

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 40 (1962)

Heft: 12

Artikel: Télécommunications à l'aide de satellites artificiels

Autor: Klein, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875146>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Télécommunications à l'aide de satellites artificiels¹

1. Généralités

Nous assistons actuellement dans le domaine technique à une extraordinaire émulation orientée vers l'exploration et la conquête des régions supérieures de l'atmosphère terrestre et, au delà, des espaces sidéraux.

Cette course à l'espace a été rendue possible grâce aux remarquables succès obtenus dans le développement de l'utilisation des fusées; l'homme a réussi pour la première fois à vaincre la gravitation terrestre pour envoyer dans l'espace des engins emportant une charge utile de proportion modeste mais toujours croissante, atteignant des vitesses relatives qui, en principe, placent à notre portée, pour un proche avenir, certaines parties du système solaire. Un tel espoir apparaissait encore utopique, il y a à peine quelques années; aujourd'hui, il ne se passe guère de semaine sans qu'un nouveau satellite artificiel de la terre soit lancé sur son orbite. Il est évident que la solution du problème de la propulsion dans l'espace n'est pas la seule en cause et qu'il est des centaines d'autres questions à résoudre; cependant, désormais, la voie des découvertes est largement ouverte vers un monde nouveau.

Le montant des investissements engagés par l'organisation faîtière des Etats-Unis d'Amérique pour l'exploration de l'espace, la «National Aeronautical and Space Administration» (NASA), qui dépasse déjà la somme de plusieurs milliards de dollars par année, montre l'importance des moyens matériels et du personnel mis en action par la poursuite des travaux entrepris dans ce domaine.

Les raisons de ce développement et les buts qu'il vise sont à la fois d'ordre scientifique et militaire. L'objectif le plus proche de la science est d'acquérir de précieux renseignements concernant la structure des régions supérieures de l'atmosphère terrestre, l'influence exercée sur elles par les processus compliqués de l'activité solaire, ainsi que sur la structure de l'espace cosmique; comme objectif lointain, elle espère obtenir des aperçus nouveaux sur les origines et l'évolution de notre planète, de notre système solaire et de tout le cosmos, problèmes en rapport avec les fondements de la physique et l'essence de notre existence matérielle. Si, d'une part, la science ne s'est encore jamais trouvée aux prises avec des questions aussi passionnantes et d'une portée aussi étendue, d'autre part, pour s'aventurer dans l'exploration de cet inconnu et en embrasser tous les aspects, il est nécessaire de mobiliser les intelligences les plus

remarquables et de recourir aux auxiliaires matériels les plus perfectionnés de tous les domaines de la technique.

Une des conditions essentielles de la conquête de l'espace, abstraction faite de la nécessité de disposer d'un moyen de locomotion approprié, c'est de pouvoir compter sur la sécurité des communications entre la terre et les véhicules spatiaux, et, dans une phase de développement ultérieure, également entre les véhicules spatiaux eux-mêmes. Dans cet ordre d'idée, il est évident que le problème de l'application utilitaire directe de satellites artificiels de la terre dans les liaisons terre-terre se pose également. Il est séduisant par exemple d'envisager l'utilisation de tels satellites dans les télécommunications intercontinentales de caractère commercial, d'autant plus qu'il n'existe pas encore à l'heure actuelle de moyen de transmission offrant des possibilités assez étendues pour que l'on soit en mesure de faire face à longue échéance au rythme de l'augmentation du volume du trafic. De nombreuses entreprises importantes du domaine de la technique des communications ont mis en œuvre de grands moyens pour le développement d'appareils destinés aux liaisons intercontinentales utilisant des satellites artificiels, tout d'abord aux Etats-Unis d'Amérique et par la suite également dans certains pays européens, sous le signe d'une coopération internationale dont il faut se réjouir. Le rôle imparti au satellite artificiel dans ces systèmes de télécommunication sera celui d'un amplificateur relais sans fil avec convertisseur de fréquence, visible à l'intérieur d'un vaste périmètre, permettant de franchir des distances de plusieurs milliers de kilomètres d'un seul bond. Compte tenu des expériences les plus récentes dans la technique de la haute fréquence et des tout derniers perfectionnements réalisés dans le développement des appareils, il paraît possible d'atteindre par ce moyen une capacité d'information de l'ordre de 10^8 bits; cela signifie, par analogie avec les liaisons par faisceaux hertziens utilisant des micro-ondes au sol, pour chaque canal de transmission, une capacité correspondant à une image de télévision, ou environ 1000 communications téléphoniques ou encore une quantité correspondante de données. Nous nous trouverions donc en possession d'un système de transmission dont les possibilités dépassent de loin celles d'un câble transocéanique moderne muni d'amplificateurs immergés ou, plus encore, d'une liaison intercontinentale sur ondes courtes. Il faut en outre tenir compte du fait que lorsqu'un satellite de télécommunication a été placé sur son orbite, il n'offre pas uniquement la possibilité de relier deux points déterminés, mais permet d'établir des liaisons entre différents

¹ Die deutsche Fassung dieses Artikels ist in den «Technischen Mitteilungen PTT», Nr. 8/1962, S. 273...286, erschienen.

points situés sur une partie étendue de la surface de la terre, aussi bien grâce à une répartition de son utilisation dans le temps, que grâce à une répartition régionale de sa capacité de transmission dans ses zones de visibilité.

Pour que l'étude de satellites à large bande servant aux télécommunications arrive à maturité et que l'on puisse envisager une exploitation avec des applications commerciales, il faut évidemment que de nombreux problèmes, dont la portée n'apparaîtra qu'au cours des essais pratiques, trouvent leur solution. Par contre, il n'existe dans ce domaine aucun obstacle que la technique, au stade actuel de ses réalisations, ne puisse surmonter. De nombreuses institutions internationales, en particulier également les Nations Unies, vouent la plus grande attention à ces problèmes. L'année dernière, en automne, l'Union Radio Scientifique Internationale (URSI) a convoqué ses membres à Paris pour une réunion spécialement consacrée aux télécommunications à l'aide de satellites artificiels, au cours de laquelle les problèmes actuels et les perspectives de développement ont fait l'objet d'un vaste tour d'horizon. L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) a abordé le côté pratique du problème dans le cadre de ses attributions, qui consistent à créer, sur le plan mondial, des conditions techniques et administratives permettant aux transmissions des communications des engins spatiaux de toute espèce de fonctionner à l'abri des perturbations, parallèlement aux services existants attachés au sol et utilisant les ondes hertziennes conformément aux plans de répartition en vigueur. La commission d'études n° IV du CCIR, créée nouvellement pour les tâches de ce genre, s'est réunie pour la première fois à Washington au printemps 1962 et s'est occupée principalement des problèmes urgents et des directives à déterminer en vue de l'établissement des plans de répartition des fréquences pour les satellites artificiels servant aux télécommunications. A la fin de l'année 1963, une Conférence administrative extraordinaire des radiocommunications prendra des décisions concernant l'adaptation du Règlement des radiocommunications aux circonstances nouvelles et avant tout au sujet des attributions de fréquences nécessaires.

Les lignes qui suivent ont pour objet d'évoquer quelques-uns des aspects les plus importants des plans à établir et du développement des satellites servant aux télécommunications.

2. Le choix d'une orbite appropriée

La fonction d'un satellite de télécommunication, servant de relais, exige une visibilité directe simultanément avec les deux stations au sol à relier ou même avec plusieurs stations désirant échanger un trafic. Géométriquement, il résulte de cette nécessité que pour franchir des distances intercontinentales, une altitude de l'orbite allant de 1 à 3 rayons terrestres serait appropriée. A des altitudes situées au-dessous de 5000 km, la zone de visibilité du satellite

se réduit assez rapidement et au-dessus de 18 000 km l'augmentation n'est plus très grande. Une valeur favorable pourrait être située entre 12 000 et 15 000 km.

Cependant, toute une série d'autres aspects revêtent une certaine importance pratique. La vitesse de rotation, et par conséquent la durée de la visibilité, ainsi que la vitesse angulaire par rapport à une station au sol déterminée, découlent nécessairement de l'altitude de l'orbite, conformément aux lois de Kepler se rapportant aux mouvements planétaires. Une fois que la force de propulsion n'exerce plus son effet sur lui, si un satellite se déplace librement dans l'espace sur une orbite circulaire située à une distance h^* du centre de la terre, son temps de révolution u pourra être calculé de façon très simple d'après l'équilibre entre la force centrifuge et la force d'attraction :

$$m \cdot h^* \cdot \omega^2 = k \cdot \frac{m \cdot M}{h^{*2}} \quad (1)$$

$$u = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{k \cdot M}} h^{*3/2} \quad \begin{matrix} k = \text{constante de la} \\ \text{gravitation} \\ M = \text{masse terrestre} \end{matrix} \quad (2)$$

Dans le voisinage du sol terrestre, on obtient un temps de révolution d'environ $1 \frac{1}{2}$ h pour une vitesse de révolution de 27 000 km/h ou 7,5 km/s, ce qui correspond aux caractéristiques des essais faits jusqu'ici avec des vaisseaux spatiaux transportant des cosmonautes. Si l'altitude augmente, le temps de révolution augmente selon l'équation précitée, pour atteindre une durée de 24 heures, le temps de rotation de notre planète, à une distance d'environ 42 000 km du centre de la terre (*fig. 1*). La vitesse de révolution atteint alors environ 11 000 km/h, c'est-à-dire un peu plus de 3 km/s.

Comme il faudrait éviter autant que possible les interruptions de la communication établie au moyen d'un satellite terrestre entre les stations au sol, cette orbite circulaire présente un intérêt particulier; en

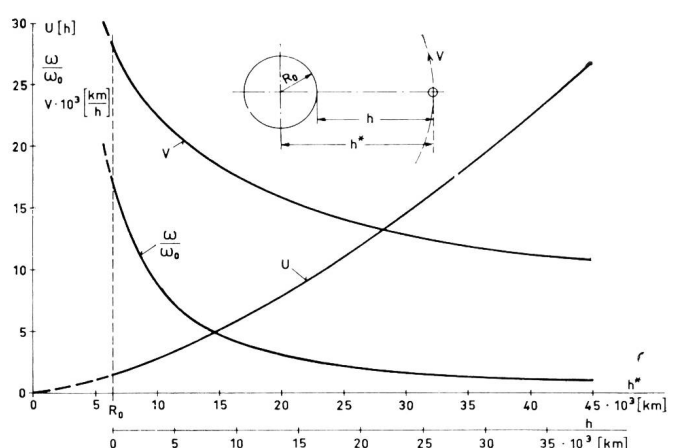


Fig. 1. — La vitesse absolue v (en 1000 km/h)
— La durée absolue de révolution u (en h)
— La vitesse angulaire ω_0 , par rapport à la vitesse angulaire ω de la rotation terrestre, d'un satellite terrestre, orbitant sur un cercle autour du centre de gravitation, en fonction de son altitude h

effet, la révolution de satellites situés à cette altitude dans le plan équatorial serait synchrone à la rotation de la terre et ils paraîtraient immobiles (quasi-stationnaires).

L'utilisation de la vitesse de rotation de la terre lors du lancement d'un satellite dans le plan équatorial aurait en outre l'avantage de permettre une économie appréciable de la force de propulsion nécessaire pour atteindre une orbite synchrone. Les antennes directionnelles des stations au sol, qui sont de grandes dimensions et pesantes, pourraient en principe conserver la même orientation ou dans le pire des cas n'avoir à se déplacer que très lentement dans la poursuite du satellite.

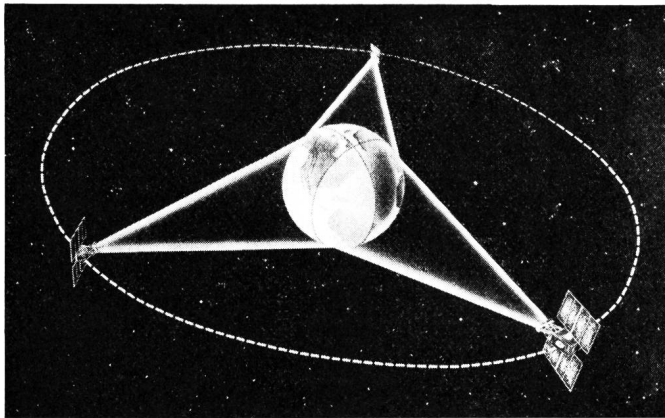


Fig. 2. Système de satellites synchrones dans le plan équatorial (orbite circulaire située environ à 35 800 km de la surface terrestre)

Un seul satellite synchrone aurait une zone de visibilité qui s'étendrait sur un bon tiers des terres habitées (fig. 2). Il serait évidemment indispensable de l'équiper d'une installation pour corriger sa vitesse et sa direction (station-keeping). Au stade actuel du développement de la technique des télécommunications et de celui des moyens d'alimentation électrique, un satellite synchrone devrait en outre être doté d'une antenne dirigée vers la terre, ce qui implique l'incorporation d'un dispositif de contrôle de l'orientation du satellite autonome ou télécommandé depuis le sol (attitude control). Les équipements de ce genre, désirables aussi pour des satellites gravitant à des altitudes inférieures, nécessaires même à de nombreuses autres applications des satellites, sont de toute manière en voie de développement.

Un désavantage inhérent aux satellites synchrones est la valeur élevée du temps de propagation du signal. Elle atteint presque $\frac{3}{10}$ de seconde pour un simple parcours long de 80 000 km environ. Si deux liaisons sol-satellite-sol sont utilisées en série dans une transmission, ce qui peut être le cas pour les plus grandes distances terrestres, le temps de propagation pourra doubler. Ce fait constitue un obstacle sérieux pour la téléphonie en duplex, principalement à cause

du problème posé par l'écho. Il est très important de savoir si et comment il pourra être résolu, car le téléphone sera vraisemblablement un des principaux usagers des satellites de télécommunication. Des recherches sont en cours dans ce domaine.

Si nous revenons à des orbites situées à des altitudes inférieures, de 5000 à 10 000 km au-dessus du sol, nous constaterons que le temps de propagation se maintient dans des limites acceptables également pour le téléphone, mais que, par contre, d'autres désavantages font leur apparition. La durée de la révolution est alors de 3 à 6 heures, la durée de la visibilité à chaque passage, pour deux stations au sol qui sont en liaison, est extrêmement brève, et la vitesse angulaire des antennes directives des stations au sol, devant assurer la poursuite avec une grande précision, sera nécessairement grande elle aussi. Le choix des orbites appropriées par rapport à l'axe terrestre, pour assurer une couverture continue de toutes les régions intéressées, est assez difficile, et le nombre des satellites nécessaires sera au moins de l'ordre de cent. La figure 3 montre, à titre d'exemple, combien de satellites seraient nécessaires pour assurer une liaison continue entre la partie orientale des Etats-Unis d'Amérique et l'Europe occidentale, en admettant que ces satellites évoluent à des vitesses légèrement différentes non contrôlées. Pour que la continuité de la liaison soit garantie, chaque station au sol doit disposer d'au moins deux équipements complets d'exploitation identiques, et il est nécessaire de commuter sur le satellite suivant plusieurs fois par heure. Il serait possible de réduire sensiblement le nombre de satellites nécessaires en leur incorporant un dispositif de réglage très compliqué, télécom-

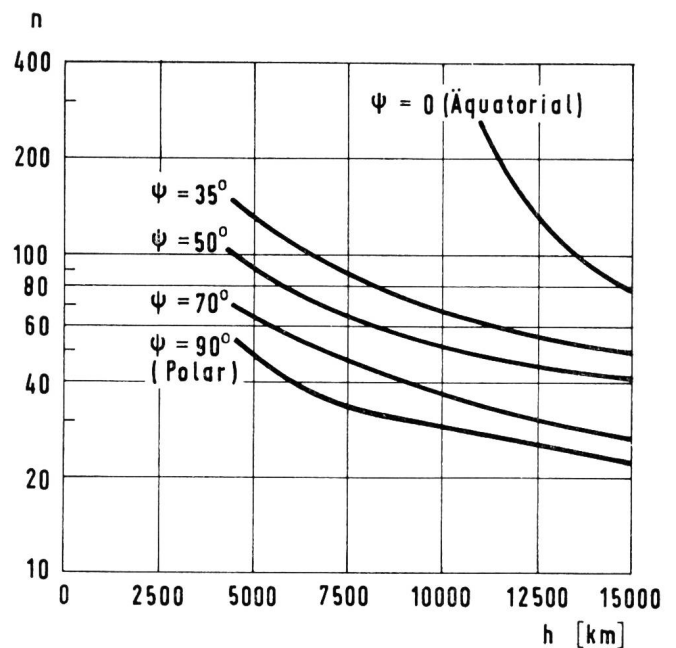


Fig. 3. Nombre n de satellites nécessaires, lorsque l'orbite est située à une altitude inférieure, dans un système asynchrone devant assurer une liaison permanente au-dessus de l'Atlantique nord (D'après J. L. Glaser: The design of medium height random orbit satellite systems, voir lit. 1)

mandé à partir du sol, permettant de corriger la trajectoire; mais les frais supplémentaires seraient alors très élevés, vu le grand nombre de satellites à contrôler.

La vitesse relative d'un satellite par rapport à une station au sol déterminée peut, suivant les cas, atteindre de $\pm 4-5$ km/s pour les orbites en question, situées à une altitude inférieure. L'effet Doppler produit alors sur certaines liaisons des variations de fréquence de l'ordre de 2 à $3 \cdot 10^{-5}$ et n'est plus négligeable pour certaines applications. En principe, il est possible de prévoir une correction à la réception, cependant, sa réalisation n'est pas facile avec quelques systèmes de transmission.

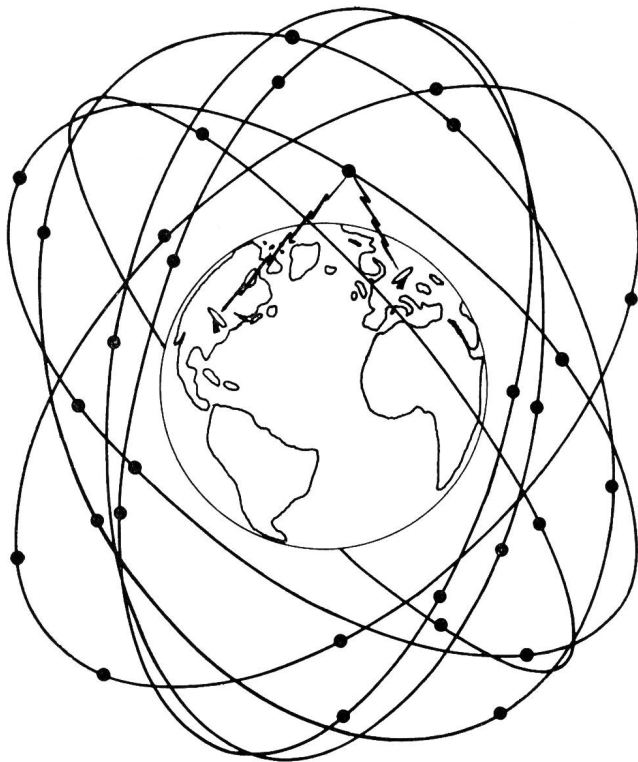


Fig. 4. Système global de satellites asynchrones à orbites différentes, mais situées approximativement à $5 \div 10\,000$ km au-dessus de la surface terrestre

Selon les connaissances encore assez incomplètes dont on dispose aujourd'hui, on peut craindre que l'effet destructeur des radiations d'électrons et de protons s'exerce avec le maximum d'intensité à quelques milliers de kilomètres d'altitude (ceinture Van Allen), ce qui fait que la durée de vie des satellites de télécommunication gravitant sur des orbites dans cette région pourrait s'en trouver fortement réduite. Ce danger est minime pour les satellites synchrones.

Dans le système synchrone, il est indispensable pratiquement de doubler le nombre minimum de satellites nécessaire à une couverture globale (6 au lieu de 3), sinon une seule panne pourrait causer une interruption prolongée d'une grande partie du trafic.

Avec un grand nombre de satellites, comme ce serait le cas sur des orbites situées à des altitudes inférieures, on pourrait se dispenser d'une installation de réserve de ce genre.

Il est difficile d'établir actuellement une comparaison valable des prix de revient des deux systèmes de satellites dont il est question ci-dessus; il est fort probable cependant qu'en prenant en considération tous les facteurs, elle serait en faveur du système synchrone. D'une manière générale, du point de vue technique et de celui de l'exploitation, à longue échéance, le système synchrone apparaît comme le plus élégant et le plus intéressant, en admettant toutefois qu'il soit possible de trouver une solution au problème du long temps de propagation pour la téléphonie.

Si ce n'était pas le cas, une orbite équatoriale à l'altitude moyenne, de l'ordre de $15\,000$ km au-dessus du sol (c'est-à-dire aussi haut que l'effet du temps de propagation le permet), serait tout de même intéressante: elle assurerait la couverture des parties du globe à forte densité de population, offrirait la vitesse relative la moins élevée par rapport à la surface terrestre, la plus longue durée possible de visibilité à chaque passage et n'exigerait pour le lancement des satellites que le minimum nécessaire de force de propulsion pour une altitude de révolution donnée. A l'altitude de $15\,000$ km, pour une orbite circulaire, le temps de révolution absolu est de plus de $8\frac{1}{2}$ heures et, relativement à la terre, il est d'environ 13 heures. Suivant la situation géographique, la durée de visibilité entre satellite et stations correspondantes au sol à chaque passage peut atteindre quelques heures; ainsi, dans bien des cas, il serait possible de renoncer à l'installation d'un équipement de réception double pour les stations au sol.

3. Le choix des bandes de fréquences appropriées

Afin de pouvoir transmettre une quantité importante d'informations sur une section d'amplification d'une longueur aussi grande que celle qui sépare la terre d'un satellite, il faut de prime abord que la gamme des fréquences utilisées soit choisie de manière à obtenir des conditions optimums, compte tenu des caractéristiques de propagation du milieu dans lequel doit s'opérer la transmission, des sources perturbatrices extérieures inévitables et du meilleur effet directif des antennes.

3.1. Pénétrabilité de l'atmosphère

L'espace cosmique offre le cas idéal d'un milieu dans lequel la propagation des ondes s'effectue sans entrave et sans perturbation pour n'importe quelle fréquence. Fort heureusement, l'atmosphère terrestre, le seul milieu entre la terre et le satellite capable de perturber la propagation des ondes transmises, n'offre pratiquement point d'obstacle aux ondes métriques, décimétriques et centimétriques entre quelque 50 et $15\,000$ MHz. Dans cette gamme de fréquences, plus l'angle d'élévation se rapproche de la verticale, moins

il faut redouter les perturbations provenant de l'absorption, de la réfraction et des réflexions dans l'atmosphère, se traduisant par des évanouissements et des distorsions du signal.

Ce fait est en rapport direct avec la longueur du trajet de propagation dans l'atmosphère terrestre et davantage encore avec la répartition de la densité des gaz atmosphériques et l'effet de leur stratification horizontale. C'est ainsi qu'il faudra probablement faire abstraction, pour des liaisons commerciales par satellites, de l'utilisation régulière d'angles d'élévation inférieurs à $5^\circ \div 10^\circ$.

Dans bien des cas, les ondes plus longues que celles mentionnées ci-dessus sont aussi utilisables pour les liaisons par satellites, surtout pour des transmissions de faible capacité; elles sont exposées cependant à des perturbations ionosphériques extrêmement variables, d'où, en partie, leur intérêt pour la recherche scientifique. On a déjà observé des effets d'absorption ionosphérique sur des fréquences beaucoup plus élevées, jusque dans le domaine des ondes décimétriques dans certains cas, lorsque l'ionisation était excessivement élevée, par exemple pendant les aurores boréales, au passage de météorites ou d'avions ultrasoniques. Ces phénomènes sont toutefois très limités quant à l'endroit, l'extension et la durée de leur apparition et nous pouvons par conséquent nous abstenir de les prendre en considération ici. Pour les ondes inférieures à 1 ou 2 cm, par contre, les phénomènes d'absorption et de dispersion provoqués par les précipitations, les nuages, la vapeur d'eau et les gaz atmosphériques prennent une importance toujours croissante.

Si les précipitations et les nuages n'existent pas à l'état permanent, ils constituent cependant un obstacle, pratiquement, pour tout le spectre supérieur des fréquences. La vapeur d'eau et les gaz atmosphériques exercent un effet sélectif, laissant toutefois ce que l'on appelle «des fenêtres» entre le sol terrestre et l'espace dans le spectre des fréquences, ce qui peut présenter un intérêt particulier à différentes fins, mais convient moins aux applications commerciales. A son maximum (60 435 MHz), l'absorption de l'oxygène atteint un degré d'atténuation de quelque 100 db, c'est-à-dire que l'atmosphère agit pratiquement comme un isolant dans une bande relativement étroite autour de cette fréquence. Cela peut éventuellement présenter un intérêt pour les liaisons entre engins spatiaux.

3.2. Température équivalente de bruit de l'antenne

Pour les liaisons à large bande établies à l'aide de satellites artificiels, il est nécessaire que des récepteurs ayant le bruit de fond le plus faible possible soient utilisés, au moins au sol — comme ce fut le cas jusqu'ici uniquement en radioastronomie. Ces récepteurs fonctionnent selon le principe des amplificateurs moléculaires (MASER) ou des amplificateurs paramétriques. Pour caractériser des valeurs de bruit aussi faibles, il a paru indiqué d'introduire, au lieu du facteur de bruit du récepteur R, la température

équivalente du bruit T_r , exprimée en degrés Kelvin, dont le rapport avec le facteur de bruit du récepteur donne la relation suivante:

$$T_r = (R-1) 290^\circ \quad (3)$$

Les amplificateurs équipés de tubes à ondes progressives, dont le bruit de fond est extrêmement réduit, atteignent aujourd'hui des valeurs T_r de 400° K, les amplificateurs paramétriques de 150° K (avec refroidissement d'environ 25° K) et les amplificateurs moléculaires même 10° K. Un bon amplificateur de micro-ondes ordinaire a comparativement une température de bruit de 3000° – 6000° K.

En utilisant des récepteurs dont le bruit de fond est si faible, on est obligé de tenir compte des radiations perturbatrices spatiales, nécessairement captées par l'antenne. Le bruit de fond dont il faut faire état pour l'exploitation peut être exprimé par la température équivalente de bruit de l'antenne T_{aq} de la façon suivante:

$$T_{aq} = T_r + T_k + T_q + T_a + T_e \quad (4)$$

- T_r = le bruit de fond propre au récepteur.
- $T_k = c \cdot f^{-2,3}$, le bruit cosmique, abstraction faite de sources puissantes particulières, telles que le soleil; ordinairement T_k diminue rapidement avec l'augmentation de la fréquence f et détermine par conséquent une limite d'utilisation du côté des fréquences inférieures.

La constante c dépend de la région du ciel visée par l'antenne au sol.

- $T_q = \frac{h}{k} \cdot f = 4,8 \cdot 10^{-11} \cdot f$,

le bruit de quantisation, augmente proportionnellement à la fréquence et détermine une limite d'utilisation du côté des fréquences supérieures. Il n'atteint cependant des valeurs sensibles qu'à partir de fréquences de l'ordre de 10^{12} (c'est-à-dire de l'ordre de 1000 GHz).

- T_a = le bruit d'absorption, provoqué par les précipitations atmosphériques, en particulier par les pluies, varie en raison inverse de l'angle d'élévation de l'antenne directive, mais aussi proportionnellement à la fréquence dans une grande partie du spectre en question.
- T_e = le bruit provenant d'installations électriques de toute sorte, diminue sensiblement en sens inverse de la fréquence. Ces perturbations peuvent et même doivent être éliminées par un choix approprié de l'emplacement de la station au sol.

La figure 5 montre les températures de bruit les plus intéressantes pour nous en fonction de la fréquence.

Il faut en déduire que l'on ne peut raisonnablement tirer parti de la plus haute sensibilité du récepteur que dans une gamme de fréquences de $1 \div 10$ GHz, en raison des perturbations extérieures, ce qui signifie une limitation du spectre des fréquences utilisable pour les communications par satellite. Cette restriction n'est pas valable en toutes circonstances et

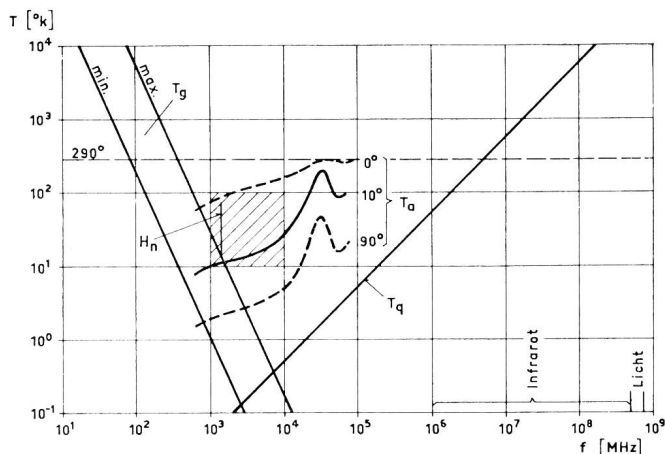


Fig. 5. Température de bruit absolue du ciel en fonction de la fréquence

- T_g bruit galactique (à l'exclusion de quelques sources individuelles particulièrement fortes). La limite supérieure correspond à l'équateur galactique et la limite inférieure au pôle galactique
- T_a bruit de quantisation
- T_a bruit de l'absorption de l'atmosphère pour différents angles d'élévation
- H_n ligne d'absorption de l'hydrogène (d'après J.A. Webb et J.L. Glaser, voir lit. 3 et 1)

pourra éventuellement être allégée à l'avenir. La température de bruit équivalente pratiquement réalisable se situe par conséquent aux environs de 50° K, en supposant un angle d'élévation minimum de l'antenne de 7,5°. Dans cette hypothèse, les évanouissements ne sont pas à craindre et le système de transmission peut être conçu pour une valeur presque constante de l'équivalent de transmission. De ce fait, une température de bruit T_r , propre au récepteur seul, de 10° à 20° K semble désirable; à l'état actuel de la technique des communications à large bande par satellites, une valeur T_r de cet ordre de grandeur est même indispensable, ainsi que nous l'expliquerons plus loin.

3.3. Limites de la directivité de l'antenne

En raison des longs trajets de transmission, nous sommes obligés, dans les liaisons commerciales par satellites, non seulement de construire des récepteurs d'une sensibilité maximale, mais également de réduire autant que possible l'affaiblissement de transmission, ce qui nous amène à augmenter au maximum la directivité de l'antenne au sol, afin de concentrer autant que possible l'énergie haute fréquence rayonnée vers le satellite désiré. Sur le satellite, les possibilités de concentrer l'énergie rayonnée vers la terre sont très limitées, non seulement pour des raisons pratiques (dimensions et poids d'antennes) mais aussi par principe, parce que l'antenne doit assurer la couverture de toute la partie visible de la surface terrestre à chaque instant de sa révolution.

Si nous désignons le gain de l'antenne au sol et de celle du satellite, par rapport à une antenne omnidirectionnelle, par G_B et G_S , le rapport entre la

puissance rayonnée et la puissance reçue s'exprime comme il suit :

$$b_{ii} = \frac{(4\pi d)^2}{G_B \cdot G_S \cdot \lambda^2} \quad (5)$$

En admettant pour simplifier que le faisceau de l'antenne est représenté par un cône de section circulaire à l'intérieur duquel l'intensité du rayonnement est constante, correspondant à la valeur maximale mesurée dans l'axe de rayonnement, nous obtenons pour l'angle d'ouverture de ce cône (fig. 9) une relation simple avec le gain G d'une antenne :

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{G}} \quad (6)$$

L'angle d'ouverture réel du lobe principal à -3 db est alors d'environ 1,5 ε .

Un gain élevé de l'antenne au sol exige des dimensions importantes (dépendant en outre, évidemment, de la longueur d'ondes), correspondant à de petits angles ε , et demande par conséquent une haute précision mécanique, une grande exactitude de l'orientation et une grande stabilité mécanique de l'antenne dans le temps. Ainsi, pour des raisons mécaniques et financières, il existe pratiquement une limite supérieure à la concentration de l'énergie rayonnée vers le satellite, même si cette limite ne peut être définie rigoureusement. Il existe en outre une limite naturelle, fixée par l'instabilité de la direction de propagation des ondes rayonnées ou captées par l'antenne. Cette instabilité provient de la turbulence des couches atmosphériques voisines du sol (comparable à la scintillation des ondes lumineuses). Elle atteint sa

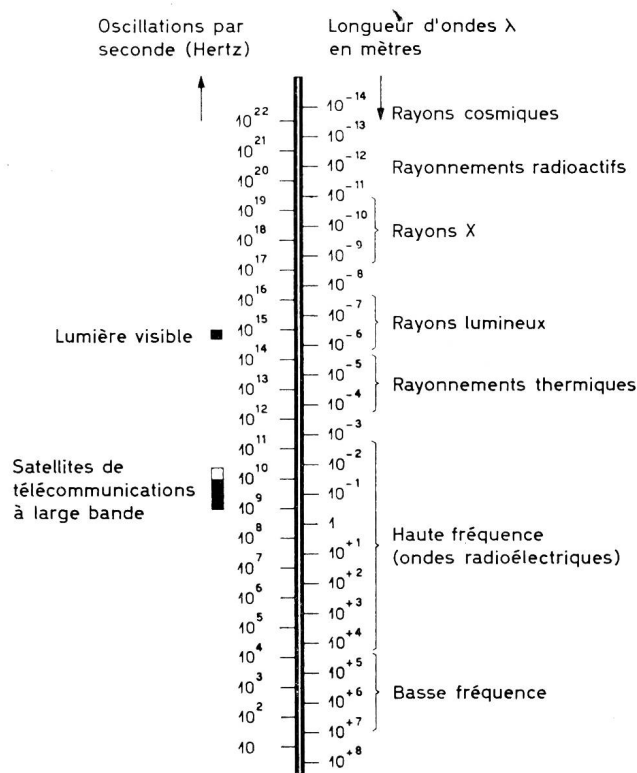


Fig. 6. Spectre des ondes électromagnétiques

valeur minimale quand la pénétration de l'atmosphère s'effectue à la verticale; par contre, elle augmente assez fortement, quand la direction de la transmission se rapproche de l'horizon par rapport à l'antenne au sol et, dans la gamme de $1 \div 10$ GHz, cette instabilité est presque indépendante de la fréquence. Outre l'augmentation des effets de l'absorption, de la réfraction et de la température de bruit équivalente de l'antenne, c'est principalement pour cette raison que les angles d'élévation d'antenne inférieurs à $5-10^\circ$ sont en général exclus pour les communications à large bande par satellites. On admet provisoirement que l'instabilité de la direction de propagation avec un angle d'élévation de cet ordre atteint déjà $1/10^\circ$, ce qui limite la concentration de l'énergie de l'antenne au sol à environ 60 dB ou $G_B = 10^6$. Pour une fréquence de 10 GHz ($\lambda = 3$ cm) cela correspond à une antenne parabolique d'environ 12 m de diamètre, pour 1 GHz ($\lambda = 30$ cm) à un diamètre de 120 m.

Selon la formule de la transmission (5), on constate que, pour un gain maximum de l'antenne donné G , l'affaiblissement de la transmission b_{ir} croît avec le carré de la fréquence.

$$b_{\text{ir}} = \frac{(4\pi d)^2}{G_B \cdot G_S \cdot \lambda^2} = \frac{C}{\lambda^2} = C^* \cdot f^2 \quad (7)$$

Le phénomène naturel que nous venons de mentionner nous conduit donc à une conclusion peut-être inattendue: pour obtenir un affaiblissement de transmission minimum, il faudrait utiliser, dans les limites fixées par les bruits extérieurs, les ondes les plus longues possibles, naturellement avec des antennes dont les dimensions et le prix de revient augmenteraient d'autant. Il est toutefois nécessaire de rassembler dans ce domaine des résultats expérimentaux plus complets que ceux dont on dispose actuellement.

4. Possibilités des satellites actifs et passifs

Un satellite actif capte une fraction extrêmement petite du spectre d'énergie rayonné par un émetteur au sol, l'amplifie et le rediffuse sur une autre fréquence. La différence fondamentale qu'il y a entre l'équipement radioélectrique d'un satellite et d'un relais hertzien au sol consiste en ce que, pour le satellite, il n'y a qu'un sens de transmission, puisque simultanément, sur la même antenne, il reçoit en principe des signaux provenant de l'ensemble de son champ de visibilité sur la terre et les renvoie sur d'autres fréquences en direction de l'ensemble de ce même champ de visibilité. Pour cette seule raison déjà, l'effet de directivité de l'antenne auquel on peut recourir sera limité. Pour autant que l'on ne puisse pas contrôler l'attitude du satellite de telle manière que celui-ci dirigera toujours la même face vers le centre de la terre, comme la lune, il faudra s'accommoder même d'antennes omnidirectionnelles. Il est nécessaire cependant, pour nombre d'autres applications, comme nous l'avons dit plus haut, que le contrôle d'attitude d'un satellite artificiel soit de

toute façon réalisé. On peut donc s'attendre à une solution de ce problème dans un proche avenir.

Un satellite passif est formé, en principe, simplement par un corps ou une accumulation de corps réfléchissant les ondes électromagnétiques. La forme la plus pratique d'un satellite passif est celle d'un ballon sphérique à enveloppe extérieure métallisée.

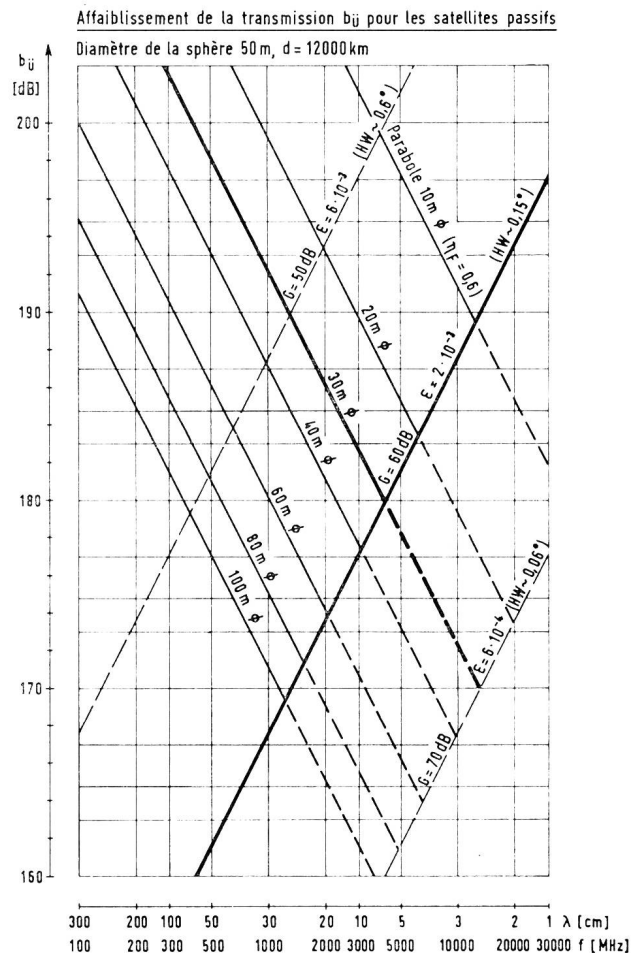


Fig. 7. Affaiblissement de transmission b_{ir} pour les satellites passifs du type «Echo»

Un tel satellite est omnidirectionnel et relativement efficace. A l'exception d'un petit émetteur de radiopérage très simple, sinon indispensable du moins très utile à la poursuite radiogoniométrique du ballon, il n'a nullement besoin d'un équipement électronique en propre. L'affaiblissement de transmission b_{ir} diminue avec le carré du rayon du ballon r_k et de la longueur d'onde λ , il croît d'autre part à la 4^e puissance de la distance d . Si l'on suppose que pour l'émission et la réception au sol sont utilisées des antennes directives de même efficacité, avec une surface d'absorption F_B ou un gain de directivité G_B , on obtient:

$$b_{\text{ir}} = \frac{\lambda^2}{r_k^2 \cdot F_B^2} \cdot d^4 = \frac{(4\pi)^2}{r_k^2 \cdot \lambda^2 \cdot G_B^2} \cdot d^4 \quad (7)$$

En ce qui concerne la limite supérieure de la directivité ou du gain G_B des antennes au sol, sont valables les mêmes considérations que celles du paragraphe précédent. La surface d'absorption F_B est proportionnelle à l'ouverture géométrique de l'antenne et pour un bon miroir parabolique elle atteint environ 60 % de celle-ci. Pour des raisons mécaniques, le diamètre du ballon ne peut pas être agrandi à volonté. En outre, dans un système de modulation à bande assez large, des distorsions inadmissibles du signal peuvent se produire dès que la valeur réciproque de la largeur de bande atteint l'ordre de grandeur du temps de propagation qui correspond au diamètre du ballon. Si l'on considère qu'un diamètre de 50 m est actuellement la limite supérieure dans la gamme de fréquences qui nous intéresse, l'affaiblissement de transmission réalisable se situera entre 170 et 190 db pour une distance de 12 000 km (fig. 7). Les valeurs les plus basses de l'affaiblissement correspondent déjà à des antennes au sol extrêmement grandes (diamètre de l'ordre de 100 m).

Les principaux avantages des satellites passifs sont évidents:

- n'ayant pas d'équipement électronique, ils sont simples et offrent une grande sécurité d'exploitation;
- les canaux de transmission pour chaque application peuvent être déterminés au sol;
- dans la gamme de fréquences entrant en considération, le nombre des canaux de transmission simultanément utilisables sur un seul satellite passif est pratiquement illimité;
- pour chaque direction, il suffit d'un seul canal de transmission (pas de conversion de la fréquence sur le satellite);
- en cas d'interférence gênante sur la liaison, il est relativement facile de s'écarter en déplaçant la fréquence.

Malgré ces avantages, on cherche la solution pour les applications commerciales plutôt du côté des satellites actifs, quoique ceux-ci soient bien plus difficiles à réaliser. Il faut en voir l'explication dans l'affaiblissement de transmission très élevé des satellites Echo, qui se traduit dans la formule de transmission (7) par le facteur de distance d^4 . Le principe du satellite Echo pourra cependant présenter un intérêt particulier à l'avenir pour des systèmes de transmission à faible capacité d'information, surtout si l'on arrive à réaliser des surfaces réfléchissantes considérablement plus étendues que jusqu'ici, soit en augmentant le diamètre du ballon, soit en prenant d'autres mesures appropriées.

La ceinture dipôle autour de la terre, proposée par *Morrow*, est une application du principe du satellite passif d'un genre totalement différent; elle se compose d'une accumulation de réflecteurs sélectifs en fréquence, sous forme d'aiguilles métalliques très fines, gravitant autour de la terre sous forme d'une

ceinture très transparente à une altitude de 3000 à 5000 km et permettant, grâce à une réflexion diffuse, d'établir des liaisons entre des stations au sol. Ce projet paraît condamné à un échec, malgré quelques bonnes idées fondamentales et certains avantages qu'il offre. L'affaiblissement de transmission est nécessairement très élevé et, en raison de la répartition très espacée et de la vitesse variable des réflecteurs partiels, même pour des signaux à bande très étroite, les signaux transmis sont affectés par des distorsions inhérentes et des bruits. En outre, ces aiguilles dipôles réfléchissent aussi de la lumière et on pourrait voir se former une sorte de voie lactée artificielle qui gênerait ou empêcherait même certaines observations astronomiques à très faible intensité lumineuse. L'Association internationale des astronomes a fait observer avec raison que la densité des dipôles de 20 pièces par km^3 , prévue pour le premier essai, serait probablement insuffisante pour les applications envisagées et qu'en cas de réalisation pour le trafic commercial, il faudrait s'attendre à des perturbations de la lumière sensiblement plus importantes.

Le satellite actif de télécommunication exige un équipement électronique très compliqué, y compris un dispositif d'alimentation de courant électrique qui doit être en mesure de fonctionner durant des années sans entretien et dans des conditions entièrement nouvelles et encore insuffisamment connues. Ces problèmes et ces désavantages sont contrebalancés par le fait que l'affaiblissement de transmission entre deux amplificateurs successifs est très sensiblement réduit par rapport au satellite passif. Pour un satellite actif, évoluant librement sur son orbite, on doit utiliser des antennes à caractéristiques approximativement omnidirectionnelles. Cela signifie que dans la formule (5) concernant l'affaiblissement de transmission, le gain de l'antenne du satellite prend la valeur de $G_s = 1$.

Supposons en outre comme auparavant une valeur $G_B = 10^6$ et une longueur du trajet de propagation effectif $d = 12\,000$ km, nous obtenons pour une gamme de fréquences de $1 \div 10$ GHz des affaiblissements de transmission situés entre 115–135 db (fig. 8). Pour des systèmes de transmission à large bande, ces valeurs sont encore très élevées, mais réalisables avec les moyens dont on dispose aujourd'hui.

En introduisant un contrôle de position de l'axe du satellite relatif au sol (attitude control) et en utilisant une modeste antenne directive au lieu d'une antenne omnidirectionnelle sur le satellite, on obtiendra une diminution importante de l'affaiblissement de transmission, comparé à une antenne omnidirectionnelle, surtout pour des orbites très élevées. L'angle de concentration de l'énergie ε_s de l'antenne du satellite (fig. 9) doit être choisi de telle manière que toute l'étendue visible de la surface terrestre puisse être desservie à partir de l'altitude qui nous intéresse, avec une marge de sécurité suffisante. Nous choisirons par conséquent

$$\varepsilon_s = \frac{2 R_o}{d} \quad \begin{array}{l} R_o = \text{rayon terrestre} \\ d = \text{distance moyenne} \\ \text{entre satellite et surface} \\ \text{de la terre} \end{array} \quad (8)$$

Nous obtiendrons donc avec (6):

$$G_s = \frac{4}{\varepsilon_s^2} = \left(\frac{d}{R_o} \right)^2 \quad (9)$$

et dans ce cas, l'affaiblissement de transmission s'exprime ainsi:

$$b_{\text{tid}} = \frac{5,1 \cdot 10^{14}}{F_B} = \frac{6,4 \cdot 10^{15}}{G_B \cdot \lambda^2} \quad (10)$$

Dans ces conditions, l'affaiblissement de transmission sera donc indépendant de d , c'est-à-dire de l'altitude de l'orbite. (Valable à partir de 6000 km environ au-dessus du sol.)

En considérant $G_B = 10^6$ comme valeur maximale admissible pour le gain de l'antenne au sol, par analogie aux cas précédents, dans la gamme 1 ÷ 10 GHz, on obtient des affaiblissements de transmission de 110 ÷ 130 db (fig. 8), et de nouveau, pour réaliser les valeurs minimales, à l'extrémité inférieure de la gamme de fréquences, il faudra utiliser au sol des antennes extraordinairement grandes. Dans la partie médiane de la gamme de fréquences qui, pour l'instant, présente le plus d'intérêt pour nous, il est

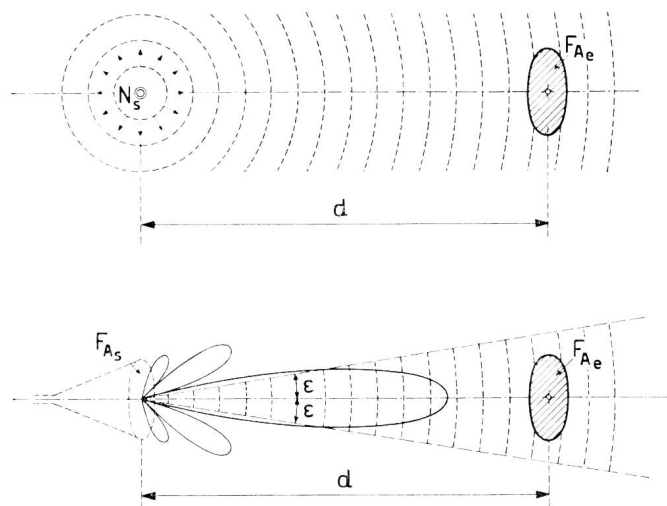


Fig. 9. Antenne isotropique et antenne directive: angle de concentration de l'énergie rayonnée ε

possible d'obtenir une valeur d'affaiblissement d'environ 121 db, ce qui exige un diamètre d'antenne d'environ 30 m avec un miroir parabolique. Cela correspond approximativement aux dimensions des antennes construites actuellement pour les stations terriennes des satellites (fig. 10, 11, 12).

Le satellite actif permet, par conséquent, de réaliser des affaiblissements de transmission qui, même en cas d'utilisation d'une orbite synchrone, sont de 6 ordres de grandeur ou de 60 db plus favorables que dans le cas des satellites passifs ayant la forme d'un ballon réflecteur de 50 m de diamètre et placés sur des orbites inférieures. Si nous considérons des orbites synchrones dans les deux cas, la différence sera même presque de 80 db au désavantage du satellite passif.

En comparant des satellites actifs synchrones, munis d'antennes émettrices omnidirectionnelles ou directives, on obtient un avantage sur l'affaiblissement de transmission d'au moins 15 db en faveur de l'antenne directive. Par conséquent, il vaut la peine d'installer un équipement de contrôle de l'attitude du satellite – au lieu d'engager des frais supplémentaires en faveur de la puissance d'émission, de la sensibilité du récepteur et de l'alimentation en courant électrique à bord du satellite, et même si c'était possible au stade actuel de la technique.

Afin de ne pas perdre de vue le rapport existant avec la technique des faisceaux hertziens à la surface de la terre, il convient de relever que dans le cas le plus favorable d'un satellite actif, mentionné ci-dessus, l'affaiblissement de transmission sera tout de même d'environ 60 db plus élevé que dans une liaison hertzienne à large bande sur micro-ondes au sol, conforme aux normes du CCIR. Par contre, pratiquement, dans une liaison par satellite, nous n'aurons pas d'évanouissement et le bruit additionnel des amplificateurs intermédiaires (stations relais) est négligeable, vu le petit nombre de ceux-ci (1 ou 2), ce qui compense déjà environ 40 db de la différence

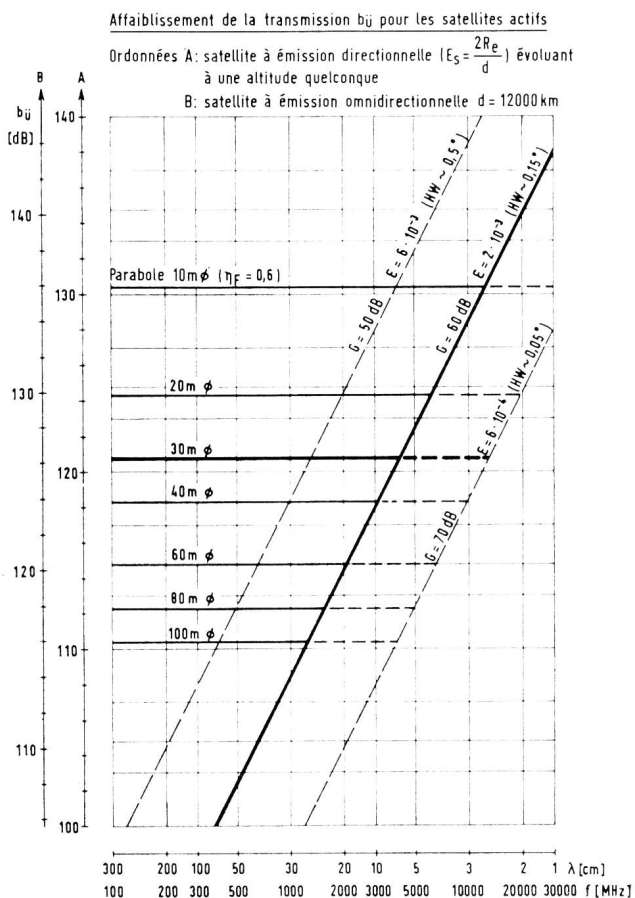


Fig. 8. Affaiblissement de transmission b_{ti} pour les satellites actifs

totale de 60 db. Les autres 20 db doivent et peuvent être compensés actuellement, dans un sens de la transmission, par une puissance d'émission cent fois plus élevée de la station au sol (1 kW au lieu de 10 W) et dans l'autre sens de la transmission, par une amélioration de la sensibilité du récepteur de la station au sol, poussée au centuple (c'est-à-dire $T_{\text{aq}} = 50^\circ \text{ K}$ au lieu de 5000° K); cela, bien entendu, indépendamment du gain de directivité extraordinaire exigé pour l'antenne au sol. Abstraction faite de la miniaturisation des appareils, de l'autonomie de l'alimentation en courant électrique et des conditions d'exploitation totalement différentes de celles

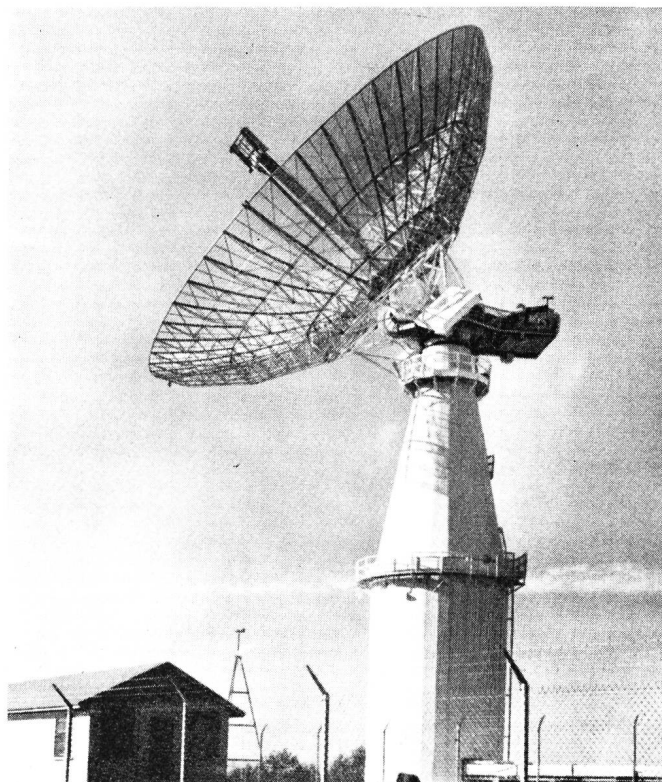


Fig. 10. Antenne parabolique servant aux liaisons avec les satellites, diamètre environ 26 m (Tiré du Rapport technique n° 32-137 de la NASA)

que l'on rencontre habituellement, l'équipement technique de transmission à bord du satellite lui-même peut être considéré comme «normal». Il n'est pas exclu que, par la suite, il devienne possible de reporter dans l'équipement de satellites une technique plus perfectionnée sans pourtant compromettre la sécurité d'exploitation (amplificateurs paramétriques, augmentation de la puissance d'émission).

Toutes ces considérations montrent que, pour les liaisons de télécommunication de grande capacité, seul le satellite actif peut être envisagé, tandis que le satellite passif, en raison de sa relative simplicité et des avantages qui lui sont propres, paraît intéressant pour des systèmes de transmission à bande étroite et pour des applications particulières.

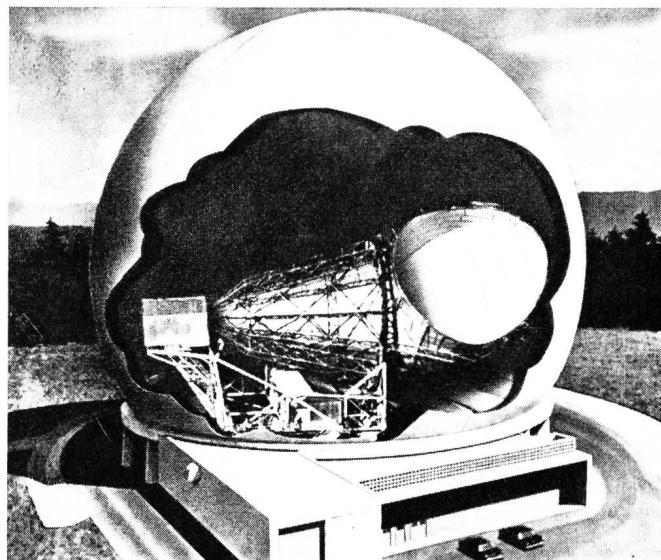


Fig. 11. Maquette d'une station au sol munie d'une antenne en cornet parabolique ayant une ouverture de 335 m^2 et protégée des intempéries par une enveloppe spéciale (Radom). Le gain de l'antenne est de 60/57 dB pour une fréquence de 6000/4000 MHz

5. Caractéristiques à exiger d'un système de transmission à large bande dans le cas d'un satellite actif équipé d'un dispositif de contrôle d'attitude (antenne directive)

Supposons qu'il faille établir une liaison par satellite pour la transmission à volonté soit d'une image de télévision d'une largeur de bande $\delta f = 5 \text{ MHz}$, soit de 600 canaux téléphoniques en système multiplex de fréquences d'une largeur de bande de $\delta f = 2,5 \text{ MHz}$. Conformément à la technique qui nous est actuellement la plus familière, la transmission sera faite dans les deux sens par simple modulation en fréquence de la porteuse haute fréquence dans la gamme des 4000 MHz. Dans ces conditions, la largeur de bande équivalente du bruit ΔF dans le spectre haute fréquence pourra être donnée par l'approximation suivante:

$$\Delta F = 2 \delta f (1 + 1,7 h) \quad (11)$$

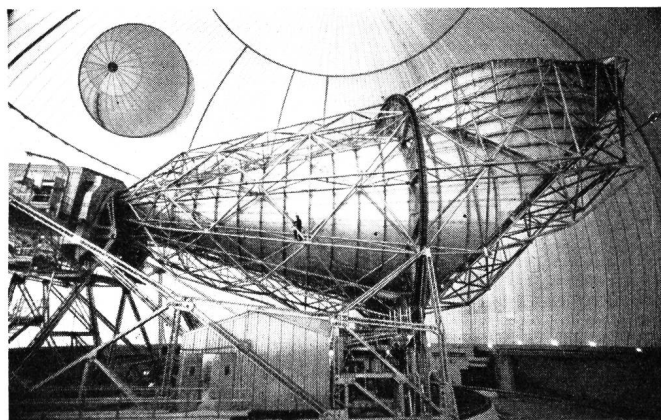


Fig. 12. Une des antennes en cornet parabolique construite à Andover, Maine (Etats-Unis). Le diamètre de l'enveloppe protectrice atteint environ 65 m

Dans cette formule, h désigne le rapport de la déviation maximum de fréquence à la fréquence de modulation la plus élevée.

Un récepteur à modulation de fréquence a un seuil de sensibilité qui ne doit pas être dépassé, au sens négatif, dans l'exploitation. Ce seuil est déterminé par la puissance du bruit équivalent du récepteur N_R et se situe pratiquement 14 db au-dessus de ce dernier. Comme marge de sécurité, nous exigeons, en tenant compte de l'usure des appareils, de l'absorption atmosphérique éventuelle et des erreurs d'orientation de l'antenne, un écart supplémentaire de 8 db au-dessus du seuil de sensibilité. En admettant un affaiblissement de transmission de 121 db, pour une antenne parabolique de 30 m de diamètre, la puissance minimum de l'émetteur devra être la suivante:

$$N_{Smin} = 2 \cdot 10^{14} \cdot N_R = 2,72 \cdot 10^{-9} \cdot T_{aq} \cdot \frac{\Delta F}{r} [W] \quad (12)$$

r désigne le facteur de contre-réaction du récepteur par rapport à la déviation de fréquence de l'émetteur (si l'on n'utilise pas de contre-réaction, $r = 1$).

La transmission d'un spectre de téléphonie multi-plex présente en général des difficultés plus grandes que celle d'une image de télévision, c'est pourquoi nous nous bornerons ci-après à considérer le cas de la téléphonie.

Si nous prenons pour taux de modulation relatif d'un canal téléphonique dans un ensemble de 600 canaux une valeur de -23 db, comme d'habitude, une détérioration du rapport signal/bruit de 1 db par intermodulation et une amélioration de 4 db par suite de la préaccentuation des fréquences élevées, le rapport signal/bruit S_K dans le canal téléphonique le plus défavorisé, compte tenu des données admises auparavant, peut être exprimé sous la forme suivante:

$$S_{Kmin} = 670 \cdot N_{Smin} \cdot \left(\frac{\Delta F}{2 \cdot \delta f} - 1 \right)^2 \quad (13)$$

Si nous choisissons la puissance d'émission

$$N_S = n \cdot N_{Smin} \quad (14)$$

en considérant $n \geq 1$, nous obtenons la formule générale

$$S_K = 670 n \cdot N_{Smin} \left(\frac{\Delta F}{2 \delta f} - 1 \right)^2 \quad (15)$$

Si nous considérons ensuite la transmission dans le sens satellite-station au sol avec $T_{aq} = 50^\circ K$ et

$$r = \frac{\Delta F}{13,5 \cdot 10^6}, \text{ le rapport de déviation de fréquence}$$

avant la démodulation étant réduit à 1, on peut calculer d'après l'équation (12) la puissance minimum de l'émetteur du satellite, exigée par le seuil de sensibilité du récepteur (avec une marge supplémentaire de sécurité de 8 db), ce qui donne une valeur

$$N_{Smin} = 1,82 [W] \quad (16)$$

indépendamment de la largeur de bande ΔF du spectre rayonné. Le rapport signal/bruit S_K par contre sera donné pour $2 \delta f = 5 \cdot 10^6$ Hz et

$$a = \frac{\Delta F}{\Delta F_{min}} = \frac{\Delta F}{13,5 \cdot 10^6} \quad (17)$$

par la formule:

$$S_K = 1240 \cdot n \cdot (2,7 a - 1)^2 \quad \begin{matrix} a \geq 1 \\ n \geq 1 \end{matrix} \quad (18)$$

On obtient ainsi les rapports suivants (tableau I):

Tableau I.	Satellite	→	Station au sol	
a	1	2	3	4
ΔF [MHz]	13,5	27	54	108
h	1	2,6	5,8	12,1
$S_{Kmin} = \frac{S_k}{n}$ [d b]	35,5	43,8	50,8	57,2
N_{Smin} [W]	1,8	1,8	1,8	1,8

Si nous demandons de prévoir pour le canal téléphonique le plus défavorisé, dans le sens de la transmission satellite-station au sol, un rapport signal/bruit de 57 db, cette valeur est réalisable, soit pour la puissance d'émission minimum de 1.8 W, avec une largeur de bande de 100 MHz, soit pour une puissance d'émission de 10 W, avec 50 MHz. Pour une largeur de bande de 27 MHz, la puissance de l'émetteur du satellite devrait être portée à 75 W, ce qui présenterait actuellement encore de grandes difficultés. Une augmentation de la puissance d'émission au-dessus du minimum de 1.8 W dans ces conditions entraîne automatiquement une augmentation correspondante de la marge de sécurité de la liaison par rapport au seuil de sensibilité du récepteur.

Pour la transmission dans le sens station au sol-satellite, pour des raisons pratiques, nous admettons que $r = 1$ et $T_{aq} = 5000^\circ K$ et nous obtenons par analogie avec le cas précédent:

$$N'_{Smin} = 2,72 \cdot 10^{-9} T_{aq} \cdot \Delta F_{min} \cdot a = 186 a [W] \quad (19)$$

$$S'_K = 1240 \cdot n \cdot a (2,7 a - 1)^2 \quad \begin{matrix} a \geq 1 \\ n \geq 1 \end{matrix} \quad (20)$$

L'évaluation de ces équations pour différentes valeurs de a est représentée dans le tableau II. On constate que pour la transmission dans le sens station au sol-satellite, pour le même écart du seuil de sensibilité du récepteur et la même largeur de bande que dans le cas précédent, il est possible d'atteindre des rapports signal/bruit sensiblement meilleurs, avec, bien entendu, des puissances d'émission très supérieures. Il est toutefois possible de réaliser des puissances d'émission de 1-10 kW au sol

actuellement déjà, de la façon requise, et c'est pourquoi les conditions sont, dans ce cas, nettement plus favorables. Un rapport signal/bruit de 53 db peut être réalisé par exemple avec une puissance d'émission de 10 kW et une largeur de bande de 15 MHz; avec une puissance d'émission de 1 kW, il faudrait 30 MHz de largeur de bande.

Tableau II. Station au sol → Satellite

a	1	2	3	4	8
ΔF [MHz]	13,5	27	40,5	54	108
h	1	2,6	4,2	5,8	12,1
$S'_{Kmin} = \frac{S'_K}{n}$ [db]	35,5	46,8	52,8	56,8	63
N'_{Smin} [W]	186	372	558	745	1490

On voit par ce qui précède que le but désiré peut en principe être atteint, avec les moyens dont on dispose actuellement, mais que, d'autre part, ces moyens doivent pour ce faire être poussés, sous certains aspects, jusqu'aux limites du possible. Il conviendrait de faire des études analogues en envisageant d'autres systèmes de transmission éventuellement mieux appropriés, tels, par exemple, que la modulation par impulsions codées. Cependant, un examen sommaire nous montre qu'il ne serait guère possible d'obtenir des améliorations significatives des caractéristiques fondamentales de transmission par rapport au système discuté, même si l'on pouvait en tirer de réels avantages du point de vue de l'exploitation et de la construction des appareils. Les systèmes à bande latérale unique, qui permettent de réduire sensiblement l'occupation du spectre des fréquences, exigent des appareils des caractéristiques techniques qui sont très difficilement réalisables au stade actuel du développement (intermodulation). Ils sont également plus sensibles aux brouillages que les autres systèmes et ce facteur joue un rôle très important par le fait que les bandes de fréquences utilisées seront nécessairement partagées avec des services au sol existants ou prévus.

Le problème du choix du système de transmission le mieux approprié est lié également au principe du libre accès aux satellites de télécommunication commerciaux. Le libre accès signifie la subdivision de la capacité totale de transmission d'un satellite actif en un certain nombre de petits groupes de canaux, déterminés à l'avance ou même adaptables à volonté, utilisables simultanément par différents couples de stations au sol qui se mettent en liaison. De cette façon, il sera possible également d'établir des liaisons directes avec des régions à faible trafic. Pour les satellites du type d'essai actuellement en construction, qui tous travaillent selon le système multiplex décrit ici en détail, avec simple modulation de fréquence de l'onde porteuse, la transmission simultanée entre plusieurs couples de stations au sol ne sera possible qu'au détriment de la capacité totale de

transmission, qui en sera fortement diminuée (intermodulation dans l'amplificateur commun du satellite). Il serait possible, en principe, de remédier à cet inconvénient en installant des équipements plus compliqués à bord du satellite (1 récepteur particulier avec démodulation pour chaque sous-groupe de canaux, regroupement dans le spectre des fréquences de tous les sous-groupes pour moduler en commun l'émetteur du satellite). L'occupation totale du spectre des fréquences n'en serait vraisemblablement pas augmentée.

6. Attribution de bandes de fréquences aux satellites de télécommunication et problème des interférences

Les satellites de télécommunication commerciaux ont besoin de bandes de fréquences très larges et ils les occuperont pratiquement sur toute la terre, ce qui est déterminant. Comme nous l'avons expliqué plus haut, actuellement, il faut s'attendre à ce que chaque canal de transmission exige une largeur de bande allant jusqu'à 100 MHz. Grâce aux progrès de la technique, il devrait être possible par la suite de réduire cette exigence de moitié et même davantage, pour autant qu'une telle réduction se révèle nécessaire et appropriée. Parce que, d'autre part, en principe, de nombreux satellites peuvent travailler sur les mêmes fréquences simultanément et de façon autonome, en tant qu'ils sont marqués individuellement et puissent être captés séparément par les antennes directives des stations au sol. Pour plusieurs raisons, il faut non seulement que l'angle du lobe de rayonnement principal de ces antennes soit extrêmement petit, mais il est en outre nécessaire que les lobes secondaires soient réduits autant que possible, pour éviter les effets nuisibles provoqués par des réflexions d'obstacles voisins de l'antenne; c'est pourquoi, suivant le système de transmission, une faible différence de l'angle d'incidence suffit à assurer une exploitation simultanée de plusieurs satellites actifs utilisant le même canal de transmission, sans brouillages (fig. 13). Dans les systèmes de transmission utilisant un

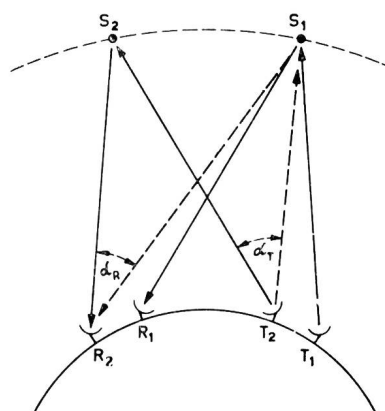


Fig. 13. Exploitation de plusieurs satellites fonctionnant sur le même canal: pour des systèmes de transmission avec un seuil de réception très marqué, il faut exiger au moins des valeurs $\alpha \geq 2^\circ$, pour les autres systèmes de transmission $\alpha \geq 10^\circ$.

seuil de récepteur très marqué, un écart angulaire d'environ 2° peut être suffisant, dans les autres systèmes cet écart peut atteindre une valeur de l'ordre de 10° . En admettant qu'une organisation rationnelle de l'exploitation soit en mesure de faire usage de cet avantage particulier, il doit être possible de maintenir dans des proportions acceptables l'ensemble des besoins en largeur de bande de fréquences des satellites de télécommunications.

Il serait difficile et prématuré de vouloir fixer aujourd'hui déjà les besoins minimums en largeur de bandes des satellites de télécommunication commerciaux; il est seulement certain qu'ils sont de l'ordre de grandeur de 1000 MHz. Un coup d'œil sur les services terrestres sans fil exploités actuellement ou prévus dans la gamme de 1-10 GHz montre immédiatement que dans ces conditions une attribution d'ondes exclusives aux satellites de télécommunications est pratiquement impossible. Il ne reste rien d'autre à faire que de partager des bandes de fréquences déjà occupées, bien entendu en assurant aux deux partenaires la possibilité d'une exploitation simultanée sans risque de brouillages nuisibles. Heureusement, étant donné qu'obligatoirement la sensibilité du récepteur et la puissance rayonnée du satellite seront relativement modestes, pour être par contre portées au maximum dans les stations au sol, la probabilité d'interférences avec les services terrestres, qui partageront les mêmes bandes de fréquences, est petite, vu les circonstances. Si les puissances rayonnées du service terrestre sont relativement faibles, elles ne pourront pas atteindre le seuil de sensibilité du récepteur du satellite, même lorsque par hasard la direction de la transmission correspondra à la position du satellite. L'émetteur du satellite, de son côté, compte tenu de sa puissance relativement faible, ne pourra pas causer de brouillages aux récepteurs à sensibilité normale du service terrestre.

De ce fait, les liaisons fixes par faisceaux hertziens sur micro-ondes, qui travaillent en visibilité directe, seront les partenaires les mieux appropriés; les possibilités d'interférences, de part et d'autre, se limiteraient à celles qui peuvent apparaître au voisinage des stations terriennes des communications par satellite, qui seront toutefois installées dans des régions isolées dans toute la mesure du possible. Ce problème peut être résolu du point de vue technique, ainsi que le montrent les directives provisoirement envisagées par la Commission d'étude IV du CCIR, sans imposer de restrictions essentielles à l'un ou à l'autre partenaire. Les liaisons utilisant la diffusion troposphérique, le radar, la radionavigation et la radioastronomie par contre ne pourraient certainement pas partager les mêmes gammes de fréquences que les liaisons par satellites artificiels. Du côté pratique, il reste évidemment quelques difficultés à surmonter, car le spectre des fréquences entrant en considération n'est pas utilisé de la même façon dans toutes les régions et par tous les pays, alors que les liaisons à l'aide de

satellites exigent absolument une coordination sur le plan mondial et, par conséquent, imposeront vraisemblablement certaines modifications. L'ampleur de ce problème dépendra naturellement de la largeur de bande totale revendiquée en faveur des satellites de télécommunications. La figure 14 donne une idée de l'envergure des revendications futures, d'après une étude américaine: cela fait 3000 MHz pour des canaux à large bande, un certain nombre de bandes partielles relativement étroites pour des services auxiliaires (télémessure, télécommande, identification,

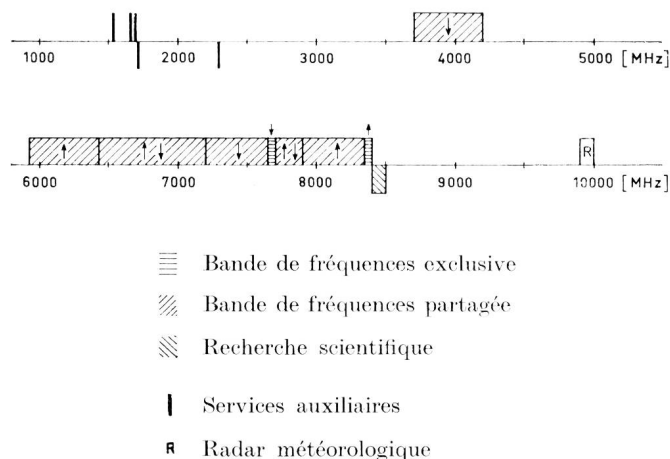


Fig. 14. Bandes de fréquences pour les communications par satellites (d'après une étude américaine, voir lit. 1.)

etc.) ainsi que pour d'autres emplois que la recherche scientifique, la météorologie et la radionavigation. Il est difficile de décider, sur la base des connaissances actuelles, si des revendications de bandes de fréquences aussi importantes trouveront leur justification dans l'avenir.

7. Diffusion directe de programmes de radiodiffusion sonore et de télévision

En principe, d'après la description ci-dessus, chaque satellite de télécommunications est un émetteur «omnidirectionnel» vu de la terre, en d'autres termes ses émissions peuvent être reçues ou influencées dans toute la zone de visibilité sur la terre, même lorsqu'il sert uniquement à la liaison entre deux stations au sol. L'étendue de la région couverte par le satellite est disproportionnée par rapport à l'utilisation en quelques points seulement de l'énergie rayonnée. Il semble séduisant, par conséquent, du point de vue technique, de diffuser des programmes de radiodiffusion sonore et des programmes de télévision à partir de satellites artificiels.

Pourquoi cela n'est pas encore possible aujourd'hui, il est facile de s'en rendre compte: supposons un satellite actif, muni d'un contrôle d'attitude, pourvu d'une antenne directive dont l'angle d'ouverture ϵ est calculé selon l'équation (8), qui couvrira donc la partie visible de la surface terrestre, avec quelque marge de sécurité. On obtiendra pour l'affaiblissement de transmission, d'après l'équation (10), indé-

pendamment de l'altitude du satellite et de la longueur d'onde, une valeur

$$b_{\text{ad}} = \frac{5,1 \cdot 10^{14}}{F_B}$$

D'autre part, la puissance nécessaire à l'émission, pour une intensité de champ E au sol à la distance moyenne du satellite, s'exprime de la façon suivante :

$$N_s = b_{\text{ad}} \cdot N_e = b_{\text{ad}} \cdot \frac{E^2 \cdot F_B}{120 \pi} \quad (21)$$

et l'on obtient

$$N_s = 1,35 \cdot 10^{12} \cdot E^2 \quad [\text{W}] \quad (22)$$

Comme on doit compter avec l'utilisation d'antennes et de récepteurs du commerce dans ce cas, les intensités de champ nécessaires au sol et, par conséquent, les puissances de l'émetteur du satellite devront être élevées :

$E = 50 \mu\text{V/m}$	exige $N_s =$	3,4 kW
$500 \mu\text{V/m}$	exige	340 kW
$5000 \mu\text{V/m}$	exige	34 000 kW

En réduisant la zone desservie par l'utilisation d'une antenne plus directive et en utilisant un dispositif de stabilisation du satellite très précis, il serait possible de réduire la puissance; elle reste toutefois encore si élevée que pour l'instant on ne peut pas songer sérieusement à la réalisation d'un service de radiodiffusion ou de télévision de caractère mondial de ce genre. Même si ces limitations n'existaient pas ou si elles disparaissaient, il faudrait encore résoudre de nombreux autres problèmes, tels que l'assignation d'ondes exclusives mondiales, l'introduction de systèmes uniformes de transmission, le choix des langues, la désignation de l'autorité chargée du choix des programmes, etc.

8. Conclusions

Nous avons essayé de montrer dans les considérations qui précèdent qu'il sera possible d'assurer des liaisons de télécommunications de grande capacité à l'échelle mondiale à l'aide de satellites artificiels. Il reste toutefois à résoudre un grand nombre de problèmes d'une extrême diversité et à surmonter des difficultés très importantes de divers ordres avant de pouvoir instaurer un service de ce genre, capable d'offrir un degré de sécurité suffisant dans l'exploitation et de façon durable.

Un des principaux problèmes de caractère tout à fait général demeurera pour longtemps celui de la fiabilité et de la durée de vie des appareils installés à bord des satellites. On sait que dans un cas précis, un simple oscillateur à transistors de quelques milliwatts, pourvu de batteries solaires d'une capacité relative très grande, a fonctionné durant plus d'une année. Par contre, bien des expériences tout à fait contraires ont été faites et dans la majorité des cas il fut impossible de déterminer les vraies causes de l'interruption prématurée du fonctionnement. Plus

les appareils deviendront compliqués, plus la puissance augmentera et plus il sera difficile de maîtriser un problème dont les aspects différents ne sont connus que partiellement et indirectement à l'heure actuelle (p. ex. dommages causés par radiations cosmiques, micro-météorites, dessèchement). La fiabilité est devenue un des éléments essentiels de tous les plans de développement des satellites, elle est le leitmotiv du choix des matériaux, des travaux de construction, du montage des appareils et des méthodes utilisées dans les essais. La fiabilité et la durée

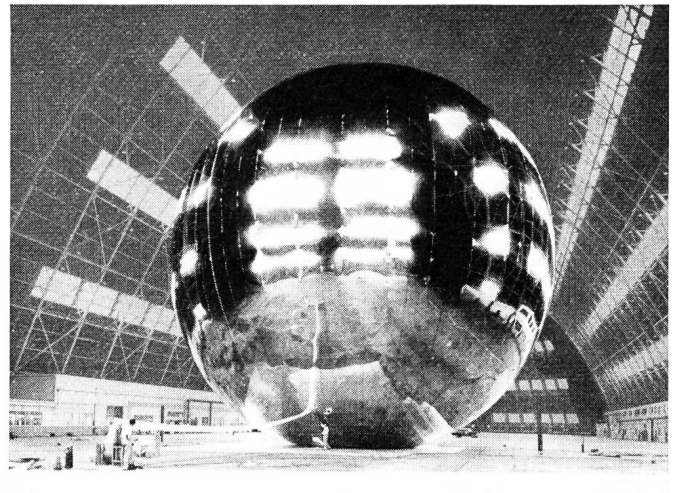


Fig. 15. Le satellite «Echo» dans la halle de montage

de vie ne sont pas seulement déterminantes pour la réalisation technique de satellites de télécommunications du point de vue technique, mais aussi de celui de la rentabilité. Comme il est extrêmement difficile de connaître les causes de l'interruption de fonctionnement, pour qu'une solution puisse être définitivement retenue, il faudra peut-être encore des années de recherches. D'autre part, les expériences les plus récentes avec le premier satellite d'essai du type commercial «Telstar», qui ont abouti à un succès magnifique jusqu'ici, signifient un progrès remarquable dans ce domaine et permettront éventuellement de résoudre nombre de problèmes plus vite que prévu.

En rapport avec la durée de vie, le dispositif d'alimentation électrique du satellite revêt également une grande importance. La solution la plus élégante, qui s'impose immédiatement, est l'utilisation de l'énergie des radiations solaires. Au début, le degré d'efficacité des batteries solaires est d'environ 10%, cependant elles ne peuvent pas être suffisamment protégées contre les radiations des protons qui les détruisent lentement, en outre, elles doivent être pourvues d'un dispositif capable d'accumuler l'énergie électrique, compte tenu du temps mort résultant du passage du satellite dans le cône d'ombre de la terre. Lorsque le besoin d'énergie est élevé, les surfaces nécessaires deviennent excessivement grandes; comme leur efficacité dépend de leur orientation par rapport

au soleil, il faut, soit qu'elles se mettent automatiquement dans la position la plus favorable, soit que les pertes résultant de ce fait soient compensées par une augmentation correspondante de la capacité de la batterie solaire.

Depuis assez longtemps déjà, on étudie la construction de réacteurs atomiques appropriés qui devraient être en mesure, en principe, de fournir, à l'aide de turbogénérateurs ou de piles thermoélectriques, à peu près n'importe quelle quantité d'énergie électrique durant des années. Ces dispositifs n'auraient pas besoin d'un accumulateur et procureraient, sous certains aspects, d'importants allègements dans la construction des satellites. Comme le degré total d'efficacité demeure cependant encore inférieur à 10 %, une quantité d'énergie considérable sera produite à l'intérieur du satellite en forme de chaleur inutile, qui doit être rayonnée vers l'espace. Parce que le rayonnement est le seul moyen pour dissiper l'énergie produite dans le satellite, cela peut conduire de nouveau à des surfaces du satellite relativement grandes, même excessives.

La réduction du poids du satellite est une question qui revêt, elle aussi, une grande importance. Pour chaque kilogramme de charge utile, avec les moyens de propulsion par fusée que l'on connaît actuellement, il faut au départ un poids de l'ordre d'une tonne, afin d'arriver à placer la charge utile sur son orbite. Les frais de la tonne de poids au départ, ou du kilo-

gramme de poids utile dans le satellite, font l'objet d'estimations très différentes. Si nous nous en tenons à la limite inférieure, on peut compter avec un montant d'environ 0.1 million de francs. On comprend qu'il est nécessaire de miniaturiser tous les équipements des satellites, sans risquer de compromettre de ce fait la durée de vie.

Il ne faut pas seulement qu'un système de communications soit techniquement élégant et réalisable, il faut encore qu'il soit rentable. L'augmentation constante du volume du trafic intercontinental dans le domaine des télécommunications est un fait, et il n'est pas exagéré de prétendre que d'ici peu d'années, la capacité des câbles transocéaniques existants et de ceux que l'on prévoit de poser, pourrait bien être complètement épuisée, sans même parler des liaisons transcontinentales sans fil sur ondes courtes. Le besoin d'un moyen de communication, offrant des possibilités plus vastes, existe. Plusieurs fois déjà les frais d'investissement et d'exploitation d'un réseau de communications par satellites ont été calculés. Mais ces estimations reposent sur des données relativement incertaines, anticipant un développement de la technique que seule l'expérience ultérieure permettra de vérifier. Elles montrent toutefois que les satellites de télécommunication présenteront également un intérêt sous l'aspect commercial, certains prétendent même – un peu prématurément peut-être – que le trafic deviendra meilleur marché. Il ne semble cependant guère possible d'envisager la réalisation d'un système mondial d'échange régulier de communications, assurées à l'aide de satellites artificiels, avant 5 à 10 ans.

Les expériences américaines connues sous les noms de projets Telstar, Relay, Syncom, Advent et Rebound auront sans doute une influence décisive sur l'orientation que prendra le développement des satellites de télécommunication commerciaux, sur le choix des orbites et des systèmes de transmission, sur la conception et la réalisation d'un réseau à l'échelle mondiale. Différents pays européens prennent déjà ou prendront part d'ailleurs activement aux essais commerciaux américains avec des stations au sol. Il n'est pas encore possible de dire si les efforts européens qui tendent à entreprendre un développement de ce genre pour notre continent aboutiront à des projets concrets et indépendants. D'une manière générale, il est certain pourtant que d'ici un temps assez rapproché, les travaux importants entrepris dans le domaine des satellites de télécommunication aboutiront à un succès.

Sources

1. URSI. Colloque sur les recherches en communications spatiales, Paris, 18–22 septembre 1961. Collection de documents.
2. Commission d'études n° IV du CCIR, Washington 1962. Collection de documents.
3. Webb, I.A. Spectral allocations for space communication. *Journal des Télécommunications* 28 (1961), n° 10, p. 561.

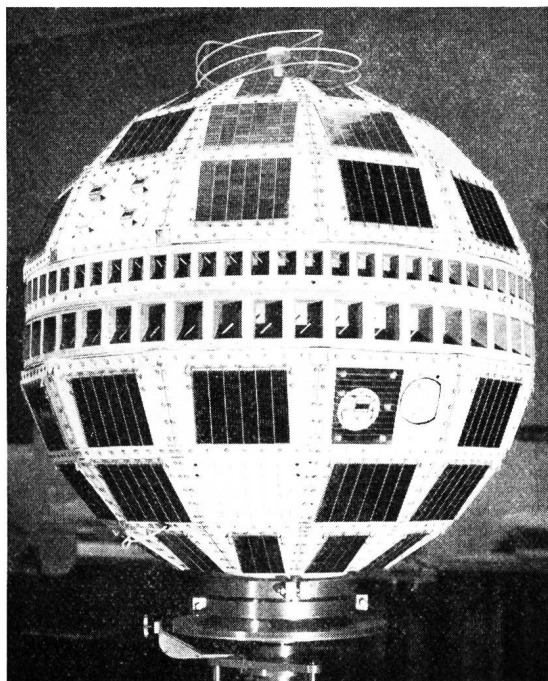


Fig. 16. Le satellite «Telstar» (ATT) au stade des essais. Son diamètre est de 86 cm, le poids de 77 kg et le nombre des cellules solaires de 3600

En haut: antenne VHF pour le repérage grossier et pour la transmission de signaux de mesure et de commande

Au milieu: antenne de réception et d'émission en forme d'une ceinture équatoriale, pour le canal principal sur les fréquences de 6390 MHz et 4170 MHz ainsi que pour le repérage précis sur 4080 MHz