

UNIVERSITE D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ELECTRONIQUE

4/70
red



PROJET DE FIN D'ANNEE

TELECOMMUNICATIONS
PAR SATELLITES

1970

PROPOSE PAR : A. BENTCHICOU
SUJET : CHOISI PAR : TAWFIK MERAZGA

TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES

S O M M A I R E

-	Introduction générale et exigences techniques.	2
<u>Chapitre I</u>	: Etude de l'antenne CASSEGRAIN.	5
<u>Chapitre II</u>	: Etude générale du bruit en radioélectricité. ANNEXE.	15
<u>Chapitre III</u>	: RECEPTION-EMISSION - Poursuite automatique du satellite	26
<u>Chapitre IV</u>	: Propagation en espace libre. Calcul d'une liaison par satellite.	34
<u>Chapitre V</u>	: Pertes dans la liaison radio.	38
<u>Chapitre VI</u>	: Conclusion.	43

BIBLIOGRAPHIE

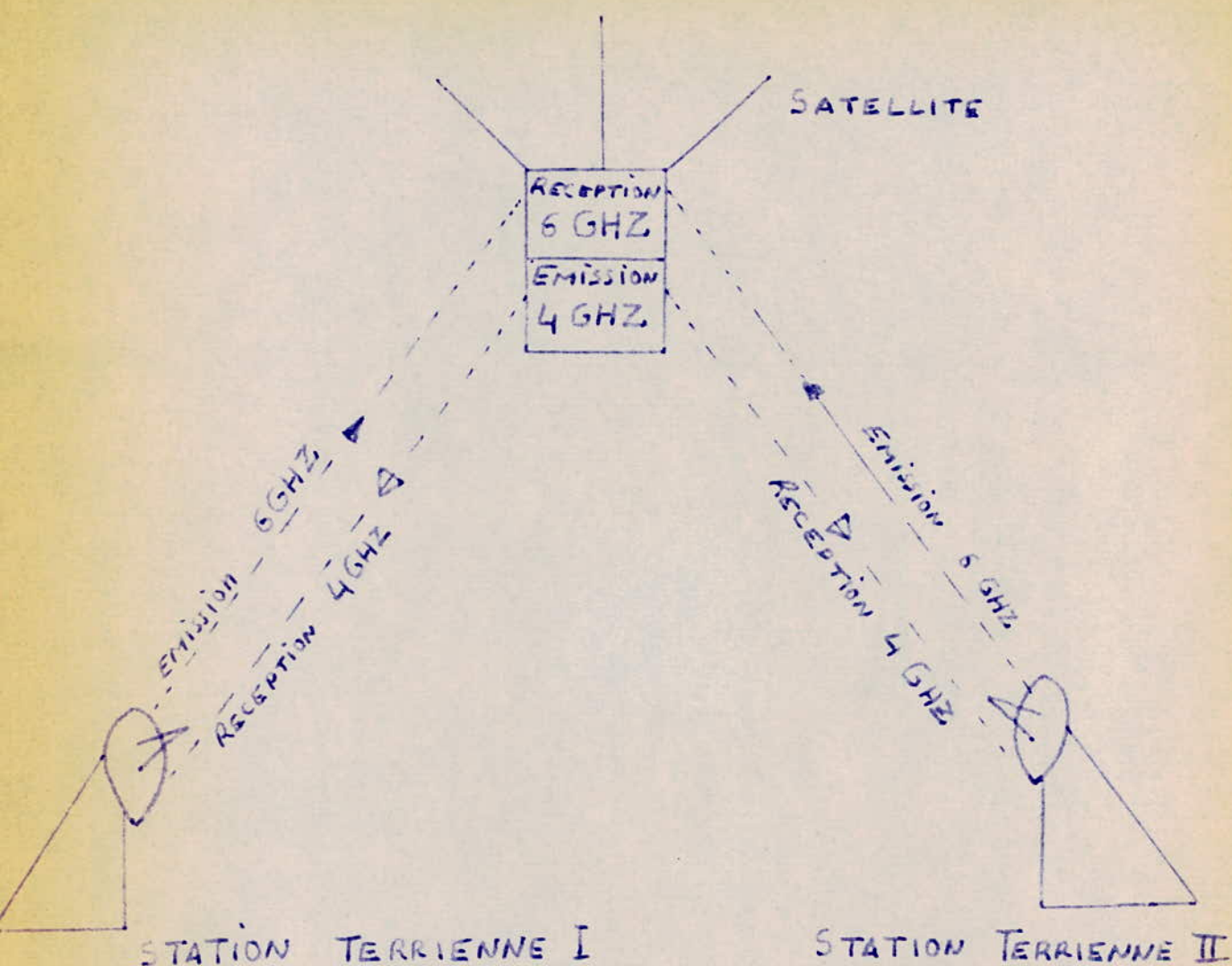
INTRODUCTION GENERALE ET EXIGENCES TECHNIQUES

Depuis le 4 octobre 1957, date du premier lancement d'un satellite soviétique, les études concernant les télécommunications par satellites sont entrées dans leur phase active. Les premières liaisons téléphoniques transcontinentales datent du mois d'août 1960, avec les essais du satellite passif ECHO.

Ainsi, le problème des liaisons multiples à très grande distance a trouvé, au fil des années, une solution et actuellement il existe sur terre plusieurs stations terriennes de communications par satellite qui travaillent avec les satellites de la série INTELSAT III placés sur orbite géostationnaire au-dessus des océans Atlantique, Pacifique et Indien.

1.- NECESSITE D'ADOPTER DES SYSTEMES DE T.P.S.

Un réseau de télécommunications par satellites constitue une solution intéressante pour réaliser un service de communications amélioré avec un certain nombre de pays étrangers, si éloignés les uns des autres. Aussi, l'installation de stations terriennes, permet de satisfaire aux besoins du trafic international; le système à satellites pourra écouler du trafic téléphonique, télégraphique, télex, de fac-similé, transmission de données et de TV mono ou polychromatique.



LIAISON TYPIQUE ENTRE DEUX STATIONS

gamme d'émission : 5925 à 6425 MHz

gamme de réception : 3700 à 4200 MHz

bande passante : 500 MHz

Pour parer à toute défaillance de la station (qui aura de ce fait une durée de vie égale à 15 ans) la fiabilité globale sera portée à 99,9 % par adjonction d'éléments dits de secours. D'autre part, le facteur de qualité G / T : gain de l'antenne sur température de bruit du système de réception sera supérieur ou au moins égal à 40,7 dB.

2.- IMPLANTATION DE LA STATION TERRIENNE

Un pays désireux d'établir une station de télécommunications par satellites, lance un appel d'offres international, ce qui l'amène à signer un pacte avec une firme étrangère qui étudie les possibilités de réalisation du projet.

La mission de coopération technique fait des études sur place, et sélectionne rigoureusement un terrain pour y édifier la station; d'autre part, elle effectue encore une étude du sol. Les facteurs déterminants du choix du site sont essentiellement :

- l'absence d'interférences radio,
- la proximité du centre de commutation international,
- une facilité d'accès la meilleure possible.

Pour éviter les interférences radioélectriques, on aura recours par exemple à un site géographique entouré de montagnes qui formeront écran entre la station et la source éventuelle de bruits parasites où qu'elle soit située par rapport à la station.

La proximité du centre international de commutation évitera, par exemple, l'emploi de relais hertziens pour distribuer les circuits de communication en téléphonie ou télégraphie.

Il est d'autre part d'une importance capitale, pour la construction d'une nouvelle station de tenir compte des caractéristiques techniques des satellites actuels et aussi des satellites à construire.

CHAPITRE IETUDE DE L'ANTENNE CASSEGRAINI - INTRODUCTION

En télécommunications spatiales, vu l'importance de la distance qui sépare le satellite de la station terrienne - distance supérieure ou au moins égale à 36.000 km - les antennes utilisées doivent avoir un gain élevé aussi bien à l'émission qu'à la réception.

Après maintes améliorations des antennes paraboliques, on en arrive au dernier type d'antenne partout employé dans le monde, et qui est l'antenne parabolique à illumination "CASSEGRAIN". Des aériens de ce type équipent toutes les stations, de diamètre variant entre 26 et 30 m. selon les coordonnées géographiques du lieu d'implantation de la station.

D'autre part, comme la puissance disponible à l'entrée des récepteurs de bande 500 MHz est très faible - de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-12} W - toutes les contributions à la température de bruit du système doivent être réduites au strict minimum, ceci pour assurer la réception des divers signaux émis par le satellite, avec une qualité acceptable requise par le C.C.I.R.

Le but de cet ouvrage est donc l'étude des caractéristiques d'antennes utilisées dans les communications spatiales, et l'étude du bruit qui prend naissance au sein même du système, abstraction faite du bruit externe, comme le bruit galactique par exemple ou autre. Par ailleurs, l'étude aura pour conséquence la définition du facteur de qualité qui est une indication très utile sur le fonctionnement d'une station terrienne, et qui s'exprime mathématiquement par le rapport gain de l'antenne sur la température de bruit du système, G / T .

II - DEFINITION ET FONCTION D'UN AERIEN HYPERFREQUENCE

Un aérien hyperfréquence d'une station de télécommunications par satellites est l'organe chargé à la fois de rayonner une énergie électromagnétique - qui est en fait la porteuse modulée en fréquence par le signal que l'on veut émettre - et de capter une autre énergie électromagnétique présente dans l'espace libre, rayonnée par un satellite répéteur, pour l'acheminer ensuite dans les circuits de démodulation du récepteur et en extraire le signal utile.

III - ENERGIE RAYONNEE PAR L'ANTENNE OU AERIEN

Le problème de l'antenne d'émission réside dans sa capacité à rayonner une énergie suffisante pour permettre une communication entre 2 points donnés séparés par une distance moyenne ou même très grande dans le cas des liaisons spatiales.

Soit \vec{P} le vecteur de POYNTING tel que

$$\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{H}$$

Soit Z l'impédance d'onde dans le vide (ou milieu $\epsilon = \epsilon_0$) définie par

$$Z = \frac{|E|}{|H|} = 120 \pi$$

donc

$$|P| = \frac{E_{\text{eff}}^2}{Z} \quad (\text{w/m}^2)$$

Si P_0 est le flux du vecteur de POYNTING sur la sphère de rayon d centrée sur la source s

$$P_0 = \frac{E_{\text{eff}}^2}{Z} \cdot 4\pi d^2$$

D'où l'on tire la valeur efficace du champ rayonné

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{d} \sqrt{30 P_0}$$

Cette formule montre la nécessité d'une très grande puissance rayonnée pour les liaisons à très grande distance.

IV - DIAGRAMME DE RAYONNEMENT

L'amplitude du champ électrique \vec{E} varie en raison inverse de la distance d; mais le produit $d \cdot \vec{E}$ ne dépend plus que de la direction du champ. On définit le diagramme de rayonnement d'une antenne comme la surface obtenue en portant sur chaque demi-droite autour d'une origine O une quantité proportionnelle au produit $d \cdot \vec{E}$ correspondant à cette direction. Le tracé du diagramme de rayonnement permet de préciser le caractère directif d'un système rayonnant. Plus la directivité sera prononcée, plus le système considéré utilisera efficacement la puissance rayonnée au voisinage d'une direction donnée. Cette propriété peut être précisée quantitativement par la notion de gain.

V - PUISSANCE RAYONNEE PAR UNE ANTENNE (OU A RIEN)

Le secteur de Poynting est

$$\vec{P} = \frac{E_{eff}^2}{Z}$$

Le champ électrique \vec{E} est de la forme

$$\vec{E} = E_0 e^{j(\omega t - Br)}$$

La valeur efficace de \vec{E} est

$$E_{eff}^2 = \frac{E_0^2}{2}$$

La puissance rayonnée par l'aérien ou antenne, à travers une sphère sera, en tenant compte que

$$ds = d^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

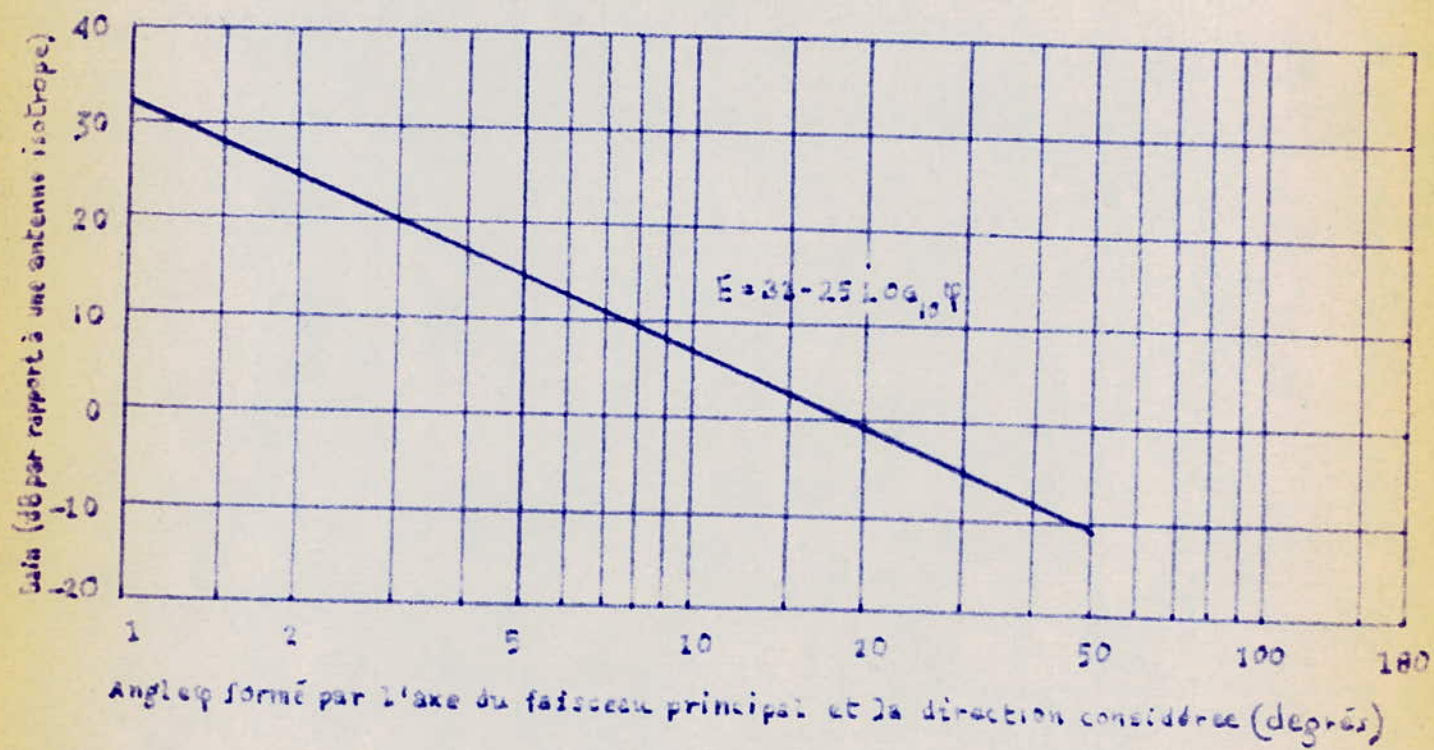


DIAGRAMME DE RAYONNEMENT
DE REFERENCE PROVISoire

$$P_o = \iint_S |\vec{P}| dS = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} d\theta \cdot \frac{E_{\text{eff}}^2 d^2 \sin \theta}{Z}$$

Soit :

$$P_o = \frac{E_{\text{eff}}^2}{Z} \cdot 4\pi d^2$$

VI - GAIN D'UNE ANTENNE

C'est une caractéristique très importante à considérer. La puissance rayonnée par une antenne d'émission subit un affaiblissement lors de sa propagation dans l'espace, et est reçue par une antenne de réception avec un niveau très faible.

1 - Définition du gain

Dans le cas des antennes classiques, on définit le gain en prenant comme élément de référence le dipole ou l'antenne demi-onde.

Dans le cas des systèmes rayonnants - en ondes centimétriques - on définit le gain en établissant une comparaison par rapport à une source dont le rayonnement est isotropique.

Le gain dans une direction donnée est alors défini par

$$g = \frac{P_o}{P}$$

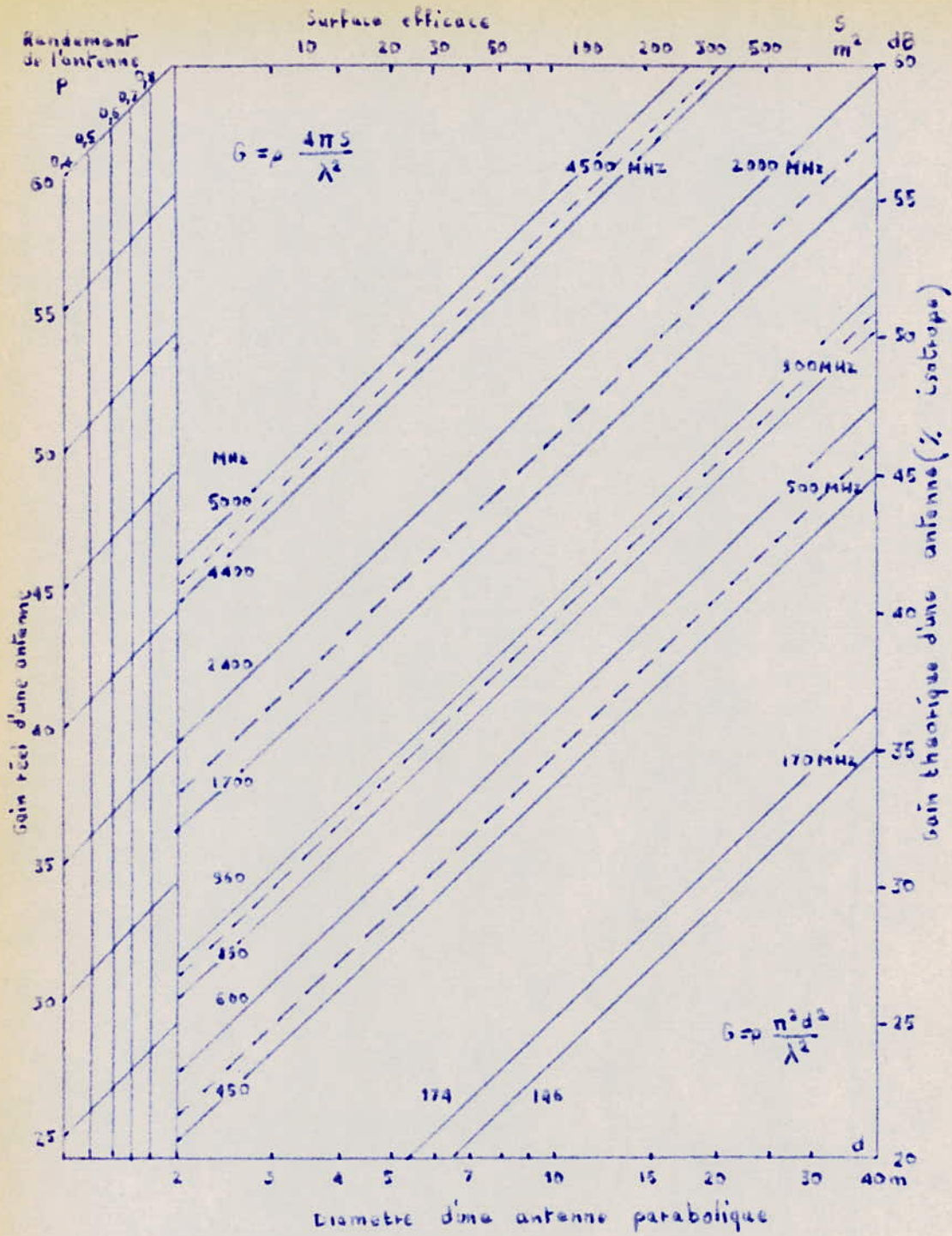
où :

P_o = puissance fournie à la source

P = " " au système rayonnant

ceci, lorsque les 2 systèmes produisent à même distance le même champ dans la direction considérée.

La notion de gain peut être étendue à un aérien de réception par l'application du principe de réciprocité.



GAIN D'ANTENNE

2 - Expression en décibels

Le gain d'une antenne ou d'un aérien quelconque s'exprime généralement en décibels en prenant 10 fois le logarithme de g ,

$$G \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{P_o}{P}$$

VII - ANGLE D'OUVERTURE

Par définition c'est l'angle fait par les 2 directions pour lesquelles la densité de puissance rayonnée est égale à la moitié de celle rayonnée dans la direction du maximum.

L'ouverture du faisceau de l'antenne rayonnant la moitié de la puissance comprise dans le lobe principal, ou ouverture du lobe à 3 dB, peut être directement reliée aux dimensions de l'antenne.

$$\omega = 70 \frac{\lambda}{D}$$

ω = s'exprime en degrés

D = diamètre de l'antenne

λ = longueur d'onde de travail.

VIII - SURFACE EFFECTIVE

Pour une source isotropique, le champ électrique rayonné à la distance d , a pour valeur :

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{d} \sqrt{30 P_o}$$

Dans les mêmes conditions, un aérien d'émission dont le gain par rapport à cette source isotropique est

$$G = \frac{P_0}{P}$$

produit le même champ

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{d} \sqrt{30 GP}$$

Prenons comme source isotropique un doublet. L'aérien dont on veut déterminer la surface effective rayonne le champ E . La f.e.m. induite dans le doublet de longueur l a pour expression $E_{\text{eff}}.l$.

Si on désigne par R la résistance de rayonnement du doublet (qui doit être adaptée au feeder), la puissance effective reçue maximum a pour expression

$$P_r = \frac{E_{\text{eff}}^2 l^2}{4R} = \frac{1}{d^2} \cdot \frac{30 GP l^2}{4R}$$

Utilisons maintenant le doublet à l'émission et l'aérien à la réception. Le champ produit par le doublet est E_{eff} :

$$E_{\text{eff}} = \frac{60 \pi I_{\text{eff}} \cdot l}{\lambda d}$$

La puissance rayonnée par le doublet est P

$$P = R I_{\text{eff}}^2 = \frac{R E_{\text{eff}}^2 \lambda^2 d^2}{(60 \pi l)^2}$$

En vertu du principe de réciprocité, l'aérien reçoit une puissance P_r égale à celle reçue par l'intermédiaire du doublet dans la première expérience, en supposant égales les puissances émises P .

L'expression de la puissance P_r devient alors en éliminant P . (1er cas)

$$P_r = \frac{\lambda^2 G E_{\text{eff}}^2}{4 \pi \cdot 120 \pi}$$

Enfin, en appelant S la surface effective de l'aérien utilisé à la réception, la puissance qu'il reçoit est Pr égale à

$$Pr = \frac{E_{\text{eff}}^2 S}{120\pi}$$

L'élimination de Pr entre les 2 dernières équations donne la relation entre le gain d'un aérien et sa surface effective

$$G = 4 \frac{\pi S}{\lambda^2}$$

Pour une antenne parabolique, et pour le paraboloïde d'une antenne CASSEGRAIN

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

D étant le diamètre du paraboloïde, ce qui donne

$$G = \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2}$$

En pratique, le rendement des antennes simples paraboliques est compris entre 0,6 et 0,7. Pour une antenne de type CASSEGRAIN, il peut atteindre 95 %.

La formule s'écrit alors, si η est le rendement

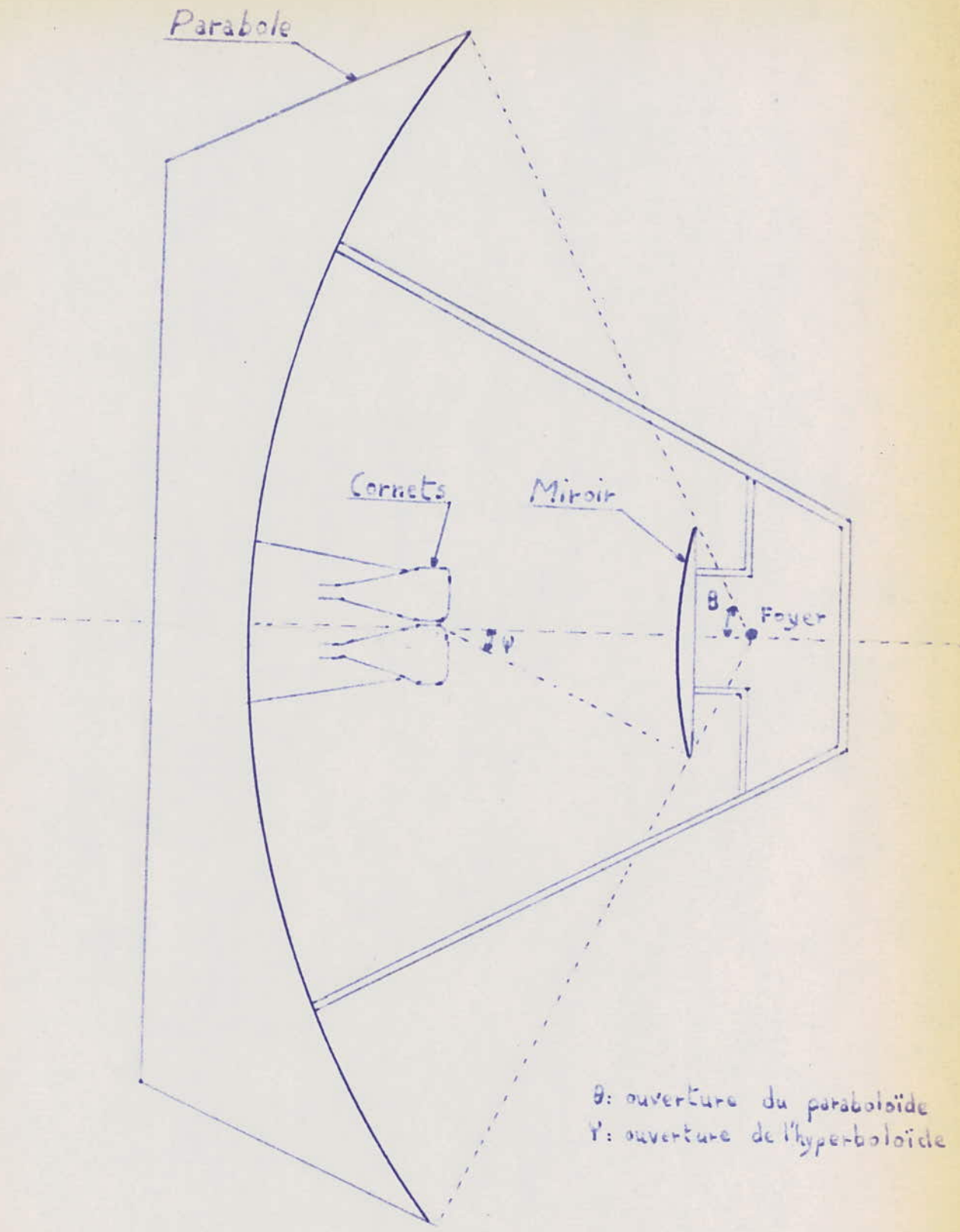
$$G = \eta \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2}$$

IX - ETUDE DE L'ANTENNE CASSEGRAIN

A/ Avantages de l'Antenne

L'antenne type CASSEGRAIN a été employée avec profit, ces dernières années, et ses principaux avantages sont :

- souplesse de réalisation
- performances améliorées en ce qui concerne le rendement, la bande passante et diagramme de rayonnement



B: ouverture du paraboloïde
 Y: ouverture de l'hyperboloïde

ANTENNE CASSEGRAIN

- simplicité de l'alimentation primaire
- utilisation à la fois pour l'émission et la réception.

B/ Description

1. - Fonctionnelle

L'alimentation d'antenne assure 3 fonctions.

- Emission d'énergie HF
- Captation d'énergie HF
- Poursuite du satellite

2. - Générale

L'antenne comprend 3 parties principales :

- réflecteur principal
- réflecteur CASSEGRAIN
- source primaire.

a/ Réflecteur principal

Il a très sensiblement la forme d'un paraboloïde; le diamètre varie entre 26 et 30 m. L'énergie reçue est concentrée sur le miroir CASSEGRAIN, et celui-ci à son tour la renvoie aux étages d'amplification par l'intermédiaire de la source primaire.

b/ Réflecteur CASSEGRAIN

Il est de forme sensiblement parabolique, et son diamètre est en général égal au $1/10^{\circ}$ du diamètre du réflecteur principal. En réception, le rôle du miroir CASSEGRAIN consiste à séparer en 4 le faisceau convergent et à l'aiguiller vers les 4 cornets de la source primaire.

c/ Source primaire

Se compose de 4 cornets coniques. Chaque cornet mesure 1 m. de diamètre à la base et sa hauteur est de 3 m. . A l'ouverture du cornet, on dispose une lentille diélectrique dont le rôle, considéré par exemple en émission est de transformer l'onde sphérique circulant dans le cornet conique en une onde plane, rayonnée vers le miroir CASSEGRAIN.

90 % de l'énergie émise par le cornet frappe le miroir.

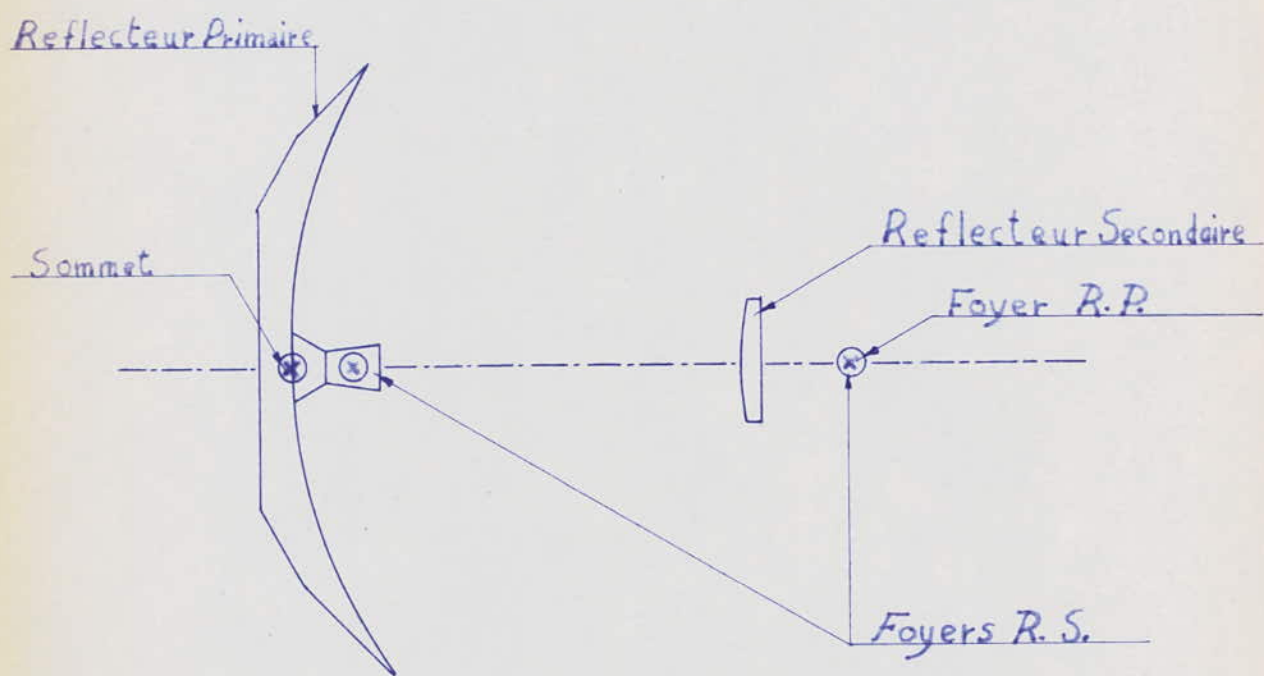
C/ Performances Radioélectriques

En raison du fait que le trajet satellite-terre est la section la plus critique de la liaison spatiale, les performances en réception sont considérées les premières :

- gamme des fréquences de réception : 3700 à 4200 MHz.
- fonctionnement en polarisation linéaire et circulaire
- le facteur de qualité G / T à 4 GHz et pour une élévation de 5° est de 40,7 dB
- variation de gain avec la fréquence : $\pm 0,2$ dB pour toute bande de 40 MHz (site 5°)
- gain 58,5 dB à la fréquence centrale 3950 MHz
- température de bruit de système 65° K.
- gamme des fréquences d'émission 5925 à 6425 MHz
- gain : 61,65 dB à la fréquence centrale de 6200 MHz.

D/ Performances Mécaniques

La précision de pointage en poursuite automatique est limitée à 20 millidegrès d'écart entre l'axe de l'antenne et la direction du satellite par vent moyen de 15 m/s et à 30 millidegrès par vent 20 à 27 m/s.



DISPOSITION

GEOMETRIQUE

DU SYSTEME

CASSEGRAIN

E/ Fiabilité de l'Antenne

L'antenne ne doit pas être arrêtée pour raisons de pannes, maintenance et entretien courant plus de 3 % du temps, soit 262 h/an. L'antenne doit conserver toutes ses caractéristiques pendant 15 ans au minimum.

F/ Performances Operationnelles

- température imposée selon les coordonnées du lieu d'implantation de l'antenne (par exemple -15°C à $+35^{\circ}\text{C}$)
- vent : vitesse 100 km/h au maximum
- pluie : 6mm/h en permanence
- mobilité en site : de 0 à 90°
- mobilité en azimuth : $+ 360^{\circ}$

G/ Conclusion : Avantage du Système CASSEGRAIN

Une antenne CASSEGRAIN possède vis à vis de l'antenne à excitation classique, quelque avantage :

1. Le rayonnement de la source primaire se produit au voisinage de l'axe de rayonnement de l'antenne, ce qui permet d'éviter l'influence du sol sur la température de bruit de l'antenne.
2. Les équipements de réception peuvent être situés à l'arrière du réflecteur principal, ce qui évite des connexions longues et par suite des pertes si cet équipement faisait partie du bâtiment de contrôle.
3. L'adjonction d'un réflecteur supplémentaire permet d'obtenir des performances supérieures notamment dans le gain.

CHAPITRE IIETUDE GENERALE DU BRUIT EN RADIOELECTRICITEI - GENERALITES SUR LE BRUIT

Le bruit radioélectrique est un phénomène aléatoire; dans le cas d'un amplificateur, à l'entrée duquel aucun signal n'est appliqué, on peut mesurer une tension de bruit, ou l'observer à l'aide d'un oscilloscope, aussi faible soit-elle.

Donc, un amplificateur, de gain même élevé ne sera pas capable d'amplifier des signaux d'entrée au-dessous d'un certain niveau. Pour caractériser la qualité d'un amplificateur, on considère le rapport signal sur bruit (S/N) :

$$\frac{S}{N} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{P_S}{P_N}$$

II - BRUIT THERMIQUE D'UNE RESISTANCEA/ F.E.M. de Bruit

En l'absence de champ électrique, les électrons d'un conducteur sont en perpétuel état d'agitation, leur parcours étant constamment modifié par les chocs qu'ils subissent avec les ions du réseau.

La relation de NYQUIST donne la f.e.m. de bruit

$$E^2 = 4 KTB$$

où $\left\{ \begin{array}{l} K = C^{te} \text{ Boltzmann} \\ B = \text{ bande passante} \end{array} \right.$

B/ Courant de bruit

Par application du théorème de NORTON, on a :

$$I^2 = \frac{4 K T B}{R}$$

C/ Puissance de bruit maximale

C'est la puissance que fournit le générateur de bruit à une résistance idéale - supposée sans bruit - égale à sa résistance interne.

$$P = \frac{E^2}{4R} = K T B$$

III - BRUIT DE GRENAILLE

Le bruit de grenaille provient des fluctuations du courant émis par une cathode, par suite du caractère granulaire de l'électricité.

A/ Cas d'une diode saturée

Une diode est saturée quand tous les électrons émis par la cathode sont captés par l'anode.

Soit i la valeur efficace du courant de bruit

$$i = 2. e. I. B$$

où : e : charge de l'électron
 I : courant continu d'anode.

IV - FACTEUR DE BRUIT

La puissance disponible de bruit d'un générateur à la température standard

$$T_0 = 290 \text{ } ^\circ\text{K} \text{ est :}$$

$$P_g = K T_0 B$$

A/ Facteur de bruit ponctuel

C'est par définition le rapport

$$F = \frac{P_b \text{ (sortie)}}{G \cdot K \cdot T_o B}$$

P_b : puissance disponible de bruit à la sortie

G : gain en puissance du système.

B/ Bruit introduit par un ampli

Le bruit introduit effectivement par un amplificateur est la différence entre le bruit à la sortie et le bruit dû au générateur.

$$P = F G K T_o B - G K T_o B$$

soit

$$P = (F - 1) G K T_o B$$

C/ Composition des facteurs de bruit

Soit une suite de quadripoles de gain G_n et de facteur de bruit F_n . Les puissances de bruit sont mesurées dans une largeur de bande B .

Le bruit de la résistance d'entrée est

$$N_o = K T_o B$$

Le bruit à la sortie du 1er quadripole est

$$N_1 = F_1 G_1 K T_o B$$

A la sortie du 2ème quadripole, ce bruit est multiplié par G_2 et il s'y ajoute le bruit introduit par le 2ème ampli dont l'expression est :

$$(F_2 - 1) G_2 K T_o B$$

On a donc :

$$N_2 = F_1 G_1 G_2 K T_o B + (F_2 - 1) G_2 K T_o B$$

Le facteur de bruit F sera alors :

$$F = \frac{N_2}{G_1 G_2 K T_o B}$$

Soit :

$$F = F_1 + \frac{(F_2 - 1)}{G_1} + \dots + \frac{(F_n - 1)}{G_1 G_2 \dots G_n - 1}$$

D/ Facteur de bruit à une température quelconque

FRIIS définit le facteur de bruit d'un réseau - actif ou passif - comme la détérioration du rapport signal à bruit entre l'entrée et la sortie du réseau

$$F = \frac{S_g / N_g \text{ (entrée)}}{S / N \text{ (sortie)}}$$

Or $\frac{S}{S_g} = G$ gain disponible en puissance

$$N_g = K T B$$

$$N = G K T B + (F - 1) G K T_o B$$

d' où

$$F_t = (F - 1) \frac{T_o}{T} + 1$$

V - CAUSES PHYSIQUES DU BRUIT DANS LES RECEPTEURS

Bien que les causes de bruit dans les récepteurs soient en apparence très variées, les plus importants résultent d'un petit nombre de mécanismes physiques. Par exemple, de nombreuses sources de bruit proviennent des fluctuations de grandeurs macroscopiques qui traduisent des phénomènes discontinus à l'échelle microscopique. Il en est ainsi du bruit de grenaille provenant des

fluctuations du courant émis par une cathode, par suite du caractère granulaire de l'électricité.

A/ Emission spontanée d'énergie électromagnétique

L'émission spontanée d'énergie électromagnétique par tous les corps est une source de bruit particulièrement importante : en particulier, l'émission produite par une population de particules en équilibre thermodynamique constitue le bruit thermique. Aux fréquences très élevées, l'un de ses aspects les plus connus est le rayonnement du corps noir; aux basses fréquences, elle se traduit par la production d'une énergie de bruit dans les circuits radioélectriques.

Dans tous les cas, l'énergie électromagnétique ainsi produite est liée à l'énergie emmagasinée dans un résonateur couplé à un thermostat à la température T. La mécanique statistique nous enseigne en effet que l'énergie moyenne d'un tel résonateur est :

$$N = \frac{h \cdot \nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1}$$

formule dans laquelle

h = Cte de PLANCK

K = " " BOLTZMANN

En 1928, NYQUIST en déduit que tout dipole radioélectrique, présentant une résistance R à la température T, est une source de bruit susceptible de donner une puissance maximale de bruit :

$$N = \frac{h\nu B}{\exp\left(\frac{h\nu}{KT}\right) - 1}$$

dans une bande de fréquence B autour de la fréquence centrale ν .

Mais aux fréquences suffisamment basses pour que $h\nu \ll KT$ (soit $\nu \ll 200$ GHz - si $T = 10^\circ$ K), la puissance de bruit maximale donnée par un dipole se réduit simplement à :

$$N = K T B$$

VI - SOURCES DE BRUIT DANS LES RECEPTEURS DE TELECOMMUNICATIONS

A/ Caractéristiques du Bruit d'un Système de Réception

Le bruit du système de réception d'une station de télécommunications provient de 4 sources :

- le bruit du ciel
- le bruit du sol
- le bruit de la ligne reliant l'antenne aux amplificateurs et celui du radôme (s'il existe)
- le bruit des amplificateurs.

La température de bruit du récepteur est la somme des températures de bruit équivalentes de chacune de ces sources ramenées à l'entrée du récepteur.

1. Le bruit du ciel et le bruit du sol

Le bruit du ciel et le bruit du sol vus à travers l'antenne de réception constituent le bruit de l'antenne. En effet, si T_{Δ} est la température apparente vue par l'antenne dans une direction Δ où elle a un gain G_{Δ} , la température de bruit de l'antenne est définie par l'intégrale :

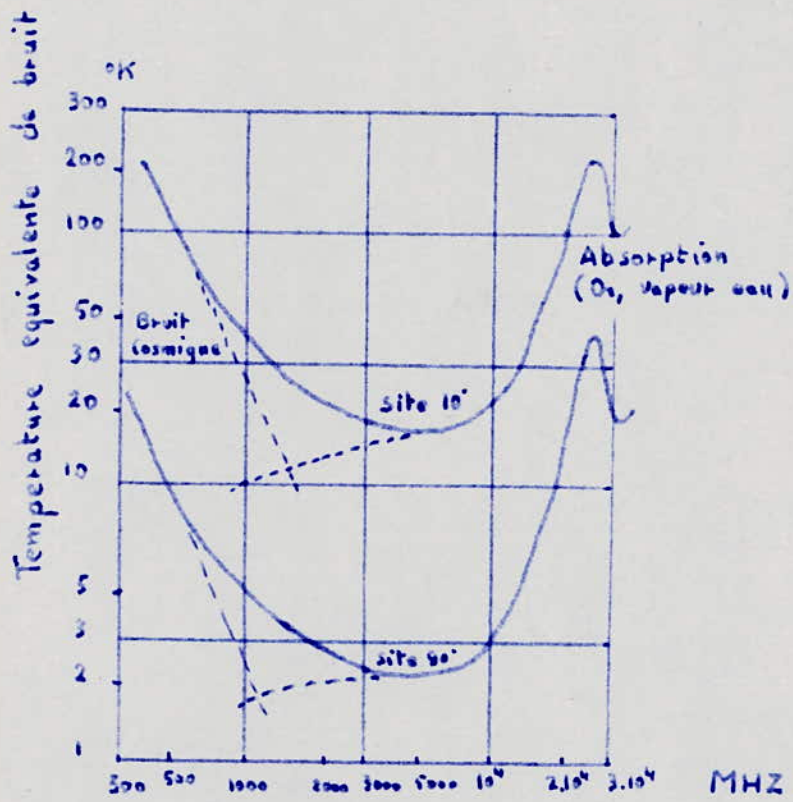
$$T_A = \frac{1}{4\pi} \int T_{\Delta} G_{\Delta} d\Omega$$

$d\Omega$ étant un angle solide infiniment petit autour de la direction Δ .

Si Δ est orientée vers le sol, T_{Δ} est la température apparente de bruit du sol, pour un sol à la température T , de coefficient d'absorption σ et de coefficient de réflexion ρ , on a la relation :

$$T_{\Delta} = T \cdot \sigma + T_c \cdot \rho$$

où T_c est la température apparente dans la direction du rayon réfléchi. Par exemple, la terre arable pour une température ambiante de 20° C, a une température de bruit apparente de l'ordre de 220° K à 230° K.



TEMPERATURE DE BRUIT DU CIEL

Si Δ est orientée vers le ciel, T_{Δ} est la température de bruit du ciel T_c . Cette température est une fonction de la fréquence.

Aux basses fréquences, le bruit du ciel est dû à notre galaxie, il diminue lorsque la fréquence croît. Aux fréquences élevées, l'atmosphère, par l'oxygène et la vapeur d'eau qu'elle contient, est un absorbant à une température supérieure au zéro absolu et produit la principale source de bruit. On conçoit aisément que lorsque l'élévation diminue, la température de bruit augmente puisque l'épaisseur d'atmosphère augmente.

Pour chaque élévation, la température de bruit du ciel présente donc un minimum en fonction de la fréquence. Celui-ci se situe entre 1 et 10 GHz. C'est la raison pour laquelle cette bande de fréquences est utilisée dans les télécommunications par satellites.

A titre d'exemple, à 4 GHz la température de bruit du ciel au zénith est de 2,6 °K. On peut admettre que pour des élévations supérieures à 10°, la température de bruit du ciel varie selon la loi.

$$T_c = \frac{T_{cz}}{\sin El}$$

où T_{cz} est la température du ciel au zénith, et El , l'élévation. A 7,5° d'élévation la température de bruit du ciel à 4 GHz a déjà atteint 19,9 °K.

Une antenne a une température de bruit d'autant plus élevée que les lobes ayant le plus grand gain sont dirigés vers des régions ayant une température de bruit apparente plus grande.

Dans la pratique, pour les fréquences comprises entre 1 et 10 GHz, la température apparente du sol étant bien supérieure à celle du ciel, le gain relatif des lobes d'antenne tournés vers le sol a une importance considérable.

On notera que la température de bruit d'une antenne est au moins de l'ordre de grandeur de la température de bruit dans la direction du lobe principal. Elle est donc une fonction de la direction de pointage de l'antenne

au-dessus de l'horizon. Elle est minimale lorsque l'antenne est pointée au zénith.

Une antenne est meilleure du point de vue du bruit que le bruit recueilli par ses lobes secondaires et arrière est faible, donc que son efficacité est grande.

Pour les télécommunications par satellites, on cherche donc à réaliser des antennes ayant des lobes latéraux très réduits par rapport au lobe principal puisque les antennes sont destinées à être orientées vers le ciel. Dans les faisceaux hertziens, par contre, le lobe principal étant dirigé dans une direction voisine du sol, le bruit apporté par l'antenne est important et l'effet des lobes latéraux sur le bruit est de moindre importance.

2. Bruit des amplificateurs

L'apport de bruit le plus important est celui des 2 premiers étages, dont la température équivalente est :

$$T_r = T_1 + \frac{T_2}{G_1}$$

3. Température de bruit du système de réception

Elle est donnée par la formule

$$T = T_a L + (L - 1) T_L + T_r$$

dans laquelle :

T_a = température de l'antenne

L = affaiblissement des éléments non rayonnants

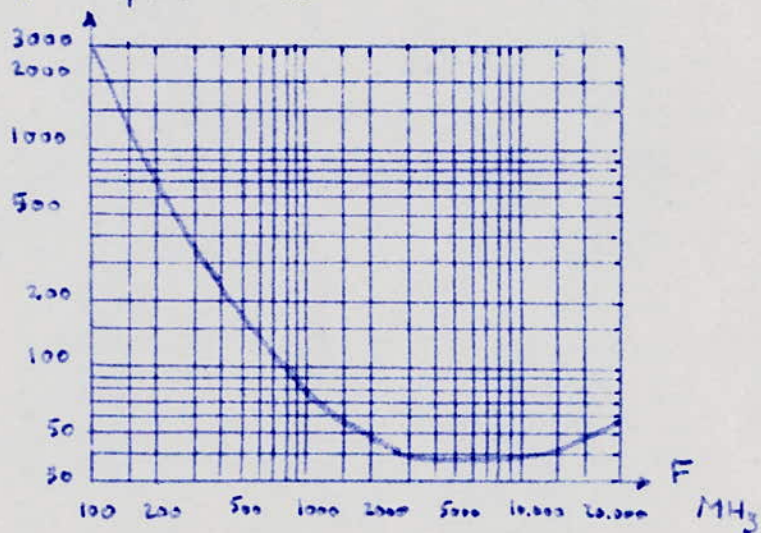
T_L = température physique de ces éléments

T_r = température de bruit du récepteur

Pour que T soit peu élevée, il faut que L soit faible.

En général, L ne dépasse pas 0,22 dB.

°K Temperature de bruit de l'antenne



COURBE DE TEMPERATURE
DE BRUIT
D'ANTENNE

T_A diminue avec la fréquence.
minimum 8-10,000 MHz ensuite T_A augmente

B/ Facteur de qualité du Système

Le facteur de qualité dans les télécommunications spatiales est le rapport gain de l'antenne sur température de bruit du système.

Dans un cas typique, la température de bruit d'une antenne CASSEGRAIN pour 4 G H Z peut se décomposer ainsi :

Faisceau principal (site 5°)	25°K
Lobes latéraux voisins	2°K
Diffraction sur réflecteur CASSEGRAIN	8°K
" " " principal	5°K

Total	40 °K
Affaiblissements dus aux guides ondes	5 à 20 °K
Préampli refroidi faible bruit	15 à 25 °K

La température de bruit totale du système varie donc entre 60 et 85 °K.

Le facteur de qualité s'exprime par :

$$Q = 10 \log \frac{G}{T}$$

Ainsi, dans le cas d'une antenne ayant un gain de 58,8 dB, avec une température de bruit de 65 °K, le facteur de qualité est de 40,7 dB, valeur standard.

C/ Conclusion

La température de bruit du système de réception d'une station de télécommunications est un facteur primordial, puisqu'il définit en grande partie la capacité de réception de cette station. Donc, les sources de bruit dont on a décrit la nature doivent être minimisées au maximum.

A N N E X EEVALUATION DE LA TEMPERATURE DE BRUITDU SYSTEME DE RECEPTION COMPLET

(EXEMPLE TYPIQUE)

I - TEMPERATURE DE BRUIT GLOBALE

On peut calculer la température de bruit globale de l'ensemble de réception à partir du schéma fonctionnel. Chacun des éléments est caractérisé par un gain positif ou sa perte négative, la température physique à laquelle il est porté, sa température de bruit propre et la température de bruit de l'élément ramené à l'entrée de l'ensemble de réception.

On notera l'importance capitale de l'accès d'entrée et du 1er étage amplificateur quant à la température de bruit globale du système.

II - FORMULES ET CALCULS

(1) Gain de l'ensemble de réception

$$G_T = L_1 + L_2 + L_3 + G_4 + L_5 + G_6 + L_7 + G_8 + L_9 + G_{10} \\ + L_{11} = 41,12 \text{ dB}$$

(2) Température de bruit globale

$$T_1 = T_2 L_1 + (L_1 - 1) T_{p1} \\ = 12,2 \cdot 1,023 + (1,023 - 1) 300 = 19,4 \text{ °K}$$

$$T_6 = \frac{T_7}{G_6} + T_{b6} = \frac{162}{12,6} + 5,8 = 18,7 \text{ °K}$$

$$T_5 = T_6 L_5 + (L_5 - 1) T_{p5} = 18,7 \cdot 1,26 + (1,26 - 1) 20 \\ = 28,7 \text{ °K}$$

$$T_4 = \frac{T_5}{G_4} + T_{b4} = \frac{28,7}{12,6} + 5,8 = 8,1 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_3 = T_4 L_3 + (L_3 - 1) T_{p3} = 8,1 \cdot 1,12 + (1,12 - 1) 20 \\ = 11,5 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_2 = T_3 L_2 + (L_2 - 1) T_{p2} = 11,5 \cdot 1,007 + (1,007 - 1) 80 \\ = 12,2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{12} = 7550 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{11} = T_2 L_{11} + (L_{11} - 1) T_{p1} = 7550 \cdot 1,32 + (1,32 - 1) 300 \\ = 10.362 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{10} = \frac{T_{11}}{G_{10}} + T_{b10} = \frac{10362}{20} + 650 = 1168 \text{ } ^\circ\text{K}$$

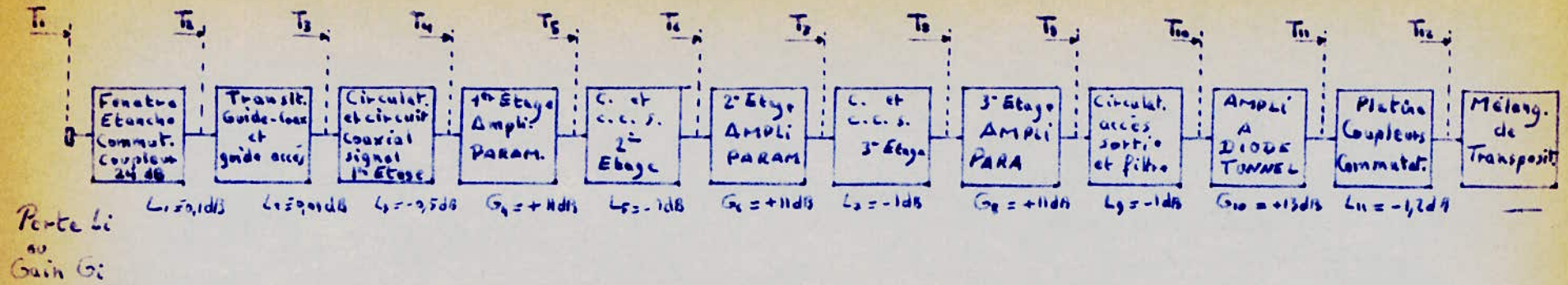
$$T_9 = T_{10} L_9 + (L_9 - 1) T_{p9} = 1168 \cdot 1,26 + (1,26 - 1) 80 \\ = 1492 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_8 = \frac{T_9}{G_8} + T_{b8} = \frac{1492}{12,6} + 5,8 = 125 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_7 = T_8 L_7 + (L_7 - 1) T_{p7} = 125 \cdot 1,26 + (1,26 - 1) 20 \\ = 162 \text{ } ^\circ\text{K}$$

o o

o



EVALUATION DE LA TEMPÉRATURE DE BRUIT DU SYSTEME DE RECEPTION COMPLET

CHAPITRE IIIRECEPTION - EMISSION - POURSUITE AUTOMATIQUE DU SATELLITEI - RECEPTIONA/ Conditions de réception

Dans les systèmes existants et dans les projets de futures stations terriennes de télécommunications par satellites, la puissance disponible à l'entrée des récepteurs 500 MHz de largeur de bande est de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-12} W. On ne peut assurer la réception de signaux aussi faibles avec un rapport signal/bruit suffisant qu'à la condition que toutes les contributions à la température de bruit du système soient réduites au strict minimum.

L'amplification paramétrique, avec sa température de bruit propre très faible, remplit la condition posée aux récepteurs à très grande sensibilité. Les stations terriennes existant dans le monde sont ainsi équipées avec des amplificateurs paramétriques pour la réception des signaux dans la bande des 4 GHz. La température de bruit d'un ensemble de réception convenablement conçu atteint 20° K lorsqu'il est porté à la température physique de 15 °K. L'amplification doit être suffisamment grande pour que la contribution au bruit des étages suivants soit négligeable. Avec un amplificateur paramétrique de gain égal à 30 dB, on utilise un post-amplificateur à diode tunnel de gain égal à 12 dB.

Par ailleurs, les signaux émis par le satellite se présentent sous la forme d'un ensemble de porteuses modulées en fréquence et véhiculant chacune 24, 60 ou 132 voies téléphoniques, ou bien un canal de télévision (525 ou 625 lignes).

Ces porteuses sont situées dans la bande 3700 - 4200 MHz et leur espacement dépend des informations qu'elles transmettent.

Après avoir été captées par l'antenne, les porteuses reçues sont simultanément appliquées à l'entrée de l'amplificateur à faible bruit (amplificateur paramétrique refroidi suivi d'amplificateurs à diode tunnel) qui les porte à un niveau suffisamment élevé par rapport au bruit thermique.

B/ Equipements de liaison et de Transposition - Description -

Pour ne pas trop encombrer la tour d'antenne (qui contient déjà l'amplificateur paramétrique) les porteuses reçues sont acheminées, globalement, vers la salle des équipements à l'aide de câbles coaxiaux, et comme la transmission par câble n'est valable que pour des fréquences suffisamment basses, est-il nécessaire d'effectuer une transposition globale de la bande 3700 / 4200 MHz. Ainsi, 2 câbles coaxiaux transportent, chacun, une demi-bande transposée à la fréquence 325 / 600 MHz.

La solution à transposition, entièrement à semi-conducteurs est très fiable, et par conséquent moins sujette aux vieillissements. La transmission sur câble coaxial n'apporte pas, contrairement à la transmission sur guide d'onde, de distorsion de temps de propagation de groupe.

Les ensembles de transposition sont réalisés entièrement à semi-conducteurs. Il existe 4 boîtiers de transposition (dont 2 de secours); chaque boîtier de transposition comporte un mélangeur 3700 - 3795 / 325 - 600 MHz ou 3925 - 4200 / 325 - 600 MHz. Ce mélangeur alimenté par une source 3375 ou 4525, délivre un signal transposé dans la bande 325 - 600 MHz à un amplificateur à large bande qui permet d'attaquer le câble à un niveau correct.

Les 2 câbles transportant le signal global de réception dans la bande 325 / 600 MHz, aboutissent enfin dans le bâti de répartition, placé dans la salle des équipements.

C/ Equipements à fréquence intermédiaire

Toutes les porteuses d'une demi-bande sont disponibles à chaque accès des multicoupleurs. Les porteuses utiles seulement sont sélectionnées de la façon suivante : un accès quelconque est relié à un amplificateur séparateur. Un filtre centré sur la fréquence à recevoir (comprise entre 325 et 600 MHz) présélectionne alors la porteuse et évite tout retour de fréquence d'oscillateur local vers les autres accès des multicoupleurs. Le signal ainsi filtré est transposé à la fréquence intermédiaire de 70 MHz puis filtré par un filtre amovible dont la bande est liée à la capacité.

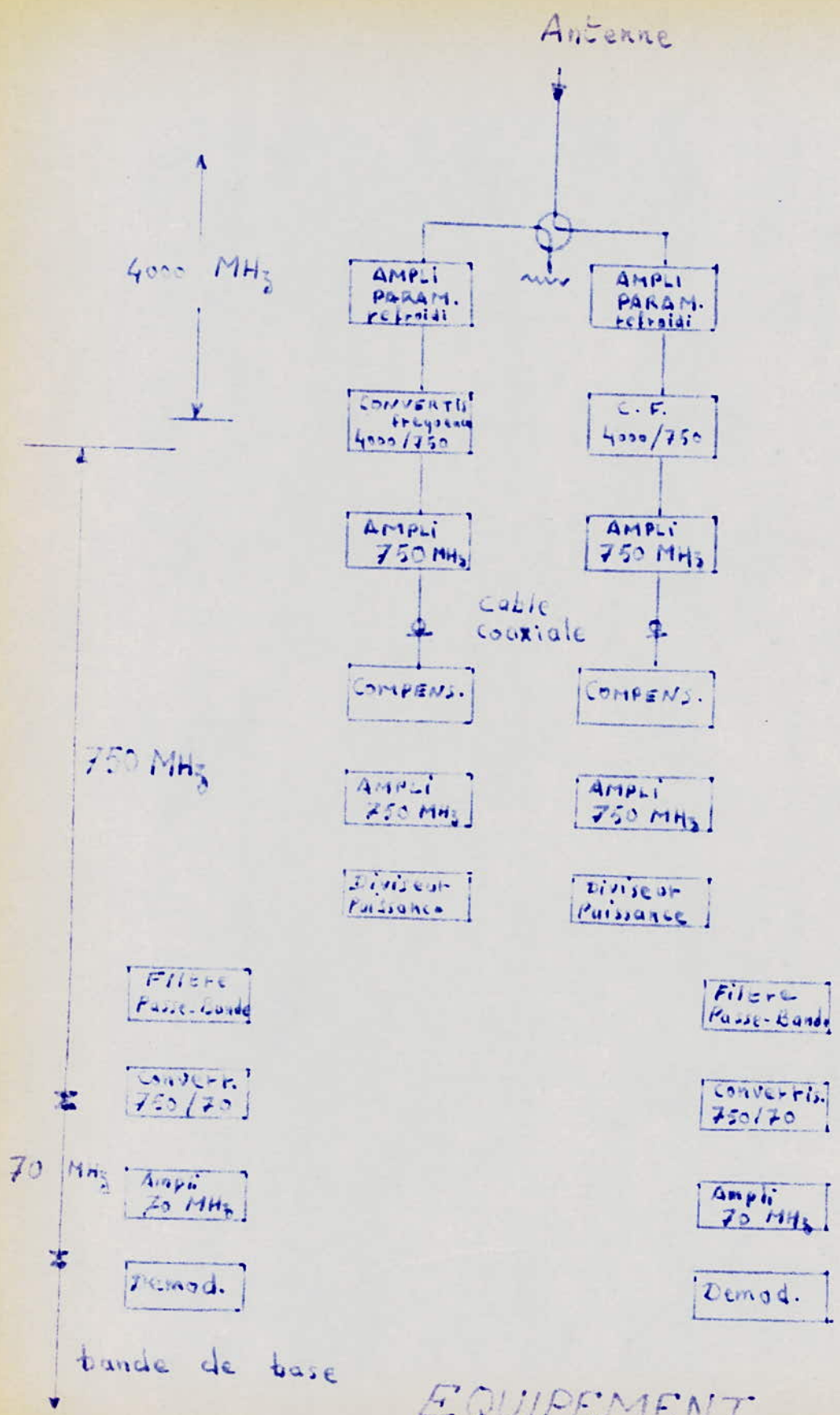
Suivent alors la correction de la distorsion de temps de propagation de groupe, l'amplification F.I., puis la démodulation.

Dans le cas spécial de la T.V., un bâti comporte une démodulateur image et un démodulateur son.

Le démodulateur est de type à compression de fréquence en téléphonie, et pour le son T.V. Il est de type classique en signal vidéo T.V.

D/ Démodulation

Les porteuses 24, 60 ou 132 voies sont appliquées à des démodulateurs destinés à restituer la bande de base. Les valeurs de seuil des démodulateurs sont définies au cahier des charges (C.C.I.R.) comme étant les rapports de porteur à température de bruit à l'entrée des équipements (C/T en dBW / °K) pour lesquels le bruit total (thermique et intermodulation) dans une voie quelconque ne doit pas dépasser 8400 pWp au niveau nominal et 50.000 pWp au niveau minimal. Or, un démodulateur de type normal ne peut pas satisfaire à ces conditions; on utilise alors un démodulateur à compression de fréquence.



EQUIPEMENT
RECEPTEUR

II - EMISSION

A/ Généralités

Une station terrienne émet au moins 2 porteuses téléphoniques, d'une puissance voisine de 100 watts et occasionnellement une porteuse télévision image (puissance 500 W environ) accompagnée de la porteuse son de faible puissance.

On peut prévoir des possibilités d'extension de la station à 3 ou 4 porteuses téléphonie ou plus, selon l'importance du trafic de la station considérée. Les voies téléphoniques multiplexées, réparties en 2 bandes de base, (1 par porteuse), le signal vidéo et le signal audio constituent l'accès d'entrée de la station, tandis que l'accès de sortie est unique, les porteuses en ondes centimétriques étant transmises vers l'antenne par le même guide d'onde.

B/ Principe

On trouve dans le bâtiment central, un bâti comprenant les 4 ensembles de modulation qui élaborent les 4 porteuses à la fréquence intermédiaire de 70 MHz, modulées en fréquence par les 4 bandes de base.

Ces porteuses à 70 MHz sont dirigées vers le bâtiment d'antenne, par 4 cables coaxiaux, où elles sont transposées dans la bande des télécommunications à 6000 MHz par les 4 ensembles de transposition. On a alors 4 porteuses à 6000 MHz modulées en fréquence, de niveau faible, et qui attaquent maintenant les amplificateurs :

- Pour la téléphonie, chacune des 2 porteuses est amplifiée par une chaîne d'amplification indépendante. (+ 1 de secours).

- Pour la T.V., la porteuse son et la porteuse image sont regroupées dans un coupleur 3 dB, puis amplifiées dans une chaîne unique de puissance.

Chacune des 3 chaînes d'amplification de puissance téléphonie est constituée des éléments suivants :

- un amplificateur d'excitation à TO P délivrant environ 15 W
- un amplificateur de puissance à tube "carpitron", à bande étroite, délivrant environ 500 W.

La chaîne d'amplification de puissance pour la T.V. est constituée des éléments suivants :

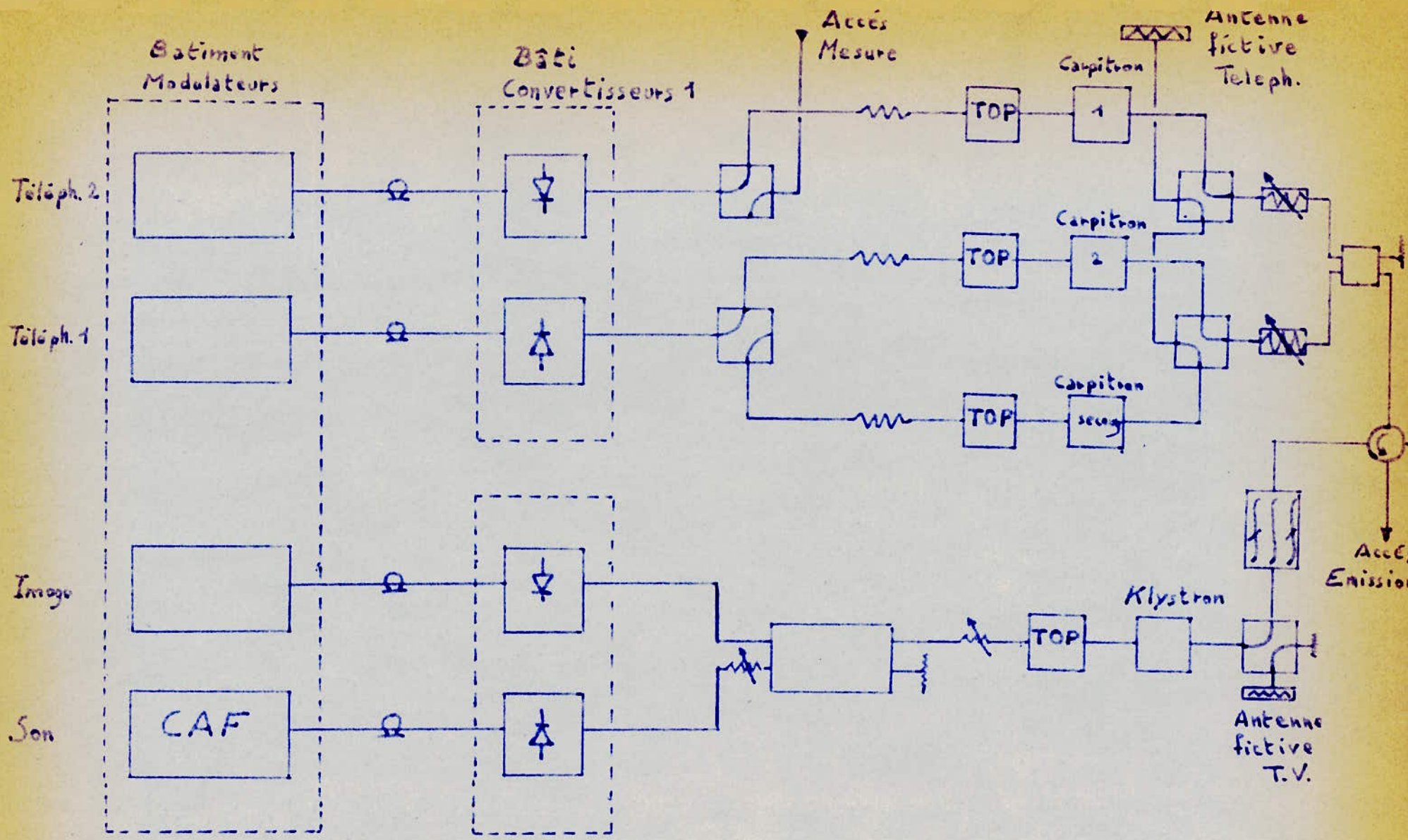
- un amplificateur d'excitation à TOP
- un amplificateur de puissance à Klystron, pouvant délivrer environ 3 KW.

Les 2 porteuses téléphonie et les 2 porteuses T.V. se rejoignent dans la circulation de puissance, et se retrouvent alors dans un guide unique à l'accès émission.

C/ Constitution de l'étage de modulation

Les étages de modulation sont au nombre de 4.

- les 2 ensembles de modulation téléphonie
- l'ensemble de modulation de l'image son
- l'ensemble de modulation pour le son T.V.



ENSEMBLE EMISSION
(Simplifié)

Légende:

- Ω liaison coaxiale
- Atténuateur variable
- Attén. var. de puissance

III - POURSUITE AUTOMATIQUE DU SATELLITE

A/ Conception de l'Asservissement

L'asservissement doit permettre de pointer l'axe radioélectrique de l'antenne dans la direction du satellite et de le maintenir pointé malgré les efforts qui tendent à le déplacer, et malgré les mouvements du satellite.

Il a été conçu pour poursuivre non seulement des satellites stationnaires mais aussi des satellites à défilement de période minimale 6 h, jusqu'à 88° d'élévation.

La largeur du lobe de l'antenne est 0,17° à 3 dB.

Les erreurs de position angulaire de l'antenne peuvent être fournies à l'asservissement de 2 façons principales :

- Soit par un récepteur de poursuite automatique : celui-ci donne l'écart entre l'axe radioélectrique de l'antenne et la direction du satellite.

- Soit par des circuits numériques qui font la différence entre la position mesurée des axes de rotation en azimut et en élévation, et leur position théorique donnée par un programme établi à l'avance. On a ainsi l'écart entre l'axe mécanique de l'antenne et la direction du satellite.

B/ Récepteur de Poursuite Automatique

1.- Rôle et Principe du Récepteur

Le récepteur de poursuite automatique (ou d'écartométrie) a pour fonction de délivrer aux asservissements 2 signaux d'erreur analogiques traduisant l'écart qui existe entre l'axe radioélectrique vrai de l'antenne et la direction d'un satellite muni d'une balise radioélectrique émettant une porteuse continue.

Les signaux de poursuite en hyperfréquence sont obtenus en effectuant des sommes algébriques des signaux fournis par chacun des 4 cornets existants, cela aux moyens d'organes d'addition et de soustraction en hyperfréquence : coupleurs et tès magiques.

La somme algébrique : "cornets de gauche moins cornets de droite" fournit un signal qui est nul lorsque l'antenne est bien pointée en azimut, et qui est proportionnel au dépointage d'azimut, lorsqu'il en existe un, multipliée par le cosinus de l'élévation.

La somme algébrique : "cornets supérieurs moins cornets inférieurs" fournit un signal qui est nul lorsque l'antenne est bien pointée en élévation et qui est proportionnel au dépointage d'élévation lorsqu'il en existe un.

Le récepteur utilise simultanément le signal "somme", fourni par la somme arithmétique des signaux provenant des 4 cornets. Ce signal constitue la référence qui permet le verrouillage de phase du récepteur sur la balise et la démodulation synchrone des signaux d'erreur.

2.- Réalisation du récepteur

Le satellite étant à une altitude très élevée, et compte tenu de la faible puissance d'émission de la balise, (-186 à -152 dBW/E²) le récepteur de poursuite automatique devra alors avoir une bande passante très étroite, pour permettre un pointage à la fois sûr et très efficace.

D'autre part, l'effet DOPPLER-FIZEAU dû au déplacement du satellite, produit des variations de fréquence du signal de balise reçu au sol : la bande passante du récepteur doit alors être centrée sur la fréquence de la balise telle qu'on la reçoit au sol.

Ces 2 conditions nécessitent que le récepteur soit muni d'un système (verrouillage de phase) qui asservit la fréquence instantanée d'un oscillateur local sur la fréquence de la balise.

3.- Acquisition du satellite

L'acquisition du satellite suppose que sa position en fonction du temps et la fréquence émise par sa balise soient préalablement connues avec une précision suffisante pour que :

- l'antenne puisse être pointée de telle sorte que le satellite soit à l'intérieur du faisceau,
- la fréquence de la balise soit à l'intérieur de la gamme d'exploration en fréquence du récepteur.

Deux procédés d'acquisition sont possibles :

Dans l'acquisition manuelle, un opérateur agit sur une tension de commande de l'oscillateur, de telle sorte que la fréquence d'accord de la boucle varie de ± 250 KHz . Si la fréquence de balise du satellite est dans cette plage, et si celui-ci se trouve dans le faisceau d'antenne, un haut-parleur donnera le battement des 2 fréquences, et quand celles-ci seront assez voisines de 0, on aura alors réalisé le verrouillage de phase du récepteur sur le satellite.

Dans l'acquisition automatique, le récepteur effectue automatiquement un balayage de fréquence en dents de scie. Le verrouillage de phase se réalise automatiquement lorsque, par suite du balayage, la fréquence d'accord devient égale à la fréquence de balise.

CHAPITRE IVPROPAGATION EN ESPACE LIBRECALCUL D'UNE LIAISON PAR SATELLITEI - EQUATION DES TELECOMMUNICATIONS

La puissance P rayonnée en 1 point (de façon isotrope) se retrouve sur une sphère de rayon d , centrée sur ce point.

La densité de puissance sur cette sphère est :

$$P_d = \frac{P}{4 \pi d^2}$$

Si à la distance d se trouve une surface de captation S , la puissance reçue sur cette surface est :

$$P_r = P \frac{S}{4 \pi d^2} \quad (1)$$

S peut être la surface effective d'une antenne.

Se : surface telle que tous les éléments du rayonnement qui l'atteignent en phase, soient renvoyés en phase en un même point (et inversement pour une antenne d'émission).

La puissance recevable (1) s'écrit alors

$$P_r = \frac{P}{4 \pi d^2} \cdot \frac{\lambda^2 G_r}{4 \pi}$$

En introduisant alors le gain à la réception G_r , et celui à l'émission ($G_e = \frac{P_r}{P_e}$ P_e : puissance émise) la puissance P_r recevable en espace libre aura pour expression :

$$P_r = P_e G_e G_r \frac{\lambda^2}{16 \pi^2 d^2}$$

Dans le cas des antennes isotropes (de gain unité)
l'affaiblissement de propagation est :

$$A_0 = \frac{\lambda^2}{16 \pi^2 d^2}$$

II - CALCUL D'UNE LIAISON PAR SATELLITE

A/ Satellite passif

Soit σ la surface effective de réflexion du satellite
si d = diamètre de sphère métallisée, et d'une onde à polarisation circulaire
dans le cas

$$\sigma = \frac{\pi d^2}{4}$$

L'énergie réfléchie par le satellite correspond à un affaiblissement :

$$A_{10} = \frac{P}{P_s} = \frac{4 \pi D_1^2}{\sigma} = 16 \frac{D_1^2}{d^2}$$

Pour la retransmission, le trajet de l'onde réfléchie \rightarrow affaiblissement

$$A_2 = \frac{P_s}{P_r} = \frac{4 \pi D_2^2}{S_r} = \frac{16 \pi^2 D_2^2}{\lambda^2 G_r}$$

Soit pour une antenne isotrope

$$A_{20} = \frac{16 \pi^2 D_2^2}{\lambda^2}$$

L'affaiblissement total entre antennes isotropes est :

$$A_0 = A_{10} \cdot A_{20} = 256 \pi^2 \frac{D_1^2 D_2^2}{d^2 \lambda^2} = \frac{P}{P_r}$$

Si les pertes dans les lignes de transmission sont $P_e P_r$
la puissance recevable P_r est

$$P_r = \frac{P}{A_0} = \frac{P_e d^2 \lambda^2 G_e G_r}{256 \pi^2 D_1^2 D_2^2 P_e P_r}$$

puisque : $P = P_e G_e$

En fonction de S_e et S_r , on aura puisque :

$$S_r = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi}$$

$$S_e = \frac{\lambda^2 G_e}{4\pi}$$

$$P_r = P_e \frac{d^2 S_e S_r}{16 \lambda^2 D_1^2 D_2^2 P_e P_r}$$

Marge de liaison

Si le récepteur \rightarrow bande B , tempé de bruit T , la puissance équivalente de bruit à l'entrée est

$$P_r = k T B$$

Si le seuil de réception correspond à une puissance R_0 fois plus grande, la marge de liaison est donnée par :

$$M = \frac{P_r}{P_b R_0} = \frac{P_e d^2 S_e S_r}{16 \lambda^2 D_1^2 D_2^2 P_e P_r k T B R_0}$$

B/ Satellite actif

La puissance et le gain d'antenne disponibles sur le satellite sont limités; la qualité de la liaison est donnée par le second trajet.

L'affaiblissement est :

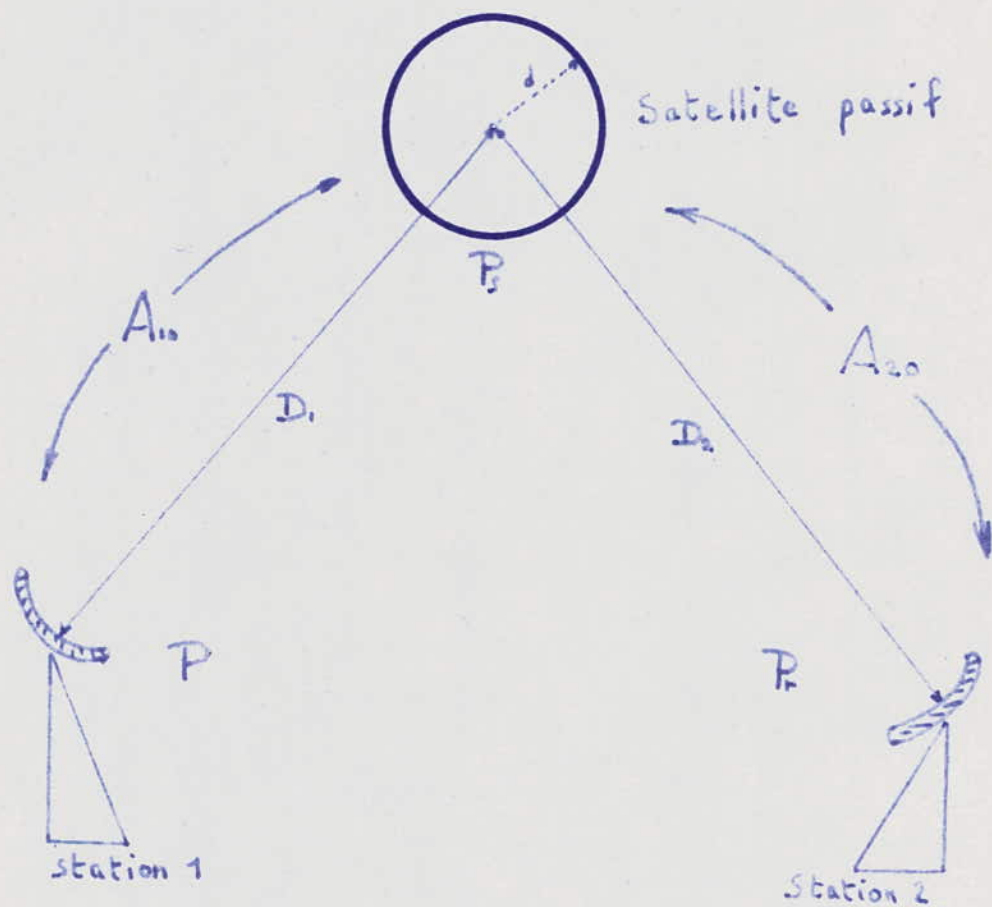
$$\frac{P}{P_r} = \frac{4 \pi D_2^2}{S_r} \quad P = P_e' \times G_e'$$

la puissance recevable est :

$$P_r = P_e' G_e' \frac{S_r}{4 \pi D_2^2}$$

Ce qui donne une marge :

$$M = \frac{P_e' G_e' S_r}{4 \pi D_2^2 K T B R_o}$$



$$A_{10} = P/B$$

$$A_{20} = B/R$$

CALCUL D'UNE LIAISON PAR SATELLITE

CHAPITRE VPERTES DANS LA LIAISON RADIOI - ATTENUATION DUE A LA PROPAGATION

L'équation des télécommunications est :

$$\frac{P_r}{P_e} = \frac{G_e \cdot G_r \cdot \lambda^2}{16 \pi^2 \cdot d^2}$$

- où P_r = puissance maximum disponible à la sortie de l'aérien de réception.
 P_e = puissance rayonnée par l'aérien d'émission
 λ = longueur d'onde
 d = distance entre aériens d'émission et de réception.

En prenant 10 fois le logarithme des 2 membres, il vient :

$$10 \log \frac{P_r}{P_e} = 10 \log G_e + 10 \log G_r + 20 \log \lambda - 20 \log 4\pi d$$

On voit que le rapport (en dB) entre la puissance reçue et la puissance émise, qui caractérise le rendement énergétique de la liaison, est limité par la distance entre satellite et station terrestre, et la fréquence de travail f .

On ne peut réduire l'affaiblissement de propagation qu'en adoptant des gains d'aérien de réception assez élevés (50 dB ou moins), ce qui impose alors des antennes à grand diamètre (type CASSEGRAIN) de l'ordre d'au moins 25 m, puisque :

$$G_e = \eta \frac{\pi^2 d^2}{\lambda^2}$$

II - PERTES DUES A L'ABSORPTION ATMOSPHERIQUE

Les pertes dans la troposphère sont dues presque entièrement à l'absorption moléculaire par l'oxygène, et la vapeur d'eau non condensée. L'absorption décroît assez rapidement avec l'augmentation de l'angle de site de l'antenne : ceci est dû à la diminution du trajet de l'onde.

Au-dessous de 15 GHz l'absorption est pratiquement constante et négligeable pour les angles de site supérieurs à 10°. Par exemple, pour un angle de site de 30°, l'absorption est de 0,2 dB environ vers 15 GHz qui est la limite supérieure approximative de la fréquence pour les communications spatiales.

III - PERTES DUES A L'IONOSPHERE : P_i

L'ionosphère a pour effet de réfléchir totalement les fréquences au-dessous d'une fréquence limite f_c donnée par la formule :

$$f_c = \left[\frac{N_e^2}{4 \pi^2 \epsilon_0 \cdot m} \right]^{1/2}$$

N_e = densité en électrons par m³

ϵ_0 = perméabilité de l'espace libre en Farads / m

m = masse de l'électron en Kg.

f_c = fréquence en Hz

Tableau des pertes

<u>Fréquences</u> en MHz	30	50	100
Pertes en dB	2,5	1	0,3

Or en plus de ça, les pertes entre 5 et 80 MHz sont sujettes aux variations saisonnières, ce qui incite à prendre 80 MHz comme limite inférieure de fréquence des liaisons spatiales.

IV - PERTE DUE A LA POLARISATION DES AERIENS : P_p

Si l'aérien d'émission, appartenant à un engin ou satellite, est à polarisation linéaire, et l'aérien sol à polarisation circulaire, il faut ajouter une perte de 3dB dans l'équation des télécommunications.

V - PERTE DUE AU FADING : P_f

Cette perte est surtout sensible lorsque le satellite est à l'horizon. Elle est due à l'interférence entre le rayon incident et le rayon réfléchi capté par l'antenne, qui peuvent arriver en opposition de phase.

Cette perte sera d'autant plus faible, que la directivité de l'aérien sera plus grande et que les lobes secondaires de l'antenne seront plus faibles. Dans certains cas, elle peut être estimée à 20 dB. Pour combattre ce défaut, on doit faire de la diversité de fréquence ou d'espace.

IV - PERTE DUE AU MOUVEMENT DE L'ENGIN : P_c

Lorsque l'aérien du satellite (ou de l'engin) est à polarisation linéaire, la polarisation émise lors des mouvements propres de l'engin ou satellite, est en fait bien souvent quelconque et dans certains cas circulaires d'un sens alors que la réception s'effectue avec une antenne polarisée circulairement dans l'autre sens. Ce phénomène se traduit par des pertes importantes dans la liaison qui peuvent se monter à plus de 20 dB.

Pour combattre ce défaut, on est conduit à recevoir au sol simultanément les 2 polarisations gauche et droite et à faire de la diversité de polarisation.

VII - PERTES DUES AUX LIAISONS COAXIALES : \underline{P}_{Σ}

Nous devons également prendre en compte les pertes dans les câbles coaxiaux ainsi que les pertes d'insertion introduites par les filtres, les duplexeurs, les circulateurs ou les isolateurs qui se trouvent entre l'antenne de réception et le préamplificateur.

Toutes ces sources de pertes doivent être examinées de près lors de l'établissement du bilan de la liaison.

La perte en décibels / m dans un câble coaxial est donnée par l'expression :

$$10 \log P_{\alpha} = 0,0026 \sqrt{\epsilon f} \cdot \frac{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}{\log \frac{d_2}{d_1}} + 0,091 \sqrt{\epsilon} \cdot \text{tg } \delta \cdot f$$

où

- f = fréquence en MHz
- ϵ = constante diélectrique de l'isolant
- d_1 = diamètre de l'âme
- d_2 = " du diélectrique
- $\text{tg } \delta$ = tangente de l'angle de perte du diélectrique.

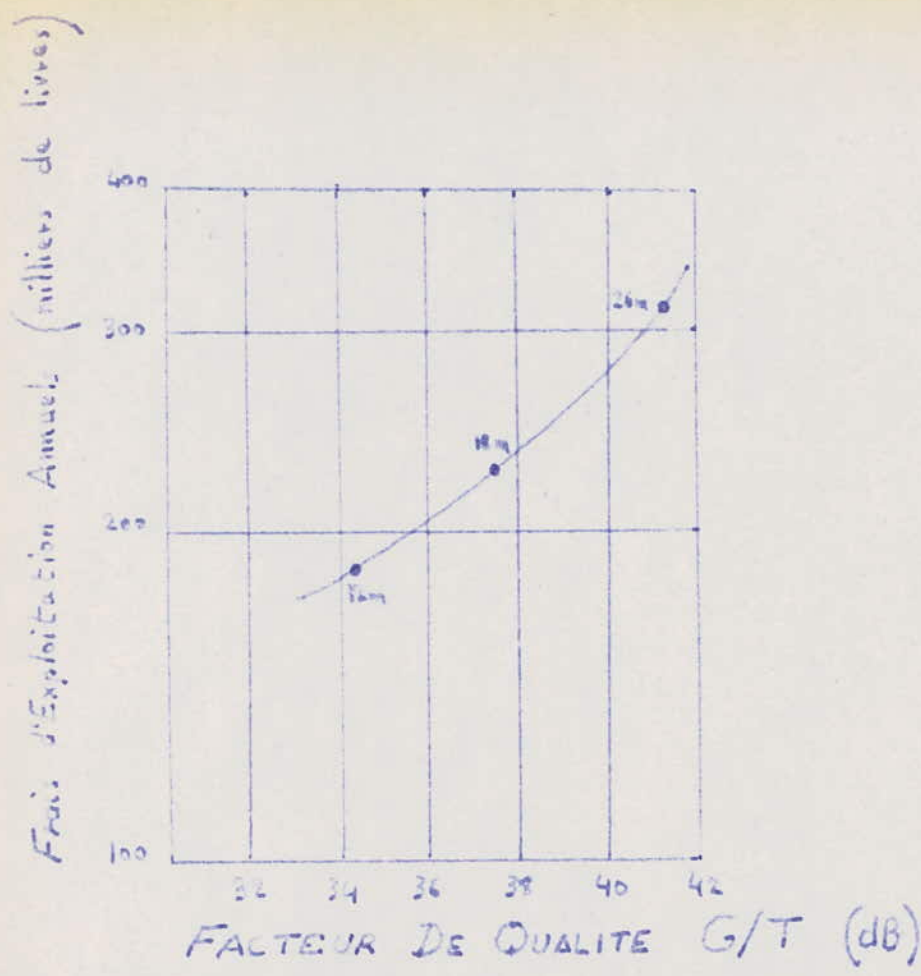
Donc, si le récepteur est trop éloigné de l'antenne, on aura intérêt à placer un préamplificateur au pied de l'antenne.

VIII - EQUATION DES TELECOMMUNICATIONS CORRIGEE

Pour tenir compte de toutes les pertes précédemment décrites, l'équation des télécommunications devient :

$$\begin{aligned}
 10 \log \frac{P_r}{P_e} = & 10 \log G_e + \log G_r + 20 \log \lambda - 20 \log 4\pi d \\
 & - 10 \log P_a - 10 \log P_i - 10 \log P_p - 10 \log P_f \\
 & - 10 \log P_c - 10 \log P_\xi
 \end{aligned}$$

° °
°



y compris:

- ① 10% du coût de la station
(15 ans intérêt 6%)
- ② Pièces de rechange
(3% du coût de l'équipement)
- ③ Personnel:

22	pour	antenne	26m
18	"	"	18m
14	"	"	12m
- ④ Alimentation, Service, divers
(10.000 £)

FRAIS D'EXPLOITATION ANNUELS

C O N C L U S I O N

I - TYPE D'ANTENNE ET SES CARACTERISTIQUES

Pour un projet de télécommunications par Satellites, le type d'antenne à choisir est le réflecteur parabolique avec alimentation CASSEGRAIN.

Les caractéristiques principales des antennes sont :

- gain élevé dans la direction des signaux utiles
- faible gain dans la direction des signaux non utiles
- haut rendement
- faible température de bruit
- mobilité en site et azimuth
- dispositif automatique d'orientation commandé par programme ou par le signal d'un radiophare de satellite.

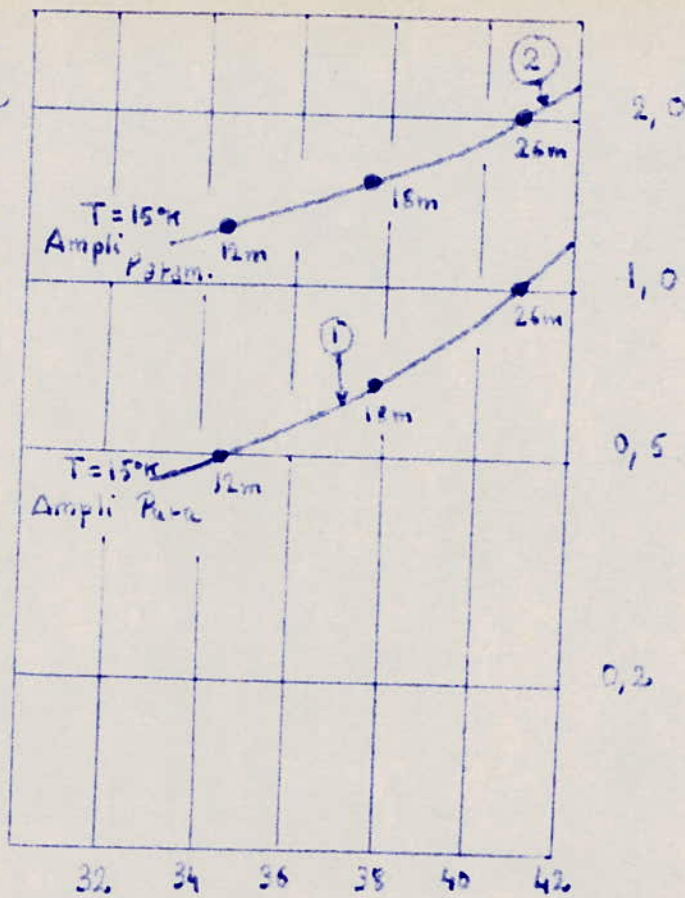
Les premières antennes "cornet-réflecteur", lourdes, encombrantes et chères en plus de ça, ne sont donc plus employées.

D'autre part, l'utilisation primitive d'un radôme dont le rôle consistait à protéger l'antenne contre les intempéries, ne présente aujourd'hui aucun intérêt pratique, car on a remarqué que sa présence est de nature à abaisser le niveau de réception, surtout en cas de forte pluie.

II - BRUIT D'ANTENNE

Dans un cas typique, la température de bruit d'une antenne CASSEGRAIN sur 4 GHz a pour valeur moyenne 40° K (voir chapitre bruit) auquel il faut ajouter l'affaiblissement des éléments non rayonnants (de 5° à 20 °K) et la température de l'amplificateur paramétrique (15° à 25 °K). La valeur moyenne totale de la température de bruit du système est prise en général égale à 65 °K.

Coût total d'une station terrienne (Millions £)



FACTEUR DE QUALITE G/T (dB)

- ① y compris : Antenne, Alimentation asservie
Amplificateurs faible bruit et grande puissance
Modulateurs et Démodulateurs
- ② y compris : ① + Multiplex, Centre de Commutation
hyperfréquences, Bâtiments, Voies d'accès,
Alimentation en énergie, Préparation du site,
Installation et Mise en service

DEPENSES EN CAPITAL

III - FACTEUR DE QUALITE D'UNE STATION

Le comité intérimaire des télécommunications par satellites (I.C.S.C.) du consortium international (INTELSAT) indique comme valeur standard de facteur de qualité d'une station le chiffre 40,7 dB . On rappelle que le facteur de qualité a pour expression

$$G/T \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{Gain en puissance de l'antenne}}{\text{Température de bruit du système (65 °K)}} \right]$$

En général, le gain en puissance de l'antenne est pris égal à 58,8 dB.

Par conséquent, le diamètre du réflecteur principal doit être compris entre 26 et 30 m. Remarquons que ces conditions ont été acceptées comme normes par INTELSAT, pour les stations terriennes du réseau national.

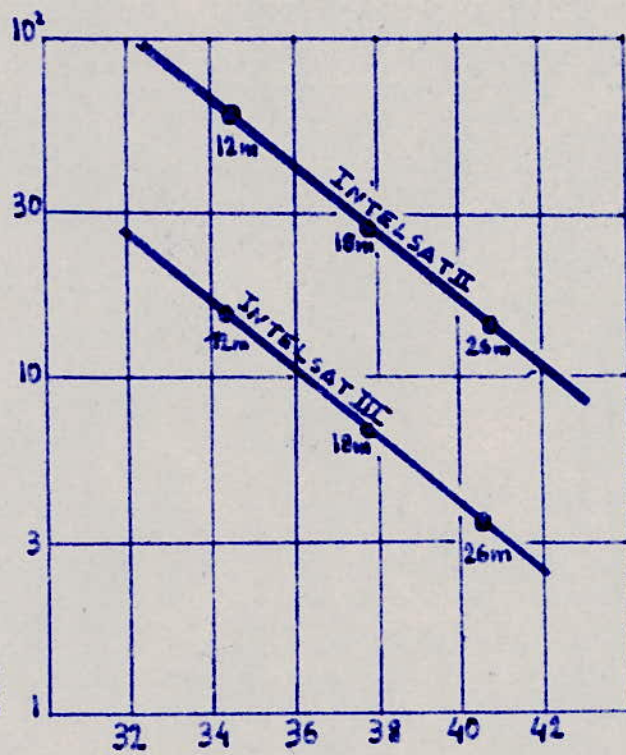
Les stations pour lesquelles le rapport G/T est inférieur à la valeur standard 40,7 dB voient leur capacité de transmission diminuer d'une part, et d'autre part les taxes à payer pour l'utilisation des voies de transmission varient en raison inverse de cette capacité.

Par exemple, une station terrienne pour laquelle G/T est égal au 1/4 de la valeur normale (utilisation d'une antenne de 13 m au lieu de 26 m) doit payer 4 fois plus cher que si G/T était égal à 40,7 dB.

IV - DEPENSES D'INVESTISSEMENTS

Les courbes tracées donnent une idée des prix moyens des stations terriennes (en fonction de G/T) actuellement proposés dans le monde, sans tenir compte des frais spéciaux qui peuvent résulter du choix d'un emplacement difficile ou des conditions locales.

Coût Annuel D'un Demi-Circuit Par Satellite (m. £)



G/T (dB)

Hypothèses :

- 1) Investissements : 9,6 millions £
- 2) Durée Utile : 5 ans
- 3) Interêt : 14%
- 4) Charge Du Satellite : 50%
- 5) Frais Annuels : 3,51 millions £

Dans le cas des antennes de 26 m. de diamètre, il est tenu compte de l'équipement nécessaire pour assurer 2 porteuses à l'émission et 10 porteuses à la réception (équipement doublé).

Pour les stations moins importantes, les prix indiqués correspondent à 1 porteuse à l'émission et à 6 porteuses à la réception (équipement partiellement doublé).

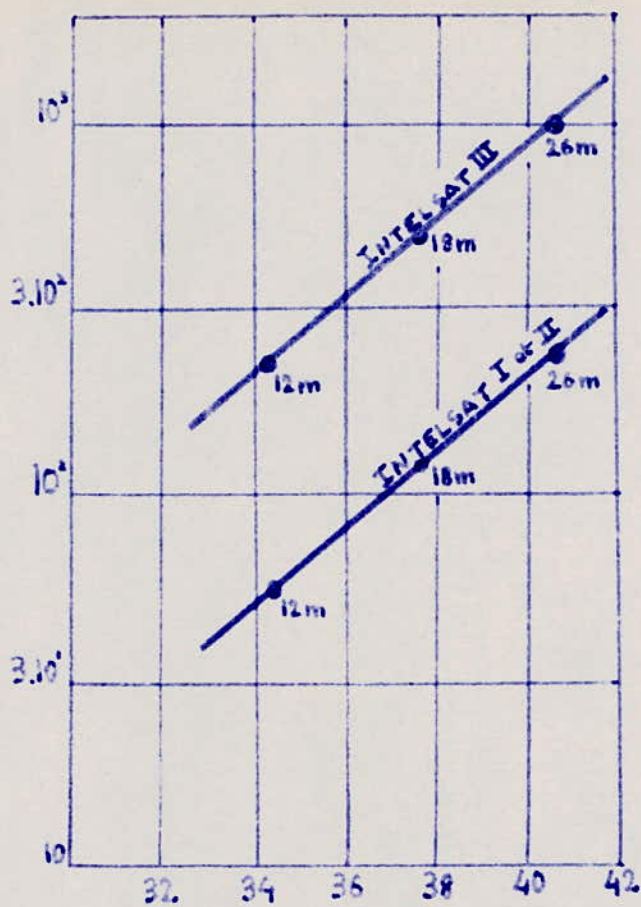
V - FRAIS D'EXPLOITATION

Les hypothèses suivantes ont déterminé les frais d'exploitation des stations terriennes :

- durée utile de la station : 15 ans; amortissement des dépenses au cours de cette période avec un taux d'intérêt annuel de 6 %. Le montant des sommes à verser annuellement s'élève de ce fait à 10 % environ des dépenses en capital pendant la durée utile de la station;
- durant la période utile de 15 ans, on a estimé que le taux moyen de consommation de pièces de rechange correspondrait à 3 % du prix de revient de l'équipement de base;
- les dépenses de personnel sont fondées sur une exploitation assurée 24 heures sur 24.

o o
o

Nombre De Circuits Passant Par Satellite



Facteur De Qualité G/T (dB)

BIBLIOGRAPHIE

F. DU CASTEL : propagation troposphérique et faisceaux hertziens
TRANSHORIZON

R. RIGAL : Les Hyperfréquences

LIBOIS : Systèmes de modulation

JOURNAL DES TELECOMMUNICATIONS :

15 décembre 1968

REVUE DES TELECOMMUNICATIONS :

n° 1 / 64

ONDE ELECTRIQUE

1 10 Novembre 1969

2 Novembre 1963

3 2 Février 1969

4 Novembre 1967

5 Janvier 1965

6 Mai 1965

C.C.I.R. XII^e Assemblée plénière NEW-DELHI 1970

Documentation diverses SOMATELSAT (Maroc)