

Plateformes à haute altitude et constellations de satellites

Introduction

Les plateformes à haute altitude et les constellations de satellites partagent l'ambition d'offrir une infrastructure pour l'accès fixe ou mobile large bande dans les zones où les réseaux mobiles terrestres ne sont pas rentables économiquement, ambition qui concerne plus du tiers des habitants de la planète. Dans le cas des plateformes à haute altitude, le déploiement peut se faire rapidement, au coup par coup, selon les besoins de chaque pays. Pour les constellations, une fois tous les satellites lancés, l'infrastructure est disponible sur l'ensemble de la planète.

Il y a une vingtaine d'années, les progrès de la technologie permettant d'envisager la réalisation de tels systèmes à court terme, les conférences mondiales de l'UIT (CMR) furent saisies de demandes en spectre considérables pour permettre cette réalisation. Satisfaire ces demandes représentait dans les deux cas un casse-tête technico-réglementaire pour autoriser sans risque de brouillage l'accès de ces systèmes au spectre attribué à d'autres systèmes terrestres ou par satellite. Au prix de difficiles négociations, la CMR-97 résolut ce casse-tête et les CMR suivantes complétèrent ses décisions par la mise à disposition de spectre additionnel.

La crise du début des années 2000 vint à bout des projets de l'époque, mais aujourd'hui, les progrès récents de la technologie et les décisions prises par l'UIT il y a plus de vingt ans font que le déploiement de ces systèmes est désormais une réalité. C'est un des rares exemples où la réglementation mondiale a précédé la technologie.

Plateformes à haute altitude

Par **Christine MENGELLE**

Thales Alenia Space

Initialement utilisées à des fins scientifiques pour la météorologie ou la surveillance de l'environnement, les plateformes à haute altitude ont suscité un intérêt croissant depuis la fin des années 1990, comme complément de connectivité radio des réseaux terrestres et à satellites. Les principaux avantages du positionnement de ces plateformes dans la stratosphère sont de permettre une large zone de couverture, tout en étant situées au-dessus du trafic aérien commercial et des forts courants de vents (courants-jets).

Depuis trois décennies, les progrès technologiques et une meilleure connaissance de l'environnement stratosphérique ont permis d'améliorer la viabilité de projets de plateformes à haute altitude. En parallèle, depuis 1997, l'environnement réglementaire a favorablement évolué avec l'identification par l'Union internationale des Télécommunications (UIT) de bandes de fréquences dédiées permettant le déploiement de ces nouveaux types de service.

Atouts des stations à haute altitude

Les plateformes à haute altitude présentent des avantages opérationnels indéniables, liés notamment à la taille de leur zone de couverture (plus large que des réseaux terrestres classiques) associée à

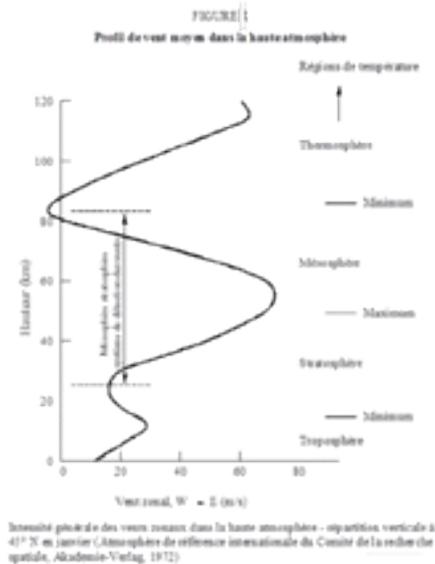
une très faible latence (comparée à celle des satellites). A ce titre, elles sont donc particulièrement intéressantes pour assurer des opérations de surveillance pour des applications civiles et de défense, ou de télécommunication pour des applications de connexité large bande ou mobiles terrestre.

Ces stations présentent également l'avantage d'être déployables très facilement avec une infrastructure de réseau et une maintenance au sol minimales, dans des zones isolées géographiquement (montagneuses, désertiques...) ou suite à un sinistre (tremblement de terre, cyclone...).

En outre, elles peuvent facilement être ramenées au sol pour assurer leur maintenance ou leur évolution, cette dernière pouvant consister à remplacer la charge utile pour embarquer des technologies plus avancées, ou à changer de mission.

Ce type de plateforme offre donc une excellente complémentarité avec les solutions terrestres et à satellites en termes de connexité radio.

Contraintes techniques et technologiques



Ce concept de plateformes opérant dans un environnement stratosphérique implique des défis technologiques importants liés à des domaines aussi divers que l'avionique, l'efficacité des panneaux solaires, le stockage de l'énergie, les matériaux composites et les antennes. Ces défis, qui ont longtemps été un frein à leur développement depuis les premiers projets des années 1990, sont en passe d'être relevés avec les projets qui ont vu le jour ces dernières années.

L'opération de ces plateformes impose d'autres contraintes techniques telles que le maintien d'une position quasi stationnaire au-dessus de la zone desservie au sol. A cet égard, le choix de l'altitude opérationnelle (typiquement autour de 20 km) présente l'avantage de se situer au-dessus des courants-jets (situés entre 10 et 15 km), dans des zones où les vents sont beaucoup moins forts. Les plateformes peuvent ainsi planer ou se mouvoir selon un modèle prévisible, au-dessus de l'altitude maximale de l'espace aérien contrôlé.

Deux grands types de plateformes ont ainsi vu le jour pour répondre à ces contraintes : celles de type ballons dirigeables (ou *LTA* : *Lighter Than Air*) et celles de type drones (ou *HTA* : *Heavier Than Air*). Ces choix sont souvent historiques de la part des constructeurs, et répondent à des contraintes avioniques et à des exigences de maintenabilité en vol différentes.

Les plateformes à haute altitude à l'UIT

L'exploitation de plateformes depuis la stratosphère implique également des contraintes réglementaires liées à l'émission de fréquences radio à 20 km d'altitude, ceci afin de garantir un environnement radioélectrique viable pour ces plateformes ainsi que pour les autres utilisateurs du spectre.

Dès 1997, la Conférence mondiale des Radiocommunications (CMR-97) décide de définir un nouveau type de station dans le Règlement des Radiocommunications (RR) pour décrire ces stations à haute altitude ou HAPS (*High Altitude Platform Station*) : « Une station installée sur un objet placé à une altitude comprise entre 20 et 50 km et en un point spécifié, nominal, fixe par rapport à la Terre » (No. 1.66A du RR). Pour la première fois, la CMR-97 décide également d'identifier des bandes de fréquences pour lesquelles l'opération des HAPS est désormais autorisée au niveau mondial : 47.2-47.5 GHz et 47.9-48.2 GHz.

Toutefois, il s'avère que dans certaines zones du globe (notamment tropicales), cette gamme de fréquences est fortement contrainte par les affaiblissements dus à la pluie, rendant son utilisation par les HAPS très difficile d'un point de vue technique. Pour répondre à cette difficulté, la CMR-2000 identifie des nouvelles bandes de fréquences pour les HAPS à 28 GHz (27.9-28.2 GHz, sens HAPS-Terre) et à 31 GHz (31-31.3 GHz, sens Terre-HAPS) dans 23 pays majoritairement situés en Asie, mais sur une base de non-protection, non-brouillage vis-à-vis des autres services utilisant ces bandes.

Devant l'essor des réseaux mobiles, la CMR-2000 décide également d'autoriser l'utilisation des HAPS comme stations de base de réseaux de télécommunications mobiles internationales (IMT) dans les bandes de fréquence comprises entre 1.9 GHz et 2.1 GHz. Cette décision est complétée à la CMR-12 par une identification de fréquences pour les HAPS de 2 x 80 MHz dans la bande 6 GHz, limitée à des « liaisons passerelles » (*Gateways*), pour la connexion entre stations de base des réseaux mobiles. Cette identification est limitée à cinq pays, là encore sur une base de non-protection, non-brouillage.

Compte tenu des difficultés de partage du spectre posées par les HAPS, la CMR-12 a également décidé de limiter leur exploitation aux bandes de fréquences expressément identifiées dans l'article 5 du RR (No. 4.23).

Les futurs usages des HAPS

Depuis quelques années, des avancées technologiques majeures ont permis de démontrer la viabilité des HAPS. Ceci s'est concrétisé par l'émergence de nombreux projets dès le début des années 2010, portés notamment par Thales Alenia Space, Airbus ou Lockheed Martin.



Figure 2 : Exemple de HAPS HTA en cours de développement
©Thales Alenia Space

Lors de la CMR-15, à l'initiative de Facebook, un nouveau point d'ordre du jour pour la CMR-19 a été proposé portant sur l'identification de fréquences HAPS pour faciliter l'accès aux applications large-bande à l'échelle mondiale. Après quatre années d'études de partage détaillées menées à l'UIT, la CMR-19 a identifié les bandes de fréquences 31-31,3 GHz (sens HAPS-Terre) et 38-39,5 GHz pour une utilisation mondiale par les HAPS, ainsi que les bandes 21,4-22 GHz et 24,25-27,5 GHz en Région 2 (continent américain).

Par ailleurs, la CMR-19 a chargé la CMR-23 d'étudier la possibilité, pour une station HAPS, d'utiliser les mêmes bandes de fréquences que les stations de base IMT au sol pour étendre la connectivité large bande mobile aux communautés mal desservies et aux zones isolées, en dessous de la bande de fréquences 2.7 GHz.

Conclusion

Les progrès technologiques dans les domaines des matériaux composites, de l'avionique, des cellules solaires, des batteries et des moteurs électriques permettent désormais d'envisager le déploiement à court terme de projets de stations à haute altitude.

Les récentes décisions de la CMR-19, qui a d'une part identifié des bandes harmonisées aux niveaux mondial et régional pour les HAPS pour des applications de connectivité large-bande, et d'autre part décidé d'étudier l'utilisation de stations placées sur des plateformes à haute altitude en tant que stations de base IMT, contribuent d'une façon majeure à la mise en place d'un cadre réglementaire propice indispensable au développement de ces plateformes.

Constellations de satellites

Par **François RANCY**

Dès les premières années de l'ère spatiale, les satellites géostationnaires (GSO) se sont imposés pour la fourniture de services commerciaux de télécommunications spatiales. La raison en est simple : l'orbite des satellites géostationnaires, située dans le plan de l'équateur à l'altitude de 36 000 km, est la seule qui permette à un satellite de rester fixe par rapport à la Terre. La station terrienne qui l'utilise n'a donc besoin que d'une seule antenne pointée dans une direction fixe de l'espace alors que dans le cas d'un système à satellites non géostationnaires (NGSO), il lui faut plusieurs antennes qui doivent en permanence changer de direction de pointage pour assurer un suivi sans coupure. De plus, un système de trois satellites GSO permet d'assurer une couverture quasi totale de la planète, à l'exception notable des zones polaires (typiquement au-delà de 60° de latitude, où ces satellites ne sont plus visibles), alors qu'un système à satellites NGSO nécessite, pour assurer une couverture mondiale permanente, un minimum d'une douzaine de satellites, ces satellites passant la plupart de leur temps à couvrir des zones non habitées. Ces raisons expliquent la domination quasi exclusive de l'orbite des satellites géostationnaires sur toutes les autres orbites depuis près de soixante ans pour les liaisons commerciales fixes ou de radiodiffusion.

Ainsi, le **No. 22.2**⁽¹⁾ du Règlement des Radiocommunications (RR) précisait, depuis le début de l'ère spatiale, que « les systèmes à satellites non géostationnaires ne doivent pas causer de brouillages inacceptables aux réseaux à satellite géostationnaire du service fixe par satellite et du service de radiodiffusion par satellite fonctionnant conformément aux dispositions du présent Règlement et ne doivent pas demander à bénéficier d'une protection vis-à-vis de ces réseaux ».

(1) Pour éviter toute complication inutile, cet article retient la numérotation des dispositions du RR en vigueur depuis la CMR-97. Avant cette conférence, qui remania entièrement le RR, ces dispositions existaient généralement, mais avec un numéro différent.

La Résolution 506 allait encore plus loin en interdisant tout autre satellite que géostationnaire dans les bandes attribuées au service de radiodiffusion par satellite, excluant ainsi l'utilisation des systèmes NGSO du service fixe par satellite dans les bandes partagées entre les deux services.

On comprend que ces deux dispositions signaient la mort réglementaire des systèmes commerciaux NGSO, à l'exception notable des satellites utilisés pour le service mobile, et dont les stations terriennes peu directives pouvaient s'accommoder de satellites NGSO. Ainsi, depuis le début des années 1960, le système NGSO russe MOLNIYA assurait la desserte des zones polaires, la plupart des communications mobiles passant par les satellites GSO d'INMARSAT.

Au début des années 1990, apparurent les premiers projets de constellations de satellites NGSO, Orbcom (35 satellites), Iridium (66), Globalstar (48) et ICO (12), qui misaient sur les économies d'échelle qu'un réseau à satellites NGSO couvrant d'emblée toute la planète permettrait d'obtenir pour offrir l'équivalent d'un service mobile cellulaire avec téléphones portables, alors à l'aube de son développement.

A la CAMR-92, les premières constellations firent valoir avec succès leurs demandes d'accès au spectre en obtenant l'attribution au service mobile par satellite, à titre primaire, de **183 MHz** de spectre supplémentaire en dessous de 2.7 GHz, soumise à la procédure de coordination du **No. 9.11A du RR**, basée sur le **principe du premier arrivé-premier servi** entre systèmes GSO, systèmes NGSO, et services de Terre, autrement dit la voie royale pour l'accès au spectre et la reconnaissance et la protection internationales. De plus, les 2x34 MHz attribués depuis le début de l'ère spatiale au service mobile par satellite et utilisés par INMARSAT à 1.5/1.6 GHz étaient également ouverts aux systèmes NGSO sur la même base.



SaVi – Satellite constellation Visualization software, <http://savi.sf.net/>, 2017.

©L. Wood, P. Worfolk et al.

Cette première victoire en appelait une nouvelle : à la CMR-95, des attributions de fréquences supplémentaires furent décidées dans les bandes du service fixe par satellite, pour les liaisons de connexion nécessaires entre satellites NGSO du service mobile par satellite et stations fixes nodales. Compte tenu des difficultés de partage entre systèmes GSO et NGSO, l'application du **No. 9.11A** nécessitait de retenir des bandes peu utilisées à l'époque par les systèmes GSO, et que, de ce fait, ces derniers auraient peu de chances de pouvoir utiliser dans le futur. Le choix de la CMR-95 se porta donc sur les bandes à 5 091-5 250 MHz, 6 700-7 075 MHz, 19,3-19.6 GHz et 29.1-29.4 GHz (au total **1.134 GHz** de spectre partagé avec les services de Terre), également soumises aux dispositions du **No. 9.11A**, et le **No. 22.2** fut donc aboli dans ces bandes.

C'est aussi à la CMR-95 que, de cette question des liaisons de connexion relativement limitée dans ses conséquences et qui avait été bien étudiée lors de la préparation de la conférence, on passa à une bataille épique qui devait s'étendre sur trois CMR, autour de la question des constellations NGSO du service fixe par satellite.

Dans les derniers mois précédant la CMR-15, les promoteurs du système Teledesic (MM. Bill Gates et Craig McCaw, avec l'appui du gouvernement des États-Unis au plus haut niveau) entreprirent de convaincre les Etats membres de l'UIT que les décisions attendues de la CMR-95 sur les liaisons de connexion NGSO pour les systèmes mobiles par satellite auraient pour conséquence d'empêcher le déploiement de ce système, constitué de 840 satellites NGSO et qui devait offrir l'accès immédiat à Internet à tous les pays de la planète quasiment gratuitement.

Personne dans la communauté relativement restreinte de la gestion des fréquences ne semblait alors prendre au sérieux ce projet jugé extravagant par ses dimensions, son prix (10 à 20 milliards de dollars) et son défi ouvert à la technologie de l'époque, d'autant que cette question, n'étant pas à l'ordre du jour de la CMR-95, ne pouvait faire l'objet d'études dans le cadre de sa préparation. La surprise fut donc de taille lorsque, au premier jour de la conférence, un levé de pancartes montra que l'écrasante majorité des Etats membres avait bien compris le message des deux milliardaires et que les jeux étaient faits.

La CMR-95 décida donc de suivre la proposition des Etats-Unis, en ouvrant **1 GHz** de fréquences à 18.8-19.3 GHz et 28.6-29.1 GHz aux systèmes NGSO du service fixe par satellite, également selon la procédure du **No. 9.11A** et en y abolissant le **No. 22.2**. La CEPT, qui s'était opposée avec vigueur à cette décision tout au long de la Conférence pour défendre les intérêts de ses systèmes GSO, subit un revers cuisant, n'obtenant que de rediscuter les 20 % inférieurs de ces deux bandes à la CMR-97 et apparaissant comme opposée au progrès inéluctable de la technologie.

Les études conduites en préparation de la CMR-97 montrèrent que le système Teledesic, qui avait pris date peu après la fin de la CMR-95, et donc avant la plupart des systèmes GSO intéressés par cette bande, était incapable de partager ses fréquences avec d'autres systèmes, GSO ou NGSO, et que, premier arrivé, Teledesic serait donc le seul servi. La décision de la CMR-95 revenait ainsi à donner à ce système 1 GHz de spectre avec le monopole mondial pour la fourniture de services Internet par des systèmes NGSO, les autres bandes du service fixe par satellite restant soumises aux dispositions léonines du **No. 22.2**.

La seule stratégie possible face à une telle situation était d'ouvrir aux systèmes NGSO l'ensemble du spectre attribué aux services fixe et de radiodiffusion par satellite sans toucher aux principes inscrits dans le **No. 22.2**, mais en quantifiant cette disposition par des limites claires sur le rayonnement maximum que peut créer une constellation NGSO pour que le brouillage causé à tout système GSO soit « acceptable ». Pour être crédibles, ces limites devaient être « dures », c'est-à-dire contraignantes et donner lieu à une vérification officielle de conformité par le Bureau des radiocommunications de l'UIT (BR), invalidant les droits d'utilisation du spectre d'un système NGSO en cas de dépassement.

Pour avoir des chances de succès, cette stratégie nécessitait aussi un projet concurrent de Teledesic, qui puisse rendre crédible l'idée de réaliser un système NGSO sur cette base. La société Alcatel Espace (devenue depuis Thales Alenia Space) releva alors ce défi en proposant le système Skybridge. Avec l'appui du gouvernement français, elle réussit en quelques mois à convaincre les 48 Etats membres de la CEPT que la meilleure façon de protéger leurs systèmes GSO était de promouvoir l'adoption du concept de limites dures. C'est ainsi que la CEPT se métamorphosa en championne du progrès et de la concurrence.

Au sein des groupes chargés de la préparation de la CMR-97, l'opposition générale des communautés GSO et de radiodiffusion fit que la conférence commença sans qu'aucune discussion préparatoire n'ait pu avoir lieu. La veille de la conférence, le porte-parole de la FCC expliquait à la presse : « Nous sommes inaltérablement opposés à l'adoption de limites. » Ce n'est qu'à la fin de la première semaine qu'il fut décidé que la proposition de la CEPT serait examinée.

Après trois semaines de négociations acharnées, la CEPT finit par rallier à ses arguments la grande majorité des Etats membres et la CMR-97 adopta ces limites⁽²⁾ dans plus de 7 GHz de spectre, comprenant l'essentiel des bandes attribuées aux services fixe et de radiodiffusion par satellite, et limita la restriction de la Résolution 506 aux seuls systèmes de radiodiffusion par satellite. Ces limites n'étaient cependant que provisoires et restaient à réexaminer par la CMR-2000. Après deux ans d'études approfondies qui finirent par vaincre toutes les oppositions, la CMR-2000 modifia ces limites, le plus souvent en les relâchant, et y ajouta des limites opérationnelles plus sévères dont la conformité devait être vérifiable dans les conditions d'exploitation, et des dispositions particulières pour la protection des très grandes stations terriennes des systèmes GSO. Il ne restait plus qu'à développer le logiciel de validation à utiliser par le BR pour vérifier la conformité aux limites des systèmes NGSO proposés.

La CMR-03 compléta le tableau en ouvrant 1,3 GHz de spectre supplémentaire aux systèmes NGSO à 6 et 4 GHz, l'article 22 couvrant désormais l'essentiel des bandes utilisées commercialement par le service fixe par satellite.

Au début des années 2000, la bulle des valeurs technologiques eut cependant raison de la plupart des systèmes NGSO en projet pour le service fixe par satellite. Les droits acquis par Teledesic expirèrent, laissant ainsi la porte se refermer sur la possibilité d'un système NGSO dans la bande correspondante (du fait de leur occupation désormais réelle par les systèmes GSO) et confirmant que la solution réglementaire de coordination qui avait été adoptée par la CMR-95 n'était pas adaptée sur le long terme.

Depuis 2015, les progrès des technologies de lanceurs et de satellites ont renouvelé l'intérêt pour les constellations NGSO du service fixe par satellite, toujours pour la fourniture d'Internet dans les zones non couvertes par les réseaux fixes ou mobiles, qui représentent encore la plus grande partie de la surface terrestre (sans compter les océans). C'est ainsi que des constellations de plusieurs centaines de satellites NGSO sont actuellement en cours de déploiement :

(2) Plus précisément, il s'agit des limites de puissance surfacique équivalente (epfd) de l'Article 22 du RR, rayonnée de façon cumulative a) par l'ensemble des satellites de la constellation et devant être vérifiées en tout point de la Terre, dans un jeu d'antennes de référence de station terrienne de système GSO pointées vers n'importe quel point de l'orbite GSO, et pour des pourcentages de temps donnés (epfd_↓), et b) par l'ensemble des stations terriennes de la constellation NGSO en tout point de l'orbite GSO (epfd_↑), et c) par l'ensemble des satellites de la constellation NGSO en tout point de l'orbite GSO (epfd_{is}). Le calcul nécessaire pour vérifier la conformité d'un système NGSO à ces limites impose de modéliser l'ensemble de la constellation NGSO et de la « faire tourner ». Pour que ce calcul soit faisable, on suppose que chaque satellite de la constellation rayonne en permanence au maximum de sa capacité, ce qui rend le résultat plus protecteur pour les systèmes GSO.

- OneWeb, 648 satellites construits par OneWeb et Airbus et lancés par Ariane, Soyouz et Virgin Galactic ;
- Starlink, 1 600 satellites construits par SpaceX et lancés par son Falcon 9.

Ce déploiement, rendu possible par des dispositions du RR adoptées vingt ans plus tôt, est un des rares exemples où la réglementation mondiale ait précédé la technologie. Le logiciel de validation du BR, dont le développement avait été mis en sommeil après 2003, a été achevé en 2018 et la plupart des systèmes NGSO proposés ont été jugés conformes aux limites.

Pour assurer le futur des constellations NGSO, la CMR-19 a complété la réglementation par les décisions suivantes :

- Précision sur le délai réglementaire de mise en service après la demande initiale d'accès au spectre pour conserver ses droits sur le spectre : 10 % des satellites de la constellation devront être déployés dans un délai de deux ans après la septième année et 50 % dans les cinq ans, et 100 % dans les sept ans.
- Ouverture de 9 GHz de spectre aux systèmes NGSO dans les bandes à 40 et 50 GHz, dans des conditions similaires à celles décidées par les CMR-97 et 2000, les limites dures applicables dans l'Article 22 contenant des niveaux contraignants de dégradation des performances de systèmes GSO de référence.