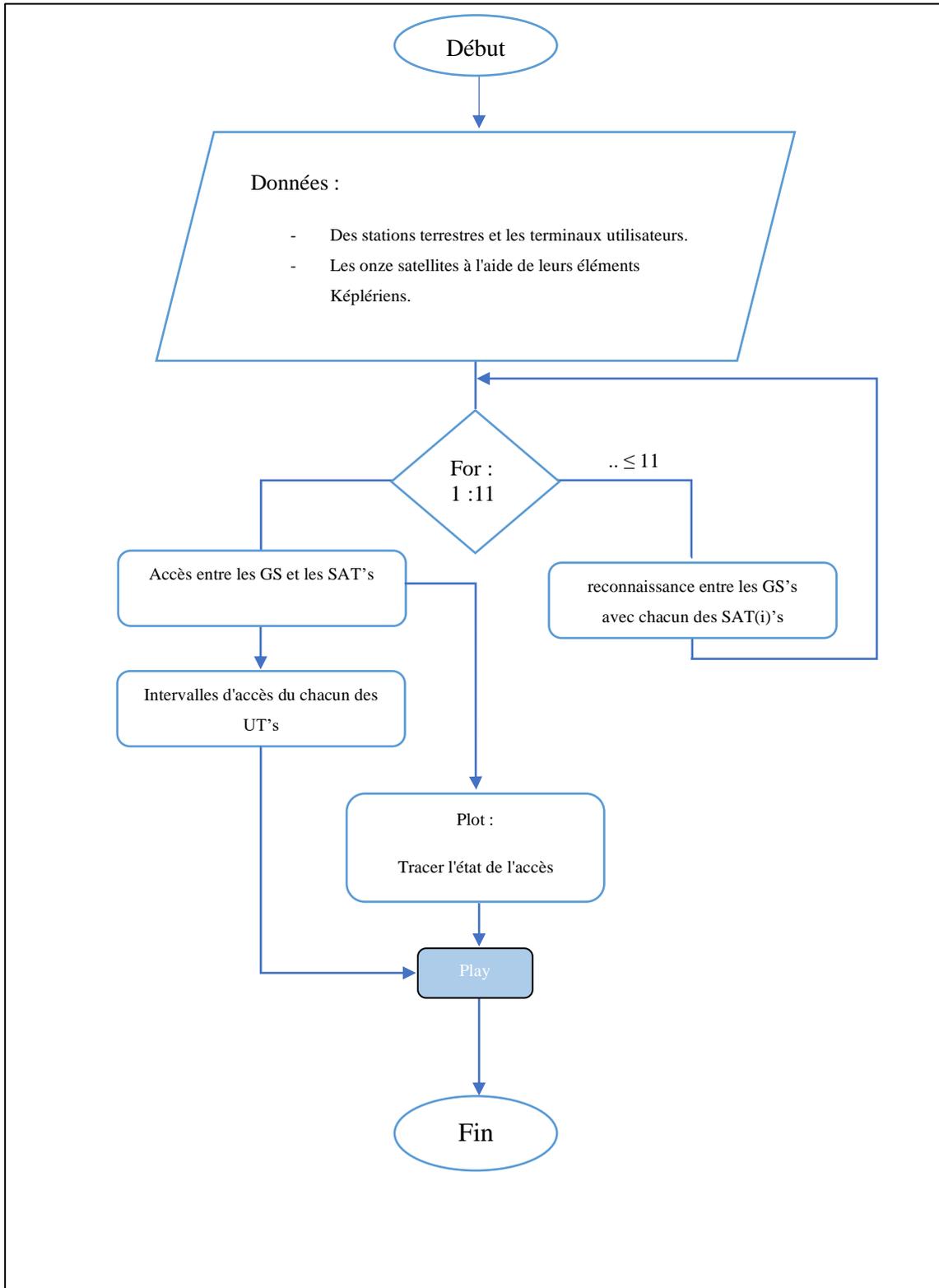


Figure 3-1: logigramme de l'algorithme de simulation O3B mPOWER



3.4 Données et Paramètres utiliser dans la simulation :

Certains paramètres ont une valeur constante et sont définis dans les équations képlériennes, et sont donnés par l'objet satellitecenario.

Tableau 3-1: Paramètres et valeurs utilisées lors de la simulation.

Paramètres	Valeur	Unité
Start Time	19/05/2023-12:00:00	jour/mois/année-heur
Stop Time	20/05/2023-12:00:00	jour/mois/année-heur
Sample Time	60	s
Semi major Axis	14.541.000	m
excentricité	00.00	NON
inclinaison	00.00	dégré (°)
Right Ascension of Ascending Node (Ω)	77.632	dégré (°)
argument of periapsis (ω)	00.00	dégré (°)
True Anomaly (ν)	00.00	dégré (°)

- **Le demi-grand axe** de l'orbite d'un satellite correspond à la moitié du plus grand diamètre de l'orbite elliptique. Il définit la taille et la forme de l'orbite, ainsi que la période orbitale du satellite. Le demi-grand axe est généralement désigné par le symbole a et est mesuré en kilomètres ou mètres.
- **L'excentricité** est un nombre réel non négatif qui mesure à quel point une section conique (un cercle, une ellipse, une parabole ou une hyperbole) s'écarte de la circularité. L'excentricité n'a pas d'unité spécifique, mais elle peut aller de 0 (circulaire) à l'infini (ligne). Une parabole a une excentricité de 1.
- **L'inclinaison** de l'orbite d'un satellite est mesurée par rapport au plan équatorial du corps autour duquel il orbite. Elle est exprimée comme l'angle entre le plan de l'orbite et l'équateur. L'unité de mesure de l'inclinaison est le degré (°). L'inclinaison peut varier de 0° à 180° , où 0° représente une orbite dans le plan équatorial, et 90° une orbite polaire.
- **L'ascension** droite du nœud ascendant (RAAN) est l'un des six éléments orbitaux qui définissent l'orientation de l'orbite d'un satellite autour d'un corps céleste. Il s'agit de l'angle entre l'équinoxe de printemps et le point où l'orbite du satellite traverse le plan équatorial du sud au nord. Le RAAN est mesuré en degrés et est généralement désigné par le symbole Ω .
- **L'argument** du périapses est l'un des six éléments orbitaux qui définissent la forme et l'orientation de l'orbite elliptique d'un satellite autour d'un corps céleste. Il s'agit de l'angle



entre le nœud ascendant et le périapses, mesuré dans la direction du mouvement du satellite. L'argument du périapses est généralement désigné par le symbole ω et est mesuré en degrés.

- **L'anomalie vraie** est un autre élément orbital qui définit la position d'un satellite sur son orbite elliptique autour d'un corps céleste. Il s'agit de l'angle entre le périapses et la position du satellite, mesuré à partir du centre de l'ellipse. L'anomalie vraie est généralement désignée par le symbole ν ou f et est mesurée en degrés.

3.4.1 Les stations au sol utilisées dans la simulation :

3.4.1.1 Les passerelles utilisées :

il existe huit stations terrestres initiales du satellite O3b mPOWER que SES a signé avec des fournisseurs de services d'infrastructure clés dans le monde entier pour les construire. Les stations terrestres sont situées à des endroits stratégiques pour permettre aux clients d'accéder facilement à des services de haute performance , ils fourniront des capacités de télémétrie, de suivi et de contrôle pour permettre à SES de gérer la constellation.

- ❖ Waialua, Hawaï ,États-Unis .
- ❖ Phoenix, Arizona ,États-Unis.
- ❖ Pivotel Satellite, Lot 52 Burraway Rd, Brocklehurst NSW 2830, Australie.
- ❖ Datacenter Entel, Longovilo, San Pedro, Región Metropolitana, Chili.
- ❖ Merredin, Australie-Occidentale 6415, Australie .
- ❖ Ras el Khaïmah - Émirats arabes unis.
- ❖ HTO Thermopylae Teleport, Molos 350 09, Grèce.
- ❖ Dakar, Sénégal.

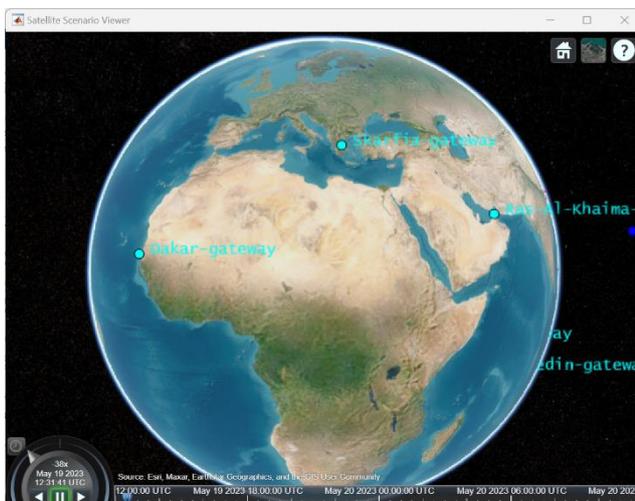


Figure 3-3 : EUROPE et AFRIQUE gateways



Figure 3-2: AUSTRALIE gateways



3.4.1.2 Les terminaux d'utilisateurs utilisés:

Les terminaux des utilisateurs sont placés au hasard dans le monde entier pour tester le système, et ils sont :

- ❖ Annaba, Algérie.
- ❖ Tindouf, Algérie.
- ❖ Ayoun al Atrous, Mauritanie.
- ❖ Kwalam, État de Jigawa, Nigeria.
- ❖ Adi Aregay, Éthiopie.
- ❖ Sandoa, République démocratique du Congo.
- ❖ To Kamogawa, Noto, District de Hōsu, Préfecture d'Ishikawa 928-0308, Japon.
- ❖ Ayutla, Jalisco, Mexique.
- ❖ El Alamein, Gouvernorat de Marsa-Matruh, Égypte.
- ❖ Kavaratti, Lakshadweep 682555, Inde.
- ❖ Odeleite, Portugal.
- ❖ Saint-Philip, Antigua-et-Barbuda.
- ❖ Île Santa Cruz, Équateur.
- ❖ Teluk Rhu, Rupert Utara, Kabupaten de Bengkalis, Riau, Indonésie.
- ❖ Rue Pierre Werner, 6815 Betzdorf, Luxembourg.
- ❖ Jung-gu , Séoul, Corée du Sud.
- ❖ Océan Atlantique.

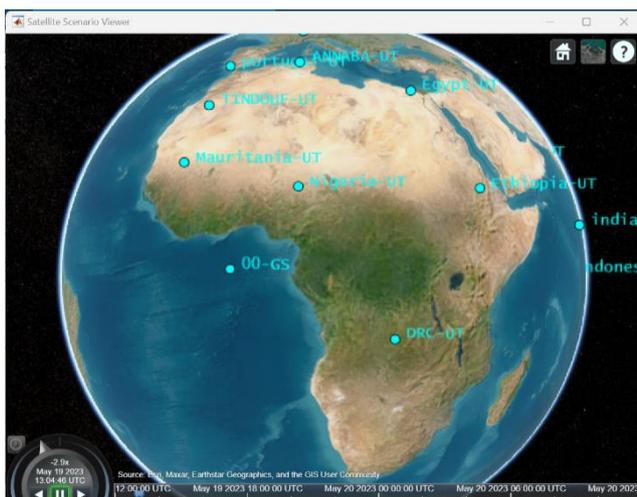


Figure 3-5: AFRIQUE Terminal-utilisateur

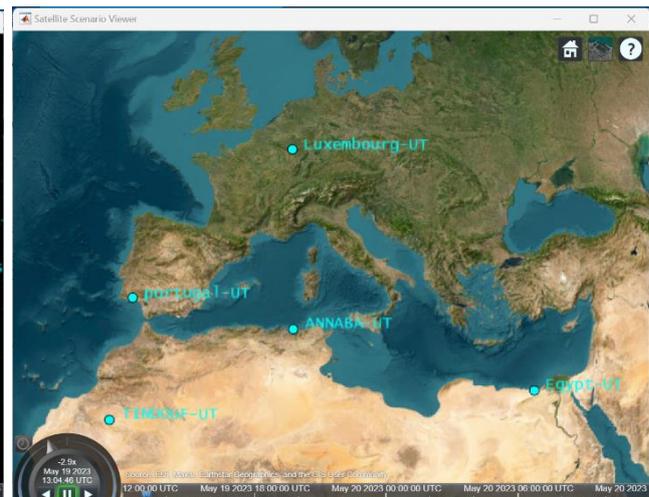


Figure 3-4: EUROPE Terminal-utilisateur



3.5 Résultat de la simulation :

3.5.1 La constellation

La figure 3-6 représentant la constellation des onze satellites O3b mPOWER en orbite autour de la Terre. elle est une représentation visuelle essentielle de l'architecture du système. Cette constellation en orbite terrestre moyenne (MEO) est conçue pour fournir une connectivité mondiale et une couverture étendue.

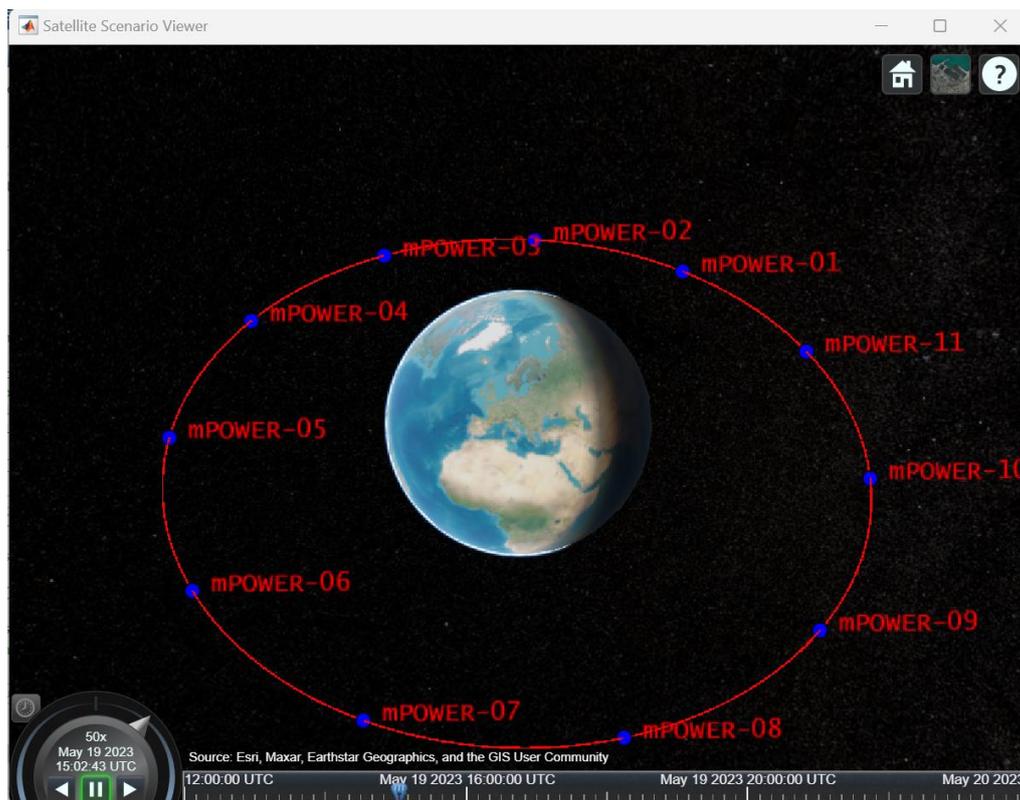


Figure 3-6: Constellation satellitaire du O3B mPOWER.

L'aspect crucial des satellites est leur capacité à maintenir une connexion constante avec au moins une station terrienne. Cette caractéristique est au cœur de l'efficacité opérationnelle de ce système de communication par satellite de nouvelle génération.

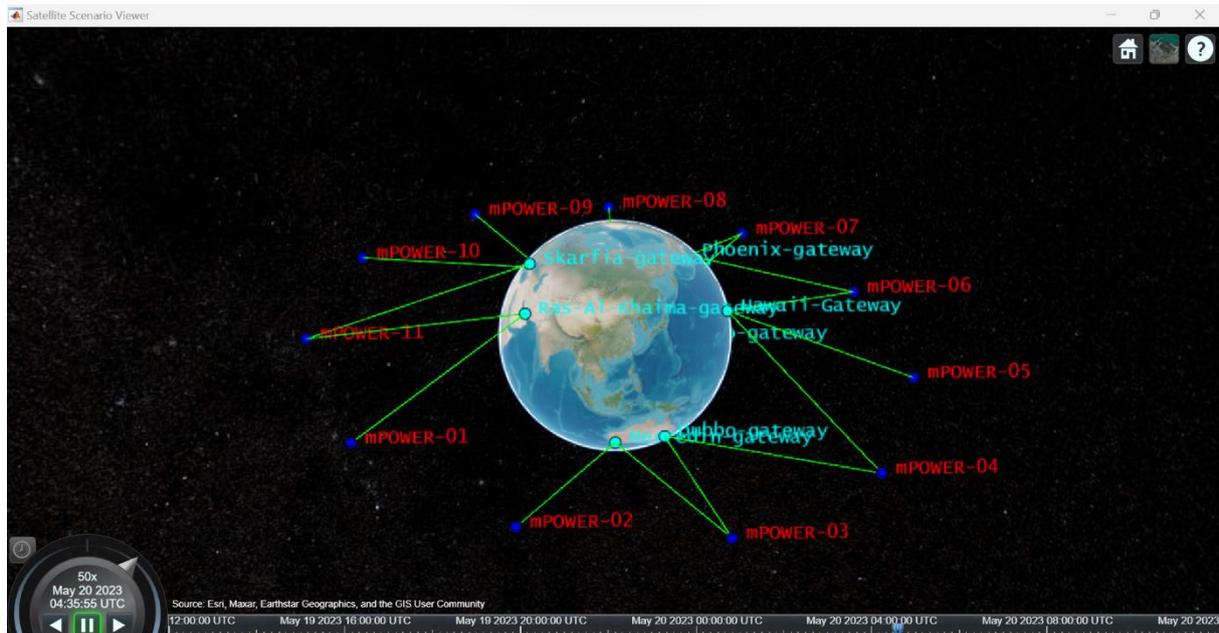


Figure 3-7 : l'accès satellite -Gateway

La continuité de la connexion entre les satellites et les stations terriennes comme montrée dans la figure 3-7, est la pierre angulaire du fonctionnement fluide du système O3b mPOWER. Elle garantit la transmission transparente des données entre les utilisateurs finaux, les terminaux au sol et le reste du réseau

3.5.2 Intervalles d'accès pour certains des Terminaux utilisateurs :

Dans notre simulation à l'aide de l'Aerospace Toolbox de MATLAB, nous avons utilisé la fonction 'accessIntervals' pour extraire des informations cruciales concernant les onze satellites du système O3b mPOWER. Cette fonction nous a fourni des tableaux de résultats détaillés, spécifiant le moment de début et de fin de chaque connexion avec chacun des satellites, ainsi que la durée de chaque connexion.

Chapitre 03 : Simulation du O3B mPOWER constellation sous Matlab.



Tableau 3-2:Annaba UT Etat de connexion.

	Source	Target	IntervalNumber	StartTime	EndTime	Duration	StartOrbit	EndOrbit
1	"ANNABA-...	"mPOWER-01"	1	19-May-2023 12:00:00	19-May-2023 12:06:00	360	1	1
2	"ANNABA-...	"mPOWER-11"	1	19-May-2023 12:03:00	19-May-2023 12:48:00	2700	1	1
3	"ANNABA-...	"mPOWER-10"	1	19-May-2023 12:46:00	19-May-2023 13:31:00	2700	1	1
4	"ANNABA-...	"mPOWER-09"	1	19-May-2023 13:28:00	19-May-2023 14:13:00	2700	1	1
5	"ANNABA-...	"mPOWER-08"	1	19-May-2023 14:11:00	19-May-2023 14:56:00	2700	1	1
6	"ANNABA-...	"mPOWER-07"	1	19-May-2023 14:53:00	19-May-2023 15:38:00	2700	1	1
7	"ANNABA-...	"mPOWER-06"	1	19-May-2023 15:36:00	19-May-2023 16:21:00	2700	1	1
8	"ANNABA-...	"mPOWER-05"	1	19-May-2023 16:18:00	19-May-2023 17:03:00	2700	1	1
9	"ANNABA-...	"mPOWER-04"	1	19-May-2023 17:01:00	19-May-2023 17:46:00	2700	1	1
10	"ANNABA-...	"mPOWER-03"	1	19-May-2023 17:43:00	19-May-2023 18:00:00	1020	1	2

Tableau 3-3: Croisière sur 00 UT Etat de connexion.

	Source	Target	IntervalNumber	StartTime	EndTime	Duration	StartOrbit	EndOrbit
1	"00-GS"	"mPOWER-11"	1	19-May-2023 12:00:00	19-May-2023 12:38:00	2280	1	1
2	"00-GS"	"mPOWER-10"	1	19-May-2023 12:36:00	19-May-2023 13:21:00	2700	1	1
3	"00-GS"	"mPOWER-09"	1	19-May-2023 13:18:00	19-May-2023 14:03:00	2700	1	1
4	"00-GS"	"mPOWER-08"	1	19-May-2023 14:01:00	19-May-2023 14:46:00	2700	1	1
5	"00-GS"	"mPOWER-07"	1	19-May-2023 14:43:00	19-May-2023 15:28:00	2700	1	1
6	"00-GS"	"mPOWER-06"	1	19-May-2023 15:26:00	19-May-2023 16:11:00	2700	1	1
7	"00-GS"	"mPOWER-05"	1	19-May-2023 16:08:00	19-May-2023 16:53:00	2700	1	1
8	"00-GS"	"mPOWER-04"	1	19-May-2023 16:51:00	19-May-2023 17:36:00	2700	1	1
9	"00-GS"	"mPOWER-03"	1	19-May-2023 17:33:00	19-May-2023 18:00:00	1620		

Tableau 3-4: Japon UT Etat de connexion.

	Source	Target	IntervalNumber	StartTime	EndTime	Duration	StartOrbit	EndOrbit
1	"Japan-UT"	"mPOWER-05"	1	19-May-2023 12:00:00	19-May-2023 12:04:00	240	1	1
2	"Japan-UT"	"mPOWER-04"	1	19-May-2023 12:01:00	19-May-2023 12:46:00	2700	1	1
3	"Japan-UT"	"mPOWER-03"	1	19-May-2023 12:44:00	19-May-2023 13:29:00	2700	1	1
4	"Japan-UT"	"mPOWER-02"	1	19-May-2023 13:26:00	19-May-2023 14:11:00	2700	1	1
5	"Japan-UT"	"mPOWER-01"	1	19-May-2023 14:09:00	19-May-2023 14:54:00	2700	1	1
6	"Japan-UT"	"mPOWER-11"	1	19-May-2023 14:51:00	19-May-2023 15:36:00	2700	1	1
7	"Japan-UT"	"mPOWER-10"	1	19-May-2023 15:34:00	19-May-2023 16:19:00	2700	1	1
8	"Japan-UT"	"mPOWER-09"	1	19-May-2023 16:16:00	19-May-2023 17:01:00	2700	1	1
9	"Japan-UT"	"mPOWER-08"	1	19-May-2023 16:59:00	19-May-2023 17:44:00	2700	1	1
10	"Japan-UT"	"mPOWER-07"	1	19-May-2023 17:41:00	19-May-2023 18:00:00	1140	1	2

Tableau 3-5:Antigua et Barbuda UT Etat de connexion.

	Source	Target	IntervalNumber	StartTime	EndTime	Duration	StartOrbit	EndOrbit
1	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-09"	1	19-May-2023 12:00:00	19-May-2023 12:43:00	2580	1	1
2	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-08"	1	19-May-2023 12:40:00	19-May-2023 13:26:00	2760	1	1
3	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-07"	1	19-May-2023 13:23:00	19-May-2023 14:08:00	2700	1	1
4	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-06"	1	19-May-2023 14:06:00	19-May-2023 14:51:00	2700	1	1
5	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-05"	1	19-May-2023 14:48:00	19-May-2023 15:33:00	2700	1	1
6	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-04"	1	19-May-2023 15:31:00	19-May-2023 16:16:00	2700	1	1
7	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-03"	1	19-May-2023 16:13:00	19-May-2023 16:58:00	2700	1	1
8	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-02"	1	19-May-2023 16:56:00	19-May-2023 17:41:00	2700	1	1
9	"Antigua-Barbuda-UT"	"mPOWER-01"	1	19-May-2023 17:38:00	19-May-2023 18:00:00	1320		



En somme, les tableaux de résultats générés par la fonction `accessIntervals` ont joué un rôle central dans notre étude en fournissant des données essentielles sur le comportement du système O3b mPOWER, ainsi qu'en permettant une analyse approfondie de sa performance temporelle.

Ces données revêtent une importance capitale, offrant un éclairage essentiel sur chaque utilisateur terrestre (UT) et son lien avec les onze satellites. Elles englobent de manière exhaustive les plages temporelles de commencement et de clôture de chaque session satellite, ainsi que la durée totale de la connexion.

3.5.3 Statut d'accès à l'ensemble du système pour certains des Terminaux utilisateurs :

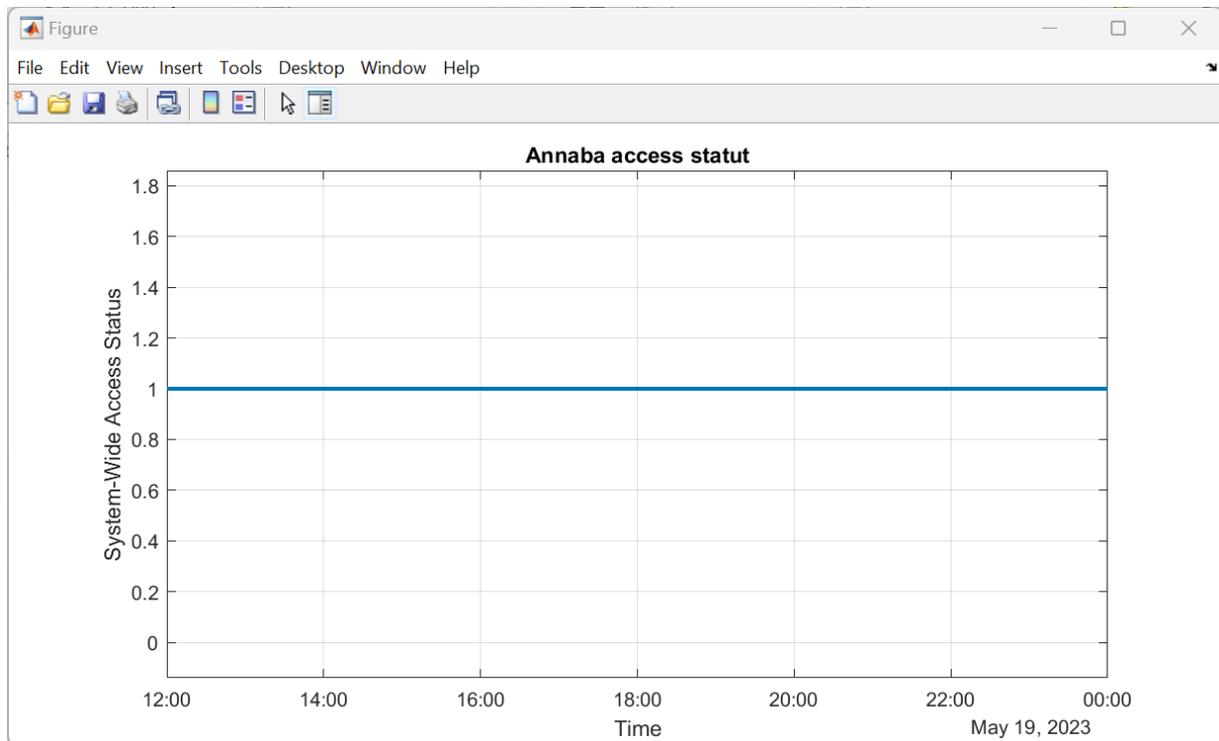


Figure 3-8: Etat de connexion du Annaba UT pendant 12h.

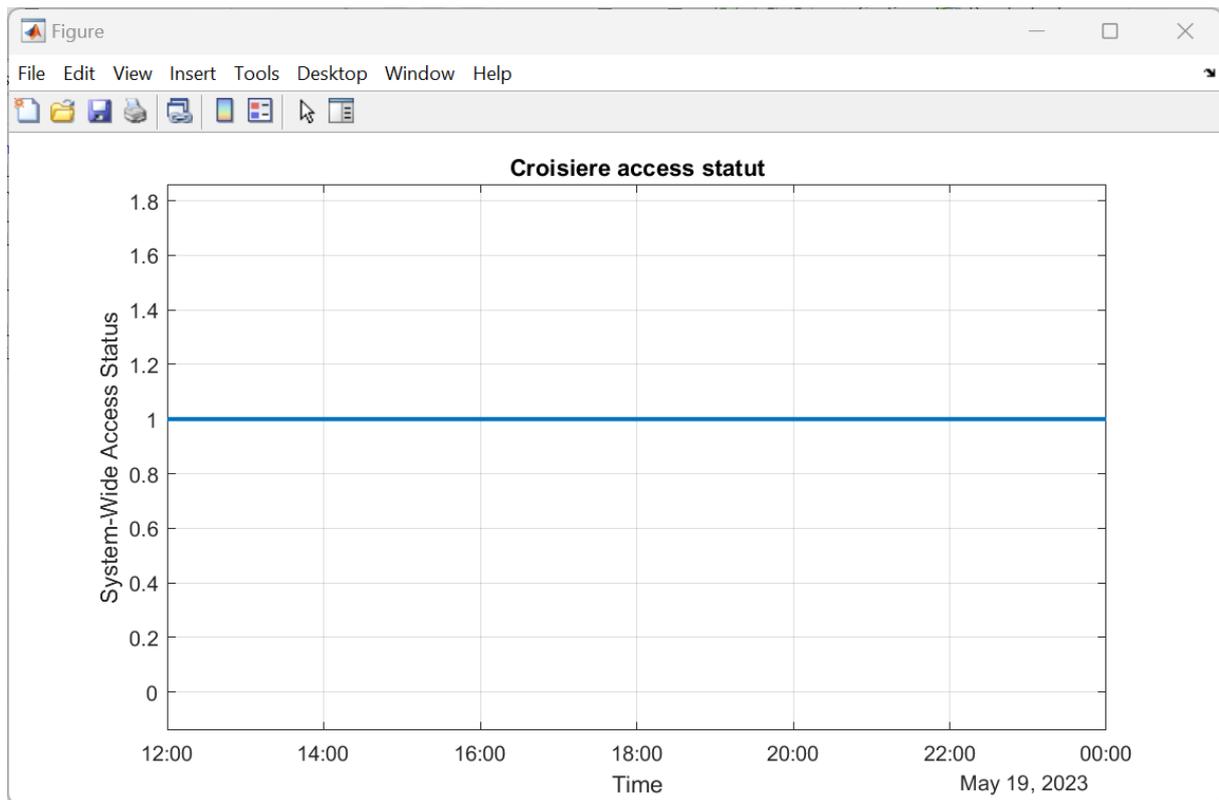


Figure 3-9: Etat de connexion du la Croisière UT pendant 12h.

Comme le montrent les Figures précédentes (Figure 3-8), (Figure 3-9), La représentation graphique de l'état de connexion pour certains utilisateurs terminaux (UT) spécifiques, montre clairement que le système a été en mesure de répondre de manière ininterrompue aux besoins de communication de ces UT particuliers. Cette disponibilité continue suggère une fiabilité exceptionnelle et une gestion efficace des ressources satellitaires.

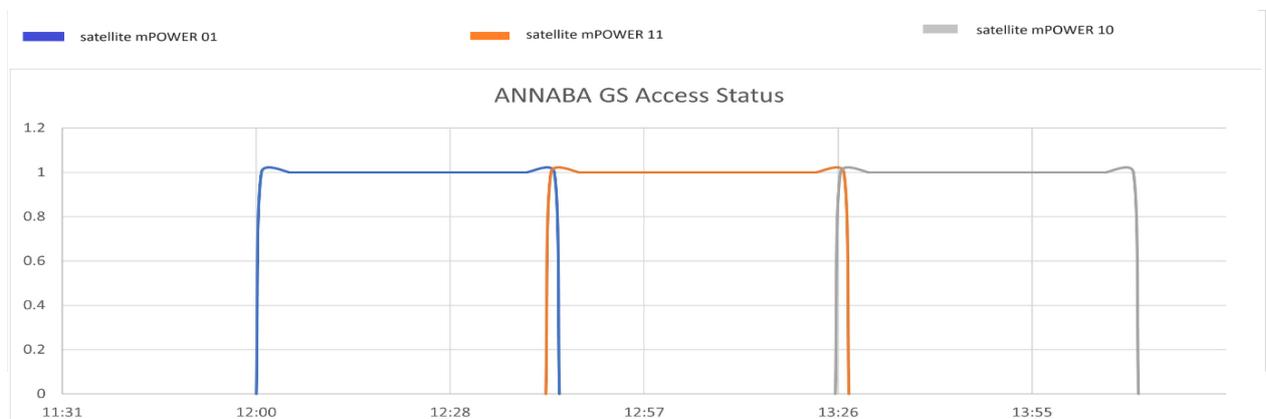


Figure 3-10: Illustration Graphique de Technique Make Before Break (MBB).



La mise en œuvre de la technique "make before break" (MBB), comme illustrée dans la (Figure 3-10), permet au système de maintenir une connectivité continue en ne rompant pas la connexion avec le premier satellite avant d'avoir établi avec succès la connexion avec le second. Cette approche garantit que les utilisateurs bénéficient d'une connectivité ininterrompue, même pendant la transition d'une liaison satellite à une autre. Ainsi, le système offre une connectivité complète à chaque instant, comme mentionné précédemment. La technique MBB permet de minimiser les interruptions de service et de garantir une expérience utilisateur fluide en basculant entre les satellites de manière transparente.

3.6 Conclusion :

En conclusion, cette simulation a permis de mieux comprendre le fonctionnement complexe et la performance du système O3b mPOWER. Grâce à l'utilisation de l'outil MATLAB avec l'Aerospace Toolbox et la technique "make before break", nous avons pu modéliser avec précision l'architecture de ce système de communication révolutionnaire. Les résultats obtenus mettent en lumière les avantages significatifs de cette technologie, notamment sa capacité à fournir une connectivité mondiale, en particulier dans les régions éloignées et mal desservies. Les résultats de la simulation témoignent de la solidité du système O3b mPOWER dans le cadre de notre étude. Ils renforcent notre compréhension de la performance du système et mettent en évidence sa capacité à maintenir des connexions fiables et continues pour les utilisateurs ciblés. Il est clair que le système O3b mPOWER joue un rôle crucial dans la réduction de la fracture numérique et dans l'amélioration des communications mondiales. Pour l'avenir, des améliorations continuent et une expansion de la constellation de satellites promettent d'apporter encore plus de bénéfices aux utilisateurs finaux, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités dans le domaine des télécommunications par satellite.

4 Conclusion générale et Les perspectives :

L'étude et la simulation du système O3b mPOWER ont permis de mettre en lumière les avancées significatives qu'apporte cette technologie dans le domaine des télécommunications par satellite. En examinant en détail son architecture, son fonctionnement et ses avantages, et nous avons utilisé des outils de simulation avancés, notamment MATLAB avec l'Aerospace Toolbox, pour évaluer sa performance, nous avons pu constater l'impact majeur qu'elle a sur la connectivité mondiale, en particulier dans les régions éloignées et mal desservies.

La constellation de satellites en orbite terrestre moyenne (MEO) d'O3b mPOWER offre une combinaison unique de latence réduite, de portée étendue et de débit élevé, ce qui en fait la solution idéale pour répondre aux besoins croissants de connectivité à l'échelle mondiale. La performance de qualité opérateur et le contrôle dynamique adaptatif garantissent une expérience utilisateur optimale.

De plus, la flexibilité de cette technologie permet de l'intégrer dans un réseau ouvert, offrant ainsi une connectivité robuste et évolutive pour divers secteurs, notamment le backhaul, le trunking, l'énergie, la croisière, l'aérospatiale, le gouvernement, et bien d'autres.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, O3b mPOWER présente également des défis et des limitations, notamment en termes de couverture globale, de coûts d'infrastructure et d'interopérabilité. Il est essentiel de prendre en compte ces aspects pour une mise en œuvre réussie de cette technologie.

En fin de compte, O3b mPOWER représente une avancée significative dans le domaine des télécommunications spatiales, offrant un potentiel immense pour améliorer la connectivité mondiale. Son développement continu et ses futures applications, notamment dans le contexte de la 5G-NTN, ouvrent de nouvelles perspectives passionnantes pour l'avenir des communications satellitaires.

Ce projet d'étude et de simulation a contribué à mieux comprendre cette technologie et ses implications, et il offre un point de départ solide pour des recherches et des développements futurs visant à exploiter pleinement le potentiel d'O3b mPOWER.

En fin de compte, O3b mPOWER représente une avancée majeure dans le domaine de la connectivité mondiale, avec le potentiel de transformer des régions entières en les reliant au monde numérique.

Les perspectives d'amélioration :

Les perspectives d'amélioration de notre thèse sont nombreuses et promettent d'enrichir davantage notre recherche. Voici quelques exemples :

- Étude du bilan de liaison du système O3b mPOWER : Nous pourrions approfondir notre analyse du bilan de liaison en tenant compte de divers facteurs tels que les conditions météorologiques, la congestion du réseau et d'autres variables importantes pour évaluer la performance du système O3b mPOWER dans des scénarios réels.
- Intégration des antennes spécifiques et des modems dans la simulation : Pour obtenir des résultats plus précis, nous pourrions intégrer les caractéristiques spécifiques des antennes et des modems utilisés dans le système O3b mPOWER dans notre modèle de simulation. Cela nous permettrait d'obtenir des données plus proches de la réalité.
- Ajout de logiciels intelligents dans la simulation : L'introduction de logiciels intelligents, tels que des algorithmes d'optimisation de la bande passante ou de gestion de la qualité de service, dans notre simulation pourrait améliorer la compréhension de la manière dont le système O3b mPOWER peut s'adapter dynamiquement aux besoins changeants du réseau.
- Analyse des performances dans des scénarios diversifiés : Nous pourrions élargir notre étude en examinant les performances du système O3b mPOWER dans différents environnements, tels que les zones urbaines, rurales, ou des situations d'urgence. Cela permettrait d'obtenir une vision plus complète de sa polyvalence.
- Évaluation des avantages économiques : En plus des aspects techniques, il serait bénéfique d'intégrer une analyse économique pour évaluer les avantages financiers potentiels du déploiement du système O3b mPOWER pour les fournisseurs de services de télécommunications.
- Exploration de nouvelles technologies : Enfin, nous pourrions également envisager d'explorer de nouvelles technologies émergentes qui pourraient compléter ou améliorer le système O3b mPOWER, comme l'intégration de la 5G ou des systèmes de communication quantique.

En incorporant ces perspectives d'amélioration dans notre thèse, nous pourrions renforcer la pertinence et la valeur de notre recherche, en fournissant des informations plus complètes et actualisées sur le système O3b mPOWER et son impact dans le domaine des télécommunications spatiales.

ΑΠΠΕΧΕΑ

a) INTELLIAN mP130

Le mP130 est un terminal d'entreprise fixe innovant conçu exclusivement pour O3b mPOWER, apportant la connectivité et les télécommunications aux communautés éloignées, aux entreprises et même aux îles - là où l'infrastructure des communications terrestres est faible ou inexistante, ou là où elle est économiquement irréalisable, L'INTELLIAN mP130 est l'un des deux nouveaux terminaux utilisateur approuvés pour O3b mPOWER, l'autre étant le X130D PM (pour les navires du gouvernement) [34].

➤ Services :

Telco & MNO :

- Entreprise
- mobile Backhaul.
- Trunk .
- Onshore Énergie et mines.



Figure 0-1:INTELLIAN mP130

Gouvernement :

- Entreprise fixe gérée.
- Entreprise fixe souveraine

➤ Key spécifications :

Tableau 0-1:SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN m P 1 3 0

Taille et poids et alimentation	
Hauteur du radôme	143.0 cm/56.3”
Diamètre du radôme	150.0 cm/ 59.”
Poids	100 kg / 220.5 lbs
Source d'alimentation	-48vDC or 100-240v
Débit	
Débit d'acheminement typique	500 Mbps
Débit de données typique	200 Mbps
Frequency & Gain	
Polarisation	Circulaire LHCP / RHCP (Auto Switchable)
Rx Fréquence	17.7 ~ 20.2 GHz
Rx Gain (Avec Radome)	Min. 45.7 dBi
G/t	21.4 dB/K (@19.0 GHz, EL 20 Degrés)
Tx Fréquence	27.5 ~ 30.0 GHz
Tx Gain (Avec Radome)	Min. 48.9 dBi
EIRP (20W Transceiver)	61.3 dBW

b) Intellian mP85NX :

Le mP85NX est un terminal d'entreprise fixe innovant conçu exclusivement pour O3b mPOWER, qui apporte la connectivité et les télécommunications aux communautés éloignées, aux entreprises et même aux îles - là où l'infrastructure des communications terrestres est faible ou inexistante, ou lorsqu'elle est économiquement irréalisable [35].

➤ Services :

Mobilité :

- Yacht

Gouvernement :

- Gestion navale
- Souveraineté navale

➤ Key spécifications :



Figure 0-2: Intellian mP85NX

Tableau 0-2: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN mP85NX

Taille et poids et alimentation	
Hauteur du radôme	123 cm/ 48.4"
Diamètre du radôme	113 cm/ 44.5"
Poids	96 kg / 211.6 lbs
Source d'alimentation	AC 100 or 240v, 50-60hz
Débit	
Débit d'acheminement typique	300 Mbps*
Débit de données typique	100 Mbps*
Frequency & Gain	
Polarisation	Circulaire LHCP / RHCP (Auto Switchable)
Rx Fréquence	17.7 ~ 20.2 GHz
Rx Gain	42.7 dBi
G/t	18.3 dB/K (@19.7 GHz, EL 10°)
Tx Fréquence	27.5~30.0 GHz
Tx Gain	45.9 dBi
EIRP (20W Transceiver)	57.8 dBW (Ka-band 20W)

c) Intellian X130D PM :

Le X130D PM est une solution VSAT bibande qui passe électroniquement de la bande Ku à la bande Ka en une seule commande . Il s'agit d'un terminal de qualité militaire conçu pour être utilisé dans des applications militaires et conforme aux spécifications requises, notamment FCC, ETSI, MIL-STD-810H et MIL-STD-461G [36].

➤ **Services :**

Énergie :

- Énergie offshore

Gouvernement:

- Gestion navale
- Navale souveraine

➤ **Key spécifications :**



Figure 0-3: Intellian X130D PM

Tableau 0-3: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN X130D PM

Taille et poids et alimentation		
Hauteur du radôme	172.4 cm/ 67.87"	
Diamètre du radôme	168.1 cm/ 66.18"	
Poids	180 kg / 396.83 lbs	
Source d'alimentation	AC 100 or 240VAC, 50-60Hz	
Caractéristique spéciale	KU / KA Système de commutation automatique	
Débit		
Débit d'acheminement typique	600 Mbps*	
Débit de données typique	200 Mbps*	
Frequency & Gain		
	KU-Band	KA-Bande
Polarisation	Cross & Co Pol	LHCP, RHCP
Rx Fréquence	10.7 ~ 12.75 GHz	17.7 ~ 20.2 GHz
Rx Gain	41.7 dBi @ 11.85 GHz	45.5 dBi @ 19.0 GHz
G/t	20.4 dB @ 11.85 GHz	21.0 dB/K @ 19.0 GHz
Tx Fréquence	13.75 ~ 14.5 GHz	27.5~30.0 GHz
Tx Gain	42.7 dBi @ 14.0 GHz	48.5 dBi @ 28.8 GHz
EIRP	55.8 dBW (@14.25GHz, 25Watt)	60.5 dBW (@29.0GHz, 20 Watt)

d) AvL 2.4m X-Y:

L'AvL est un système d'antenne transportable et ultra-robuste qui fonctionne avec une couverture hémisphérique complète à l'aide d'un positionneur X-Y et qui élimine les passages aériens en "trou de serrure". Le réflecteur en fibre de carbone est segmenté et l'antenne est facile à assembler, à désassembler et à emballer. L'antenne AvL 2,4 m X-Y a été développée pour SES O3b mPOWER afin d'être utilisée comme terminal utilisateur à haut débit ou comme passerelle transportable. L'antenne X-Y suivra les satellites O3b mPOWER en orbite terrestre moyenne (MEO) et fournira un suivi direct des satellites au-dessus de la tête¹. L'antenne fonctionnera par paires et se caractérisera également par des vitesses de repérage améliorées, optimisées pour une performance opérationnelle robuste du réseau [37].

Services :

Telco et MNO:

- Trunk

Gouvernement:

- Entreprise fixe souveraine
- Entreprise fixe gérée



Figure 0-4: AvL 2.4m X-Y

➤ Key spécifications :

Tableau 0-4: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN AvL 2.4m X-Y

Taille et poids et alimentation	
Diamètre du radôme	240 cm/ 94,49"
Source d'alimentation	50-60Hz, 100-240VAC
Débit	
Débit d'acheminement typique	1,500 Mbps*
Débit de données typique	750 Mbps*
Frequency & Gain	
Polarisation	LHCP/RHCP
Rx Fréquence	17.7 ~ 20.2 GHz
Rx Gain	51.8 dBi
G/t	26.5 dB/K
Tx Fréquence	27.5~30.0 GHz
Tx Gain	55.6 dBi
EIRP	69.5 dBW

e) **VIASAT 2.4M:** Le VIASAT 2.4M est un système d'antenne en bande Ka conçu pour les derniers satellites à grande capacité en bande Ka . Il convient parfaitement aux applications en bande Ka à haute performance sur orbite MEO ou inclinée, offrant une connectivité à haut débit pour les services résidentiels, commerciaux et gouvernementaux [38].

➤ **Services :**

Telco & MNO:

- Trunk
- Mobile Backhaul
- Enterprise

Gouvernement:

- Entreprise fixe souveraine
- Entreprise fixe gérée



Figure 0-5:VIASAT 2.4M

➤ **Key spécifications :**

Tableau 0-5: SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES du INTELLIAN VIASAT 2.4M

Taille et poids et alimentation	
Diamètre de l'antenne	240 cm/ 94.49"
Poids	616 kg / 396.83 lbs
Source d'alimentation	48V DC 500W
Débit	
Débit d'acheminement typique	1,200 Mbps*
Débit de données typique	750 Mbps*
Frequency & Gain	
Polarisation	LHCP, RHCP
Rx Fréquence	17.7 ~ 20.2 GHz
Rx Gain	51.1 dBi
G/t	26.8 dB/K (20o EL, clear sky)
Tx Fréquence	27.5~30.0 GHz
Tx Gain	54.4 dBi
EIRP	69.6 dBW (@29.0GHz, 40W BUC)

ΑΠΠΕΧΕ Β

Modems et plates-formes pris en charge

a) Gilat SkyEdge-4

La SkyEdge IV est la plate-forme multiservice de nouvelle génération de Gilat, construite avec la nouvelle architecture Elastix avancée. La plateforme unique de SkyEdge IV pour l'exploitation multi-orbite permet le déploiement sur des satellites GEO à très haut débit (VHTS) ainsi que sur des constellations stationnaires non GEO (NGSO) et exploite un réseau multi-orbite unique et unifié.

La SkyEdge IV est une plateforme hautement élastique qui permet, avec les satellites définis par logiciel (SDS), la création de réseaux programmables définis par logiciel (SDN) qui prennent en charge les changements à la volée pour répondre de manière optimale aux changements dynamiques du réseau.

L'architecture Elastix est une architecture distribuée basée sur le nuage, qui permet de séparer la fonction de transmission située dans la passerelle et les fonctions de traitement des données basées sur les logiciels, qui peuvent être déployées de manière flexible sur des serveurs en nuage situés n'importe où dans le réseau. [39].

b) ST Engineering Next-Generation (Dialog based)

La Dialog est une plateforme de communication par satellite multiservice, évolutive et flexible, qui permet aux fournisseurs de services d'accéder à un large éventail de marchés, de gérer efficacement les coûts d'exploitation et d'investissement et de créer une valeur unique pour les clients. Dialog offre l'évolutivité et la souplesse nécessaires pour exploiter des réseaux satellitaires performants et très efficaces et permet aux fournisseurs de services satellitaires de construire et d'adapter facilement leur réseau au fur et à mesure que leur activité se développe, ce qui les place dans une perspective de croissance et de réussite à long terme. [39].

c) Legacy O3b Point-to-multipoint and SCPC Modems: Viasat MeoLink, Comtech CDM-760:

Les modems point-à-multipoint et SCPC (Single Channel Per Carrier) de la gamme Legacy O3b, notamment Viasat MeoLink et Comtech CDM-760, sont des équipements de communication par satellite utilisés pour établir des liaisons de données haut débit via le système O3b MEO (Medium Earth Orbit).

- **Viasat MeoLink :**

Le modem MEOLink est un modulateur/démodulateur de satellite multi-canal par porteuse (MCPC) haute performance à plusieurs ports Ethernet qui convertit les signaux d'entrée Ethernet en fréquences intermédiaires (FI) à formes d'ondes multiples et vice-versa. Le MEOLink assure la rétrocompatibilité de la forme d'onde DVB-S2 avec la technologie de modem utilisée sur le terrain, tout en ajoutant des récepteurs doubles pour prendre en charge les satellites MEO avec un transfert sans perte. Le MEOLink fonctionne à des vitesses comprises entre 5 Mbps et 800 Mbps avec des taux de symboles de 10 à 180 Msps. Les formes d'onde de modulation comprennent Q-/8-/16A-/32A-PSK. Les fonctions de codage et de modulation adaptatifs (ACM) et de contrôle avancé de la puissance sur la liaison montante (AUPC) permettent de préserver les ressources satellitaires. [39].

- **Comtech CDM-760 :**

Le CDM-760 est un modem avancé de transmission et de diffusion à haut débit qui vient s'ajouter à notre famille primée de modems de transmission à haut débit et à haute efficacité. Le CDM-760 améliore encore pour inclure des débits de symboles à bande ultra large, des performances proches de la théorie avec une perte d'implémentation minimale, une variété de sélections MODCOD à haute efficacité. Configurable en tant que véritable modem DVB-S2&S2X, démodulateur ou modem et prend en charge les modes HTS, GEO et MEO avec transfert d'antenne et de satellite sans interruption. [39].

d) Special Purpose (Govt) Waveforms

"Special Purpose (Govt) Waveforms" fait référence à des formes d'ondes spéciales conçues pour répondre aux besoins du gouvernement ou des autorités gouvernementales dans le contexte des communications par satellite ou d'autres systèmes de communication. Ces formes d'ondes sont développées pour des applications spécifiques qui peuvent inclure la sécurité nationale, la défense, l'application de la loi, la gestion des catastrophes, la surveillance, etc [39].

ΑΠΠΕΧΕ Ε

Les éphémérides du o3b et o3b mPOWER

OBJECT_NAME	OBJECT_ID	EPOCH	MEAN_MOTION	ECCENTRICITY	INCLINATION	RA_OF ASC_NODE	ARG_OF PERICENTER	MEAN_ANOMALY	EPHEM	ERIS TYPE	CLASSIF TYPE	NORAD CAT ID	ELEMENT SET_NO	REV AT EPOCH	BSTAR	MEAN MOTION DOT
O3B FM5	2013-031A	2023-09- 18T05:26:21.564672	5.00115712	0.0002985	0.0385	348.5092	186.6515	184.8464	0	U	39188	999	18686	0	-1.60E-07	0
O3B FM4	2013-031B	2023-09- 18T16:22:11.969472	5.00116151	0.0002941	0.0575	13.5279	162.8446	183.634	0	U	39189	999	18689	0	-1.60E-07	0
O3B FM2	2013-031C	2023-09- 18T04:11:03.630912	5.00115361	0.0002781	0.061	17.1324	157.1409	185.7341	0	U	39190	999	18693	0	-1.60E-07	0
O3B PFM	2013-031D	2023-09- 18T23:59:37.374432	5.00115989	0.000255	0.0446	357.5871	179.3312	183.0878	0	U	39191	999	18698	0	-1.50E-07	0
O3B FM3	2014-038A	2023-09- 18T10:54:25.477920	5.00116715	0.0000271	0.051	8.9821	126.4332	224.5913	0	U	40079	999	16288	0	-1.60E-07	0
O3B FM7	2014-038B	2023-09- 18T19:13:14.347200	5.0011589	0.0004397	0.0513	13.899	159.2246	186.8869	0	U	40080	999	16773	0	-1.50E-07	0
O3B FM6	2014-038C	2023-09- 18T15:03:45.870336	5.00115252	0.0002619	0.0521	8.8698	165.9861	185.1512	0	U	40081	999	16800	0	-1.60E-07	0
O3B FM8	2014-038D	2023-09- 18T16:20:53.088864	5.00115959	0.0002567	0.0551	10.0889	169.1205	180.7956	0	U	40082	999	16779	0	-1.60E-07	0
O3B FM10	2014-083A	2023-09- 17T12:11:56.907456	5.00115348	0.0002596	0.0498	359.0239	176.1516	184.8308	0	U	40348	999	15968	0	-1.70E-07	0
O3B FM11	2014-083B	2023-09- 18T07:42:28.529856	5.0011554	0.0003174	0.0454	1.5568	166.5064	191.9486	0	U	40349	999	15974	0	-1.60E-07	0
O3B FM12	2014-083C	2023-09- 18T13:09:35.884800	5.00115466	0.0002628	0.0464	2.0017	169.9061	188.1008	0	U	40350	999	15975	0	-1.60E-07	0
O3B FM9	2014-083D	2023-09- 18T04:12:01.323648	5.00115069	0.0002677	0.0443	1.8181	173.0519	185.1369	0	U	40351	999	15989	0	-1.60E-07	0
DIAMOND RED	2017-036U	2023-09- 18T20:59:55.767264	15.4622798	0.0009023	97.1424	294.853	118.4874	241.7285	0	U	42783	999	34724	9.98E-04	4.93E-04	0
DIAMOND GREEN	2017-036W	2023-09- 19T01:15:57.940416	15.48012432	0.000866	97.1409	295.407	118.2281	241.9846	0	U	42785	999	34728	1.11E-03	5.82E-04	0
DIAMOND BLUE	2017-036X	2023-09- 18T18:58:19.990560	15.47040568	0.0008874	97.1413	295.0136	116.9439	243.2719	0	U	42786	999	34731	8.39E-04	4.26E-04	0
LEO VANTAGE 1	2018-004C	2023-09- 18T21:59:09.011328	14.57272536	0.0387926	99.2679	37.2256	250.9023	104.9794	0	U	43113	999	29092	4.09E-04	5.23E-05	0
O3B FM15	2018-024A	2023-09- 18T20:10:41.922336	5.00114513	0.0002681	0.0526	357.1096	175.4088	187.4901	0	U	43231	999	10106	0	-1.50E-07	0
O3B FM16	2018-024B	2023-09- 18T02:15:50.584608	5.00116261	0.0002731	0.0557	354.179	177.8724	187.9571	0	U	43232	999	10076	0	-1.60E-07	0
O3B FM14	2018-024C	2023-09- 18T12:49:11.385984	5.00115749	0.0002921	0.0572	353.7355	179.9547	186.3179	0	U	43233	999	10079	0	-1.60E-07	0
O3B FM13	2018-024D	2023-09- 18T14:06:30.070656	5.0011563	0.0002513	0.0418	11.4463	146.1053	202.4638	0	U	43234	999	10090	0	-1.60E-07	0

O3B FM20	2019-020A	2023-09- 18T13:27:36.688320	5.00115747	0.0002866	0.0502	359.6445	166.129	194.239	0	U	44112	999	8141	0	-1.60E-07	0
O3B FM19	2019-020B	2023-09- 18T09:18:39.275712	5.0011558	0.0004173	0.0284	358.5315	179.1959	182.2788	0	U	44113	999	8127	0	-1.60E-07	0
O3B FM17	2019-020C	2023-09- 17T20:50:32.402112	5.00116047	0.0002667	0.0693	4.114	166.5165	189.3785	0	U	44114	999	8133	0	-1.70E-07	0
O3B FM18	2019-020D	2023-09- 19T00:20:27.655008	5.00116041	0.0002687	0.0498	359.4353	176.8659	183.7053	0	U	44115	999	8150	0	-1.50E-07	0
SALSAT	2020-068K	2023-09- 18T20:50:19.750560	15.08670253	0.0015901	97.778	210.9569	154.8755	205.325	0	U	46495	999	16319	4.84E-04	7.54E-05	0
O3B MPOWER F1	2022-174A	2023-09- 18T19:16:22.662048	5.00118458	0.0004819	0.0466	16.6355	175.6375	8.3443	0	U	54755	999	1521	0	-1.50E-07	0
O3B MPOWER F2	2022-174B	2023-09- 19T00:03:56.831904	5.00113742	0.0006576	0.0488	17.6208	212.9711	129.3545	0	U	54756	999	1529	0	-1.50E-07	0
O3B MPOWER F4	2023-059A	2023-09- 18T17:22:30.751392	5.0011543	0.0006268	0.0386	356.1211	196.1006	167.7676	0	U	56367	999	845	0	-1.60E-07	0
O3B MPOWER F3	2023-059B	2023-09- 18T10:10:57.248544	5.00115095	0.0002521	0.0387	352.7083	208.1957	159.0901	0	U	56368	999	457	0	-1.60E-07	0

Références :

- [1] Satellite Payloads Market Size By Orbit | Industry Report, 2014-2025.
<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/satellite-payloads-market>.
- [2] Gérard Maral, Michel Bousquet, and Zhili Sun. “Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology, Sixth Edition”. John Wiley & Sons Ltd. © 2020
- [3] Satellite Communications Applications, Testing, Test Tools – GL COMMUNICATIONS INC. [Satellite Communications - Applications, Testing and Test Tools \(gl.com\)](#)
- [4] K. arun, « Module 5 Broadcast Communication Networks », in Academia.edu.
- [5] G. Maral, M. Bousquet, et Z. Sun, Satellite communications systems: systems, techniques and technology, 5th ed. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley, 2009.
- [6] Sonja Caldwell, Jun 9, 2023, National Aeronautics and Space Administration(NASA),
<https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/communications>
- [7] AGRAWAL, Brij N. Design of geosynchronous spacecraft. Prentice-Hall, Inc., 1986.
- [8] CNES, « techniques et technologies des véhicules spatiaux», tome I, Cépaduès Editions, 1994.
- [9] Le guide du satellite de télécommunication. Eutelsat communications, février. 2008.
- [10] P. Fortescue, G. Swinerd, et J. Stark, Spacecraft Systems Engineering, 4e éd. Wiley, 2011.
- [11] AGRAWAL, Brij N. Design of geosynchronous spacecraft. Prentice-Hall, Inc., 1986.
- [12] What is Horn Antenna: Working & Its Applications - ElProCus. <https://www.elprocus.com/horn-antenna/>.
- [13] Reflector Antennas - McMaster University.
https://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L19_Reflector.pdf
- [14] Phased Array Antennas: Principles, Advantages, and Types. <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021phased-array-antennas-principles-advantages-and-types>.
- [15] Common Applications of Phased Array Antennas | System Analysis Blog <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-common-applications-of-phased-array-antennas>.
- [16] Satellite de télécommunications | Futura Sciences. <https://www.futura-sciences.com/sciences/espace/astronautique/satellite-telecommunications/>
- [17] Nordine Abdallah . ‘ ‘ Satellite ‘ ‘. Chapitre 1 : les satellites et système de transmission par satellite.
<http://nourdineabdallah.fr/Files/Other/.pdf>.
- [18] Clayton Vallabhan, “MDA provides communication subsystems for O3b”, SatellitePro ME,
<https://satelliteprome.com/author/clayton/>.

- [19] Federal Aviation Administration (FAA). (2016). The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2016.
- [20] “LES RESEAUX DE SATELLITES”, AXESS, 2019, <https://axessnet.com/fr/les-reseaux-de-satellites>
- [21] Schéma | Wikipedia.
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Comparison_satellite_navigation_orbits.svg
- [22] Satellite de télécommunications | techno-science .2022. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Satellite-de-telecommunications.html>
- [23] What is a Transponder? | Definition from TechTarget.
<https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/transponder>
- [24] Raul Dominguez-Gonzalez. Deimos Space S.L.U., Spain. “DISPOSAL STRATEGIES ANALYSIS FOR MEO ORBITS”.
- [25] Ses s.a | FICHE D’INFORMATION PRESSE: O3b mPOWER | janvier 2023.
https://www.ses.com/sites/default/files/2023-03/SES_O3bmPOWER_PressFactsheet_January_2023_FR.pdf
- [26] SES Team Spotlight: Stewart Sanders on the Innovation Power of the O3b mPOWER Ecosystem
<https://www.ses.com/blog/ses-team-spotlight-stewart-sanders-innovation-power-o3b-mpower-ecosystem>
- [27] O3b mPOWER Constellation Africa https://www.ses.com/sites/default/files/2020-11/O3b%20mPOWER_image_3.jpg
- [28] SES . MEDIA LIBRARY, O3b mPOWER, <https://www.ses.com/media-gallery/o3b-mpower>
- [29] Ses s.a | Lancement réussi des deux premiers satellites O3b mPOWER Press Release | 17 Déc 2022.
<https://www.ses.com/fr/press-release/lancement-reussi-des-deux-premiers-satellites-o3b-mpower>
- [30] Mark Holmes | April 28, 2021, SES Exec Details Ground Station of the Future for O3b mPOWER, via satellite | <https://www.satellitetoday.com/ground-systems/2021/04/28/ses-exec-details-ground-station-of-the-future-for-o3b-mpower/>
- [31] Mark Holmes | March 30, 2022, Comtech to Supply Gateways and User Terminals for SES O3b mPOWER | <https://www.satellitetoday.com/ground-systems/2022/03/30/comtech-to-supply-gateways-and-user-terminals-for-ses-o3b-mpower/>
- [32] O3b mPOWER | SES | March 30, 2022, 20 | mPOWER Newsroom Factsheet FR |pdf
https://www.ses.com/sites/default/files/2020-12/SES_O3b%20mPOWER_Newsroom_Factsheet_FR.pdf.
- [33] April 28, 2021| Eastern Daylight Time| Le système de prochaine génération en orbite NGSO de SES se prépare au lancement avec l’installation des 8 premières stations sol O3b mPOWER
- [34] Intellian Unveils Two New Terminals - MarineLink. <https://www.marinelink.com/news/intellian-unveils-two-new-terminals-495207>.
- [35] INTELLIAN mP85NX |SES| <https://www.ses.com/o3b-mpower/o3b-mpower-technology/intellian-mp85nx>.

[36] X130D PM - Intellian. | intelliantech | <https://intelliantech.com/en/products/mil-spec-vsats/x130d-pm/>..

[37] AvL Technologies-2.4m X-Y Auto-Acquire FlyAway Antenna. <https://www.avltech.com/products/21451/14>.

[38] 2.4 Meter Ka-band Antenna - Viasat. https://www.viasat.com/content/dam/us-site/antenna-systems/documents/2.4_ka_band_meo_antenna_010_web.pdf.

[39] Ashok Kolar Rao,O3b mPOWER A NEW ERA for Satellite Communications. May 24, 2022.VP Product Development, SES.

[40] Satellite Communications Toolbox - MATLAB - MathWorks.
<https://www.mathworks.com/products/satellite-communications.html>.

[41] Satellite Scenario Basics - MATLAB & Simulink - MathWorks.
<https://www.mathworks.com/help/satcom/gs/satellite-scenario-overview.html>.