

Titre: Systèmes de communications par satellite
Title:

Auteurs: David Haccoun, & Joseph B. Reid
Authors:

Date: 1977

Type: Rapport / Report

Référence: Haccoun, D., & Reid, J. B. (1977). Systèmes de communications par satellite.
Citation: (Rapport technique n° EP-R-77-43). <https://publications.polymtl.ca/10126/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10126/>
PolyPublie URL:

Version: Version officielle de l'éditeur / Published version

Conditions d'utilisation: Tous droits réservés / All rights reserved
Terms of Use:

Document publié chez l'éditeur officiel

Document issued by the official publisher

Institution: École Polytechnique de Montréal

Numéro de rapport: EP-R-77-43
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:

22 DEC 1977

SYSTEMES DE COMMUNICATIONS PAR SATELLITE

DAVID HACCOUN

Professeur Agrégé
Département de Génie Electrique
Ecole Polytechnique de Montréal

et

JOSEPH B. REID

Conseiller
Vice-Présidence aux Communications
Université du Québec

RAPPORT TECHNIQUE No EP77-R-43
Ecole Polytechnique de Montréal
Septembre 1977

SYSTEMES DE COMMUNICATIONS PAR SATELLITE

par

David Haccoun et Joseph B. Reid

SOMMAIRE

Ce rapport présente les éléments essentiels des systèmes de communications par satellites. En plus de faire comprendre le fonctionnement des systèmes existants ou envisagés dans l'avenir, l'étude vise à expliquer les relations fondamentales qui régissent les différentes techniques utilisées dans les communications par satellite. Après un bref historique de l'évolution des satellites de communications, on présentera un tableau résumant les caractéristiques importantes des satellites de communications anciens, actuels et futurs. Les grands projets internationaux, nationaux et régionaux en matière de communication par satellite sont également passés en revue.

REMERCIEMENTS

Nous désirons exprimer notre reconnaissance au Ministère des Communications du Québec et à son Service de la Recherche pour nous avoir autorisé à utiliser les résultats de l'étude effectué par l'Université du Québec: "Les satellites au-delà de 1980: l'intérêt pour le Québec. 1- Etudes technologiques" dans la préparation de ce rapport.

TABLE DES MATIERES

	PAGE
CHAP. 1 LES SATELLITES DE COMMUNICATION D'HIER A DEMAIN	1
CHAP. 2 LES SATELLITES DE COMMUNICATION, ANCIENS, ACTUELS ET FUTURS ..	8
CHAP. 3 LES PROJETS INTERNATIONAUX ET REGIONAUX EN MATIERE DE COMMUNICATION PAR SATELLITE	25
CHAP. 4 LES PROJETS DE DIFFERENTS PAYS AU MONDE EN MATIERE DE COMMUNICATION PAR SATELLITES	32
CHAP. 5 LA COMMUNICATION PAR SATELLITE: ASPECTS TECHNIQUES & FONDAMENTAUX	50
5.1 Bilan de liaison, propagation et bruit	50
5.1.1 Bilan de liaison	50
5.1.2 Température de bruit	55
5.1.3 Milieu de propagation	65
5.1.4 Rapport signal sur bruit dans la bande utile	67
5.1.5 Choix des fréquences	70
5.2 Procédés de modulation	74
5.2.1 Introduction	74
5.2.2 Modulation analogique	76
5.2.3 Modulation numérique	87
5.3 Technique d'accès multiple	99
5.3.1 Introduction: liaisons unilatérales et bilatérales	99
5.3.2 Accès multiple	100
5.3.3 Accès multiple par répartition en fréquence (AMRF ou FDMA)	103
5.3.4 Accès multiple par répartition en temps (AMRT ou TDMA)	107
5.3.5 Accès multiple par répartition codée en temps et en fréquence (AMRC ou CDMA)	111
5.3.6 Comparaison des techniques d'accès multiple	116
REFERENCES	120

CHAPITRE 1

LES SATELLITES DE COMMUNICATION D'HIER A DEMAIN

Le Début

En 1945, Arthur C. Clarke, ingénieur britannique, proposa un système mondial de télécommunications par le truchement de trois relais de micro-ondes en orbite géostationnaire à l'équateur à une altitude de 36 000 km et espacés de 120° chacun. Douze ans après, le 5 octobre 1957, l'Union soviétique inaugure l'ère spatiale en plaçant en orbite le premier satellite artificiel de l'histoire, le célèbre Spoutnik. Ce satellite émettait des messages enregistrés vers la terre et, en ce sens, il fut aussi le premier satellite de communication.

Les Premiers Satellites de Communication

La course à l'espace était commencée. Quatorze mois après Spoutnik, les Etats-Unis répliquent en lançant Score. En 1960, le premier satellite conçu spécifiquement à des fins de communications est mis en service: il s'agit d'Echo, un satellite passif en ce sens qu'il agissait comme un simple réflecteur de l'onde émise par la station au sol. Ces satellites passifs, les premiers à être utilisés pour les télécommunications, étaient en fait d'enormes ballons légèrement pressurisés, faits de polyester Mylar aluminisé, d'un diamètre d'environ 30 mètres et d'un poids de quelque 60 kg.

L'avantage premier de ce type de satellite résidait dans l'absence d'équipements à bord, donc de besoins en énergie. Ils offraient de plus la possibilité d'utiliser n'importe quelles fréquences, même simultanément. Mais ils présentaient l'inconvénient de ne pas permettre la transmission de grandes largeurs de bande. Ils demandaient l'utilisation d'antennes énormes, d'émetteurs très puissants, de récepteurs très sensibles. Par ailleurs, les radiations solaires pouvaient perturber de façon appréciable l'orbite de ces ballons de faible masse et de grande surface - ballons dont la fine enveloppe ne résistait pas longtemps aux météorites.

L'utilisation de réflecteurs passifs, soit dit en passant, ne s'est pas limitée aux satellites artificiels. En 1959, une communication audio fut, par exemple, établie entre les Etats-Unis et la Grande-Bretagne en utilisant la lune comme réflecteur. Et c'est de la même façon que la marine américaine exploita, en 1960, quelques circuits entre le Maryland et Hawaii.

Mais l'on vint rapidement à une autre génération de satellites de communication, celle que l'on connaît actuellement: les satellites actifs. Telstar I, que les Etats-Unis lancèrent en 1962, fut le premier de tous. Dans un satellite actif, les signaux en provenance de la station émettrice sont reçus, amplifiés et immédiatement retransmis vers la station terrienne réceptrice. Ces satellites agissent donc comme rédéteurs et doivent fournir leur propre énergie.

L'Orbite

Les premiers satellites circulaient autour de la terre sur des orbites elliptiques et étaient animés d'un mouvement relatif par rapport à la terre: il s'agissait de satellites à défilement. L'inconvénient majeur de ces systèmes réside en ce que les antennes au sol doivent repérer et suivre le satellite, qui par ailleurs passe une partie de son temps "à l'ombre" de la terre: si l'on veut un service continu, il faut donc placer deux satellites sur l'orbite de façon à en voir toujours un.

Le mouvement apparent du satellite dépend des caractéristiques d'orbite: altitudes du périgée et de l'apogée, inclinaison du plan d'orbite. Lorsque la période de révolution du satellite est égale à la période sidérale de rotation de la terre (23h 56min. 4,1s.), le satellite est dit synchrone. Les satellites synchrones peuvent avoir une orbite elliptique avec une inclinaison quelconque.

Un satellite stationnaire est un satellite synchrone, à orbite circulaire dans le plan de l'équateur. Le satellite semble immobile par rapport à la terre et sa poursuite par les antennes des stations au sol est alors inutile. Les caractéristiques d'un satellite stationnaire sont les suivantes:

Rayon de l'orbite: 42 164 km
Altitude : 35 786 km
Période orbitale : 23h 56 min 4,1 s
Vitesse : 3075 m/s

L'espace sur le continuum unidimensionnel qu'est l'orbite géostationnaire est limité. Pour les satellites fonctionnant dans les bandes de 4 et 6 GHz, l'Union internationale des télécommunications exige, par exemple, un espacement d'au moins 5° de façon à éviter le brouillage entre les signaux. Et il faut noter que plus les antennes au sol sont petites, plus leurs faisceaux d'émission et de réception sont larges et plus les satellites doivent être espacés sur l'orbite.

Pour pallier cet inconvénient, on peut utiliser des fréquences plus élevées qui permettent des antennes de diamètre réduit et des faisceaux étroits. Mais surgissent alors d'autres inconvénients: entre autres, une atténuation atmosphérique plus élevée et une plus grande difficulté à localiser le satellite avec l'antenne.

Une façon de pallier le manque d'espace sur l'orbite géostationnaire, est d'utiliser des orbites non géostationnaires, ressources qui, elles, sont illimitées. Il est sûr que le satellite stationnaire, même s'il est très éloigné de la terre, est généralement plus avantageux que le satellite à défilement: et presque tous les satellites de communication actuellement en service sont stationnaires. Néanmoins, dans certains cas, le satellite à défilement peut être utilisé avantageusement, par exemple pour les liaisons unidirectionnelles (collecte de données) et pour les cas où de grands délais de transmission sont tolérables. De plus, le satellite à défilement, utilisé à faible altitude, peut donner, dans le bilan de liaison, un gain considérable par rapport à un satellite stationnaire. Ce gain permet donc d'utiliser des stations terriennes équipées d'antennes beaucoup plus petites.

A titre d'exemples de systèmes de télécommunication actuels utilisant des satellites à défilement, citons le système MOLNYA de l'URSS. Ce système, qui utilise 16 satellites, permet d'assurer des liaisons téléphoniques et

télégraphiques bilatérales ainsi que la transmission de la télévision. Les satellites décrivent des orbites très allongées dont l'apogée se situe au-dessus de l'hémisphère Nord. Les communications sont établies lorsque le satellite est dans la zone d'apogée, alors que la vitesse angulaire du satellite et le mouvement de poursuite des antennes sont les plus faibles.

Les premiers satellites expérimentaux de télécommunications civils étaient des satellites à défilement: il s'agit des satellites américains TELSTAR 1 (1962), RELAY 1 (1962), TELSTAR 2 (1963) et RELAY 2 (1964). Les premiers satellites expérimentaux stationnaires furent les satellites SYNCOM 2 (1963) et SYNCOM 3 (1964).

Les Satellites Commerciaux

Les communications commerciales par satellites ont débuté le 6 avril 1965 avec le lancement d'Early Bird par l'organisation internationale INTELSAT (International Telecommunications Satellite Consortium). En 1967, Intelsat lança trois Intelsat II; entre 1968 et 1970, cinq Intelsat III; et, entre 1971 et 1975, huit Intelsat IV et IV-A. Chaque génération d'intelsat a démontré des avances appréciables. Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.1. A la fin de 1975, le système Intelsat incluait 124 antennes situées à 96 stations dans 73 pays.

Le Canada est membre de INTELSAT par l'intermédiaire de la société de la Couronne Téléglobe. De plus, le Canada fut le premier pays, après l'URSS, à exploiter un système national de communication par satellites, les Anik de Télésat Canada qui utilisent la technologie des Intelsat IV.

Les Progrès des Satellites Stationnaires

Le tableau 1.1 donne une bonne indication de l'évolution générale des performances des satellites stationnaires au cours de la dernière décennie. Les durées de vie ont doublé et les masses ont augmenté d'un ordre de grandeur. Les courbes de l'accroissement de la P.I.R.E.* et de l'accroissement du nombre de circuits téléphoniques sont tracées à la figure 1.1.

Il est à remarquer que l'accroissement de la P.I.R.E. est due en partie aux progrès technologiques réalisés dans les domaines des tubes à ondes progressives, antennes, alimentation de bord, etc, et en partie à l'accroissement de puissance des lanceurs qui permettent la mise en orbite de masses de plus en plus importantes. Naturellement, cette évolution devrait conduire à l'usage de stations au sol relativement simples: petites antennes à pointage simplifié, récepteurs non refroidis, etc. Une application qui se dessine dans cette voie est le système de communication où le satellite diffuse directement vers les utilisateurs. Par exemple, avec un tel système, les particuliers pourraient recevoir directement des programmes de télévision diffusés par le satellite.

Les systèmes de communications classiques à grandes capacités tels que les faisceaux hertziens (micro-ondes) sont limités en portée. Quant aux liaisons à grandes distances, elles sont en général à faible capacité (la télévision ne peut être transmise actuellement par câble sous-marin) et/ou assez peu fiables (liaisons troposphériques). Par contre, un réseau utilisant des satellites stationnaires possède une grande souplesse. Tout d'abord, portées et capacités ne sont pas reliées: un réseau de quelques satellites couvre la terre entière et les grands événements (par exemple les Jeux Olympiques) peuvent être suivis en direct par le monde entier. De plus, on peut facilement adapter le réseau aux besoins particulier, et il n'y a pas de difficulté particulière à desservir une région isolée (par exemple le Nord canadien). Enfin, les stations terriennes ont peu d'effet les unes sur les autres: une panne à l'une des stations ne signifie pas la perte du réseau.

* P.I.R.E. est la puissance isotropique rayonnée effective, c.a.d. qu'elle tient compte du gain de l'antenne.

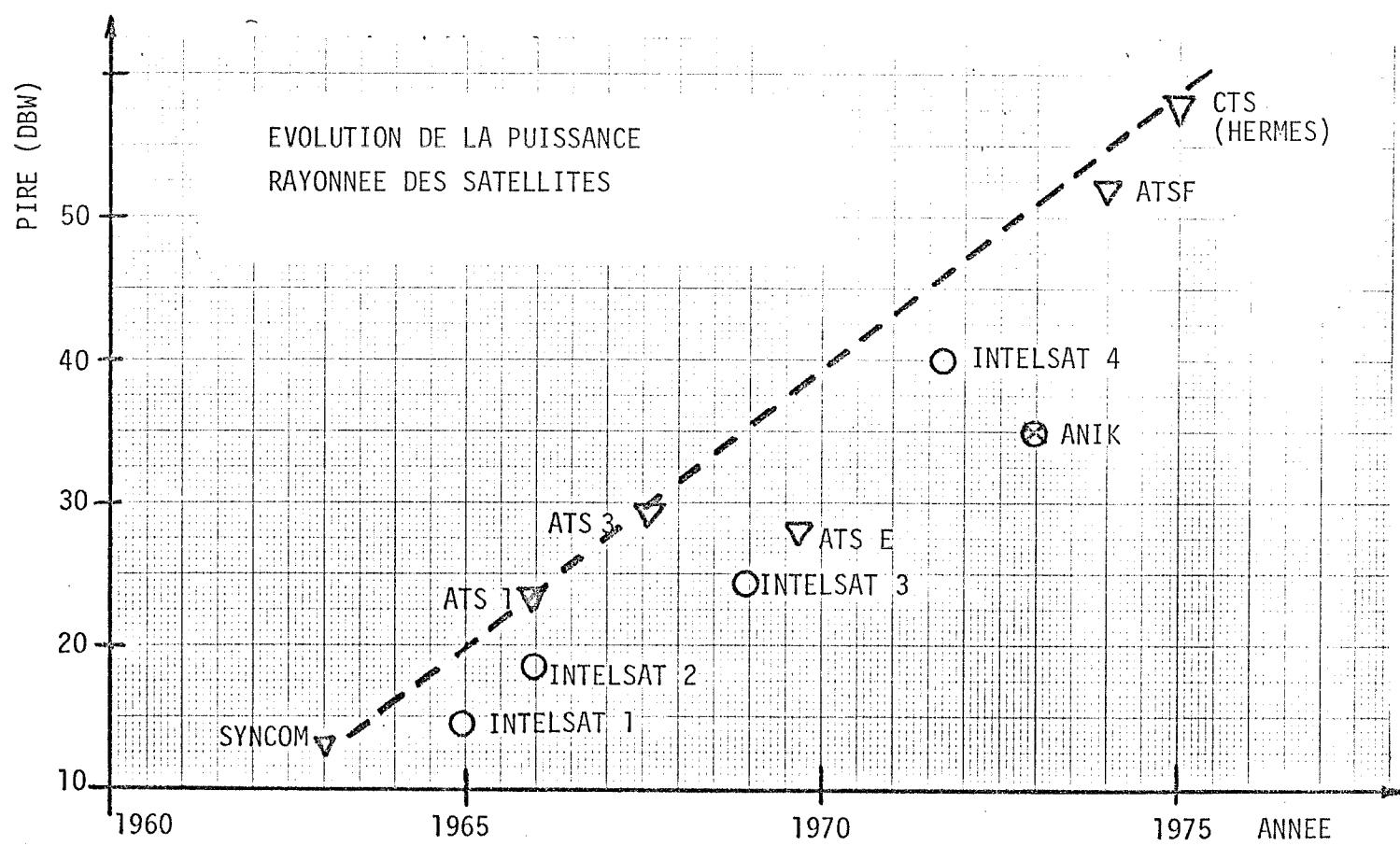
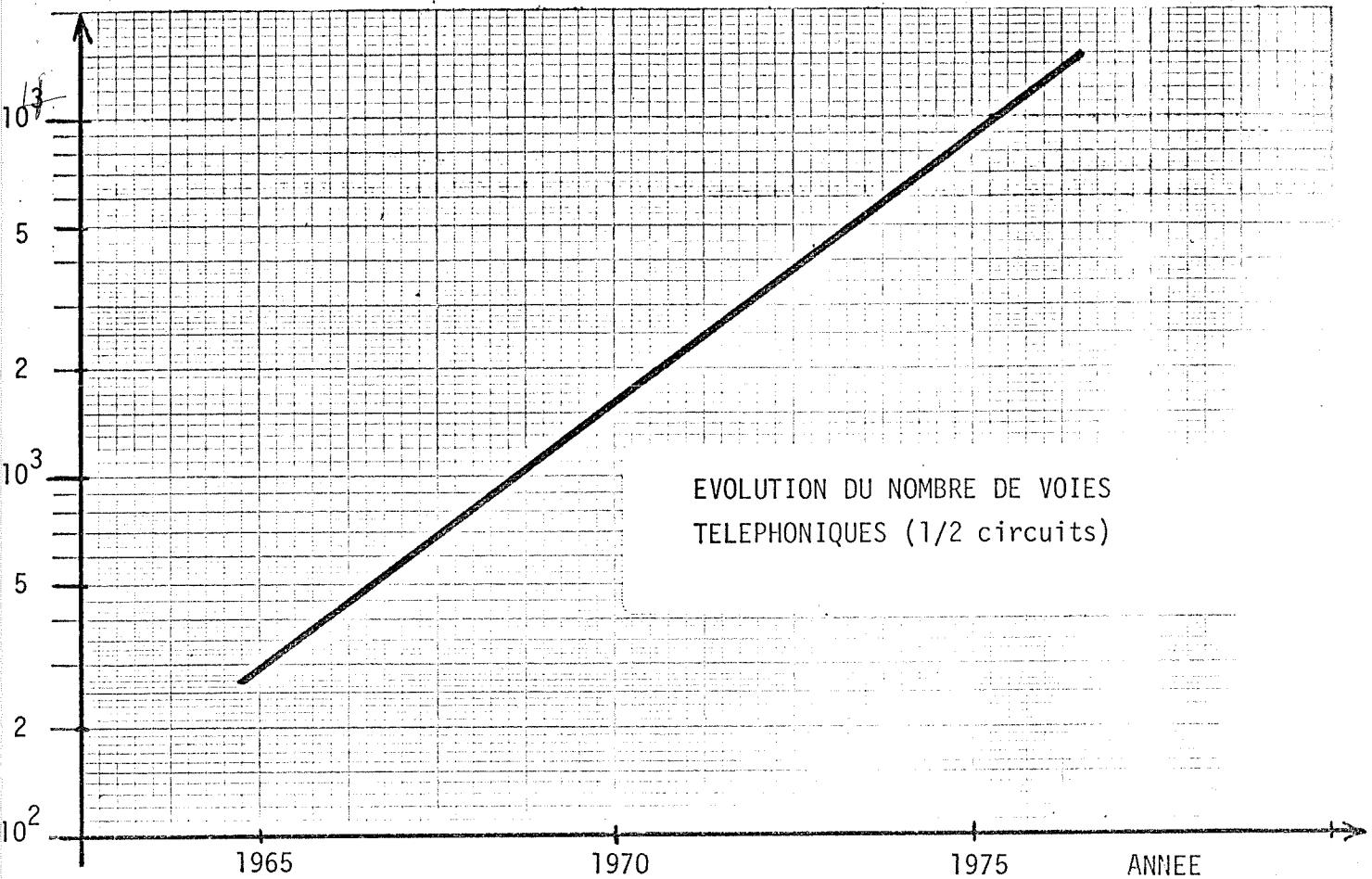


Figure 1.1

	INTELSAT I (EARLY-BIRD)	INTELSAT II	INTELSAT III	INTELSAT IV	INTELSAT IV A
Entrée en service	6 avril 1965	1967	1969-1970	1972-1974	1975
Durée de vie (an)	1.5	3	5	7	7
Masse en orbite (Kg)	38.5	87	146	709	1450*
Diamètre (cm)	71	142	142	237	237
Hauteur (cm)	59	66	102-198	282-533	678
Répéteur:					
Nombre	2	1	2	12	20
Bande Passante (MHZ)	25	130	225	36	36
Bande Passante Totale (MHZ)	50	130	480	480	720
Capacité Téléphonique (# Circuits)	240	240	1200	6000	7000
Accès Multiple	non	oui	oui	oui	oui
Télévision (canaux)	1	1	4	12	20

Tableau 1.1: SATELLITES INTELSAT

CHAPITRE 2

LES SATELLITES DE COMMUNICATION, ANCIENS, ACTUELS ET FUTURS

Avant de dresser une liste des satellites de communication, il convient d'établir une codification de leurs caractéristiques principales afin de permettre une présentation compacte de la liste. Cette codification doit être basée sur une classification de ces caractéristiques.

Classification des Satellites

On peut classer les satellites selon les caractéristiques suivantes:

- Utilisation
- Orbite
- Stabilisation
- Zones de couverture
- Panneaux solaires
- P I R E (puissance isotropique rayonnée effective)
- Largeur de bande totale
- Nombre de répéteurs

Utilisation

On divise les satellites en deux groupes: les satellites de communication qui ne font que réémettre les messages qu'ils reçoivent, et les satellites de surveillance qui font des observations.

On classe les satellites de communication suivant leur utilisation dans trois classes: les satellites de liaison point à point, les satellites de distribution et les satellites de diffusion directe. Cette classification ne distingue pas des types de satellites, mais des types d'utilisation.

Les satellites Intelsat sont des satellites de liaison point à point. Ils concurrencent les câbles sous-marins. Les satellites Anik font des liaisons point à point entre Allan Park, Ontario, et Lake Cowichan, Colombie-Britannique, (960 circuits dans chaque sens) et entre Allan Park, Ontario, et Harrietsfield, Nouvelle-Ecosse, (400 circuits dans chaque sens). Mais il font également la distribution de trois programmes de télévision de Radio-Canada (ou quatre de temps en temps) à partir de huit stations terriennes; ces programmes sont destinés à ces mêmes huit stations ainsi qu'à 26 stations de réception; 14 stations de réception additionnelles seront installées avant la fin de 1977.

Le STT,* satellite expérimental canadien lancé le 17 janvier 1976, est peut-être le premier satellite de diffusion directe en opération, mais on prévoit son utilisation aux fins de distribution et de liaison point à point.

En général, on peut dire que pour les liaisons point à point, il est plus économique d'employer des satellites de faible puissance avec de grosses antennes terriennes très sensibles. Pour la diffusion directe, un satellite doit projeter un signal relativement puissant sur la terre pour permettre sa réception par des stations de taille et de coût très réduits.

Orbite

Les orbites se divisent en orbite géostationnaire, orbite géosynchrone et orbites à défilement. On remarque que l'orbite géostationnaire est un continuum à une dimension, tandis que les orbites à défilement forment un continuum à cinq dimensions. Tous les satellites de communication actuellement en opération, sauf les MOLNYA de l'URSS, sont en orbite géostationnaire. Les MOLNYA utilisent une orbite de défilement afin d'atteindre les régions nordiques du pays. Les satellites de surveillance suivent des orbites à défilement afin de passer plus près de la terre.

* Satellite Technologique de Télécommunication, dénommé "Hermes" depuis 1976.

Stabilisation

Les premiers satellites n'étaient pas stabilisés. Leurs antennes étaient donc omnidirectionnelles. Quand on considère qu'une bonne antenne parabolique peut émettre, dans une direction donnée, un signal 500 fois plus puissant que le signal émis par une antenne omnidirectionnelle alimentée par la même source, on voit l'intérêt d'une antenne stabilisée et dirigée vers la cible (l'antenne d'un Anik a un gain de 27 dB, ce qui veut dire que son signal est 500 fois plus puissant que celui d'une antenne omnidirectionnelle).

Les satellites Intelsat I et II étaient stabilisés par leur propre rotation, comme un gyroscope, l'axe de rotation étant parallèle à l'axe de la terre. L'antenne était conique et elle produisait un signal en forme de cône couvrant l'Amérique du Nord et l'Europe. Naturellement, le signal était en grande partie perdu dans l'espace. Les satellites Intelsat III et IV avaient des antennes paraboliques tournant autour de l'axe du satellite, de façon à être toujours dirigées dans une direction donnée vers la terre. L'électronique du satellite était montée sur une plate-forme tournant avec l'antenne. Un autre système consisterait en des antennes stabilisées mais orientables.

Les satellites Symphonie et STT sont stabilisés sur trois axes par un gyroscope de façon à présenter toujours la même face à la terre, et cela avec une exactitude de moins de 1° . En effet, le satellite tourne autour d'un axe parallèle à l'axe de la terre une fois par jour. La vitesse de rotation est réglée par un moteur qui augmente ou diminue le couple appliqué au gyroscope. Avec la stabilisation sur trois axes, les antennes du satellite peuvent être fixes ou orientables.

Zones de Couverture et Pinceaux

Si le rayonnement d'un satellite couvre un continent, on parle de zone de couverture. Si le rayonnement couvre une région restreinte, on parle de pinceau. On considère un cône d'un angle de moins de 4° comme un pinceau.

Panneaux Solaires

Les panneaux solaires fournissent toute l'énergie électrique d'un satellite. Sur les satellites Intelsat, ils sont situés sur la paroi cylindrique du satellite. Pour ces satellites de liaison point à point, cette surface extérieure est assez grande pour satisfaire aux besoins du satellite en énergie.

Les satellites de distribution et de diffusion directe, tels que Symphonie et STT, ont besoin d'une puissance électrique plus élevée. Symphonie et ATS-6 utilisent des panneaux solaires qu'ils déploient une fois en orbite. STT fait la même chose, mais ses panneaux tournent autour de l'axe du satellite une fois par jour de façon à ce qu'ils soient toujours dirigés vers le soleil.

PIRE

La puissance isotropique rayonnée effective d'un satellite détermine l'importance de la station terrienne nécessaire pour la réception de ses signaux. C'est une combinaison de la puissance de l'émetteur et de l'efficacité ou gain de l'antenne dans la direction satellite à station terrienne. La PIRE est mesurée en watts exprimés en décibels (le décibel est une façon d'exprimer un nombre pur sur une échelle logarithmique: un nombre n exprimé en décibels, devient $10 \log_{10} n$ dB. Donc $100 = 20$ dB, et $100 W = 20$ dBW).

Largeur de Bande Totale

Chaque répéteur fonctionne avec une largeur de bande (ou variation de fréquence) définie, normalement exprimée en mégahertz ou MHz. Le débit d'un répéteur en terme de quantité d'informations transmises est directement proportionnel à la largeur de bande utilisée.

Nombre de Répéteurs

Le débit d'un satellite est également directement proportionnel au nombre de répéteurs qu'il comporte.

La Codification des Caractéristiques

Utilisation:

- 0 satellite de communication point à point
- 1 satellite de distribution
- 2 satellite de diffusion directe
- 5 satellite de surveillance

Orbite:

- 0 géostationnaire
- 1 géosynchrone
- 2 à défilement

Stabilisation:

- 0 non stabilisé
- 1 en rotation, antenne en rotation
- 2 en rotation, antenne stabilisée
- 3 en rotation, antenne orientable
- 4 stabilisé sur 3 axes, antenne stabilisée
- 5 stabilisé sur 3 axes, antenne orientable

Couverture:

- nombre de zones
- nombre de pinceaux

Panneaux solaires:

- 0 sur la paroi extérieure
- 1 déployés, en rotation avec le satellite
- 2 déployés, stabilisés

PIRE:

- en dBW (décibels de watts)

Largeur de bande:

- en MHz (mégahertz)

Répéteurs:

- nombre

TABLE DES SATELLITES DE COMMUNICATION

La table contenue dans les pages suivantes renferme des informations de base et les caractéristiques essentielles sur les principaux satellites de communication en orbite depuis Spoutnik (1957).

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

UTILISATION	ORBITÉ	STABILISATION	NO. DE ZONES	NO. DE PINCEAUX	PANNEAUX SOLAIRES	PIRE (dBW)	LARGEUR DE BANDE (MHz)	NO. DE REPÉTEURS	LARGEUR DE BANDE TOTALE (MHz)	LONGITUDE	DATE DE LANCEMENT	NOM	PROPRIETAIRE
-------------	--------	---------------	--------------	-----------------	-------------------	------------	------------------------	------------------	-------------------------------	-----------	-------------------	-----	--------------

1	2	0	1								1957-10-04	Spoutnik	URSS
1	2	0	1								1958-12-18	Score	NASA
0	2	0	1	passif							1960-08-12	Echo I	NASA
0	2	0									1960-10-04	Courier 1B	DOD
0	2	1	1			50	1	50			1962-07-10	Telstar I	NASA, ATT
0	2		1								1962-12-13	Relay I	NASA
											1963-02-14	Syncom I (échec)	NASA
0	2	1	1			50	1	50			1963-05-07	Telstar II	NASA, ATT
0	0										1963-07-26	Syncom II	NASA
0	2										1964-01-21	Relay II	NASA
0	2	0	passif								1964-01-25	Echo II	NASA, URSS
0	0										1964-08-19	Syncom III	NASA
0	0	1	1	0	0	11,5					1965-02-11	LES-1	USAF
0	0	1	1	0	0	11,5	25	2	50		1965-04-06	Early Bird (Intelsat I)	Intelsat

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

UTILISATION	ORBITE	STABILISATION	NO. DE ZONES	NO. DE PINCEAUX	PANNEAUX SOLAIRES	PIRE (dBW)	LARGEUR DE BANDE (MHz)	NO. DE REPETEURS	LARGEUR DE BANDE TOTALE (MHz)	LONGITUDE	DATE DE LANCEMENT	NOM	PROPRIETAIRE
0	2	3	1	2	0 (43,1) 185 (40) 125 (28) 50	1	410	1	1966-06-16 à 1968-06-13		1966-10-26	IDSCS (26 satellites)	DOD
0	0	1	0	0	25					1966-12-06	Intelsat II A (échec)	Intelsat	
0	0	1	0	0	Voir Intelsat II B	15,5 126	1	126	172°E	1967-01-11	ATS-1	NASA	
									6°W	1967-03-22	Intelsat II B	Intelsat	
										1967-04-05	Intelsat II C	Intelsat	
											ATS-2 (échec)	NASA	
					Voir Intelsat II B				176°E	1967-09-27	Intelsat II D	Intelsat	
						30				1967-11-05	ATS-3	NASA	
										1968-08-10	ATS-4	NASA	
										1968-09-18	Intelsat III F-1 (échec)	Intelsat	
0	0	1	1	0	0	23 225	2	450	30°W	1968-12-18	Intelsat III F-2	Intelsat	
										1968-09-26	LES-6	USAF	

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

UTILISATION	ORBITE	STABILISATION	NO. DE ZONES	NO. DE PINCEAUX	PANNEAUX SOLAIRES	PIRE (dB _W)	LARGEUR DE BANDE (MHz)	NO. DE REPETEURS	LARGEUR DE BANDE TOTALE (MHz)	LONGITUDE	DATE DE LANCEMENT	NOM	PROPRIÉTAIRE
-------------	--------	---------------	--------------	-----------------	-------------------	-------------------------	------------------------	------------------	-------------------------------	-----------	-------------------	-----	--------------

Voir Intelsat III F-2										565°E	1969-02-05	Intelsat III F-3	Intelsat
Voir Intelsat III F-2										174°E	1969-05-21	Intelsat III F-4	Intelsat
										1969-07-25		Intelsat III F-5 (échec)	Intelsat
										1969-08-12		ATS-5	NASA
0	0	2	1	0	0	17,2	20	1	22	47°E	1969-11-21	Skynet 1A	MOD
Voir Intelsat III F-2										177°E	1970-01-14	Intelsat III F-6	Intelsat
										18°W	1970-03-20	NATO I-I A (échec)	OTAN
Voir Intelsat III F-2										19°W	1970-04-23	Intelsat III F-7	Intelsat
										1970-07-23		Intelsat III F-8 (échec)	Intelsat
										1970-08-19		Skynet 1 B (échec)	MOD
0	0	2	2	2	0	33,7	36	12	432	19,5°W	1971-01-25	Intelsat IV F-2	Intelsat
										22,5			

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

UTILISATION	ORBITE	STABILISATION	NO. DE ZONES	NO. DE PINEAUX	PINEAUX SOLAIRES	PIRE (dBW)	LARGEUR DE BANDE (MHz)	NO. DE REPETEURS	LARGEUR DE BANDE TOTALE (MHz)	LONGITUDE	DATE DE LANCEMENT	NOM	PROPRIETAIRE
-------------	--------	---------------	--------------	----------------	------------------	------------	------------------------	------------------	-------------------------------	-----------	-------------------	-----	--------------

0	Géostationnaire										1974-03-26	Cosmos 637	URSS
1	0	2	1	1	0	34	36	12	432	99°W	1974-04-13	Westar I	Western Union
2	0	4	0	1	1	51	12	1	132	95°W 35°E 105°W	1974-05-30	ATS 6	NASA
0	0	Voir Westar I										Molniya 1-S	URSS
		Voir Intelsat IV F-2										123,5°W	1974-10-10
												174°E	1974-11-21
0	0	2	1	0	0	17,2	20	1	22	49°E	1974-11-23	Skynet II B	Intelsat
												23,2	MOD
1	0	4	2	0	1	29	90	2	180	11,5°W	1974-12-19	Symphonie A	France-Allemagne
		Voir Anik I										114°W	1975-05-07
		Voir Intelsat IV F-2										63°E	1975-05-22
		Voir Symphonie A										11,5°W	1975-08-27
0	0	2	2	4	0	29	36	20	720	25°W	1975-09-26	Intelsat IV-A F-1	Intelsat
1	0					22				99°E	1975-10-08	Statsionar-T	URSS

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

UTILISATION	ORBITE	STABILISATION	NO. DE ZONES	NO. DE PINCEAUX	PANNEAUX SOLAIRES	PIRE (dBW)	LARGEUR DE BANDE (MHz)	NO. DE REPETEURS	LARGEUR DE BANDE TOTALE (MHz)	LONGITUDE	DATE DE LANCEMENT	NOM	PROPRIETAIRE	
1	0	4	1	0	2	40 10	1 20	240	75 à 85°E	1975-1976	Statsionar 1		URSS	
		Voir Statsionar 1							35°E	1975-1976	Statsionar 2		URSS	
0	0	4	1	1		32 26	34	24	816	99°W?	1976-01-02	Satcom 1		RCA
2	0	5	0	2	2	59 46	85 85	1 1	170	116°W	1976-01-17	Hermès (STT,CTS)		CRC-NASA
0	0	2	1	0	0	29,5 18,8		5	29	15°W	1976-02-21	Marisat-1		Comsat General
		Voir Satcom I								119°W	1976-03-26	Satcom 2		RCA
0	0	2	1	1	0	35 29	17 50	1 1	152	18° W	1976-04-22	NATO III A		OTAN
0	0	2	1	3	0	33 31	34	24	816	128° W	1976-05-13	Comstar 1		Comsat-ATT
		Voir Marisat-1							176,5°E	1976-05	Marisat-2		Comsat General	
		Voir Intelsat IV-A-F-1							1976-05 à -----		Intelsat IV-A F-2 (6 satellites)		Intelsat	

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

UTILISATION	ORBITE	STABILISATION	NO. DE ZONES	NO. DE PINCEAUX	PANNEAUX SOLAIRES	PIRE (dBW)	LARGEUR DE BANDE (MHz)	NO. DE REPETEURS	LARGEUR DE BANDE TOTALE (MHz)	LONGITUDE	DATE DE LANCEMENT	NOM	PROPRIETAIRE
-------------	--------	---------------	--------------	-----------------	-------------------	------------	------------------------	------------------	-------------------------------	-----------	-------------------	-----	--------------

1	0	2	1	0	0	33	36	12	432	75° à 85° E	1976-06	Indostar 1 (2 satellites)	Indonesie
		Voir Comstar 1								114° W?	1976	Comstar 2	Comsat-ATT
0	1	5	1	1						116,3° W 26,3° W	1976 1976	LES 8 LES 9	USAF
		Voir Statsionar 1								85° E	1976	Statsionar 3	URSS
1	0	5	2	1	2	30,7 20,7 5	120 40 1	1	165	10° E	1977-03	OTS	ASE
0	0	4	1	0	2	26 28	0,025 0,025	20	0,500	100° W 23° W 75° E 172° E	1977-03	FltSatCom 1	USN
		Voir FltSatCom.1									1977-09	FltSatCom 2	USN
0	0	4	1	0	2	35,5 26,7				40° E?	1977-12	Marots (OTS-2)	ASE
		Voir NATO III A									1977-12	NATO III B	OTAN
		Voir FltSatCom 1									1977-12	FltSatCom 3	USN

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

UTILISATION	ORBITE	STABILISATION	NO. DE ZONES	NO. DE PINCEAUX	PANNEAUX SOLAIRES	PRE (dBW)	LARGEUR DE BANDE (MHz)	NO. DE REPETEURS	LARGEUR DE BANDE TOTALE (MHz)	LONGITUDE	DATE DE LANCEMENT	NOM	PROPRIETAIRE
1	0	2	1	1	0	26	35	1	35	15°W	1977-12	Sirio	Italie
			Voir Satcom 1							129°W	1977	Satcom 3	RCA
0	0	2	1	0	37	200	8	1600	135°E	1977	CS	Japon	
			Voir Comstar 1							13°W?	1978-01-01	Comstar 3	Comsat-ATT
			Voir FltSatCom 1								1978-03	FltSatCom 4	
1	0	4	1	2	46	50 à 2 55 80 2	260	110°E	1978-03	BS		Japon	
			Voir FltSatCom 1								1978-06	FltSatCom 5	USN
			Voir FltSatCom 1								1978-09	FltSatCom 6	USN
			Voir NATO III A								1978-12	NATO III C	OTAN
1	0	1		37	36	4	144	75°W	1978-12	Brésil F-2		Brésil	
2	0	4	1	0	2	72 36	4 12	720	104°W	1978	Anik IV		Télésat Canada
0	0	2	1	0	0	42 35	54	8	432	112°W 110°W	1978	SBS (CML) (2 satellites)	SBS
			Voir Indostar 1							75- 85°E	1978	Indostar 2	Indonésie

LES SATELLITES DE COMMUNICATIONS

UTILISATION	ORBITE	STABILISATION	NO. DE ZONES	NO. DE PINCEAUX	PANNEAUX SOLAIRES	PIRE (dBW)	LARGEUR DE BANDE (MHz)	NO. DE REPETEURS	LARGEUR DE BANDE TOTALE (MHz)	LONGITUDE	DATE DE LANCEMENT	NOM	PROPRIETAIRE
0	0	1	2			6			1978 ou 1979			DSCS III (4 satellites)	DOD
		Voir Brésil F-1					67,5°W		1979-06			Brésil	Brésil
0	0	4	1 0 2			3		15°W	1979			Aerosat 1	ASE.-Comsat-Canada
		Voir Aerosat 1					40°W		1979			Aerosat 2	ASE -Comsat-Canada
0	0	5 4		40 à 240	27	2280	15-40°W		1979			Intelsat V	Intelsat
							170-180°W 55-65°E						
2	0							1980?				Insat	Inde
0	0	1 ?						1980+				Immarsat	IMCO
2	0							1980+				(jusqu'à 7 satellites)	UER
0	0					6						CCS	Japon
2	0	4 1 2						1980+					Australie
2	0	4 1				14		1980 à 1990					Ligue Arabe
2	0	4 0 1 2	66,3	30	4	120	15°W	1980 à 1990					RFA
1	0			36	6	216			1985				Iran
									?				

Liste de Sigles de la Table des Satellites de Communication

<u>SIGLE</u>	<u>NOM</u>
ASE	Agence Spatiale Européenne
ATS	Applications Technology Satellite
ATT	American Telephone and Telegraph Company
BS	Broadcast Satellite
CCS	Commercial Communications Satellite
CML	Comsat General, Microwave Communications Inc., Lockheed Aircraft
COMSAT	Communications Satellite Corporation
COMSAT GENERAL	Filiale de Comsat
CRC	Centre de recherches sur les communications, OTTAWA
CS	Communication Satellite
CTS	Communications Technology Satellite (Hermès)
DOD	Department of Defense, Etats-Unis
DSCS	Defense Satellite Communications System
FLTSATCOM	Fleet Satellite Communications
IMCO	International Maritime Consultative Organization
IMMARSAT	International Maritime Satellite System
INTELSAT	International Telecommunications Satellite Consortium
LES	Lincoln Experimental Satellite
MARISAT	Maritime Satellite
MAROTS	Maritime Orbital Test Satellite
MOD	Ministry of Defence, Royaume-Uni
NASA	National Aeronautics and Space Administration, ETATS-UNIS
NATO	North Atlantic Treaty Organization (OTAN)
OTAN	Organisation du traité de l'Atlantique du Nord
OTS	Orbital Test Satellite
RCA	Radio Corporation of America

RFA	République Fédérale Allemande
SBS	Satellite Business Systems (propriété de Comsat General, International Business Machines, et Aetna Life and Casualty Company)
SIRIO	Satellite italien de recherche
STT	Satellite technologique de télécommunications (Hermès)
UER	Union européenne de radiodiffusion
USAF	United States Air Force
USN	United States Navy

CHAPITRE 3

LES PROJETS INTERNATIONAUX ET REGIONAUX EN MATIERE DE COMMUNICATION PAR SATELLITE

Dans ce chapitre, on fait une brève revue des grands projets internationaux en matière d'exploitation des systèmes de communication par satellite.

AEROSAT

Le projet Aerosat est une expérience pour remplacer le système actuel de communication avec les avions en vol sur les ondes VHF et HF par des communications par satellites. En même temps, les satellites permettront la localisation de chaque avion en vol. Actuellement, les erreurs grossières de navigation exigent un espace de 200 km entre les trajets à travers l'Atlantique. Une plus grande précision de navigation s'avère de plus en plus importante avec l'augmentation constante du trafic aérien.

La localisation d'un avion sera faite par une station terrienne de contrôle qui enverra un signal à l'avion grâce à deux satellites. L'avion renverra les signaux à la station de contrôle grâce aux mêmes satellites. Les délais donneront les distances entre l'avion et les deux satellites et ces distances combinées avec l'altitude de l'avion détermineront sa position.

Le lancement des deux satellites est prévu pour 1979. Les positions seront à 15° et 40° ouest et couvriront l'Atlantique. Environ 20 avions seront équipés d'antennes pour les expériences. Chaque satellite aura trois répéteurs. Les panneaux solaires livreront un minimum de 800 W. Les communications terre-satellite seront à 5 GHz et les communications avion-satellite à 1,6/1,5 GHz et à 132/126 MHz.

Le consortium Aerosat est la propriété de Comsat General à 47%, de l'Agence spatiale européenne à 47% et du Canada à 6%. Des compagnies allemandes développeront l'équipement des avions.

Satellite Systems Engineering estime qu'un système de cinq satellites géostationnaires et de deux satellites en orbite sur les deux pôles pourront donner une économie de 200 M\$ par an par le remplacement des 146 régions d'information de vol actuelles.

AGENCE SPATIALE EUROPÉENNE

Les pays membres de l'Agence spatiale européenne (ASE) sont la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la France, l'Italie, les Pays-Bas, la République fédérale allemande, le Royaume-Uni, la Suède et la Suisse. L'ASE a l'intention de lancer un satellite orbital d'essai (SOE) au début de 1977. Ce satellite servira de prototype à un satellite de communication européen (SCE) qui devait entrer en opération en 1980 dans la bande de 14/12 GHz.

On calcule que le SCE acheminera environ un à deux tiers du trafic européen entre les capitales européennes distancées à plus de 800 ou 1200 km entre 1980 et 1990. Avec un taux d'augmentation présumé de 13% par an, on arrive à une projection de 2000 à 18000 circuits en 1980 et à une projection de 6800 à 61000 en 1990. On prévoit aussi deux canaux de télévision et un trafic de données considérable.

Au point de vue mécanique, le SOE sera semblable au STT de Communications Canada, stabilisé sur trois axes et avec deux panneaux solaires qui se tournent continuellement vers le Soleil.

Il y aura cinq répéteurs, chacun d'une puissance de 20 W: deux d'une largeur de bande de 40 MHz, deux de 120 MHz et un de 5 MHz. Les répéteurs de 40 MHz émettront sur une antenne d'une largeur de faisceau à mi-puissance de $7,5^{\circ}$ par $4,25^{\circ}$ nommée "Eurobeam A". Les répéteurs de 120 MHz émettront sur une antenne avec un pinceau d'un diamètre de $2,5^{\circ}$, orientable mécaniquement. Ces deux antennes utiliseront la polarisation orthogonale.

Le cinquième répétiteur émettra sur une antenne avec un faisceau de 3,5° par 5° nommé "Eurobeam B". Ce faisceau utilisera la polarisation circulaire, ce qui permettra une comparaison des polarisations orthogonale et circulaire en vue du choix de la meilleure méthode pour le satellite opérationnel futur.

Le cinquième répétiteur, avec sa largeur de bande de seulement 5 MHz, est conçu pour être reçu par des antennes terriennes de 3m de diamètre et des récepteurs relativement simples.

IMMARSAT

L'organisation consultative maritime intergouvernementale a convoqué un congrès intergouvernemental en février 1976 pour établir un organisme chargé de mettre sur pied un système de satellites de navigation et de communication. Le système doit remplacer le système américain Marisat et le système européen Marots dans les années 80. On prévoit trois à six satellites en orbite. Le coût de la station sur un bateau serait environ de 50 k\$.

INTELSAT

Les satellites INTELSAT V, planifiés pour lancement en 1979 et après, auront plusieurs répéteurs distribués comme suit:

Nombre de répéteurs	Largeur de bande (MHz)	Bande (GHz)
2	240	14/12
4	80	14/12
16	80	6/4
5	40	6/4

Un satellite pourra transmettre 24000 voies téléphoniques dédiées, plus un système à accès multiple par assignation à la demande avec porteuse unique et modulation par impulsions codées (Système SPADE), plus la télévision. On pourra interconnecter les bandes de 6/4 et de 14/12 GHz

entre quatre répéteurs de largeur de bande de 80MHz. Deux INTELSAT V seront suffisants sur l'Atlantique jusqu'en 1983: après, on pourra mettre un troisième satellite en service et employer l'interpolation numérique de la voix. (PRITW75, chapitre 3.1.1).

MARISAT

Marisat est un système de deux satellites conçu pour fournir un service de données et de voix à des bateaux et des opérations de forage en mer. Un satellite situé à 15° ouest, couvrira l'Atlantique et l'autre situé à 176,5° est, couvrira le Pacifique. Les lancements étaient planifiés pour décembre 1975 et janvier 1976.

Au début, la marine américaine sera le grand client de Marisat puisqu'elle emploiera jusqu'à 80% de la puissance du satellite. La marine aura un canal de 500 kHz et de deux canaux de 25 kHz dans chaque satellite à 300-312 MHz (Voie montante) et 248-260 MHz (Voie descendante).

La communication avec les bateaux civils se fera à 1,6385-1,6425 GHz montant et à 1,537-1,541 GHz descendant.

Les stations terriennes de contrôle déjà installées au Connecticut et en Californie, communiqueront avec leurs satellites à 6,420-6,424 GHz (Voie montante) et 4,195-4,199 GHz (Voie descendante). Elles ont des antennes de 12,8m. La marine aura ses propres stations terriennes.

Les bateaux civils communiqueront uniquement avec une station de contrôle qui fera un "polling" continual des bateaux sur un sous-canal de contrôle. Neuf sous-canaux de voix, avec accès multiple par répartition en fréquence et avec un sous-canal par onde porteuse seront disponibles pour l'usage civil. Cinq sous-canaux sont désignés pour le trafic des télécritteurs. 22 circuits de télécritteurs partageront un sous-canal par accès multiple par répartition dans le temps.

L'antenne sur un bateau a un diamètre de 1,22 m et est montée sur une plate-forme stabilisée en tangage et en roulis. Sur cette plate-forme, un autre système dirige l'antenne en azimut et en élévation. Le compas gyroscopique du bateau fournit la référence pour la commande en azimut.

Le réglage de précision est asservi aux signaux du satellite. Un radôme protège le tout. L'électronique est logée sur un pont inférieur. Le prix d'un terminal complet avec antenne est 52.5 k\$.

Les propriétaires des satellites et des stations terriennes sont:

- Comsat General	86,29%
- RCA Globocom	8,00%
- Western Union International	3,41%
- ITT Worldcom	2,30%

Pour la marine américaine, Marisat sert de système de transition entre LES 6 (Lincoln Experimental Satellite 6), lancé le 26 septembre 1969 et maintenant épuisé, et le système FleetSatCom, beaucoup plus important, qui sera lancé en 1977 et 1978.

Alors que l'utilisation par la marine militaire diminuera, celle par la marine marchande augmentera. On envisage l'installation de terminaux sur les bateaux marchands à un taux de 800 par an en 1980.

La durée du système est cinq ans. On discute de son remplacement par Inmarsat, un système financé et géré par une agence internationale sous l'égide des Nations Unies.

MAROTS

L'Agence spatiale européenne lancera son Marots (Maritime Orbital Test Satellite) vers la fin de 1977. De sa position en orbite à 45° est, il couvrira l'Océan Indien et complètera la couverture des deux Marisat. Il communiquera avec les mêmes terminaux sur bateaux que Marisat et avec presque les mêmes fréquences: 1,6415-1,6445 GHz montant et 1,540-1,5425 GHz descendant. Par contre, la liaison entre le satellite et les stations terriennes sera à 14,49-14,50 GHz montant et 11,69-11,70 GHz descendant.

La capacité théorique du satellite sera de 50 canaux de voix, ou l'équivalent, terre à bateau, et de 60 canaux de voix, ou l'équivalent, bateau à terre.

La structure du satellite sera la même que le SOE (ou OTS), sauf les détails électroniques et les antennes.

OTAN

Les 12 partenaires de l'Organisation du Traité de l'Atlantique du Nord communiquent par le DSCS (Defense Satellite Communications System) des Etats-Unis, mais pendant 1976 et 1977 l'Otan lancera son propre système de deux satellites. Chaque satellite aura un faisceau étroit de 7,5° pour couvrir l'Europe avec une PIRE de 35 dBW, et un faisceau large de 15° x 12° pour couvrir toute la région de l'OTAN avec une PIRE de 29 dBW. Le faisceau large aura une largeur de bande de 50 MHz et il sera alimenté par un tube à onde progressive de 22 W. Le faisceau étroit partagera la puissance de 22 W d'un autre tube à onde progressive entre un canal de largeur de bande de 17 MHz et un canal de 85 MHz. Tous les canaux seront à 7-8 GHz. La capacité du réseau européen de faisceau étroit sera de 524 circuits téléphoniques unidirectionnels. La capacité du réseau atlantique-européen à large faisceau sera de 152 circuits téléphoniques unidirectionnels. Les stations terriennes fixes auront des antennes de 12 m, les stations transportables de 6 m et les stations sur navires de 2 m.

SYSTEME ARABE

L'Union arabe de télécommunication (UAT), qui relie 18 ou 20 nations de la Ligue Arabe, envisage le lancement d'un satellite pour sa région. On pense à environ 20 stations principales de 10m, capables d'émission, de réception et de réémission VHF vers les téléviseurs avoisinants. Environ 15 stations, aussi de 10 m, sont prévues pour la liaison entre les systèmes locaux de communication par onde courte. Au début, on pense à 500 stations de 3 m pour la réception en direct de la télévision: ce nombre peut augmenter à 5000 dans les années 80. Le satellite aura besoin d'une source d'énergie de 1 kW.

UNION EUROPEENE DE RADIODIFFUSION

Le réseau terrien Eurovision de l'Union Européenne de Radiodiffusion (UER) relié à 10,000 postes émetteurs de télévisions qui servent 108 téléviseurs. Le réseau peut transmettre plusieurs programmes à la fois. Le coût de circuits serait 75 M\$ par an en 1980. Le Groupe de travail N de l'UER étudie l'opportunité de remplacer ou de compléter le réseau Eurovision par un système de satellites. Avec les satellites actuels qui fonctionnent dans la bande de 4-6 GHz, l'économie n'est pas évidente, mais les satellites de 12-14 GHz permettront l'utilisation de petites stations terriennes dans les villes et pourraient augmenter utilement la capacité du réseau.

Le Groupe de travail K de l'UER considère la possibilité d'atteindre par des satellites la population non servie par les postes émetteurs et les réseaux de câblovision. Le groupe prend comme hypothèse de départ une station terrienne avec une antenne de 75 cm maximum à un prix de \$300.00. Une telle station exige un satellite puissant, d'une masse de 700 kg en orbite pour une capacité de 4 programmes de télévision. Le nombre de pays et de langues à couvrir exige un minimum de 7 satellites. La limitation de la largeur totale de bande disponible de 800 MHz exige la réutilisation de fréquences, et le large faisceau des petites antennes terriennes exige un espace-ment de 8° entre les satellites dans l'orbite géostationnaire. Il n'est pas évident que l'UER puisse obtenir les fréquences et les positions orbitales désirées.

Si l'UER décide d'utiliser des satellites, il est fort probable qu'elle laisserait les soins d'implantation et d'exploitation aux PTT.

CHAPITRE 4

LES PROJETS DE DIFFERENTS PAYS AU MONDE EN MATIERE DE COMMUNICATION PAR SATELLITES

Dans ce chapitre on présente les projets de communications par satellite envisagés par différents pays au monde. Lorsque disponibles les caractéristiques des systèmes prévus, leurs coûts ainsi que les raisons qui ont dicté les différents choix sont fournis.

ALGERIE

Le système algérien utilise un répêteur dans le satellite INTELSAT III F-3 à 56,5° est, au-dessus de l'Océan Indien, mais il peut fonctionner avec les INTELSAT IV au dessus de l'Atlantique ou l'Océan Indien. Il y a des stations terriennes à Alger et dans 13 communautés du Sahara. La capacité théorique est un canal de télévision plus 65 circuits téléphoniques bidirectionnels. En effet, il y a un canal de télévision plus deux à quatre circuits téléphoniques à chaque station terrienne dans le Sahara. La station d'Alger et une autre peuvent émettre et recevoir la télévision. Les 12 autres stations peuvent seulement la recevoir. La station d'Alger a 12 circuits téléphoniques.

Les stations terriennes ont des antennes d'un diamètre de 11 m et des émetteurs avec des tubes à onde progressive de 40 W, redondants, pour le service téléphonique. Les émissions de télévisions sont faites par des klystrons de 3 kW. La liaison avec les services internationaux de l'INTELSAT utilise la station terrienne normale de l'INTELSAT avec une antenne de 29,5m.

ARGENTINE

Le Secrétaire des communications d'Argentine a commandité en 1974 une étude sur l'opportunité d'un satellite pour les communications internes au pays. On a commencé avec l'hypothèse d'un satellite puissant du genre de celui que construit GE-Toshiba pour le Japon. On a pensé à la diffusion directe de la télévision vers des antennes d'un diamètre de 1 à 1,5 m, et d'un coût de \$2,000 par station. Le réseau de base coûterait environ 200M\$. On a pensé à une quarantaine de stations pour la téléphonie et la télévision et à 90 stations uniquement pour la télévision.

Finalement, on a rejeté le plan parce que:

1. Le besoin pour plusieurs canaux de télévision diminue avec la nationalisation des réseaux de télévision.
2. La télévision éducative s'avère plus difficile que l'on ne s'y attendait. Le développement des cours est lent et la plupart des programmes ne demandent pas une rétroaction: en conséquence, ils peuvent être transmis sur les canaux terriens existants pendant les heures creuses.
3. L'addition de canaux sur les réseaux existants coûterait beaucoup moins cher que l'établissement d'un système de satellites et pourrait utiliser du matériel de fabrication argentin.
4. Dépendance totale envers une ou deux nations étrangères et manque de contrôle sur l'opération du secteur spatial.
5. Possibilité de sabotage par des tiers.

On a aussi considéré la location d'un demi-canal d'un satellite d'INTELSAT pour la téléphonie entre 10 villes, mais on a rejeté cette approche à cause de la difficulté de commutation de sous-canaux de satellite.

On doit réexaminer la situation dans cinq ans. L'Argentine exploite deux stations terriennes d'INTELSAT et on considère la construction d'une troisième pour le trafic international, mais si la diminution des coûts des câbles sous-marins continue, on considérera également un câble entre 1980 et 1985.

L'Argentine est un membre actif du programme Inmarsat.

AUSTRALIE

L'Australian Telecommunications Commission (ATC) a étudié l'opportunité d'un système national de satellites. Aucune conclusion définitive n'a été arrêtée jusqu'ici, mais il paraît probable que l'Australie aura un système en 1980 environ.

On pense en termes d'un satellite puissant et de plusieurs milliers de stations terriennes produites en Australie en grande série. Il y a actuellement 8,000 postes bidirectionnels de radio HF en Australie qui sont utilisés pour l'éducation, le divertissement et les services d'urgence tel que le Royal Flying Doctor Service. L'un des buts du satellite serait de remplacer ces postes HF par des stations terriennes de satellite afin de fournir un service meilleur et plus fiable. On suit l'expérience de l'ATS-6 dans la bande de 2,5 GHz avec beaucoup d'intérêt. Quelques ingénieurs pensent que le coût d'une station terrienne pour cette bande peut arriver à 2 k\$ grâce à une production en grande série; d'autres estiment que le chiffre de 10K\$ à 15K\$ serait plus réaliste.

Pour d'autres applications, on envisage trois types de stations terriennes:

1. Stations principales pour le service téléphonique interurbain et la télévision de haute qualité, dans la bande de 6/4 ou de 14/12 GHz.
2. Stations secondaires avec des antennes de 10 m pour l'accès multiple des petites villes.
3. Un grand nombre de stations de 7,5 m pour la réception de la télévision et sa réémission locale (Il n'y a que 2% de la population en dehors de la portée de la télévision, soit 250,000 personnes).

L'Australie est un membre important du système INTELSAT. Elle possède actuellement deux stations terriennes et elle espère en avoir cinq en 1980 et six en 1985 pour donner une diversité de routage et une fiabilité accrue.

Il est peu probable que l'Australie essaie de construire des satellites, mais elle espère développer la fabrication de stations terriennes.

BRESIL

Telebras (Telecomunicacoes Brasileiras S/A) a constaté en 1973, d'après une étude d'opportunité, que les satellites offrent le meilleur moyen de combler les besoins en télécommunication des régions éloignées et en voie de développement du pays. Le Président du Brésil a approuvé le projet en février 1975. Le système doit entrer en service vers la fin de 1978 avec des satellites à 75° et $67,5^{\circ}$ ouest. On va ajouter un troisième satellite à 60° ouest, s'il y en a besoin. Les satellites fonctionnent à 6/4 GHz.

Une antenne standard sera utilisée pour tous les besoins téléphoniques, avec l'électronique pour des centaines de circuits entre les grandes villes, et équipée pour l'utilisation de sous-canaux (un circuit par sous-canal) pour les petits centres. On débutera avec des circuits dédiés pour éviter les complications de l'accès multiple sur demande, mais on ajoutera cette possibilité quand les canaux deviendront chargés.

L'échéancier est:

NOMBRE DE TERMINAUX EN SERVICE

<u>ANNEE</u>	<u>HAUTE CAPACITE</u>	<u>BASSE CAPACITE</u>	<u>TOTAL</u>
1978	10	7	17
1980	12	24	36
1983	12	32	44

Toutes ces antennes seront équipées pour la télévision.

De plus, on envisage un nombre grandissant très rapidement d'antennes plus simples pour la seule réception de la télévision qui aura quatre canaux. Ces antennes fonctionneront sans opérateur. Pour les services d'urgence, les réseaux privés et les services aux plates-formes de forage et aux explorations de minerai, il y aura des stations portatives et robustes.

Le Brésil fabriquera le plus possible le matériel du système, en particulier les stations terriennes. Finalement, tout le matériel terrien sera fabriqué au Brésil.

Par intérim, Embratel a inauguré en 1976 un service de communication par satellite entre les villes intérieures de Manaus et Boa Vista et le réseau national de télécommunications. GTE International Systems a fourni l'équipement terrien.

CANADA

Télésat Canada

Le satellite Anik I, lancé le 10 novembre 1972, sera remplacé en mi-1978 par le quatrième satellite de Télésat Canada. Ce satellite combinera les fonctions des Anik, c'est-à-dire 12 répéteurs à 6/4 GHz, avec celles de Hermès, qui fonctionne à 14/12 GHz. Les 12 répéteurs à 6/4 GHz auront chacun une puissance de 10 W, et une largeur de bande de 36 MHz. Tandis que Hermès possède un répéteur de 200 W, et un répéteur de 20W, tous les deux ayant une largeur de bande de 85 MHz; le nouveau satellite aura quatre répéteurs de 20W et de 72 MHz. Donc, à 14/12 GHz la puissance disponible diminuera de 220 W à 80 W, mais la largeur de bande totale augmentera de 170 MHz à 288 MHz. Le ministère des Communications a commencé avec Hermès. Le manque de tubes à onde progressive de 200 W dans le nouveau satellite indique l'abandon par le Ministère des expériences avec des petites stations terriennes.

L'Astro-Electronics Division de RCA construira le nouveau satellite pour un prix de 19,1 M\$. RCA Limitée de Montréal a reçu un contrat de 5,6M\$ pour des stations terriennes à 14/12 GHz.

CHILI

Le Chili aura, vers la fin de 1976, une liaison entre Santiago et Punta Arenas, sur le détroit de Magellan, via des stations standard d'INTELSAT.

COLOMBIE

La Colombie louerait 1/4 d'un canal de secours d'un INTELSAT IV pour la communication sur 50 circuits téléphoniques entre Bogota et l'île de San Andres, à 200 km à l'est du Nicaragua. Les antennes seraient de 10 ou 11 m de diamètre. On n'a pas encore décidé si l'on utiliserait ce canal d'INTELSAT IV ou le satellite brésilien pour la communication avec Tabatinga. Dans ce cernier cas, Tabatinga n'aura pas sa propre antenne mais sera relié par une ligne terrienne à Letica, où le Brésil aura une station terrienne.

DANEMARK

Le Danemark considère l'utilisation d'un satellite pour améliorer les communications avec le Groenland et pour la transmission de la télévision aux îles Féroé. Au Groenland, on pense mettre une petite station terrienne à chaque bout de la ligne de micro-ondes qui suit la côte occidentale de l'île. On trouve le tarif d'INTELSAT trop élevé et on soupçonne la fiabilité des Symphonie parce qu'ils sont des satellites expérimentaux. On préfère attendre l'OTS et l'ECS, deux satellites de l'Agence spatiale européenne.

On considère une liaison entre Thulé, Gorenland (76° nord, 68° ouest) avec le Canada par un satellite Anik. Ce serait, vraisemblablement, par le satellite de secours à 104° ouest parce qu'il est vu de Thule sous un angle d'élévation de 3° , tandis que le satellite opérationnel à 114° est vue sous un angle de seulement 2° .

Le Danemark appuie l'établissement de l'organisation Inmarsat, mais il ne participe pas aux projets Marots et Marisat.

ETATS-UNIS

Comstar

L'American Telephone and Telegraph Company (AT&T) et Comsat General, une filiale de la Communications Satellite Corporation (COMSAT) ont signé le 28 février 1973 un accord pour le lancement d'un système de trois satellites pour fournir des communications à l'intérieur des Etats-Unis, y compris l'Alaska, et Hawaii et Puerto-Rico. Comstar I a été lancé le 13 mai 1976 et stationné à 128°W. Comstar 2 et 3 vont le suivre vers la fin de 1976 et au début de 1978, probablement pour stationnement à 114°W et 93°W.

Les Comstar sont des variantes des Intelsat IV, fabriquées par Hughes. Chaque satellite a 24 répéteurs, chacun d'une capacité de 1200 circuits téléphoniques unidirectionnels, ou d'un canal de télévision, ou de 44,7 Mbit/s de données. Chaque répéteur a quatre niveau d'atténuation télécommandés.

AT&T et GTE (General Telephone and Electronics) auraient un système conjoint de sept stations terriennes de 30m, en Pennsylvanie, Illinois, Georgie, Californie (2 stations), Floride et Hawaii. Aucune station terrienne n'est planifiée pour le moment pour l'Alaska, ni pour Puerto-Rico. Les sorties de 12 répéteurs dans chaque satellite pourront être commutées entre les antennes dirigées vers l'Alaska, Hawaii et Puerto Rico. Les canaux des satellites ne seront pas loués séparément, comme les canaux des Anik, mais ils seront intégrés dans les services normaux de l'AT&T et de la GTE.

DEFENSE SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEM

Le département de Défense des Etats-Unis (DOD) a lancé entre juin 1966 et juin 1968 une série de 26 satellites qui ont constitué la Phase I d'un programme de communications par satellites pour la défense. La Phase II a été marqué par le lancement de 2 satellites en novembre 1971 et 2 autres en décembre 1973. En 1978 et 1979 DOD lancera 4 satellites de la Phase III.

La Défense Satellite Communications System (DSCS) constitue une partie du Defense Communications System qui couvre le globe. Ce système est à

la disposition de tous les services de défense des Etats-Unis, de l'OTAN, les communications du Président des Etats-Unis, et le service de télécommunications diplomatiques du pays. La Phase III ajoutera le Worldwide Military Command and Control System (WWMCCS) et les Ground Mobile Forces (GMF).

Les satellites de la Phase III auront un faisceau qui couvrira toute la terre visible du satellite, et des pinceaux de 2° , 4° et 8° . Une capacité de calcul dans les satellites permettra l'AMRT par commutation entre les pinceaux, et une PIRE augmentée vers les usagers désavantagés. Les TOP (tubes à onde progressive) seront d'un plus grand rendement et d'une puissance de 10 à 40W.

FLEETSATCOM

La marine américaine (USN) aura en 1977-78 un système de quatre satellites stationnés à 100° W, 23° W, 75° E et 172° E pour une couverture du monde jusqu'aux latitudes 60° . Les applications sont la diffusion de messages à toute la marine, l'échange de données, un service téléphonique de sécurité. La modulation de tous signaux est numérique. Quatre stations terriennes, plus deux de rechange, avec des antennes de 4,9 m, communiqueront par les FleetSatCom avec les navires, les sous-marins et les avions de la marine américaine. Les fréquences utilisées seront de 7,9 et de 8,4 GHz. Chaque satellite aura 20 canaux avec une PIRE de 26 dBW et 2 avec une PIRE de 28 dBW. La largeur de bande d'un canal sera seulement de 25 kHz, largeur qui permettra la communication avec les avions et les sous-marins. C'est TRW Systems Group qui construit les FleetSatCom.

LES-8 ET LES-9

Le Lincoln Laboratory du Massachusetts Institute of Technology a développé une série de satellites pour l'aviation américaine (USAF). Le LES-6 (Lincoln Experimental Satellite 6) a été lancé le 26 septembre 1968. Le LES-7 n'était pas fini à cause des changements de programmes. Le laboratoire travaille actuellement sur les LES-8 et LES-9, une paire de satellites qui communiqueront directement entre eux à 36 et 38 GHz. Les orbites seront géosynchrones mais pas géostationnaires parce que les orbites seront

dans le plan de l'écliptique plutôt que dans le plan de l'équateur. Le résultat sera que chaque satellite fera un trajet dans le ciel entre 23°N et 23°S et sera visible une fois par jour dans les régions au nord de 77°N et au sud de 77°S . C'est une solution au problème de l'accès aux régions polaires que résout les orbites elliptiques et très inclinées des satellites MOLNYA. La longitude de chaque satellite restera constante à l'intérieur de $\pm 0,15^{\circ}$, le LES-8 à $116,3^{\circ}\text{W}$ et le LES-9 à $26,3^{\circ}\text{W}$, c'est-à-dire à une séparation de 90° de longitude. Le LES-8 sera visible toujours d'une grande région du Pacifique et les LES-9 de la plupart de l'Atlantique.

Les satellites utiliseront les fréquences 36 et 38 GHz pour les communications entre eux et vers la terre, les bateaux et les avions équipés pour servir comme postes de commande. Pour la communication avec les avions en général, les satellites employeront les fréquences UHF de 225-400 MHz. Chaque satellite aura trois antennes. Un satellite peut diriger une antenne parabolique avec une largeur de faisceau de $1,15^{\circ}$ vers un point voulu sur la terre ou vers l'autre satellite pour la communication à 36-38 GHz. Egalement pour la communication à 36-38 GHz, chaque satellite aura un cornet avec une largeur de faisceau de 10° (rappelons que la terre sous-tend un angle de 17° au satellite). Pour les communications aux avions à 225-400 MHz chaque satellite aura une rangée de dipôles qui produira un faisceau d'une largeur de 35° .

La source d'énergie dans chaque satellite pendant la période d'éclipse, qui arrivera chaque jour à cause de l'orbite écliptique, sera deux générateurs thermoélectriques à radio-isotopes. Chaque générateur pèsera 36,3 kg et livrera 145 W au début de sa vie et 125 W après cinq ans.

SATCOM

RCA (RCA Global Communications et RCA Alaska Communications) est en train de lancer trois satellites Satcom, analogues à ceux de Intelsat. Le but est la fourniture de canaux aux Etats-Unis, y compris l'Alaska, Hawaii, et Puerto-Rico. Chaque satellite a 24 canaux d'une largeur utilisable de 34 MHz et une PIRE de 26 à 32 dBW. La vie planifiée est huit ans. Satcom I était lancé le 2 janvier 1976, Satcom 2 le 26 mars 1976, et Satcom 3 doit les

suivre en 1977. La construction des engins spatiaux est confiée à RCA Astro Electronics.

SBS

Satellite Business Systems a commencé sa vie comme CML Satellite Corporation, un consortium de Comsat General, Microwave Communications Incorporated, et Lockheed Aircraft. Les deux derniers partenaires se sont retirés du consortium, et sont remplacés par IBM et Aetha Life and Casualty Company. La Federal Communications Commission n'a pas encore donné son approbation à ce projet qui est très contesté à cause de la position extrêmement forte d'IBM dans le marché des ordinateurs.

Les satellites proposés communiqueront à 12-14 GHz afin de permettre le placement des stations terriennes à l'intérieur des villes. Il y aura huit répéteurs par satellite avec une largeur de bande de 54 MHz et une puissance de 20 W. Toute modulation sera numérique avec une capacité totale de 400 Mbit/s par satellite, ou de 11 375 circuits téléphoniques unidirectionnels de 32 kbit/s. (La norme du Système Bell est 64 kbit/s pour un circuit téléphonique en MIC ou modulation par impulsion et codage. Est-ce que SBS utilisera la modulation delta?). L'accès multiple sera par répartition dans le temps. La PIRE de 42 dBW vers la région peuplée permettra l'utilisation d'antennes terriennes de 5 m, tandis que la PIRE de 35 dBW vers la région moins peuplée exigera des antennes de 7m.

Le budget actuel du système est de 407 M\$, dont 175 M\$ pour des stations terriennes. Pour 1986, on envisage des milliers de stations terriennes sur les toits d'édifices commerciaux avec une valeur totale de 2,2 G\$, dont 945 M\$ pour des terminaux numériques, 310 M\$ pour des antennes, et 945 M\$ pour des émetteurs-récepteurs.

INDE

Une station terrienne, à 60% d'origine indienne, a inauguré les communications avec un satellite d'INTELSAT en février 1971. Une autre station, à 75% d'origine indienne, entra en opération en 1976.

EXPERIENCE SITE

L'ISRO (Indian Space Research Organization) mène actuellement une expérience très importante sur l'opportunité de l'utilisation d'un satellite pour la diffusion de la télévision aux 600,000 villages de l'Inde. La NASA a prêté son satellite ATS-6 à l'ISRO pour un an, entre le milieu de 1975 et le milieu de 1976, pour cette expérience. La station principale de 14 m émet sur 6 GHz et le satellite réémet sur 4 GHz et 860 MHZ. Il y a une station réceptrice de 10,6 m, une de 6,1 m et trois de 4,6 m. Chacune de ces stations alimente un émetteur VHF de télévision sur la terre. La partie principale de l'expérience consiste en l'installation de 2,400 stations de 3 m, dispersées dans six régions, 400 par région. Le paraboloïde en aluminium coûte \$350., mais on expérimente dans cinq villages un paraboloïde de terre couverte de ciment et de mailles d'aluminium. Cette "antenne de boue" coûte \$150. Toutes les stations terriennes étaient conçues et construites entièrement en Inde. Si un village n'a pas une bonne source d'électricité, on alimente la station de 3 m par un accumulateur de 24 V. La consommation est de 54 W.

INSAT

Les spécifications d'Insat, le satellite qui remplacera ATS-6, ne sont pas établies en définitive, mais on pense à un satellite capable de diffuser cinq canaux de télévision, chacun avec cinq canaux audio de cinq langues différentes. Le satellite doit aussi diffuser des programmes de radio et transmettre jusqu'à 8,000 circuits téléphoniques. On considère cinq pinceaux pour l'émission de la télévision vers cinq régions du pays, plus un faisceau couvrant tout le pays pour les télécommunications.

INDONESIE

L'Indonésie est en train de se doter d'un système de satellites fabriqués par Hughes Aircraft Company et très semblable au système de Télésat Canada. Un premier satellite sera lancé pendant le troisième trimestre de 1976 et un deuxième en 1978. Le but est de compléter le réseau de micro-ondes. On prévoit une demande de 3,200 circuits téléphoniques interurbains en 1978, dont 2,100 par micro-ondes et 1,100 par satellite; un autre canal du système reliera toutes les installations de la sûreté nationale avec des circuits de voix, de données et de télévision.

Le système comprendra 19 stations principales avec antennes de 9,8 m dont deux pourront émettre et recevoir la télévision, et les 17 autres ne pourront que la recevoir. La station maîtresse sera équipée pour 600 circuits téléphoniques pré-assignés sur demande. Les autres stations principales seront équipées pour 24 à 360 circuits préassignés et pour 2 à 15 circuits assignés sur demande. Le traffic léger passera par 21 stations de 7,3 m, chacune équipée pour 2 à 6 circuits assignés sur demande. En plus, 17 des 21 stations recevront la télévision. Dix stations de 4 m, pour usage industriel, pourront émettre et recevoir un circuit de voix ou de données assigné sur demande.

On a prévu des dépenses de 90 M\$. Mais on pense maintenant que le coût du système, incluant l'infrastructure terrienne, pourra s'élever à 290 M\$.

IRAN

L'Iran loue 90 circuits téléphoniques sur le satellite INTELSAT IV, au-dessus de l'Atlantique. Il louera à peu près le même nombre de circuits sur l'INTELSAT de l'Océan Indien quand il aura construit une deuxième station terrienne.

L'organisation de planification du gouvernement développe les spécifications d'un satellite national. Le plan, dans son état actuel, demande:

1. Deux répéteurs pour le trafic téléphonique de 5,000 villages concentré vers 500 stations terriennes de 5 m.

2. Quatre répéteurs de 36 MHz pour deux canaux de télévision commerciale et deux canaux de télévision éducative. Les stations terriennes seront petites et serviront pour capter la télévision pour réémission locale sur VHF. On débutera avec 1,000 stations, nombre qui augmentera à 7,000 après sept ans. Si la télévision éducative s'avère efficace, on pourra installer jusqu'à 20,000 petites stations terriennes. On considère la bande 14/12 GHz bien adaptée à ce service.
3. Les forces armées paraissent être satisfaites de la promesse de deux canaux.

L'Iran cherche à fabriquer dans le pays le plus possible de stations terriennes.

ITALIE

Sirio est un satellite expérimental entièrement construit en Italie qui sera lancé par la NASA vers la fin de 1977. Il aura un répéteur qui fonctionnera avec une largeur de bande de 1,5 ou de 35 MHz avec une puissance de 9 W. Les fréquences seront de 18 GHz en montant et de 12 GHz en descendant. Trois zones de couverture seront essayées: le nord de l'Italie; l'Europe; l'ouest de l'Europe et l'est des Etats-Unis et du Canada. Les expériences porteront sur la propagation et la communication. On étudiera (1) l'atténuation à 11,6 et à 17,4 GHz en fonction des conditions météorologiques, (2) l'atténuation relative de deux bandes latérales équidistantes de l'onde porteuse, et (3) la distorsion de phase des deux bandes latérales.

Les expériences de communication seront nommées "bande étroite" et "bande large". Dans les expériences de bande étroite de 1,5 MHz, on essaiera 12 sous-canaux de 100 kHz pour la téléphonie numérique à 64 kbit/s. L'expérience de bande large de 35 MHz transmettra un canal de télévision en modulation de fréquence. Les stations réceptrices auront le pouvoir de répondre pendant les émissions télévisuelles. L'Allemagne, le Canada, les Etats-Unis, la Finlande, la France et les Pays-Bas participeront à ces expériences.

La deuxième génération de Sirio aura un tube à onde progressive de 20 W, et la troisième génération en aura plusieurs par satellite. On pense à son utilisation pour la transmission fac-similé de journaux, les communications entre des ordinateurs et des centres de documentation, les bases de données, etc.

JAPON

Le Japon est actif dans tous les aspects de la recherche et du développement spatial, y compris les lanceurs. Il participe aux consortiums de satellites internationaux de INTELSAT, Inmarsat, et Aerosat. Son budget pour le programme spatial est 187 M\$/an, dont 156 M\$/an pour l'Agence nationale de développement spatial. Quatre lancements de satellites expérimentaux par la fusée N, un lanceur japonais, auront lieu entre 1975 et 1978. Trois autres lancements, par Thor-Delta 2914, de satellites plus lourds sont planifiés pour 1977 et 1978. Un de ces satellites fera des observations météorologiques, le deuxième servira aux télécommunications et le troisième à la diffusion de la télévision.

COMMUNICATIONS EXPERIMENTALES

Aeronutronic-Ford construit un satellite expérimental de communication en Californie en collaboration avec Mitsubishi Electric Corporation. Le satellite sera stabilisé sur un axe et fera 90 tours par minute. L'antenne sera stabilisée comme l'antenne d'Anik. Il y aura six répéteurs à 30/20 GHz et deux à 6/4 GHz, chacun d'une largeur de bande de 200 MHz. On utilisera chaque canal en mode numérique à 100 Mbit/s. L'antenne des répéteurs à 30/20 GHz couvrira les quatre îles principales et l'antenne à 6/4 couvrira tout le Japon. La plupart des antennes seront de 10 m, mais il y aura des stations mobiles de 2,5 m. La capacité totale sera l'équivalent de 4,000 circuits téléphoniques.

COMMUNICATIONS COMMERCIALES

La Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation développe un satellite pour remplacer le satellite expérimental de communications. Le concept est le même mais le nouveau satellite sera construit entièrement au Japon et lancé peu après 1980. Les répéteurs à 6/4 GHz auront une puissance de 6 W et les répéteurs à 20/30 GHz en auront une de 4 W. La capacité totale sera de 3 000 circuits téléphoniques plus 2 canaux de télévision. L'intérêt principal du satellite sera la communication avec les îles éloignées du pays et un service temporaire de communication en cas de désastre.

TELEDIFFUSION

General Electric construit le satellite de télédiffusion, près de Philadelphie, en collaboration avec Toshiba. Il aura trois tubes à onde progressive, chacune d'une puissance de 100 W. Un tube sera utilisé seulement en cas de panne d'un autre tube. Les répéteurs fonctionneront à 14/12 GHz et pourront donner une largeur de bande de 180 MHz, mais un tube fonctionnera sur une largeur de bande de 50 MHz et l'autre de 80 MHz. On essaiera de transmettre deux programmes de télévision sur la bande de 50 MHz. Le canal, avec la largeur de 80 MHz, servira pour des expériences de méthodes nouvelles, telle la télévision numérique avec 1 125 lignes. Il y aura plusieurs stations réceptrices de 4,5 m et jusqu'à 100 stations de 1,6 m pour la réception communale. Le lancement aura lieu au début de 1978. Le satellite sera stabilisé sur trois axes par trois roues de réaction.

MALAISIE

La Malaisie opère une liaison par satellite entre Kuantan, sur la péninsule malaisienne, et Kota Kinabalu, Sabah, sur l'île de Bornéo. L'INTELSAT a loué à la Malaisie un répéteur dans un satellite pour cinq ans, en se réservant le droit de préemption. Les terminaux ont des antennes de 13 m et peuvent transmettre la télévision et un supergroupe de circuits

téléphoniques. On envisage l'addition de quelques petites antennes portatives pour assurer un service de secours, pour liaisons d'urgence en cas de désastre et pour les communications avec les forages pétroliers.

Pour les communications internationales, la Malaisie a une station standard d'INTELSAT à Kuanta.

NORVEGE

La Norvège a étudié un système de communication par dispersion troposphérique à 2 GHz entre la terre et les stations de forage de pétrole et de gaz dans la Mer du Nord (160 à 400 km au large). Des émetteurs de 1 à 5 kw et des antennes de 8 m étaient envisagés. La demande, d'une fiabilité de 99,9%, a exigé l'utilisation de quatre trajets séparés du forage à l'endroit sur terre le plus proche de chaque forage. Quand INTELSAT a offert le prix très raisonnable de 500 k\$/an pour l'utilisation d'un demi-répéteur dans un satellite de secours, en réservant le droit de préemption, on a trouvé qu'un système de satellite était moins cher qu'un système de dispersion troposphérique pour plus de trois endroits sur la mer.

L'échéancier prévoit l'installation d'une antenne sur une plate-forme de forage en novembre 1975, une en janvier 1976 et une troisième en novembre 1976. On planifie l'installation d'une station terrienne au Spitzberg et on envisage des stations pour deux autres îles. La station principale, près de Stavanger, a une antenne de 8 m et a coûté 800 k\$.

On ne prévoit pas suffisamment de demande en télécommunications pour justifier un satellite domestique pour la Norvège.

Quatre bateaux norvégiens utiliseront le système Marisat. La Norvège sera un des propriétaires du système Immarsat avec 8% ou 9% des actions à cause de l'importance de sa flotte marchande.

PHILIPPINES

Les Philippines ont formé Domsat (Philippines) Inc. en 1975 pour exploiter un système de stations de satellite. Les actionnaires sont POTC (Philippines Overseas Telecommunications Corporation), PLDT (Philippines Long Distance Telephone Co.) et KBS (Kanlaon Broadcasting System). Le système pourra fonctionner à la fin de 1976.

Domsat n'as pas encore fait son choix entre la location d'un répêteur dans un satellite de secours d'Intelsat, pour 1 M\$/an, ou la location d'un répêteur dans le satellite indonésien. INTELSAT retiendra le droit de préemption de son répêteur et l'Indonésie n'a pas de satellite de secours. Il est probable que Domsat choisera INTELSAT.

Le système initial aura 15 stations. Le diamètre de l'antenne sera de 10 m. La station de contrôle à Manille pourra émettre et recevoir la télévision et, au début, aura une capacité de 60 circuits téléphoniques, un circuit par porteuse. Les 14 autres stations seront de deux types: récepteur de télévision comprenant jusqu'à 24 circuits téléphoniques, et récepteur de télévision seulement. Toutes ces stations devront être opérationnelles avant la fin de 1978 et on prévoit un besoin de cinq autres stations deux ans plus tard.

REPUBLIQUE FEDERALE ALLEMANDE

La RFA a commandité deux études sur l'opportunité d'un satellite pour la diffusion directe de la télévision et la réception par des stations à un coût de \$200. On pense que 1985 sera une date réaliste. Le concept de Siemens-MBB-SEL (MBB: Messerschmitt-Bölkow-Blohm, SEL: Standard Elektrik Lorenz) consiste en un satellite de quatre canaux à 14/12 GHz, chacun d'une puissance émise de 354 W et d'une largeur de bande de 30 MHz. La structure serait semblable à celle du STT: stabilisée sur trois axes et avec des panneaux solaires en rotation constante vers le soleil. Les panneaux solaires seraient cinq fois plus importants que ceux du STT en vue des besoins en énergie élevés, soit une puissance de 5 kW. Le satellite n'aurait aucun accumulateur pour combler le manque

d'énergie pendant la période d'éclipse chaque nuit environ, durant les équinoxes. Pour cette raison, on envisage de stationner le satellite à 15° ouest, afin que l'éclipse commence après une heure du matin, heure allemande.

Les stations émettrices terriennes auraient des antennes de 6 m. Pour les récepteurs, une antenne de 0,7 m pourrait être suffisante.

La Société pour la recherche spatiale (Gesellschaft für Weltraumforschung m.b.H.) a commencé plusieurs programmes de recherches spécifiques, surtout sur l'utilisation de fibres de carbone en polymère comme matériel de construction.

CHAPITRE 5

LA COMMUNICATION PAR SATELLITE: ASPECTS TECHNIQUES & FONDAMENTAUX

Dans ce chapitre, les éléments techniques essentiels des systèmes de communication par satellite sont présentés. En plus de faire comprendre le fonctionnement des systèmes existants ou envisagés dans l'avenir, ce chapitre vise à expliciter les relations fondamentales qui régissent les différentes techniques utilisées dans les communications par satellite. On s'est efforcé d'aborder les questions d'un point de vue fondamental, et aucune connaissance spéciale n'est prérequisée pour la compréhension du texte.

5.1 BILAN DE LIAISON, PROPAGATION ET BRUIT

Cette section traite des éléments entrant dans le bilan énergétique qui existe dans une liaison radio électrique entre le satellite et les stations au sol. Les notions de puissance rayonnée, gain d'antenne , affaiblissement, etc, sont passées en revue en vue de calculer la puissance reçue à une antenne au sol. Les pertes diverses subies par l'onde électromagnétique entre le satellite et la terre et qui apparaissent sous l'effet de "bruits" sont examinées, et les notions de facteur de bruit, température de bruit, etc, introduites, ce qui permet d'établir les expressions habituelles des rapports signal à bruit. Enfin quelques propriétés du milieu, les bandes fréquences utilisées pour les communications spatiales ainsi que les normes d'interférences permises avec les systèmes terrestres sont mentionnées.

5.1.1 BILAN DE LIAISON

Le bilan de liaison est le bilan énergétique qui relie les gains et les pertes encourues dans une liaison entre deux stations. Il permet de déterminer le rapport signal sur bruit au récepteur à partir des principales caractéristiques du milieu de propagation et des équipements des stations.

5.1.1.1 EQUATION DES TELECOMMUNICATIONS

L'équation des télécommunications permet de calculer la puissance reçue en fonction de la puissance transmise et des caractéristiques des antennes.

Considérons un émetteur équipé d'une antenne isotrope, c'est-à-dire qui irradie la puissance uniformément dans toutes les directions. Si P_t est la puissance transmise, alors le flux de puissance ou densité de puissance (en W/m^2) à une distance d est égal à $P_t/(4\pi d^2)$. Cependant, une antenne sert à concentrer et à focaliser l'énergie électromagnétique en un faisceau dirigé vers le récepteur.

Cet effet de concentration est évalué en assignant à l'antenne un gain G_t par rapport à la radiation isotropique. La densité de puissance effective à une distance d est donc

$$\frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (5.1)$$

Le produit $P_t G_t$ est la puissance rayonnée apparente (P.A.R.) ou puissance isotrope rayonnée équivalente (P.I.R.E.) (en anglais "Equivalent isotropically radiated power, E.I.R.P.).

L'antenne de réception de surface équivalente A'_r prélève sur l'onde reçue la puissance $A'_r P_t G_t / (4\pi d^2)$. La puissance reçue à l'entrée du récepteur est donc

$$P_r = \frac{P_t G_t A'_r}{4\pi d^2} \quad (5.2)$$

La surface équivalente d'une antenne est reliée principalement à la forme et aux dimensions de l'antenne.

Par exemple, pour une antenne parabolique, la surface équivalente est de l'ordre de 0.5 à 0.6 fois la surface réelle. De plus, le gain d'une antenne G et sa surface équivalente A' étant reliés par la relation

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A' \quad (5.3)$$

où λ est la longueur d'onde, la puissance reçue P_r peut s'exprimer en fonction des gains ou des surfaces équivalentes des antennes* par

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (5.4)$$

$$P_r = P_t A'_t A'_r \frac{1}{\lambda^2 d^2} \quad (5.5)$$

Utilisant (5.3), l'affaiblissement de puissance P_t / P_r s'exprime donc en décibel par

$$\begin{aligned} \alpha_{dB} &= 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} \\ \alpha_{dB} &= 22 + 20 \log_{10} \left(\frac{d}{\lambda} \right) - G_t - G_r \end{aligned} \quad (5.6)$$

Où les gains d'antennes G_t et G_r sont exprimés en dB.

L'affaiblissement de propagation entre deux antennes isotropes $\alpha_{f.s.}$ est donné par l'expression

$$\alpha_{f.s.} = 22 + 20 \log_{10} \left(\frac{d}{\lambda} \right) \quad (5.7)$$

* Il y a réciprocité entre une antenne utilisée pour la transmission et la même antenne utilisée pour la réception.

On en déduit immédiatement que l'affaiblissement augmente avec la fréquence utilisée. La figure 5.1 donne l'affaiblissement en fonction de la fréquence pour la distance $d = 36\ 000$ km, correspondant à l'altitude des satellites stationnaires**. Il est important de remarquer que l'utilisation de fréquences élevées ne conduit pas nécessairement à un bilan de liaison moins avantageux. En effet, d'après (5.3), à surfaces égales le gain des antennes croît avec la fréquence et peut donc compenser l'augmentation de l'affaiblissement de propagation et des autres pertes.

5.1.1.2 PERTES DIVERSES

Un bilan de liaison réel doit tenir compte des pertes d'origines diverses qui s'ajoutent aux pertes théoriques.

Ces pertes sont:

- pertes entre la sortie de l'émetteur et l'antenne de transmission, entre l'antenne de réception et l'entrée du récepteur;
- pertes de propagation dans l'atmosphère et l'ionosphère;
- pertes de polarisation dues à une adaptation imparfaite entre les polarisations des antennes d'émission et de réception;
- pertes dues au dépointage des deux antennes;
- pertes dues à la pluie, à la brume, etc...

Dénotant l'ensemble de ces pertes par L , le bilan de liaison devient donc

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r}{L} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (5.8)$$

** En limite de couverture pour une antenne dont l'angle de site est 5 degrés, il faut ajouter 1.3 dB.

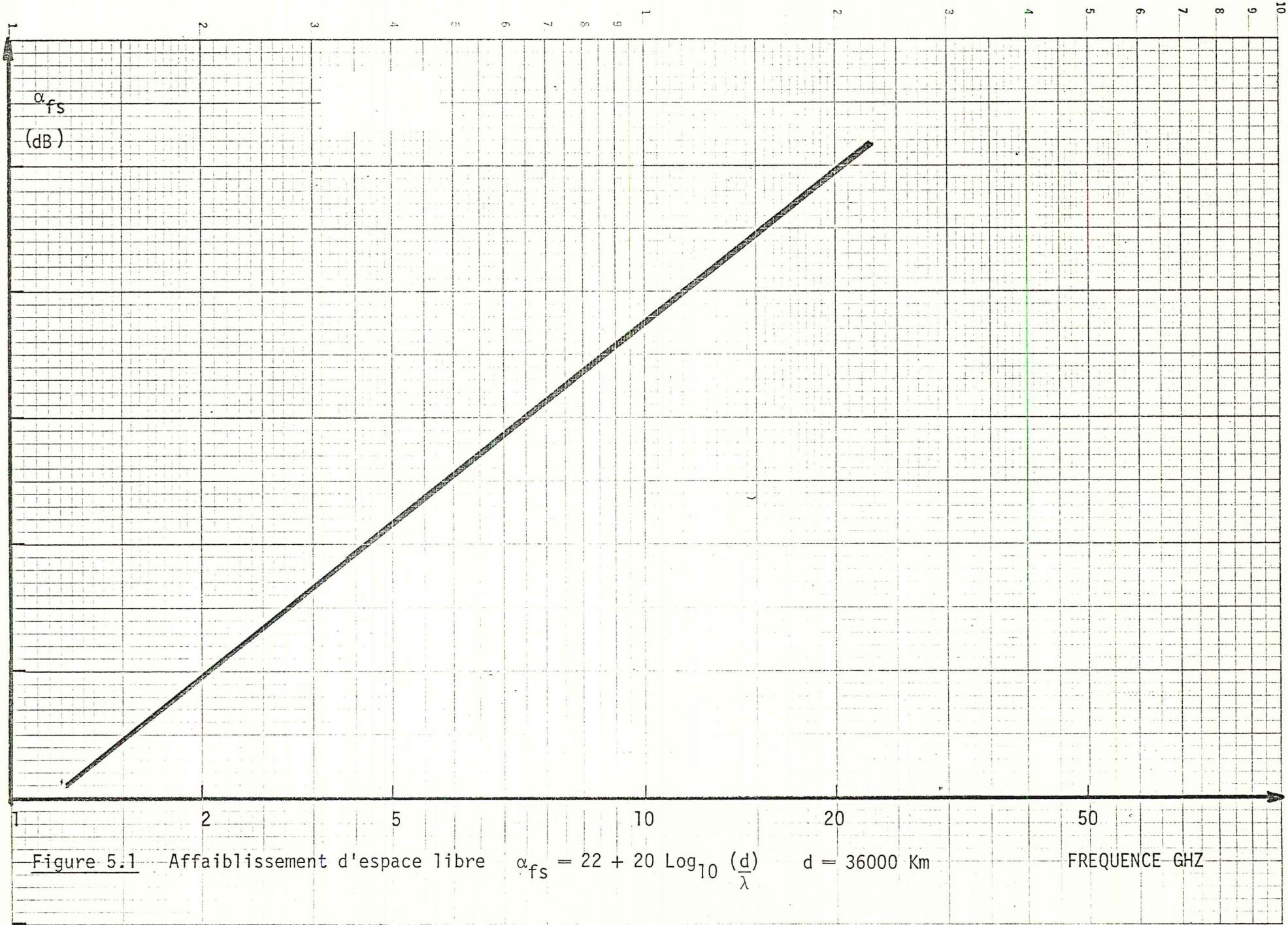


Figure 5.1 Affaiblissement d'espace libre

$$\alpha_{fs} = 22 + 20 \log_{10} \left(\frac{d}{\lambda} \right)$$

$$d = 36000 \text{ Km}$$

FREQUENCE GHZ

ou, exprimé en décibel

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L - 22 - 20 \log_{10} \left(\frac{d}{\lambda} \right) \quad (5.9)$$

Par exemple, soit une liaison satellite stationnaire/sol à la fréquence 12 GHz ($\lambda = 2.5$ cm). Les antennes au sol et à bord du satellite ont un gain de 39 dB et 41 dB respectivement. Calculons la puissance reçue si la puissance d'émission est égale à 200 watts (+23 dBW).

	<u>TERMES</u> <u>positifs</u>	<u>TERMES</u> <u>négatifs</u>
Puissance d'émission	23 dBW	
Gain d'antenne d'émission	41 dB	
Pertes à l'émission		1 dB
Pertes d'espace libre		205 dB
Pertes de polarisation		1 dB
Pertes de pointage		3 dB
Gain d'antenne de réception	39 dB	
Pertes à la réception		1 dB
TOTAL	103 dBW	-211 dB
Puissance reçue	-108 dBW	

5.1.2 TEMPERATURE DE BRUIT

Tout signal reçu par une antenne est accompagné de bruit. Le rôle du récepteur est d'amener le signal reçu à un niveau acceptable. Cependant, l'amplification effectuée au récepteur agit sur le signal et sur le bruit, et de plus ajoute des bruits créés par le récepteur. Il s'ensuit que l'amplification dégrade la qualité du signal incident.

Dans le but d'arriver à exprimer les rapports de signal à bruit, les paramètres (facteur de bruit, température de bruit) décrivant les effets des bruits sont passés en revue.

Le bruit thermique est associé au mouvement aléatoire des particules dans le milieu. Par exemple, la pression d'un gaz est l'effet global des molécules du gaz se déplaçant au hasard dans toutes les directions, frappant et rebondissant sur les parois du récipient contenant le gaz. L'énergie cinétique moyenne d'une molécule est proportionnelle à kT , où k est la constante de Boltzmann, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ j/k, et T la température absolue en kelvins.

En électricité, on observe des fluctuations similaires. Ici, les particules sont des ions et des électrons qui vibrent et se heurtent au hasard. Les électrons libres produisent un courant, et la valeur quadratique moyenne de ce courant est encore proportionnelle à kT . C'est le bruit thermique. Son spectre de densité de puissance N_0 est indépendant de la fréquence (bruit blanc) et est égal à kT

$$N_0 = kT \quad \text{W/Hz} \quad (5.10)$$

Le bruit total N dans une bande de fréquence B est donc

$$N = N_0 B \quad (5.11)$$

5.1.2.1 TEMPERATURE ET FACTEUR DE BRUIT D'UN RECEPTEUR

Le bruit créé par un récepteur est défini par son facteur de bruit ou sa température de bruit.

Soit un récepteur à la température ambiante $T_0 = 300$ K, de largeur de bande B_{IF} , et de gain de puissance G . Si le récepteur ne créait aucun bruit lui-même, la puissance maximum de bruit à la sortie, N' , ne dépendrait que du bruit présent à l'entrée du récepteur,

$$N' = G kT_0 B_{IF} \quad (5.12)$$

Cependant, le récepteur crée des bruits propres. La puissance maximale de

bruit à la sortie du récepteur est N_s , supérieure à N' . Le facteur de bruit est le rapport

$$F = \frac{N_s}{N'} = \frac{N_s}{G k T_0 B_{IF}} \quad (5.13)$$

Le facteur de bruit s'exprime en décibels, $F_{dB} = 10 \log_{10} F$.

Pour évaluer le bruit crée par le récepteur, on utilise la notion de température équivalente de bruit du récepteur T_e .

Supposant le récepteur non bruyant, c'est la température T_e d'une source de bruit branchée à l'entrée du récepteur, et qui donnerait le même bruit de sortie que ce récepteur, c'est-à-dire $G k T_e B_{IF}$. La puissance de bruit maximale N_s est donc

$$\begin{aligned} N_s &= G k T_0 B_{IF} + G k T_e B_{IF} \\ &= G k B_{IF} (T_0 + T_e) \end{aligned} \quad (5.14)$$

Utilisant (5.13) on obtient donc

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (5.15)$$

La figure (5.2) donne la correspondance numérique entre facteur et température ambiante $T_0 = 300$ K.

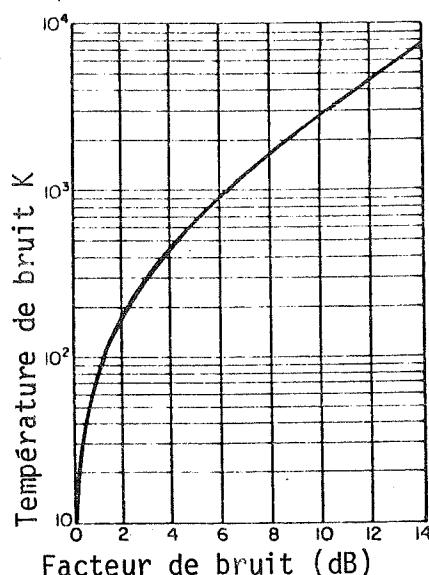


Figure 5.2 Température et facteur de bruit

La température équivalente de bruit d'un récepteur est en général différente de la température à laquelle est portée ce récepteur. Par exemple, pour un facteur de bruit $F = 6 \text{ dB}$, un récepteur à la température ambiante ($T_0 = 300 \text{ K}$) a une température équivalente $T_e = 900 \text{ K}$. Les récepteurs des stations au sol ont des températures équivalentes de bruit T_e comprises entre 10 K (maser) et 200 K (amplificateur paramétrique) alors que les récepteurs des satellites ont des températures T_e de l'ordre de 1000 K .

5.1.2.2 TEMPERATURE DE BRUIT D'ANTENNE

L'antenne capte les bruits d'origine externe qui se superposent au signal utile. Si N_0 est la densité spectrale de ces bruits (W/Hz), alors la température d'antenne T_A est

$$N_0 = k T_A \quad (5.16)$$

où k est la constance de Boltzmann.

La température d'antenne T_A dépend du gain d'antenne donc de son diamètre d'ouverture et de son angle de site (angle d'élévation) (voir Fig. 5.3).

Les bruits captés par une antenne ont des origines différentes, de nature atmosphériques et industrielles. Le spectre de densité de puissance des bruits industriels ne s'étend pas au-delà de 50 MHz , donc peut être ignoré pour les communications par satellites. Les autres bruits correspondent au rayonnement énergétique de tous les corps de température supérieure à 0 K . Donc la terre, l'atmosphère, le soleil, les étoiles, etc, se comportent comme des sources de bruit. Si une antenne était parfaitement isolée de ces bruits, la température de bruit de cette antenne serait égale à zéro. Naturellement cette antenne serait aussi parfaitement inutile car elle ne pourrait capturer aucun signal utile.

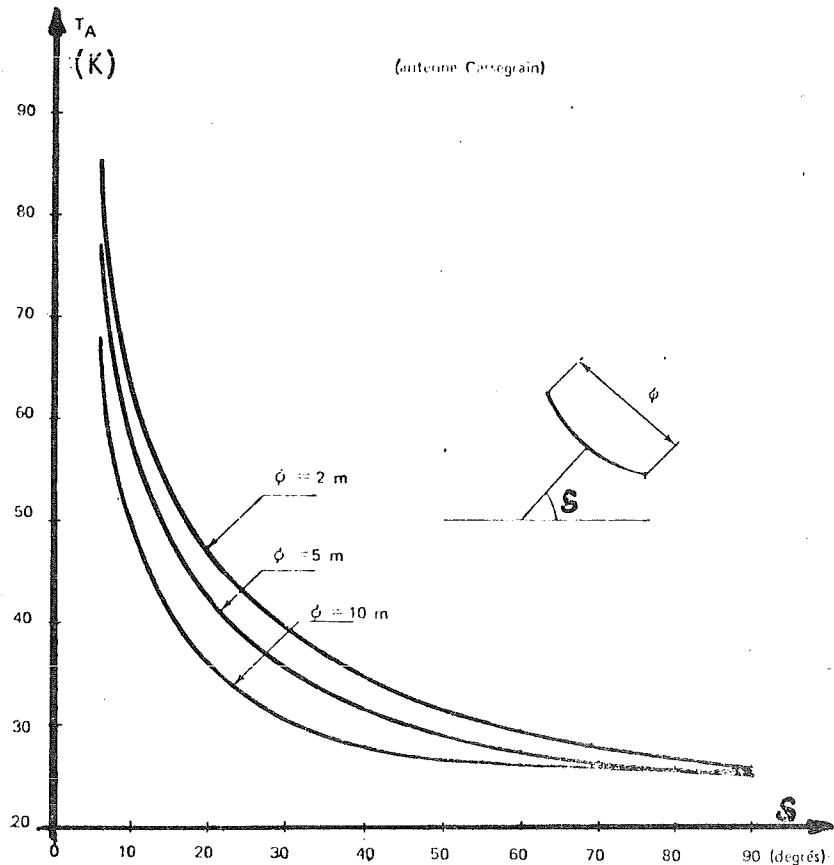


Figure 5.3 Température T_A en fonction de l'angle de site s et du diamètre de l'ouverture de l'antenne.

Le corps noir est un corps idéal, parfaitement absorbant. L'énergie rayonnée par un corps noir ne dépend que de sa température et de la fréquence considérée. Cependant, les corps ne sont pas parfaitement absorbants et l'énergie reçue est partiellement réfléchie. L'énergie rayonnée est donc inférieure à celle du corps noir. On peut définir une température équivalente, inférieure à la température réelle du corps, qui est celle du corps noir qui rayonnerait la même densité spectrale dans la bande de fréquence considérée.

Dans le cas d'une antenne de réception pointée vers un satellite on distingue le bruit provenant du ciel et le bruit dû au rayonnement propre de la terre.

Bruit provenant du ciel. On distingue le bruit cosmique, le bruit dû aux gaz atmosphériques et aux précipitations.

Le bruit cosmique appelé aussi parfois bruit de fond galactique est émis par les étoiles et les gaz interstellaires. Il varie en fonction inverse de la fréquence et sa décroissance est très rapide. Le bruit cosmique dépend de la région du ciel considéré. Dans les figures 5.4 et 5.5, il se situe entre les valeurs minimales et maximales, là où les radio-sources sont nombreuses. De plus, on constate une augmentation de bruit lorsque le lobe principal de l'antenne est dirigé vers une radio-source intense. Pour une radio-source de diamètre apparent ϕ et de température T_s , la température additionnelle de bruit T pour une antenne d'ouverture θ du lobe principal est donné par

$$T = T_s - \frac{\phi^2}{\theta^2} \text{ si } \phi < \theta$$

et

$$T = T_s \text{ si } \phi \geq \theta \quad (5.17)$$

Par exemple, dans le cas d'une antenne de 2 mètres de diamètre, la température additionnelle serait de 9000 K ou de 36 K si elle était pointée vers le soleil ou vers la lune.

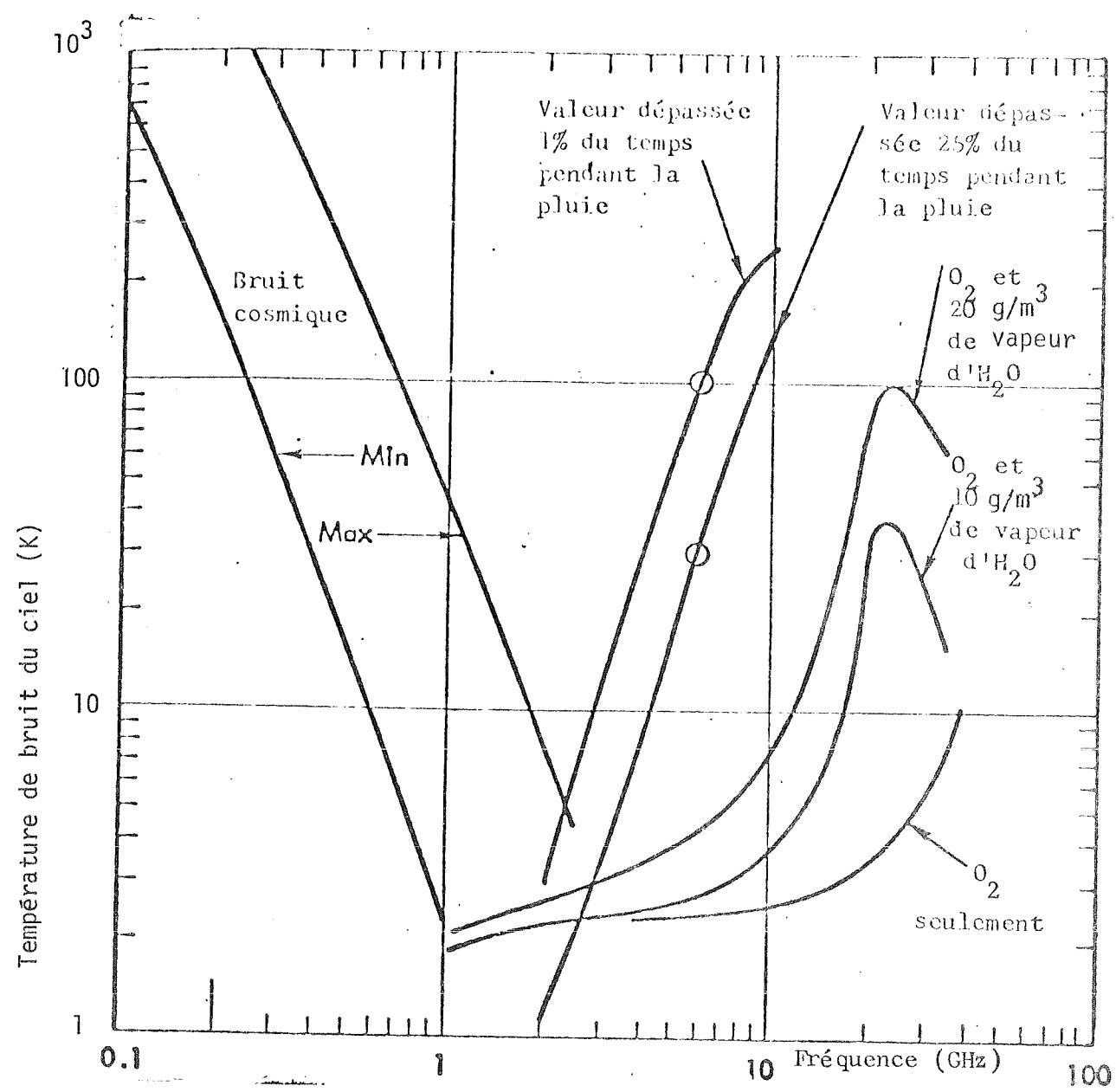


Figure 5.4 Température de bruit du ciel (au zénith)

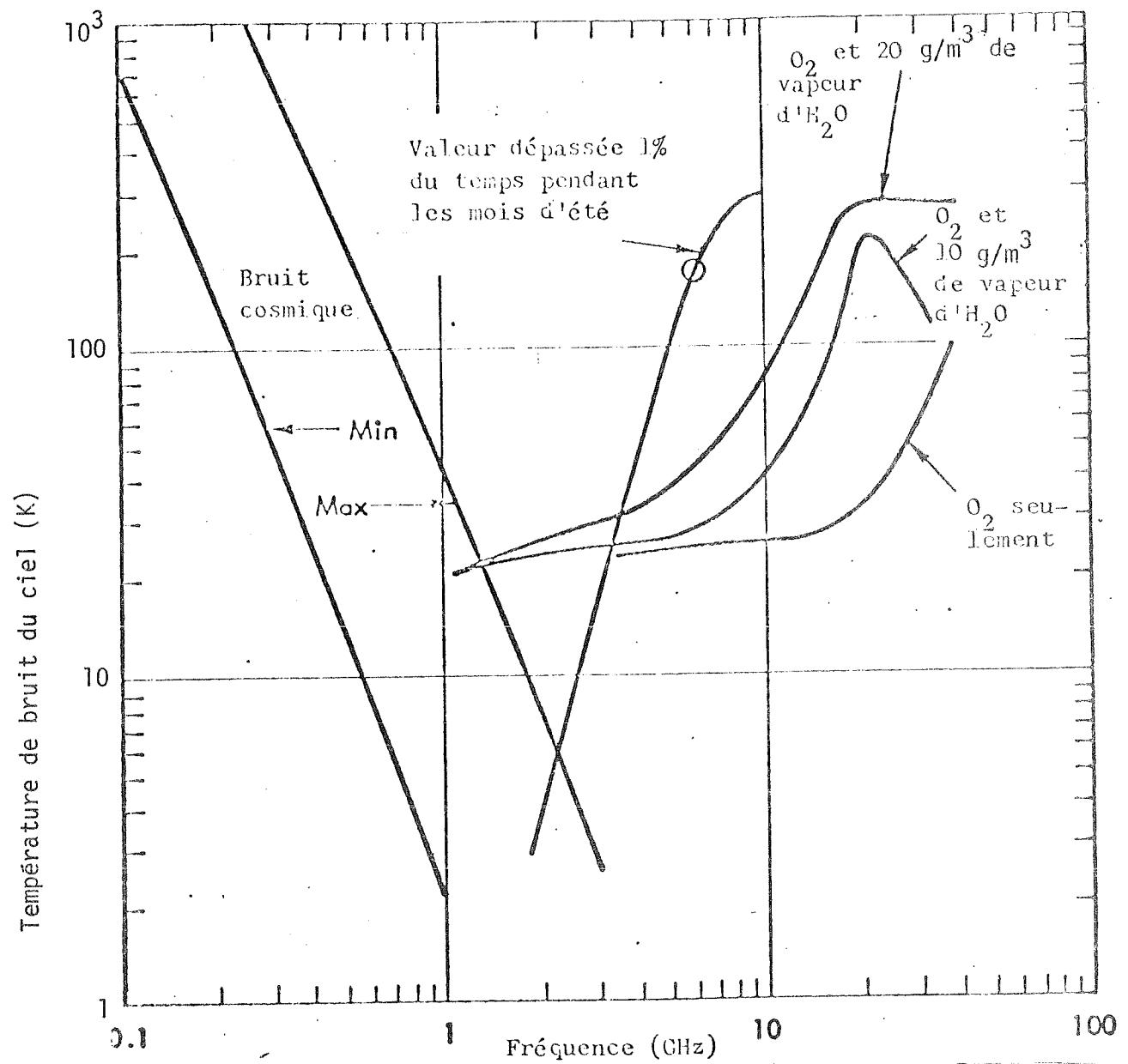


Figure 5.5 Température de bruit du ciel (élévation 5°)

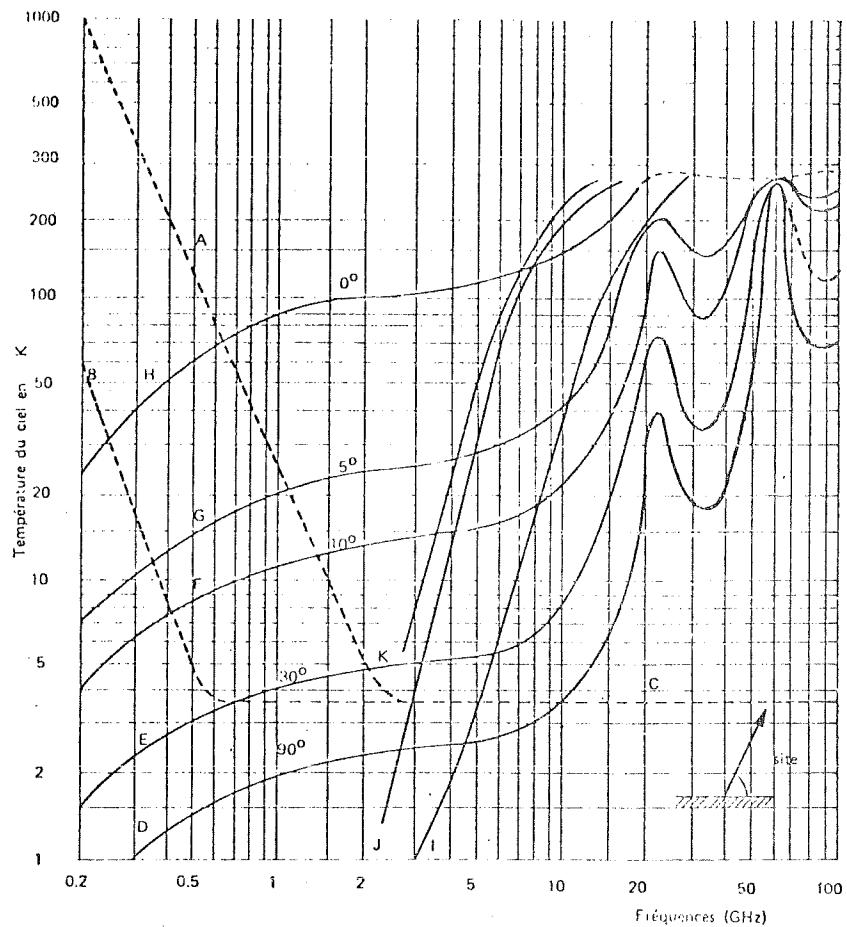
Dans la gamme des hyperfréquences, les principales sources de bruit rencontrées dans l'atmosphère sont celles dues aux gaz de l'air (surtout l'oxygène et la vapeur d'eau) et aux formations météorologiques (nuages, pluies, brume, etc). Lorsque les antennes sont protégées par des radomes, la pluie provoque la formation d'une mince pellicule d'eau sur ces radomes, ce qui se traduit par une absorption et un bruit, particulièrement élevé aux fréquences supérieures à 10 GHz. Les différents bruits atmosphériques varient avec l'angle de site des antennes. Les figures 5.4 et 5.6 donnent les températures de ces bruits pour différents angles de site de l'antenne.

Bruit du rayonnement propre de la terre. La température de bruit provenant du rayonnement propre de la terre est approximativement égale à la température réelle du sol (275 à 300 K). Pour une station terrienne le lobe principal de l'antenne est normalement pointé vers le ciel, mais la présence de lobes latéraux et arrières induit une température de bruit qui peut ne pas être négligeable pour les antennes à faible température de bruit. La température d'antenne des grandes stations terriennes est typiquement de l'ordre de 30 K par beau temps. Cependant, pour les antennes à bord des satellites, la température d'antenne est égale à celle de la terre, soit environ 300 K.

5.1.2.3 TEMPERATURE GLOBALE DE BRUIT

La température globale de bruit ramenée à l'entrée du récepteur tient compte de la température d'antenne T_A , et de la température équivalente de bruit du récepteur T_e . Il faut aussi ajouter l'effet de la ligne qui relie l'antenne au récepteur. Si T_L est la température réelle de cette ligne et α_L son affaiblissement, alors la température globale de bruit ramenée à l'entrée du récepteur T est donné par

$$T = \frac{T_A}{\alpha_L} + T_L \left(1 - \frac{1}{\alpha_L}\right) + T_e \quad (5.18)$$



Température apparente du ciel

(d'après M. THUL et J. VOGÉ - *Onde Electrique* - n° 479 - février 1967)

1. Bruit cosmique

- A: bruit galactique maximal
- B: bruit galactique minimal
- C: bruit de fond cosmique isotrope (3,5 sK)

3. Bruit dû aux précipitations

- I: pluie de 3,5 mm/h sur une épaisseur de 15 km
- J: pluie de 150 mm/h sur une épaisseur de 1,2 km
- K: pluie de 50 mm/h sur une épaisseur de 10 km

2. Bruit dû aux gaz de l'atmosphère

- D: angle de site 90°
- E: angle de site 30°
- F: angle de site 10°
- G: angle de site 5°
- H: angle de site 0°

Hoog D, C. et SIMPLACK

- R. A. Estimated sky temperature due to rain in the microwave band.

Figure 5.6 Température apparente du ciel.

Si la bande passante du récepteur est B_{IF} , alors la puissance totale de bruit d'entrée N est égale à

$$N = k T B_{IF} \quad (5.19)$$

La ligne qui relie l'antenne au récepteur prend de l'importance lorsque la température de bruit de l'antenne est faible. Ainsi, pour une station au sol ayant une température d'antenne T_A faible (30 K), il y a lieu d'utiliser un récepteur à faible température de bruit, par exemple un amplificateur paramétrique refroidi ($T_e \approx 10$ K), donnant une température globale de l'ordre de 70 K. Si on utilisait un amplificateur paramétrique non refroidi, ($T_e \approx 150$ K), la température globale serait de l'ordre de 200 K.

Dans le cas des récepteurs à bord des satellites, la température d'antenne T_A étant de l'ordre de 300 K, il devient inutile d'utiliser des récepteurs ayant une très faible température de bruit T_e . La température globale T est alors de l'ordre de 1000 K.

En conclusion, le niveau de bruit recueilli par l'antenne d'un récepteur varie en fonction de la fréquence et des conditions de propagation dans l'atmosphère terrestre. Il y a d'autant plus d'intérêt à soigner le récepteur et à diminuer son bruit que le bruit recueilli par l'antenne est faible.

5.1.3 MILIEU DE PROPAGATION

Nous avons vu que les effets du milieu de propagation se manifestent sous la forme de température de bruit d'antenne. Mentionnons à présent les perturbations apportées par le milieu de propagation.

Dans le vide, une onde électromagnétique se propage en ligne droite et subit seulement l'affaiblissement d'espace libre, alors que dans tout autre milieu elle subit d'autres perturbations: absorption, diffraction, rotation du plan de polarisation (Effet de Faraday). Dans le cas des satellites de communication, les deux milieux à considérer sont l'atmosphère et l'ionosphère et

les effets de ces milieux seront d'autant moins importants que la direction de propagation sera grande par rapport à l'horizontale locale (angle de site de l'antenne au sol).

L'atmosphère présente un certain nombre de fenêtres spectrales dans lesquelles l'atténuation de l'onde électromagnétique est très faible; ainsi, la transmission est très bonne aux fréquences inférieures à 15 GHz. Cependant, il faut tenir compte de l'atténuation apportée par la pluie, et dans tous les cas l'angle de site des antennes au sol doit être supérieur à 5 degrés.

L'ionosphère est une zone de forte densité électronique qui s'étend de 80 à 1000 km d'altitude. Une onde électromagnétique traversant l'ionosphère subit un certain nombre de perturbations, en particulier: l'atténuation, la réfraction, la dispersion et la rotation du plan de polarisation.

- L'atténuation ionosphérique est négligeable aux fréquences supérieures à 300 MHz.
- La réfraction ionosphérique étant de signe opposé à celle induite par l'atmosphère, l'effet global est réduit.
- La dispersion est causée par les variations de la vitesse de propagation en fonction de la fréquence. Par conséquent, les différentes composantes spectrales d'un signal subissent des variations de phase qui se traduisent par de la distorsion. Cette distorsion peut être appréciable pour les signaux large bande.
- La rotation du plan de polarisation (ou rotation de Faraday) d'une onde électromagnétique traversant l'ionosphère est causée par l'action du champ magnétique terrestre. Bien que négligeable au-dessus de 2 GHz, les effets de cette rotation peuvent être compensés par l'utilisation d'antennes à polarisation circulaire.

5.1.4 RAPPORT SIGNAL SUR BRUIT DANS LA BANDE UTILE

Ayant établi l'expression de la température globale de bruit, on peut à présent évaluer le rapport de la puissance reçue S à la puissance de bruit recueillie N dans la bande de réception B_{IF} , c'est-à-dire la largeur de bande de l'amplificateur à fréquence intermédiaire. Utilisant les relations (5.8) et (5.19), on obtient

$$\frac{S}{N} = \frac{P_t G_t G_r}{L k T B_{IF}} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (5.20)$$

Si la puissance S est celle d'une porteuse pure C (comme c'est le cas en modulation FM), on obtient

$$\frac{C}{N} = \frac{S}{N} = \frac{P_t G_t G_r}{L k T B_{IF}} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (5.21)$$

Dans certain cas, on cherche le rapport de la puissance reçue à la densité spectrale du bruit N_0 . Sachant que $N = N_0 B_{IF}$, on obtient

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_t G_t G_r}{L k T} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (5.22)$$

Les expressions (5.20) à (5.22) montrent que les rapports signal sur bruit augmentent avec la puissance transmise et le gain des antennes, et diminuent avec la température globale ramenée à l'entrée du récepteur.

Les systèmes de réception sont souvent caractérisés par un facteur de mérite G/T. C'est le rapport du gain d'antenne de réception G_r à la température globale de bruit ramenée à l'entrée du récepteur T , et s'exprime en dB/K. Le facteur G/T varie avec l'angle de site de l'antenne (voir Fig. 5.7) et est d'autant plus élevé que le système de réception est performant. Il mesure en quelque sorte la qualité du système de réception.

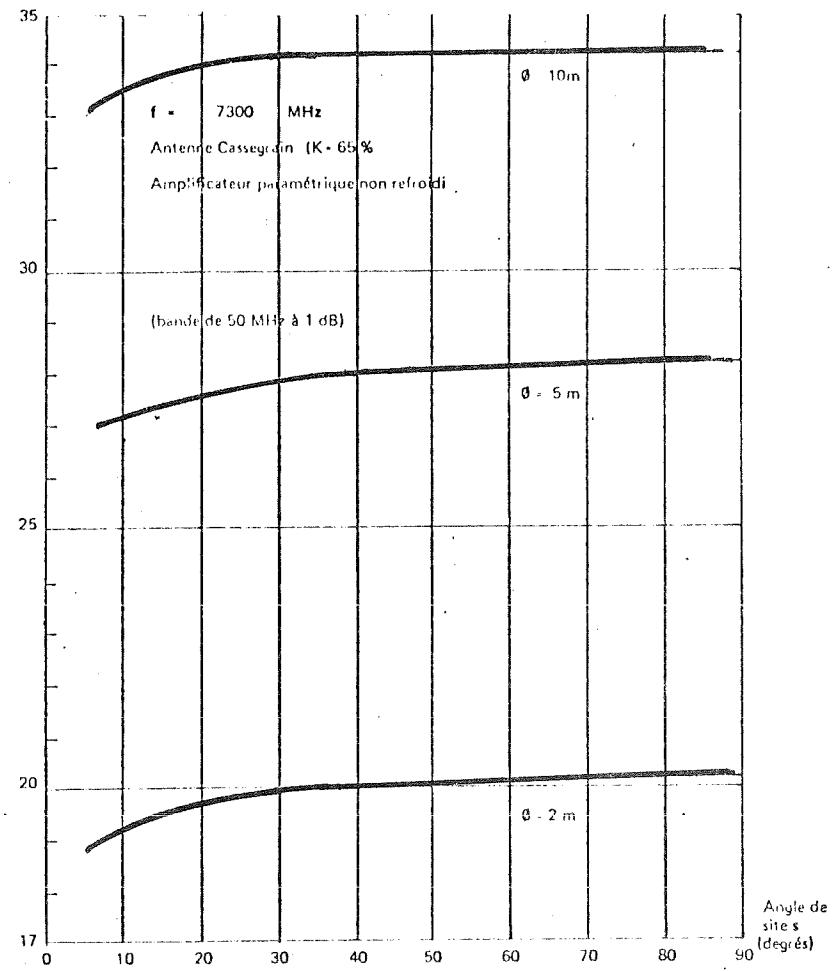


Figure 5.7 Facteurs de mérite en fonction de l'angle de site et du diamètre d'antenne.

Pour les stations normalisées du réseau INTELSAT, G/T est égal à 40.7.

Utilisant le facteur de mérite G/T dans les expressions des rapports signal à bruit (5.21) et (5.22), on obtient

$$\frac{C}{N} = \frac{P_t G_t}{L k B_{IF}} (G/T) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (5.23)$$

et

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_t G_t}{L k} (G/T) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (5.24)$$

Ce rapport est souvent exprimé en décibels de la façon suivante:

$$\frac{C}{N_0} = P.I.R.E. + G/T - k - \alpha_{f.s.} - L \quad (5.25)$$

où

P.I.R.E. = $P_t G_t$ puissance isotrope rayonnée équivalente

G/T = facteur de mérite du système de réception

k = constance de Boltzmann = -228.6 dBW/K.Hz

$\alpha_{f.s.}$ = affaiblissement en espace libre = $22 + 20 \log_{10} \left(\frac{d}{\lambda}\right)$

L = pertes diverses: polarisation, dépointage des antennes dues aux équipements, à la pluie, etc...

Par exemple soit une liaison satellite/terre à la fréquence de 7.3 GHz ($\lambda = 4.1$ cm). La puissance émise par l'émetteur est de 10 watts et l'antenne d'émission a un gain de 20 dB (ce qui donne une P.I.R.E. égale à 30 dBW). Le système de réception a un G/T égal à 19 dB/K. On établit le bilan suivant:

	<u>Termes</u> <u>Positifs</u>	<u>Termes</u> <u>négatifs</u>
P.I.R.E.	30 dB	
G/T	19 dB	
-k	228.6 dB	
Affaiblissement d'espace libre $\alpha_{f.s.}$		200.9 dB
Pertes de pointage		1.3 dB
Pertes de polarisation		0.4 dB
Pertes dues à la pluie		2.0 dB
Pertes d'émission		0.8 dB
Pertes à la réception		0.2 dB
TOTAL	277.6 dB	205.6 dB

Puissance de la porteuse à la densité spectrale du bruit $\frac{C}{N_0} = 72$ dB.

5.1.5 CHOIX DES FREQUENCES

La répartition des fréquences pour les communications spatiales est fixée par l'Union intertional des télécommunications (U.I.T.) selon les recommandations techniques du Comité consultatif international des radiocommunications (C.C.I.R). La conférence de Genève, en 1963, a défini la répartition des fréquences comprises entre 3 et 8.5 GHz, et celle de 1971 a défini la répartition des fréquences supérieures à 10 GHz. Pour ces répartitions, la terre a été divisée en trois régions distinctes:

- Région 1: Europe, Afrique, Moyen-Orient et URSS;
- Région 2: Amérique du Nord et du Sud;
- Région 3: Asie et Australie.

Le tableau 5.1 donne la répartition des bandes de fréquences comprises entre 3.4 GHz et 21.20 GHz destinées aux communications par satellites.

Tableau 5.1

REPARTITION DES FREQUENCES POUR LES COMMUNICATIONS PAR SATELLITE

Bandes de fréquences (MHz)	Liaison	Attribution
3400 - 4200	descendante	partagée
4400 - 4700	montante	"
5750 - 6425	montante	"
7250 - 7300	descendante	"
7300 - 7750	descendante	"
7900 - 7975	montante	"
7975 - 8025	montante	exclusive
8025 - 8400	montante	partagée
10950 - 11200	desc./mont.	"
11450 - 11700	descendante	"
12500 - 12750	desc./mont.	"
14000 - 14500	montante	"
14300 - 14500	montante	"
17700 - 21200	descendante	exclusive

La plupart des bandes de fréquences inférieures à 19 GHz attribuées aux satellites de communication sont partagées avec les réseaux de communications micro-ondes terrestres. Des interférences sont donc possibles entre les systèmes terrestres et spatiaux et le C.C.I.R. a publié des recommandations limitant les niveaux d'interférences mutuelles. En particulier:

- Le flux de densité de puissance produit à la surface de la terre par un satellite ne doit pas dépasser -130 dBW/m^2 (modulation FM), soit 10^{-13} W/m^2 , sans dépasser -149 dBW/m^2 dans toute bande de 4 kHz. Pour tout autre procédé de modulation le flux de densité puissance ne doit pas dépasser -152 dBW/m^2 (soit $1.6 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$) dans toute bande de 4 kHz. A ce flux correspond une

P.I.R.E. du satellite stationnaire de 10 dBW par 4 kHz. Si la modulation FM est utilisée, la limitation de la P.I.R.E. est de 13 dBW.

- La valeur moyenne de la P.I.R.E. transmise dans le plan horizontal par une station terrienne pointée vers le satellite ne doit pas dépasser +55 dBW dans toute la bande de 4 kHz. De plus, l'angle de site de l'antenne terrienne ne peut être inférieur à 3 degrés.

La recommandation limitant le flux maximum permissible à la surface de la terre défavorise les stations terriennes ayant de petites antennes. En effet, la valeur du rapport signal à bruit C/N que l'on peut atteindre en FM pour un flux maximum de -130 dBW/m^2 décroît avec les dimensions des antennes. Par conséquent, si on fixe une valeur minimum de C/N, les antennes au-dessous d'une certaine taille ne pourraient être utilisées. La figure 5.8 illustre cet effet pour des stations ayant une température effective de bruit de 150 K.

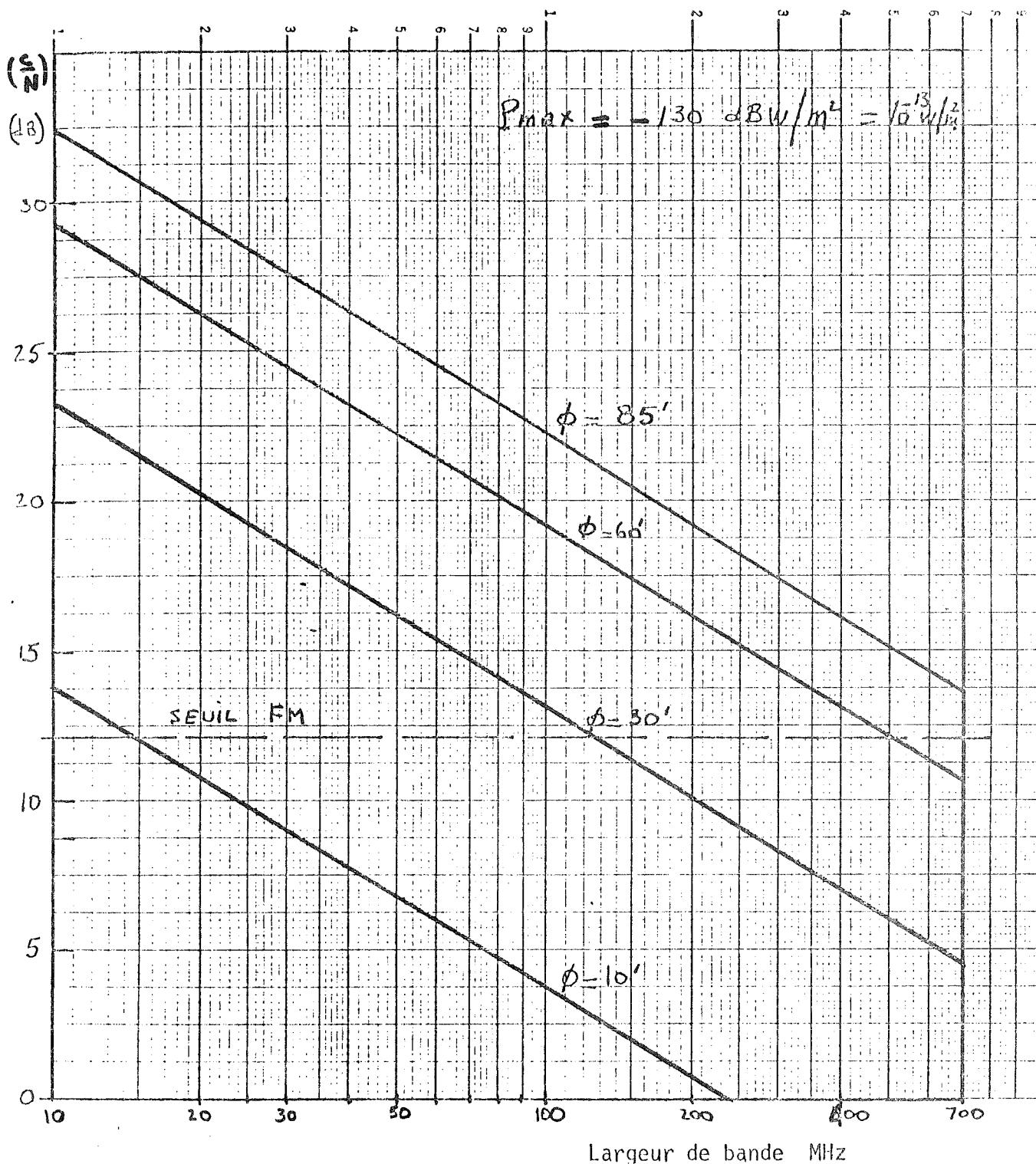


Figure 5.8 Valeur maximale du C/N permissible pour différentes tailles d'antennes.

5.2 PROCEDES DE MODULATION

5.2.1 Introduction

Nous avons vu qu'une onde électromagnétique à haute fréquence se propage relativement bien dans l'atmosphère et l'ionosphère. Cependant, les signaux électriques portant l'information à transmettre (les messages), ont une très faible largeur de bande et ne pourraient donc être transmis directement par l'antenne. On utilise alors une onde porteuse haute fréquence qui se propage bien dans le milieu et dont un (ou plusieurs) paramètre est modifié en fonction du signal basse fréquence qui représente l'information. Les paramètres de cette onde porteuse sont: l'amplitude, la fréquence et la phase. L'opération qui consiste à altérer ces paramètres par le signal basse fréquence s'appelle modulation et l'onde porteuse ainsi modifiée est appelée porteuse modulée. Dépendant du paramètre modifié on distingue la modulation d'amplitude (AM), la modulation de fréquence (FM) et la modulation de phase (PM).

L'opération de modulation étant effectuée à l'émetteur, au récepteur l'opération inverse ou démodulation restitue le signal utile en l'extrayant de l'onde porteuse. Dans la transmission de signaux analogiques (téléphone, musique, télévision...), les paramètres de l'onde porteuse varient de façon continue: c'est la modulation analogique. En modulation analogique, le problème du démodulateur en est un d'estimation continue du signal transmis en présence de bruits parasites. Aussi le critère de performance du démodulateur sera le rapport signal sur bruit après démodulation, $(S/N)_{out}$ dans la largeur de bande 0-fm du signal utile (bande de base).

Ce rapport définit en partie la qualité de la liaison. La qualité de la liaison dépend aussi du rapport signal sur bruit mesuré avant la démodulation $(S/N)_{in}$, c'est-à-dire à la sortie de l'amplificateur à fréquence intermédiaire, alors que le signal modulé occupe une largeur de bande B_{IF} . Cette largeur de bande B_{IF} dépend de la largeur de bande fm et du type de modulation utilisée. A part quelques exceptions (e.g. modulation AM à bande latérale unique), tout procédé de modulation entraîne une largeur de bande du

du signal modulé B_{IF} supérieure à fm. Les procédés de modulation analogiques sont souvent évalués par l'intermédiaire des rapports signal sur bruit avant et après démodulation. Le facteur de mérite

$$\gamma = \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \quad (5.26)$$

est d'autant plus grand que le procédé de modulation/démodulation est meilleur. Ce facteur de mérite permet donc de comparer les différents types de modulation analogiques entre eux.

Dans un grand nombre de cas, l'information à transmettre apparaît sous la forme de signaux numériques, comme par exemple en télégraphie, en transmission des données, etc. Dans ces cas, la modulation consiste encore à modifier un paramètre, mais ce paramètre ne peut prendre qu'un nombre fini M de valeurs possibles. Régulièrement, à chaque intervalle de temps T sec, l'émetteur transmet une valeur choisie parmi M possibles (une valeur du signal numérique) et la fonction du démodulateur consiste à déterminer ou décider à chaque T secondes cette valeur. (par exemple pour les signaux binaires il n'y a que 2 valeurs possibles, M = 2). La fonction du démodulateur est donc ici une fonction de décision.

Occasionnellement le démodulateur fera une décision erronée. Aussi la probabilité d'erreur par bit P_B , c'est-à-dire la probabilité de délivrer un bit erroné à la sortie du récepteur, caractérisera en partie le procédé de modulation/démodulation. Un procédé de modulation est d'autant meilleur que P_B sera faible pour une même énergie utilisée pour transmettre un bit.

La notion de modulation étant établie, les principaux types de modulation analogiques et numériques sont à présent passés en revue dans le contexte des communications par satellites.

5.2.2 MODULATION ANALOGIQUE

Le signal utile occupe la bande de fréquences 0-f_m et la largeur de bande de signal modulé est B_{IF}. Les deux principales sources de bruit sont: le bruit capté par l'antenne et le bruit thermique créé par le récepteur. L'effet global de ces bruits est modelisé par du bruit Gaussien, blanc de densité spectrale N₀ W/Hz, de sorte que dans une largeur de bande B la puissance du bruit est égale à N₀B watts.

5.2.2.1 MODULATION D'AMPLITUDE

En modulation d'amplitude, le signal utile m(t) modifie l'amplitude A_c de l'onde porteuse A_c cos(2πf_ct) de fréquence f_c.

L'onde modulée AM avec double bandes latérales s'écrit

$$y_{AM}(t) = A_c (1 + m(t)) \cos(2\pi f_c t) \quad (5.27)$$

avec |m(t)| < 1.

Dans le cas d'un signal sinusoïdal de fréquence f_m on obtient

$$y_{AM}(t) = A_c (1 + m \cos(2\pi f_m t)) \cos 2\pi f_c t. \quad (5.28)$$

m est inférieur à 1, s'exprime en % et s'appelle l'indice de modulation ou profondeur de modulation.

La largeur de bande du signal AM est

$$B_{IF} = 2 f_m \quad (5.29)$$

et la puissance du signal modulé d'entrée, c'est-à-dire avant démodulation est

$$S_{in} = \frac{A_c^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \quad (5.30)$$

La puissance du bruit d'entrée qui accompagne ce signal est

$$N_{in} = N_o B_{IF} \quad (5.31)$$

Dénotant par C la puissance de la porteuse $\frac{A_c^2}{2}$, le rapport signal/bruit d'entrée devient

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{in} = \frac{C \left(1 + \frac{m^2}{2}\right)}{N_o B_{IF}} \quad (5.32)$$

Utilisant un démodulateur d'enveloppe, le rapport signal/bruit de sortie est donné par

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = \frac{2m^2}{2 + m^2} \left(\frac{S}{N}\right)_{in} \quad (5.33)$$

Le facteur de mérite est donc

$$\gamma_{AM} = \frac{2m^2}{2 + m^2} \quad (5.34)$$

et vaut au plus 2/3 lorsque l'indice de modulation m est égal à 1 ou 100%.

La modulation AM n'est donc pas un procédé de modulation très efficace.

Il existe plusieurs variantes de la modulation d'amplitude: à double bande latérale sans porteuse, à bande latérale unique avec ou sans porteuse.

Chacune de ces variantes a ses avantages et inconvénients, mais en général la modulation d'amplitude n'est pas utilisée pour moduler l'onde porteuse dans les communications par satellite.

5.2.2.2 MODULATION DE FREQUENCE

En modulation de fréquence (FM), la fréquence instantanée ω_i de l'onde porteuse est proportionnelle à la valeur du signal utile $m(t)$. On a donc

$$\omega_i = \omega_c + k m(t) \quad (5.35)$$

où k est une constante de proportionnalité.

La déviation de fréquence ou excursion de fréquence Δf est le plus grand décalage de fréquence subi par la fréquence porteuse f_c .

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} k |m(t)|_{\max} \quad (5.36)$$

En Modulation de Phase (PM), la phase instantanée est proportionnelle à la valeur du signal utile $m(t)$, et le signal PM s'écrit

$$y_{PM}(t) = A_c \cos(\omega_c t + k_p m(t)) \quad (5.37)$$

où k_p est une constante de proportionnalité.

Les modulations FM et PM sont très similaires et il est facile de passer de l'une à l'autre. L'analyse du spectre d'une onde FM modulée par un signal quelconque $m(t)$ est en général très difficile, voire impossible. Aussi, pour fins d'analyse on considère $m(t)$ comme étant un signal sinusoïdal

$$m(t) = a \cos(2\pi f_m t) \quad (5.38)$$

on obtient alors

$$y_{FM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + m_f \sin 2\pi f_m t) \quad (5.39)$$

où m_f , l'indice de modulation FM, est défini par

$$m_f = \frac{\Delta f}{f_m} \quad (5.40)$$

La puissance moyenne de l'onde modulée est

$$C = \frac{A_c^2}{2}$$

et la largeur de bande selon la règle de Carson est donnée par

$$B_{IF} = 2 f_m (m_f + 1) \quad (5.41)$$

ou

$$B_{IF} = 2 (\Delta f + f_m) \quad (5.42)$$

Lorsque m_f est faible ($m_f < 0.5$) la modulation FM est dite à bande étroite et la largeur de bande est approximativement égale à $2 f_m$. La modulation FM est dite à bande large lorsque $m_f > 1$.

Le rapport signal/bruit à l'entrée du démodulateur FM, c'est-à-dire dans la bande de fréquence B_{IF} est donné par

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{in} = \frac{C}{N_0 B_{IF}} = \frac{C}{N_0 2 (\Delta f + f_m)} \quad (5.43)$$

Supposant la puissance de la porteuse beaucoup plus grande que la puissance du bruit (fonctionnement au-dessus du niveau de seuil), le rapport signal sur bruit à la sortie du

démodulateur (c'est-à-dire dans la bande de base 0-fm) est donné par

$$\frac{(S)}{N}_{out} = \frac{3}{2} m_f^2 \frac{C}{N_0 f_m} \quad (5.44)$$

ou encore

$$\frac{(S)}{N}_{out} = 3 m_f^2 (1 + m_f) \frac{(S)}{N}_{in} \quad (5.45)$$

On voit immédiatement que le rapport signal/bruit augmente avec l'indice de modulation, c'est-à-dire avec la largeur de bande occupée. Le facteur de mérite étant

$$\gamma = \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} = 3 m_f^2 (1 + m_f) \quad (5.46)$$

on aurait donc avantage à fonctionner avec une largeur de bande aussi grande que possible. Ceci est vrai à condition de préserver la condition énoncée plus haut, c'est-à-dire que la puissance de la porteuse soit nettement supérieure à la puissance du bruit. Comme la puissance du bruit d'entrée augmente avec la largeur de bande qu'il occupe, pour une puissance de porteuse C donnée, on voit qu'on ne peut accroître indéfiniment la largeur de bande de l'onde FM tout en bénéficiant du gain de modulation représenté par les équations (5.45) ou (5.46). La modulation FM possède un seuil au-dessous duquel les expressions (5.44) à (5.46) ne sont plus valides; il y a une très forte dégradation des performances, ce qui rend la modulation FM inutilisable.* Ce seuil varie avec l'indice de modulation comme le montre la figure (5.9). Il se situe à une valeur de $(S/N)_{in}$ d'environ 10 dB pour la FM à bande large. Ce seuil est une notion très importante de la modulation FM et dans tous

* Il existe certaines techniques d'extension de seuil qui permettent de travailler avec des valeurs légèrement inférieures au seuil.

les calculs on doit s'assurer qu'on fonctionne au-dessus du seuil.

PREACCENTUATION-DESACCENTUATION. Bien que le bruit qui accompagne le signal d'entrée soit blanc et Gaussien, le bruit après démodulation FM n'est plus blanc. En effet, l'opération du discriminateur (démodulateur) FM étant essentiellement une différentiation, le bruit de sortie du démodulateur a une densité spectrale parabolique, c'est-à-dire la puissance du bruit augmente avec le carré de la fréquence. Donc, si le signal utile $m(t)$ s'étend sur une bande $0-f_m$, toutes les composantes du signal $m(t)$ ne seront pas affectées uniformément; ce sont les composantes à fréquences élevées qui seront accompagnées du bruit le plus fort (voir figure 5.10). Ceci peut présenter un inconvénient majeur surtout dans la transmission d'une conversation téléphonique. En effet, une voie téléphonique occupe un spectre utile de 300 à 3400 Hz. La maximum d'énergie transmise se situe autour de 800 Hz et la quasi totalité de l'énergie (99%) se situe au-dessous de 3000 Hz. On voit donc que pour une liaison téléphonique, le bruit est le plus fort là où le signal utile est le plus faible. Ce phénomène qui n'est pas unique aux voies téléphoniques conduit à de la distorsion et des performances inégales dans la bande utile.

Pour remédier à cet effet indésirable du bruit, on renforce artificiellement, c'est-à-dire on préaccentue les composantes hautes fréquences du signal utile avant de moduler l'onde porteuse. Cette opération est effectuée à l'émetteur dans un filtre passe-

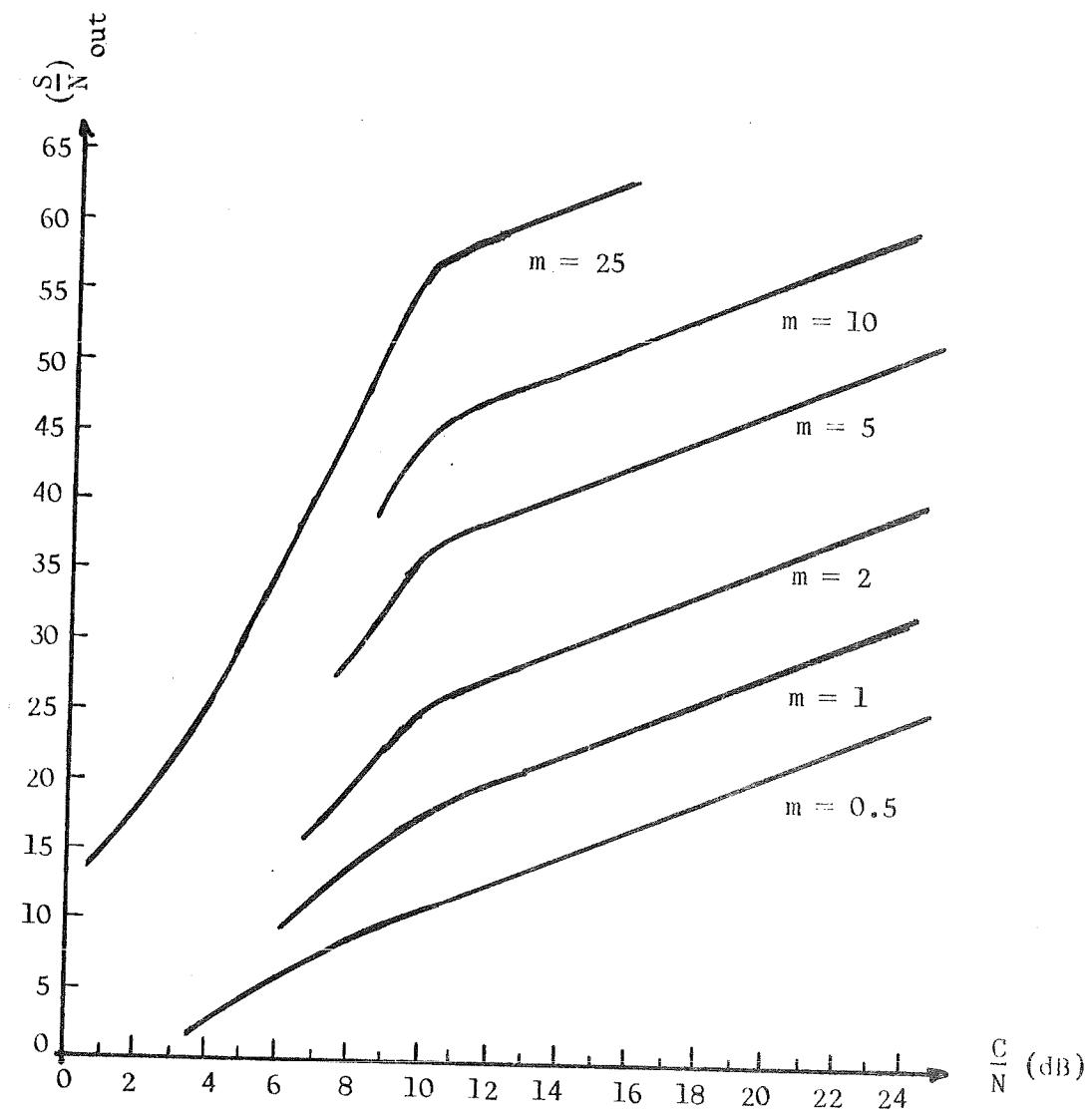


Figure 5.9 Rapports signal/bruit $(S/N)_{\text{out}}$ en fonction de $(S/N)_{\text{in}} = \frac{C}{N}$

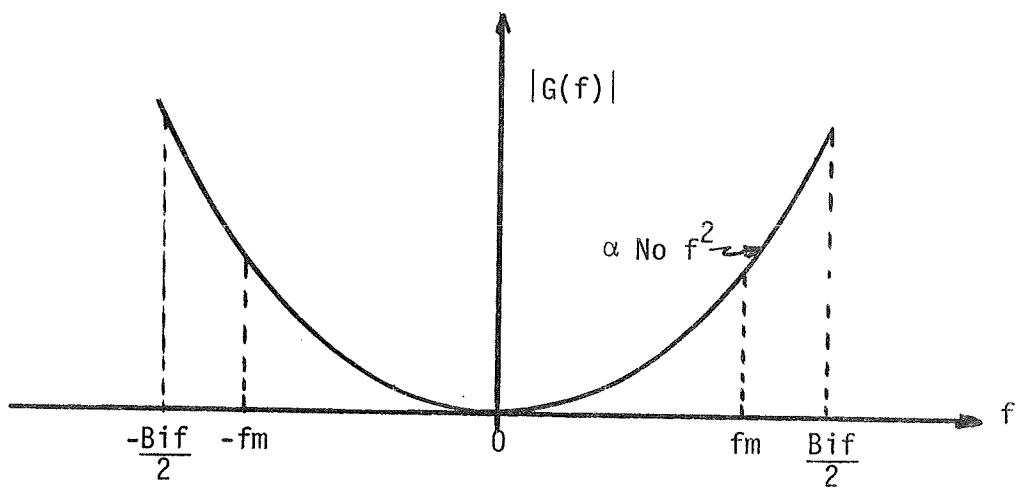


Figure 5.10 Spectre de densité de puissance du bruit FM démodulé

haut appelé filtre de préaccentuation. Au récepteur, après démodulation on obtient le signal préaccentué qu'il suffit de faire passer dans un filtre de désaccentuation (filtre passe-bas) pour récupérer le véritable signal utile. Les techniques de préaccentuation/désaccentuation sont universellement utilisées en FM, et en particulier dans les communications par satellite. Ces techniques donnent lieu à un gain de préaccentuation G_p par rapport aux systèmes non préaccentués. Les expressions des rapports signal/bruit (5.19) et (5.20) doivent donc en tenir compte. On a donc

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = \frac{3}{2} m_f^2 \frac{C}{N_0 f_m} G_p \quad (5.47)$$

Exemple 1: Transmission d'un canal de télévision

Le signal de télévision 525 lignes occupe une bande vidéo de 4.5 MHz. On admet en général une déviation de fréquence égale à 4 MHz. Pour transmettre la couleur on prend une largeur de bande légèrement supérieure à la bande de Carson, c'est-à-dire

$$B_{IF} = 2(f_m + 1.2 \Delta f) \quad (5.48)$$

on obtient alors une largeur de bande $B_{IF} = 18.6$ MHz.

Pour calculer le rapport S/N à la sortie, on peut poser $(S/N)_{in} = 14$ dB pour être au-dessus du seuil, et on peut prendre $G_p = 25$ dB pour inclure la préaccentuation et la pondération effectuée par l'oeil de l'observateur qui est moins sensible aux composantes de bruit de fréquences élevées. De (5.19) on a

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = \frac{3}{2} m_f^2 \frac{B_{IF}}{f_m} \left(\frac{C}{N_0 B_{IF}} \right) G_p \quad (5.49)$$

ce qui conduit à $\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = 45.9 \text{ dB}$. Ce rapport signal/bruit est le carré du rapport de la tension de crête du signal vidéo à la valeur R.M.S. du bruit dans la bande vidéo. Certaines autres définitions de ce rapport signal/bruit existent, selon qu'on considère ou non les impulsions de synchronisation du signal vidéo.

Exemple 2: Transmission de voies téléphoniques multiplexées en fréquence

Il est très rare qu'on ait à transmettre une seule voie téléphonique. Le plus souvent on transmet simultanément plusieurs voies téléphoniques sur une même porteuse. Pour cela, les bandes de fréquences des voies téléphoniques sont juxtaposées côte à côte, un espace à 4 kHz étant réservé à chaque voie. C'est ce qu'on appelle le multiplexage par répartition en fréquence (MRF, ou FDM "Frequency Division Multiplexing"), et c'est le multiplex qui module la porteuse haute fréquence. La première modulation du multiplex est AM à bande latérale unique avec une bande de garde égale à 4000 Hz - 3400 Hz = 600 Hz. La deuxième modulation pourrait être FM. On a alors FM-MRF.

On appelle groupe primaire un ensemble de 12 voies occupant 48 kHz. Il existe deux groupes primaires occupant les bandes 12-60 kHz et 60-108 kHz. Un groupe secondaire est formé de 5 groupes primaires (60 voies) et occupe 240 kHz. Un groupe tertiaire regroupe 5 groupes secondaires et comporte donc 300 voies téléphoniques. Le tableau 5.1 montre la répartition des fréquences dans la bande de base recommandée par le CCIR. On voit qu'un canal de TV occupe approximativement la même bande que 1000 voies téléphoniques

Tableau 5.1

voies téléphoniques	Bande de fréquence (kHz)	
	fréquence la plus basse	fréquence la plus haute (fm)
12	12	60
24	12	108
60	12	252
	60	300
120	12	510
	60	552
300	60	1300
600	60	2540
960	60	4028
1260	60	5636
	316	5564
1800	312	8204
2700	312	12338

Dans un multiplex en fréquence, transmis en modulation FM le calcul de la préaccentuation se fait en considérant la voie la plus haute, c'est-à-dire la voie la plus défavorisée par le bruit. Avec préaccentuation, la déviation de fréquence n'est plus la même pour toutes les voies du multiplex, la déviation de fréquence la plus élevée étant réservée pour la voie la plus haute de la bande du multiplex. Ces valeurs de déviation pour la voie la plus haute sont standardisées pour toutes sortes de configurations de multiplex. Le rapport signal/bruit par voie est donné par l'expression

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{voie}} = \frac{C}{2 N_0} \left(\frac{\Delta f_{\text{voie}}}{f_{\text{voie}}} \right)^2 \frac{G_t}{b} \quad (5.50)$$

où Δf_{voie} est la déviation de fréquence de la voie, f_{voie} la fréquence milieu et b la bande de fréquence de la voie. G_t est le gain de préaccentuation (environ 4 dB). Ainsi, par exemple, pour un multiplex à 120 voies, le facteur $\left(\frac{\Delta f_{\text{voie}}}{f_{\text{voie}}} \right)^2 G_t$ est standardisé à -1.82 dB pour la voie la plus haute.

5.2.2.3 PRODUITS D'INTERMODULATION

Dans les communications par satellite fonctionnant en mode FM-MRF, Les non linéarités dans le système donnent naissance à des fréquences parasites dans le multiplex. Ces fréquences parasites ou produits d'intermodulation proviennent de 3 sources: 1) non linéarités à l'émetteur, 2) non linéarités du milieu et temps de propagation différents, et 3) non linéarités au récepteur. Les non linéarités de phase et d'amplitude contribuent de façon égale à ce bruit d'intermodulation. Dans les systèmes FM-MRF lorsque le signal est fort, c'est le bruit d'intermodulation qui devient le facteur dominant et non pas le bruit thermique. Il y a donc lieu de choisir les équipements avec soin.

Une autre source de bruits et de distorsion provient de la détection d'une onde porteuse parasite, modulée ou non modulée, qui vient s'ajouter à la porteuse désirée. Ce problème d'intermodulation entre porteuses est particulièrement épineux dans les communications par satellite où plusieurs porteuses provenant de stations terriennes sont reçues et retransmises simultanément par le répéteur à bord du satellite. Dans ce système d'exploitation qui sera étudié dans la section 5.3 (Techniques d'accès multiple), une bande de fréquence du répéteur est assigné à chaque porteuse modulée par son multiplex propre. Naturellement, la largeur de bande du répéteur doit pouvoir accomoder toutes les porteuses.

Dans les systèmes multiporteuses FM, il existe plusieurs sources de distorsion d'intermodulation. La distorsion la plus importante provient des non linéarités des émetteurs

micro-ondes utilisés, en particulier les klystrons et les tubes à onde progressive (TOP). En effet, ces éléments sont caractérisés par des mécanismes de conversion AM/PM qui induisent de la distorsion. De plus, les TOP utilisés à bord des satellites ne sont pas linéaires dans leur région de saturation, là où le rendement est le meilleur. On réduit donc les produits d'intermodulation en faisant fonctionner le TOP dans une région linéaire, c'est-à-dire en reculant la puissance du tube en-dessous de sa puissance de saturation ("back off").

On voit donc que les produits d'intermodulation des systèmes FM-MRF sont néfastes à double titre: ils créent des bruits nuisibles, et ils consomment en quelque sorte une partie de la puissance de l'émetteur qui pourrait servir au signal utile.

5.2.3 MODULATION NUMÉRIQUE

En modulation numérique, la transmission de l'information résulte de la modification à intervalles réguliers d'un paramètre qui peut prendre M valeurs. Si $M = 2$ on a une modulation binaire. La probabilité d'erreur par bit P_B , la bande passante nécessaire et la complexité des équipements caractérisent le procédé de modulation.

5.2.3.1 MODULATION BINAIRE

On ne transmet que des "1" ou des "0" en agissant sur l'amplitude, la fréquence ou la phase d'une onde porteuse. A la réception, on doit décider lequel des deux symboles a été transmis. Lorsque la décision est basée sur une comparaison entre le signal reçu et chacun des deux signaux qui auraient pu être transmis, la démodulation est dite

cohérente. Pour cela, il faut établir un signal de référence ayant la même fréquence et la même phase que le signal ayant servi à l'émission. Lorsque cette référence ne peut être établie, la décision se fait par examen de l'enveloppe du signal reçu. La modulation est dite alors incohérente.

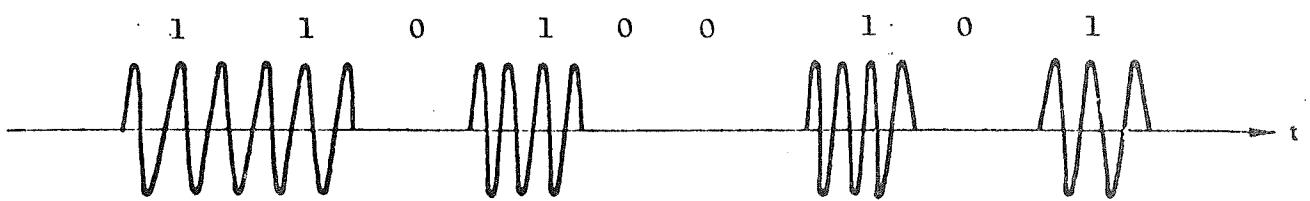
Les principaux procédés de modulation sont:

- Modulation par déplacement d'amplitude (MDA, ou ASK: "Amplitude Shift Keying"). Le cas le plus simple consiste à transmettre un signal d'amplitude déterminée pour un "1" (état de fonctionnement) et aucun signal pour un "0" (état zéro). Ce cas correspond à la modulation OOK ("On-Off Keying").
- Modulation par déplacement de fréquence (MDF, ou FSK: "Frequency Shift Keying"). A chacun des cas binaires, on fait correspondre une sinusoïde de fréquence déterminée et de durée T.

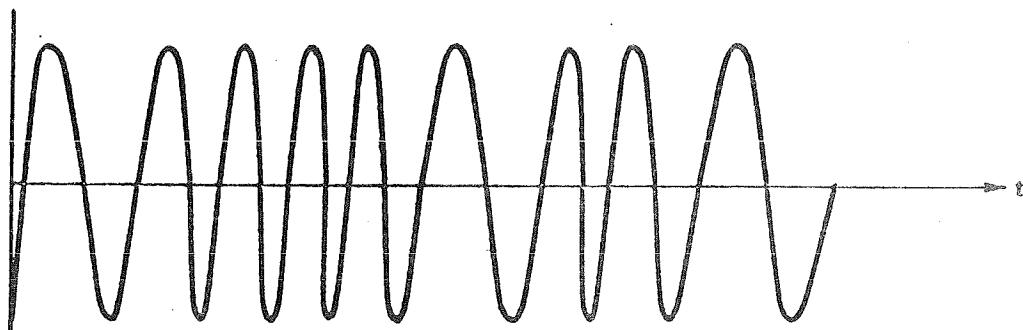
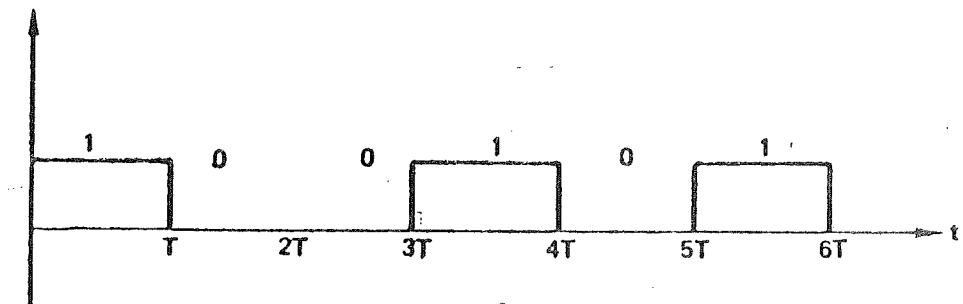
$$\begin{aligned} 1 \rightarrow & A \cos \omega_c t \\ 0 \leq t \leq T \\ 0 \rightarrow & A \cos \omega_0 t \end{aligned} \tag{5.51}$$

La Figure 5.11 montre les signaux obtenus pour ces différents procédés de modulation.

Pour tous ces procédés, on peut utiliser au récepteur la démodulation cohérente ou démodulation synchrone. Cette technique en principe très simple consiste à multiplier le signal reçu par un signal de référence c'est-à-dire par la fréquence porteuse utilisée à l'émetteur. Le signal produit est ensuite filtré passe-bas et comparé à un seuil. Si le



MODULATION D'AMPLITUDE (ON-OFF KEYING)



MODULATION FSK

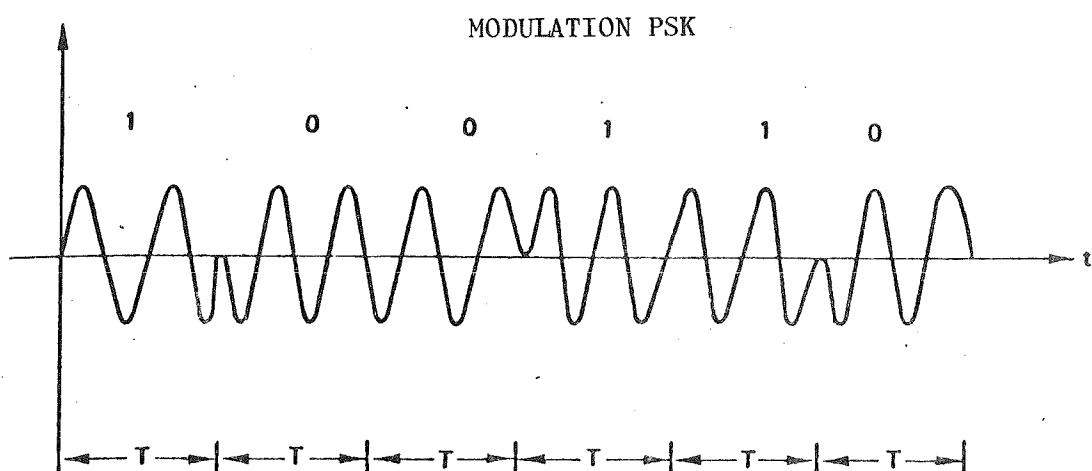


Figure 5.11 Principales modulations binaires

résultat est supérieur à la valeur du seuil, on décide qu'un 1 a été transmis. Sinon, on décide que c'est un 0.

Bien que très simple, ce procédé de démodulation est assez difficile à réaliser en pratique car le synchronisme de phase entre le signal de référence et le signal utilisé à l'émetteur est difficile à obtenir et à garder, surtout si la transmission s'effectue sur une grande distance comme dans le cas des satellites de communication. Certaines méthodes existent pour établir la référence de phase. En particulier:

- utilisation d'une onde pilote transmise par l'émetteur;
- utilisation d'une boucle de phase ("Phase locked loop") pour se verrouiller sur la phase de l'émetteur.

La démodulation cohérente est la procédure de démodulation la plus efficace. Pour la FSK, on peut utiliser une procédure de démodulation plus simple appelée détection d'enveloppe où les problèmes de synchronisation de phase sont évités; la performance est cependant un peu moins bonne qu'avec la démodulation cohérente.

Lorsqu'on veut éviter les problèmes de la démodulation cohérente, et cependant utiliser la PSK, on utilise une variante de cette modulation appelée modulation par déplacement de phase différentielle (MDPD, ou DPSK: "Differential Phase Shift Keying"). Avec ce procédé, on ne code que les changements qui apparaissent dans le train binaire. Par exemple, l'apparition d'un 1 laisse la phase inchangée par rapport à la phase dans l'intervalle précédent. L'apparition d'un zéro change la phase de 180° (voir Figure 5.12).

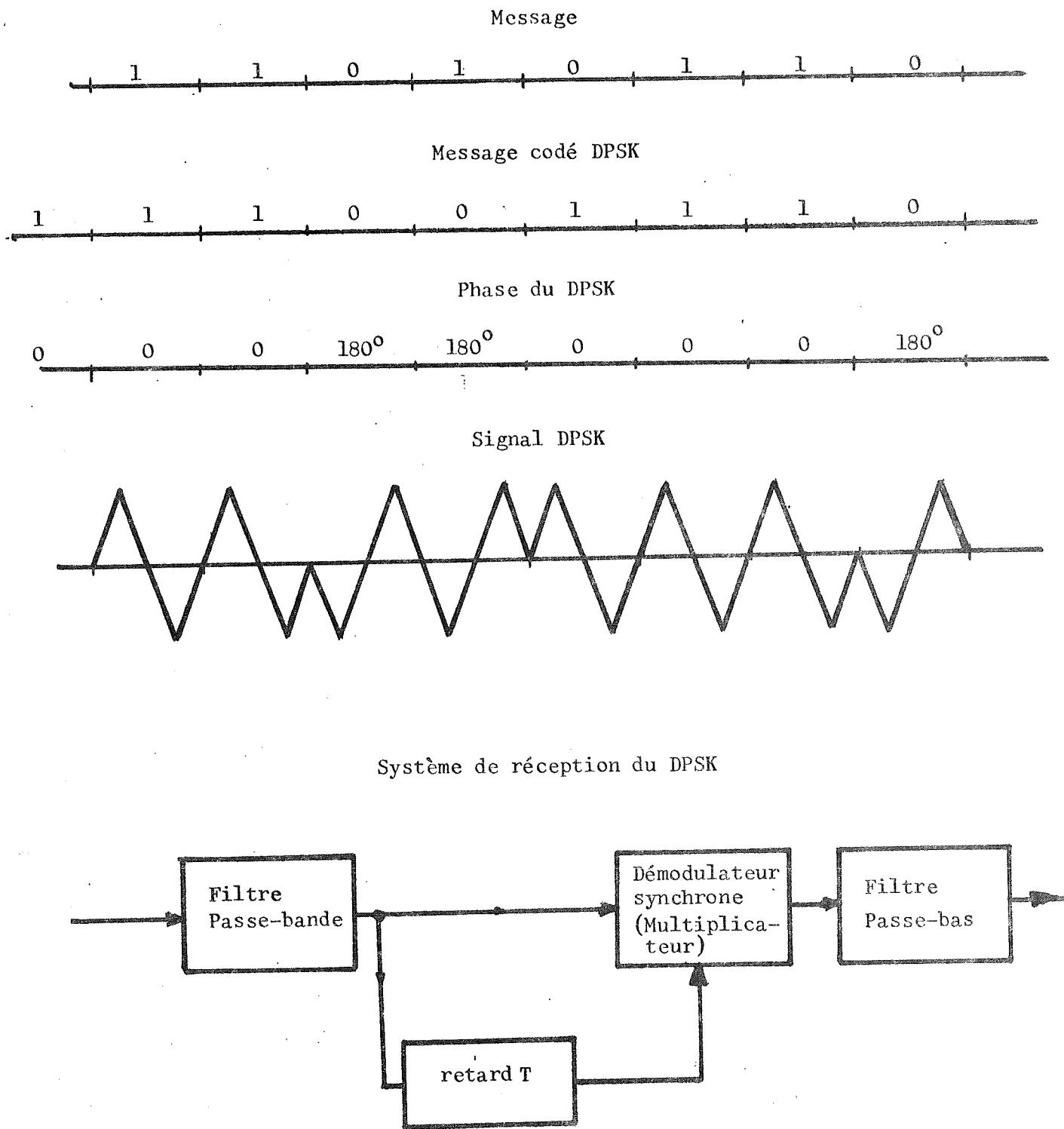


Figure 5.12 Modulation DPSK

Au récepteur, il est relativement aisé de reconnaître le changement de phase entre deux signaux consécutifs. Ainsi, un changement de phase de 180° correspond à un 0 et aucun changement de phase correspond à un 1. En modulation DPSK, les erreurs tendent à se produire par paires, car chaque bit reçu sert de référence au suivant. La modulation DPSK- est très utilisée et sa performance d'erreur se situe entre celle du PSK cohérent et celle du FSK non cohérent.

5.2.3.2 Probabilité d'erreur

En se plaçant dans l'hypothèse où les "0" et les "1" sont équiprobables, et en supposant que le bruit est blanc, Gaussien, de densité spectrale N_0 , l'expression générale de la probabilité d'erreur par bit P_B est

$$P_B = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}_c \left(\sqrt{\frac{E_b - E_{12}}{2 N_0}} \right) \quad (5.52)$$

dans laquelle E_b est l'énergie par bit d'information, E_{12} exprime la corrélation entre les deux signaux $s_0(t)$ et $s_1(t)$,

$$E_{12} = \int_0^T s_1(t) s_2(t) dt \quad (5.53)$$

et où

$$\operatorname{erfc}_c(u) = \int_u^{\infty} \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} dx \quad (5.54)$$

Le tableau 5.3 ainsi que la Figure 5.13 donnent les probabilités d'erreur pour les principaux procédés de modulation. On voit que le système le plus performant est le PSK cohérent, exigeant deux fois moins d'énergie par bit E_b que le système FSK cohérent pour une même probabilité d'erreur.

Tableau 5.3

<u>PROCEDE</u>	<u>PROBABILITE D'ERREUR</u>
PSK cohérent	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right)$
PSK avec décalage de phase ϕ	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0} \cos^2 \phi} \right)$
DPSK	$\frac{1}{2} \exp \left(-\frac{E_b}{N_0} \right)$
FSK cohérent	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2 N_0}} \right)$
FSK non cohérent	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{E_b}{2 N_0} \right)$
ASK cohérent	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{4 N_0}} \right)$

Le débit binaire R en nombre de bits par seconde est lié à la durée du bit par

$$R = \frac{1}{T} \quad (5.5)$$

La largeur de bande nécessaire B_{IF} est en pratique comprise entre R et $2R$. On choisit en général $B_{IF} = 1.5R$

Probabilité d'erreur P_B

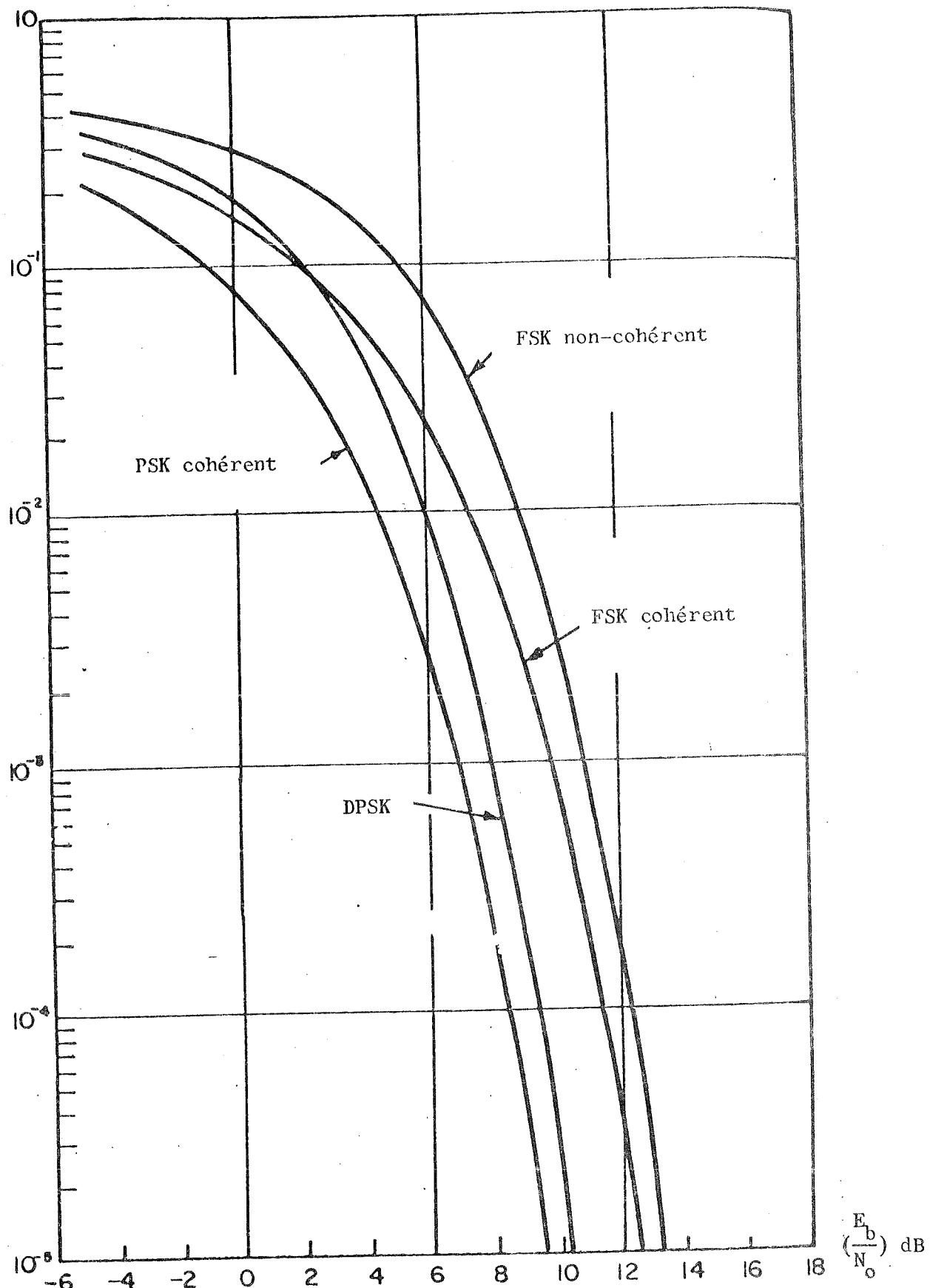


Figure 5.13 Probabilité d'erreur pour les principaux procédés de modulations numériques.

5.2.3.3 Procédés de modulation mult;niveaux

L'information est transmise à l'aide d'un paramètre qui peut prendre M valeurs au lieu de 2. Si T est la durée du message, alors le débit en bits/sec est

$$R = \frac{1}{T} \log_2 M \quad (5.56)$$

Dans le système de modulation 4 phases PSK (QPSK), un signal choisi parmi 4 possibles est transmis à chaque T sec. Ces 4 signaux sont:

$$s_1(t) = A \cos \omega_0 t \quad s_2(t) = -A \sin \omega_0 t$$

$$s_3(t) = -A \cos \omega_0 t \quad s_4(t) = A \sin \omega_0 t$$

La modulation QPSK donne lieu à une probabilité d'erreur plus élevée que la modulation PSK. Cependant, pour une largeur de bande donnée le débit binaire est deux fois plus élevé que pour la PSK. Cette augmentation du débit pour une même largeur de bande est générale pour la modulation par déplacement de phase à M niveaux (M PSK et M DPSK). Les procédés multi-niveaux sont surtout intéressants lorsque le système de transmission est limité en largeur de bande. Pour un taux d'erreur de 10^{-4} le tableau 5.4 donne la valeur de E_b/N_0 requise. Dans les communications par satellite, on se limite généralement à 4 niveaux (QPSK).

Tableau 5.4

M	E_b/N_0 pour $P_B = 10^{-4}$	
	M - PSK	M - DPSK
2	8.4	9.3
4	9.4	10.7
8	11.8	14.8
16	16.1	19.1

Un autre procédé de modulation est la modulation par déplacement de fréquence M niveaux MFSK, appelé aussi système M-orthogonal. La figure 5.14 donne la probabilité d'erreur en fonction de $\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N_0 R}$ pour différentes valeurs de M.

Ici, la probabilité d'erreur diminue lorsque M augmente, cependant la largeur de bande requise B_{IF} augmente avec M. Ce procédé permet donc d'échanger la probabilité d'erreur pour la largeur de bande. Il est donc intéressant dans les communications par satellite lorsque la liaison est limitée en puissance et non en largeur de bande.

5.2.3.4 Application numérique

Lorsqu'on utilise la modulation numérique, le paramètre important est la valeur de E_b/N_0 . Cette valeur se calcule facilement à partir du bilan de la liaison (Eq. 5.25 par exemple) en utilisant

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N_0 R} \quad (5.57)$$

La performance ou taux d'erreur est obtenu à l'aide des courbes des taux d'erreur correspondant au type de modulation choisi.

Soit, par exemple, une liaison descendante satellite/terre à 7.3 GHz donnant $C/N_0 = 72$ dB (voir exemple de la sous-section 5.4). Supposons la modulation FSK choisie avec un taux d'erreur de 10^{-5} . D'après la figure 5.13, il faut avoir $E_b/N_0 = 12.6$ dB. Utilisant (5.33) on a

$$\begin{aligned} R_{dB} &= (C/N_0) - (E_b/N_0) \\ &= 72 - 12.6 = 59.4 \\ R &= 870 \text{ bits/s} \end{aligned}$$

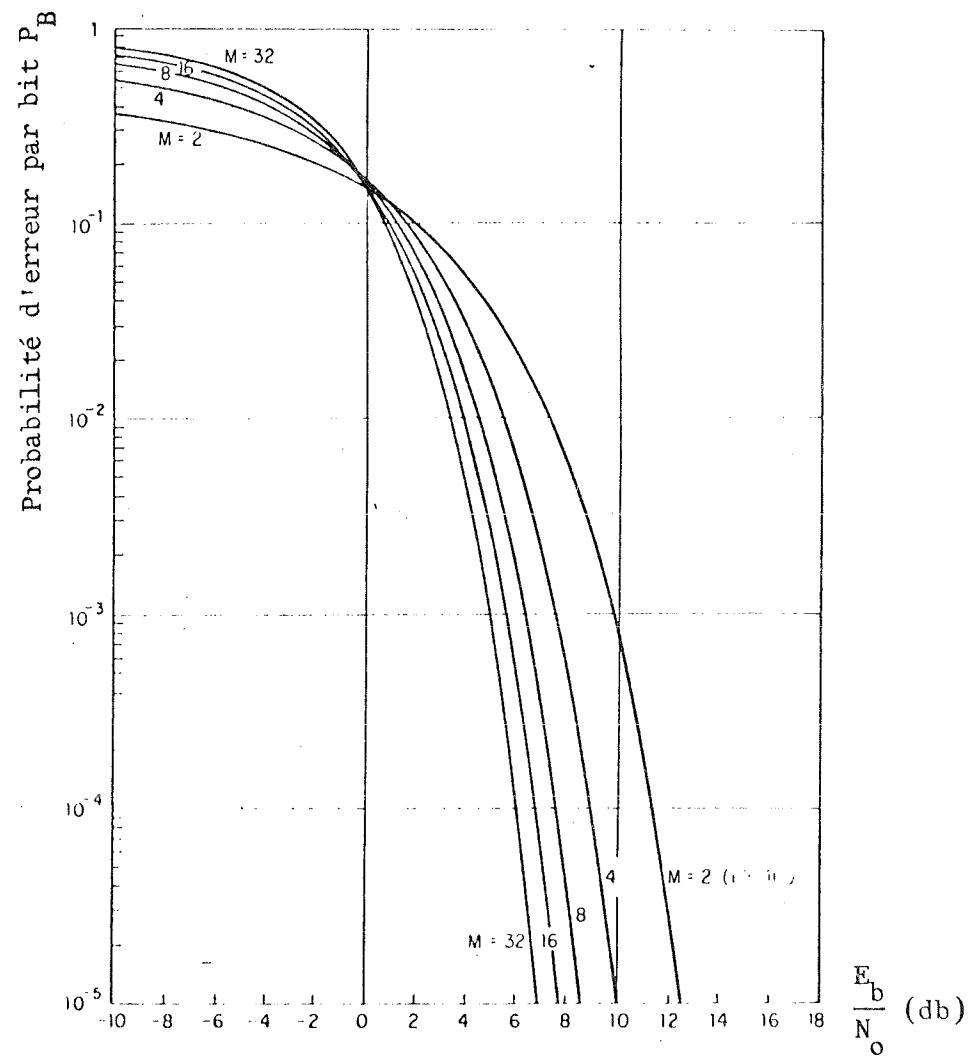


Figure 5.14 Performance de la modulation M-FSK

Pour une transmission de télex à 110 bit/s, il est donc possible de transmettre 7900 voies simultanément et la bande B_{IF} nécessaire est égale à environ 1.3 MHz.

La transmission d'un canal de télévision en temps réel par la modulation par impulsions codées MIC ou PCM ("Pulse code modulation") avec un code à 6 moments (c'est-à-dire qu'on peut transmettre $2^6 = 64$ valeurs différentes, chacune d'elles représentée par un message de 6 bits) nécessite un débit de 48 Mbit/s et un taux d'erreur de 10^{-3} . Pour la modulation DPSK, d'après la figure 5.13, il faut $E_b/N_0 = 8$ dB. D'après l'équation (5.33) pour $C/N_0 = 72$ dB, on peut obtenir un débit binaire de

$$R_{bb} = 72 - 8 = 64$$

ou

$$R = 2.5 \text{ Mbit/s}, \text{ ce qui est insuffisant.}$$

Avec la modulation PSK, on peut atteindre un débit $R = 3$ Mbit/s. On ne peut donc pas transmettre ce canal de télévision en temps réel. La valeur de C/N_0 nécessaire pour avoir $P_B = 10^{-3}$ en DPSK et un débit $R = 48$ Mbit/s est égal à 85 dB. Il faut donc augmenter la puissance de l'émetteur de 13 dB, ou prendre un système de réception ayant un G/T égal à 32 dB au lieu de 19 dB.

Dans une liaison sol-satellite-sol, il y a deux tronçons: la liaison montante sol-satellite et la liaison descendante satellite-sol. Les notions de modulation présentées dans ce chapitre s'appliquent à chacun de ces tronçons, et la quantité finale de l'information reçue à la station de destination dépend des caractéristiques des deux tronçons de la liaison et du répéteur. Le répéteur joue deux rôles: celui d'amplifier les signaux reçus et celui de les retransmettre (en général à une fréquence différente) vers la station réceptrice. Le récepteur est donc transparent à tout procédé de modulation utilisé aux stations. Ajoutons qu'un autre rôle semble se dessiner pour les répéteurs de la prochaine généra-

tion de satellites de communication: celui d'organe de traitement de l'information et de remodulation. En effet, les satellites ayant des puissances de transmission de plus en plus grandes, les stations au sol peuvent être plus simples et plus nombreuses. De plus, la technologie spatiale devenant très fiable, on peut faire assumer au répéteur des fonctions jusque là réservées aux stations. Le répéteur devient donc un répéteur intelligent.

Dans le calcul global d'une liaison, on doit faire deux bilans de liaison: un pour la liaison montante et l'autre pour la liaison descendante. En général, la qualité de la liaison montante est nettement supérieure à celle de la liaison descendante. C'est d'ailleurs la liaison descendante qui sera la cause principale des erreurs encourues par la liaison entière. Les calculs des bilans des deux liaisons sont assez faciles à effectuer et suivent les exemples traités dans la section 5.1.

5.3 TECHNIQUE D'ACCES MULTIPLE

5.3.1 *Introduction: liaisons unilatérales et bilatérales*

Dans une liaison unilatérale entre deux stations terriennes T_1 et T_2 , le "réseau" constitué des deux stations et du satellite est particulièrement simple: la liaison se fait dans une seule direction de T_1 vers T_2 via le satellite. Le satellite dispose d'un répéteur et pour éviter tout brouillage entre l'entrée et la sortie du répéteur, on affecte une fréquence f_M pour la liaison montante et une autre fréquence f_D pour la liaison descendante. Le répéteur pourrait avoir deux antennes: l'une pour la réception et l'autre pour l'émission. Un changement de fréquence au répéteur est donc nécessaire. Naturellement, le réseau peut s'étendre facilement et comporter plusieurs stations réceptrices au lieu d'une seule. On aurait en quelque sorte un réseau de diffusion avec un seul émetteur et une zone de réception. Si l'émetteur appartient à la zone, alors les deux antennes à bord pourraient être remplacées par une antenne unique. Un duplexeur et un ensemble de filtre assureraient alors la protection contre le brouillage entrée/sortie du répéteur (voir figure 5.15).

Dans une liaison bilatérale entre deux stations, les liaisons se font dans les deux sens, chaque station transmet avec une fréquence et reçoit sur une autre fréquence. Il faut donc disposer de 4 fréquences différentes: deux fréquences pour les liaisons montantes, et deux autres pour les liaisons descendantes. Chaque direction de transmission utilise un répéteur avec une seule ou deux antennes. Le premier satellite commercial INTELSAT I fonctionnait sur ce principe: 4 fréquences étaient utilisées et le satellite avait deux répéteurs. Naturellement, on peut simplifier le système en n'utilisant qu'une seule antenne à couverture commune et un seul répéteur à bande large au lieu de deux à bande étroite. Un schéma de principe serait celui de la figure 5.16.

La situation la plus intéressante correspond à un réseau comprenant plus de deux stations devant assurer des liaisons bilatérales. Pour assurer des liaisons bilatérales simultanées entre les différentes stations au sol on pourrait multiplier le nombre de répéteurs à bord du satellite. Ainsi, si il y a N stations, il faudrait $N(N-1)/2$ répéteurs. On pourrait remplacer tous ces répéteurs à bande étroite par un seul répéteur à bande large pouvant desservir toutes les liaisons bilatérales simultanément. Ce mode d'exploitation appelé accès multiple est celui utilisé couramment dans les satellites commerciaux depuis INTELSAT II.

5.3.2 Accès multiple

Dans un réseau à accès multiple, le satellite équipé d'un seul répéteur assure les liaisons bilatérales simultanées entre les différentes stations au sol. L'accès multiple permet donc aux stations d'interconnecter simultanément leurs circuits de voix téléphoniques, données, télévision, etc, par l'intermédiaire du satellite.

Dans un système à accès multiple, un problème important est celui de l'adresse définissant les différentes stations du réseau. Un autre problème est celui de la gestion du réseau, c'est-à-dire de l'affectation des différents circuits aux stations. Enfin, il y a le problème du traitement

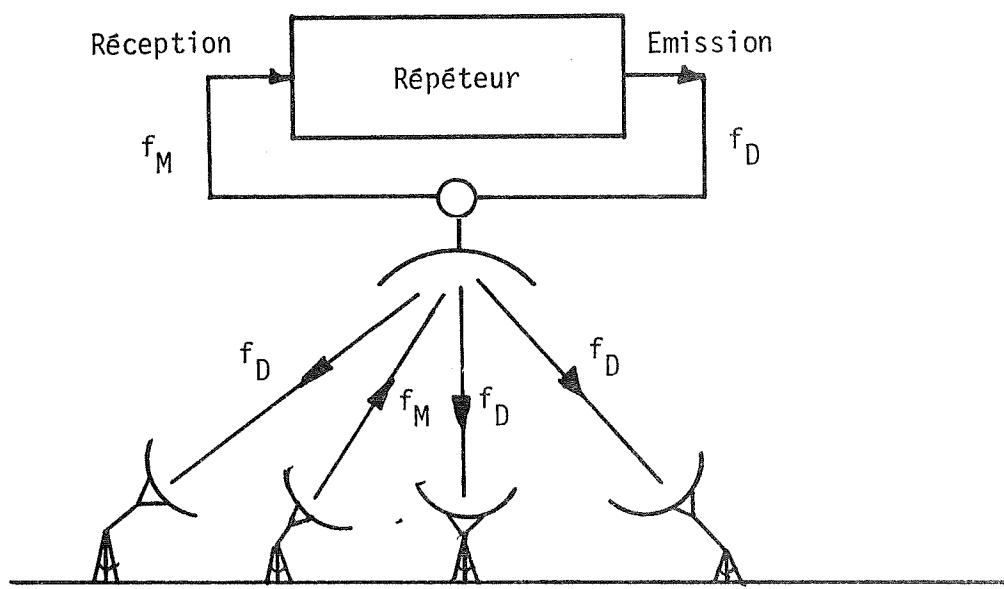


Figure 5.15: Liaisons Unilatérales

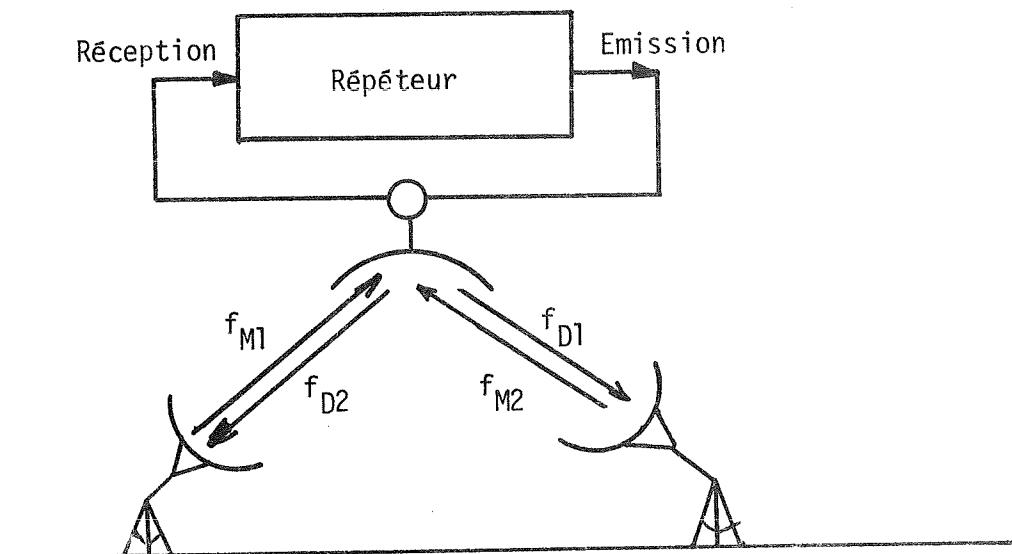


Figure 5.16: Liaison bilatérale

des signaux qui transitent dans le répéteur du satellite. En effet, il se pose au satellite le problème de recevoir et de retransmettre avec une fidélité acceptable un grand nombre de signaux tout en optimisant la puissance et la largeur de bande disponible au satellite. Ce problème est d'autant plus aigu que le nombre de stations augmente, car si N stations doivent communiquer entre elles, il faut assurer $N(N-1)$ liaisons unidirectionnelles à bord du satellite.

Un système d'accès multiple idéal devrait optimiser les paramètres suivants:

- capacité du satellite;
- puissance irradiée et largeur de bande allouée;
- interconnexion;
- adaptation aux variations de trafic et de réseau.

De plus, il faut tenir compte des conditions économiques et de certaines conditions politiques dans le cas d'un réseau international. On peut affirmer qu'il n'existe pas de système à accès multiple idéal, mais plusieurs types d'accès multiples ont été étudiés et implantés. Le reste de la section est consacré à la présentation des trois principaux systèmes d'accès multiple:

- Accès multiple par répartition en fréquence (AMRF, ou FDMA: "Frequency Division Multiple Access");
- Accès multiple par répartition en temps (AMRT, ou TDMA: "Time Division Multiple Access");
- Accès multiple par répartition codée en temps et en fréquence (AMRC, ou CDMA: "Coded Division Multiple Access").

Quel que soit le procédé d'accès multiple, l'adresse doit définir une seu-

la station réceptrice, une seule station émettrice. A chacune des familles d'accès multiple correspond un type d'adressage. Pour définir l'adressage, il est commode de considérer deux axes orthogonaux représentant la fréquence et le temps. Le long de l'axe des fréquences, on délimite la largeur de bande B du répéteur. Chaque technique d'accès multiple utilise de façon particulière l'espace temps-fréquence.

5.3.3 Accès multiple par répartition en fréquence (AMRF ou FDMA)

5.3.3.1 Le système AMRF

Le système AMRF fut le premier système utilisé où, essentiellement, la largeur de bande B du répéteur est partagée entre les différentes largeurs de bande b_i nécessaires à chacune des liaisons. Si toutes les liaisons occupent une largeur de bande b , alors on peut établir un nombre $n = B/b$ de liaisons indépendantes. L'adresse de chaque liaison est définie par la place que sa largeur de bande b_i occupe dans B (voir figure 5.17). Naturellement, on peut assigner cette place de façon permanente ou seulement durant la durée de la communication.

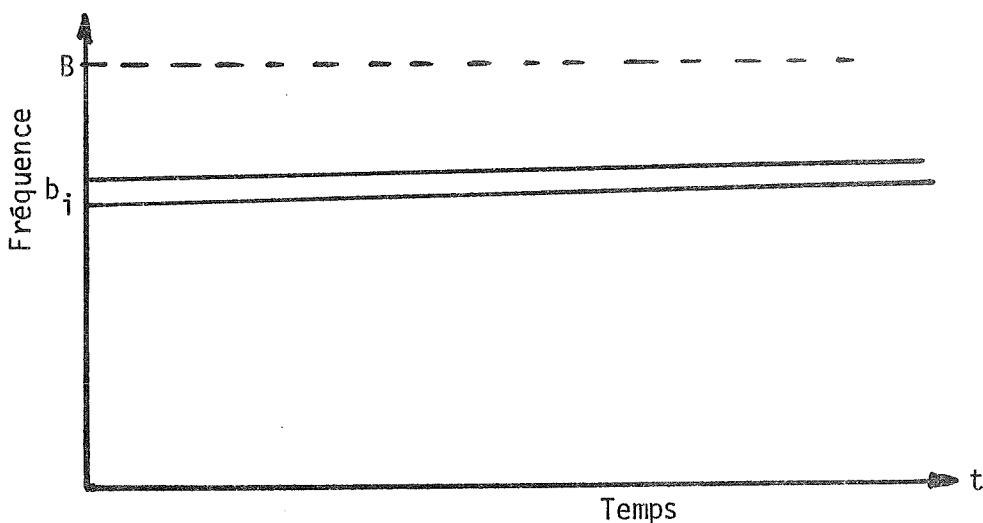


Figure 5.17 Axes temps-fréquence pour le système AMRF

Dans tout système d'accès multiple, il y a lieu de spécifier en plus le type de modulation utilisé ainsi que le procédé de multiplexage. Par exemple, un système à accès multiple FDMA où les porteuses sont modulées en FM s'écrit FDMA/FM/FDM. Il est bon de souligner que dans un FDMA, les porteuses peuvent en principe être modulées par des procédés différents.

Soit un réseau constitué de N stations, chacune d'elles pouvant communiquer simultanément avec les $(N-1)$ autres stations. Supposant que le réseau fonctionne en FDMA/FM/FDM, plusieurs cas d'exploitation peuvent être envisagés:

- Utilisation de $(N-1)$ porteuses par station. Chaque station émet $(N-1)$ porteuses correspondant aux $(N-1)$ stations de réception et reçoit $(N-1)$ autres porteuses qui lui sont destinées. Le répéteur doit donc pouvoir recevoir et réémettre $N(N-1)$ porteuses. Ce système prolifère le nombre de porteuses et n'est pas très efficace.
- Emission d'une seule porteuse par station. Chaque station émettrice regroupe en un "super" multiplex FDM/FDM les $(N-1)$ multiplex FDM destinés aux $(N-1)$ stations réceptrices. Ce multiplex global module une seule fréquence porteuse. Ici, chaque porteuse caractérise la station d'émission, et le répéteur ne reçoit et retransmet que N porteuses différentes. Chaque station de réception reçoit $(N-1)$ porteuses, les démodule et extrait de chaque multiplex FDM/FDM les voies qui lui sont destinées.
- Méthode hybride. Chaque station émet un certain nombre (petit) de porteuses, et chaque porteuse est destinée à plusieurs stations. Les voies destinées à une station particulière sont préassignées dans le multiplex, ce qui facilite l'extraction aux stations réceptrices. La méthode hybride de porteuses FM multi-destinations est la méthode couramment employée dans le réseau INTELSAT où la capacité par porteuse est standardisée à 24, 60, et 132 voies. Cette méthode d'accès multiple permet d'offrir un service excellent mais n'est pas très flexible et n'utilise pas la puissance du satellite de façon très efficace.

5.3.3.2 Produits d'intermodulation

En FDMA/FM/FDM plusieurs fréquences sont simultanément reçues et réémises par le répéteur. Si le répéteur avait une caractéristique entrée/sortie parfaitement linéaire, il n'y aurait pas d'interférence entre les porteuses. Cependant les tubes à onde progressive (TOP) des répéteurs ne sont pas linéaires, et leur rendement est d'autant meilleur qu'ils sont utilisés près de leur point de saturation, c'est-à-dire dans une région fortement non linéaire. De plus, les TOP effectuent une conversion AM/PM nuisible. En conséquence, un bruit d'intermodulation apparaît lorsque plusieurs porteuses attaquent le répéteur simultanément. Les produits d'intermodulation sont particulièrement nuisibles lorsque leurs fréquences tombent dans la bande passante du tube. Ainsi, si trois fréquences porteuses f_1 , f_2 et f_3 passent dans le tube, ce sont surtout les produits d'intermodulation du troisième ordre tels que $f_1 \pm f_2 \pm f_3$ tombant dans la bande passante du tube qui provoqueront les interférences nuisibles avec les signaux utiles. Le problème des produits d'intermodulation augmente avec le nombre de porteuses qui doivent passer simultanément dans le tube.

Pour réduire les produits d'intermodulation en FDMA, on utilise le TOP dans sa partie la moins non linéaire, c'est-à-dire le plus loin possible de sa puissance de saturation. Ceci correspond à un recul ou "back off" de puissance par rapport à la puissance maximale permise. On voit donc que les produits d'intermodulation sont néfastes dans le sens qu'ils consomment de la puissance et réduisent la puissance utilisée pour la transmission des signaux utiles. Le phénomène de l'intermodulation conduit à une réduction sensible de la capacité d'un répéteur de satellite lorsque le nombre de porteuses qui y accèdent augmente. Par exemple, la capacité d'un répéteur d'INTELSAT IV couplé à une antenne de couverture globale est de l'ordre de 900 voies téléphoniques avec une seule porteuse, alors que le fonctionnement avec quatre porteuses ne permet d'obtenir que 528 voies (voir tableau 5.5).

Tableau 5.5

Capacité d'un répéteur INTELSAT IV de largeur de bande nominale 36 MHz,

EN MODE FDMA/FM/FDM

Nombre de voies par porteuse	Nombre d'accès	Largeur de bande par porteuse (MHz)	Capacité (# voies)
900	1	36	900
132	4	10	528
60	7	5	420
24	14	2.5	336

Une autre conséquence de l'intermodulation est la réduction de la largeur de bande utile par rapport à la largeur de bande permise du répéteur. En effet, si n accès occupent une largeur de bande b , la bande utile nb est inférieure à la largeur de bande totale B du répéteur. En choisissant les fréquences des porteuses pour que les produits d'intermodulation ne tombent pas à l'intérieur des fréquences utiles, le pourcentage utile de la bande de fréquence B décroît avec le nombre d'accès. Ce pourcentage est donné à la figure 5.18 pour un répéteur à limiteur.

En plus de la réduction de la capacité, il s'avère difficile de modifier le plan de fréquence des systèmes FDMA/FM/FDM. Ceci est un inconvénient majeur dans un contexte d'exploitation international tel que INTELSAT, où les plans de fréquences sont modifiés assez fréquemment.

En conséquence, le système FDMA présente beaucoup d'inconvénients mais son avantage essentiel est d'utiliser des techniques et des équipements

qui ont fait leurs preuves dans les réseaux micro-ondes terrestres.

Dans le but d'augmenter la capacité des satellites, de nouvelles méthodes de modulation et d'accès multiples, surtout numériques, ont été étudiées.

5.3.4 Accès multiple par répartition en temps (AMRT ou TDMA)

5.3.4.1 Le système AMRT

En AMRT, les communications sont de nature numérique. Les stations transmettent chacune à leur tour durant un bref intervalle de temps t , et lorsqu'une station transmet, aucune autre station du réseau n'est en mode de transmission. Le processus est répété toutes les T secondes. Ainsi, donc, chaque station émet périodiquement un paquet de données de façon telle qu'il ne chevauche pas dans le temps les paquets émis par les autres stations. De cette façon, les limitations de puissance imposées par l'amplification simultanée de plusieurs porteuses dans un TOP sont évitées. On peut alors utiliser toute la puissance du tube et toutes les stations peuvent utiliser la même fréquence sur toute la largeur de bande B permise. Si t_i est l'intervalle de temps réservé dans la trame T à la station i , l'adresse de cette station est définie par la place de l'intervalle t_i dans T (voir figure 5.19). Cette place est affectée en permanence. Si t est le même pour toutes les liaisons, il est possible d'établir $n = T/t$ liaisons simultanées indépendantes.

En AMRT, l'information de base peut se présenter sous formes analogique ou numérique. On utilise souvent la modulation par impulsions et codage MIC ou PCM ("Pulse Code Modulation") dans laquelle chaque voie téléphonique est échantillonnée au rythme de 8 000 échantillons par seconde, puis codée à l'aide de 8 bits. Toutes les voies d'une station sont ensuite multiplexées dans le temps pour former une trame de $8xn$ bits.

Une des caractéristiques d'un système AMRT est la durée T de la trame, c'est-à-dire l'intervalle de temps qui sépare deux émissions successives d'une même station. Dans le cas de la transmission de voies téléphoniques, on prend en général la période d'échantillonnage, égale à 125 microsecondes ou un multiple entier de 125 microsecondes. L'intervalle de récurrence T est partagé en autant d'intervalles élémentaires qu'il y a de stations dans le réseau utilisant le satellite. Durant l'intervalle qui lui est alloué, chaque station émet à grande vitesse une salve qui est le paquet de données correspondant à une trame. Tout comme en AMRF, chaque station reçoit tous les paquets réémis par le satellite et en extrait les voies qui lui sont destinées. La procédure de modulation est celle de déplacement de phase PSK ou DPSK à deux ou quatre niveaux. Il va de soi que la durée des salves ou leur taux de transmission peuvent changer d'une station à l'autre.

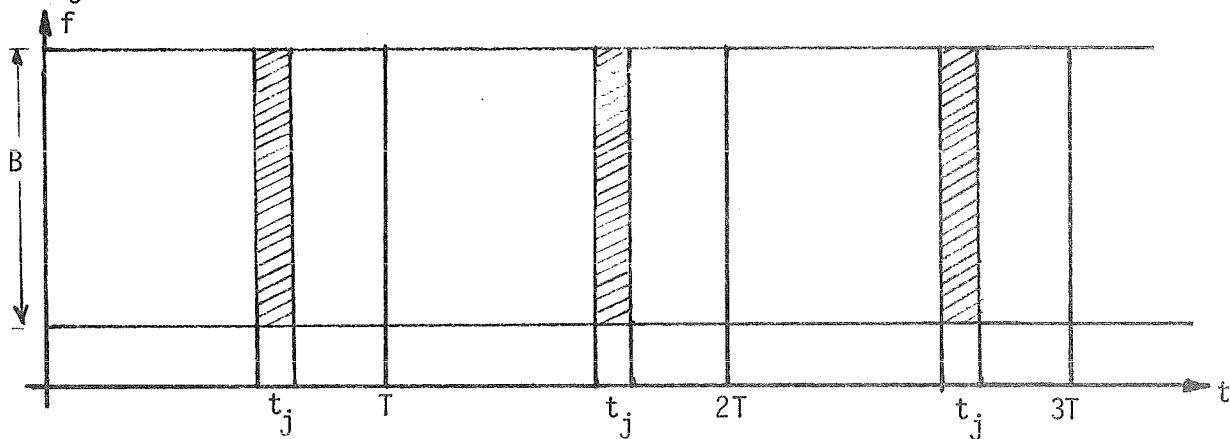


Figure 5.19 Espace temps-fréquence pour le système AMRT

5.3.4.2 Structure de trame et synchronisation

Si N stations se partagent la durée de la trame T , chacune d'elles occupant le système pendant t secondes, à l'intérieur de chaque intervalle de temps t , il faut identifier les stations destinatrices et inclure les données. L'organisation générale est la suivante: la période de trame comprend les salves d'impulsions de toutes les stations terriennes. Ces salves sont séparées entre elles par des écarts de garde.

La salve issue d'une station comprend un préambule caractéristique et les échantillons codés des voies téléphoniques destinés aux différentes stations. Le préambule doit être ajouté à la salve afin de faciliter la synchronisation qui n'est pas disponible à priori. En effet, les démodulateurs cohérents PSK ne peuvent se synchroniser immédiatement et nécessitent quelques 20 à 40 bits pour se synchroniser sur la porteuse. Il est donc difficile pour les systèmes de réception de déterminer exactement le début d'un paquet dans une salve. Le préambule d'une longueur d'environ 80 bits facilite la synchronisation. Il comporte un bloc destiné à la récupération de porteuse et de rythme pour le démodulateur, un mot unique, un code d'indentification de station puis divers canaux de signalisation et de ligne d'ordre. La Figure 5.20 montre un schéma de trame.

Les données sont principalement constituées d'octets binaires représentant un codage PCM d'une voie téléphonique. Si la trame a une durée n fois $125 \mu s$, chaque voie téléphonique sera représentée par n octets dans le paquet.

Les salves issues des stations terriennes doivent se présenter au satellite à des instants précis pour qu'elles ne chevauchent pas les salves émises par les autres stations. Une synchronisation des stations est donc indispensable. Cette synchronisation se heurte aux difficultés suivantes: 1) distances inégales entre le satellite et les stations: ces distances entraînent des différences de temps de propagation appréciables, et 2) variations résiduelles de temps de propagation dues aux mouvements de dérive du satellite.

La synchronisation du réseau est assurée par une station de référence qui transmet des paquets de synchronisation une fois par trame. En cas de panne, une procédure de remplacement de la station de référence par une station de secours est prévue afin d'éviter toute interruption de service.

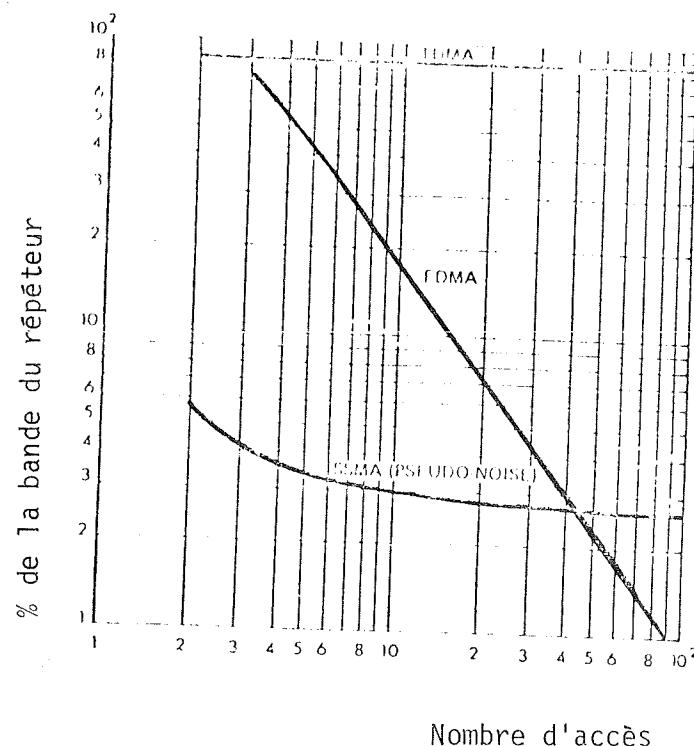


Figure 5.18 Pourcentage utilisable de la bande du répéteur.

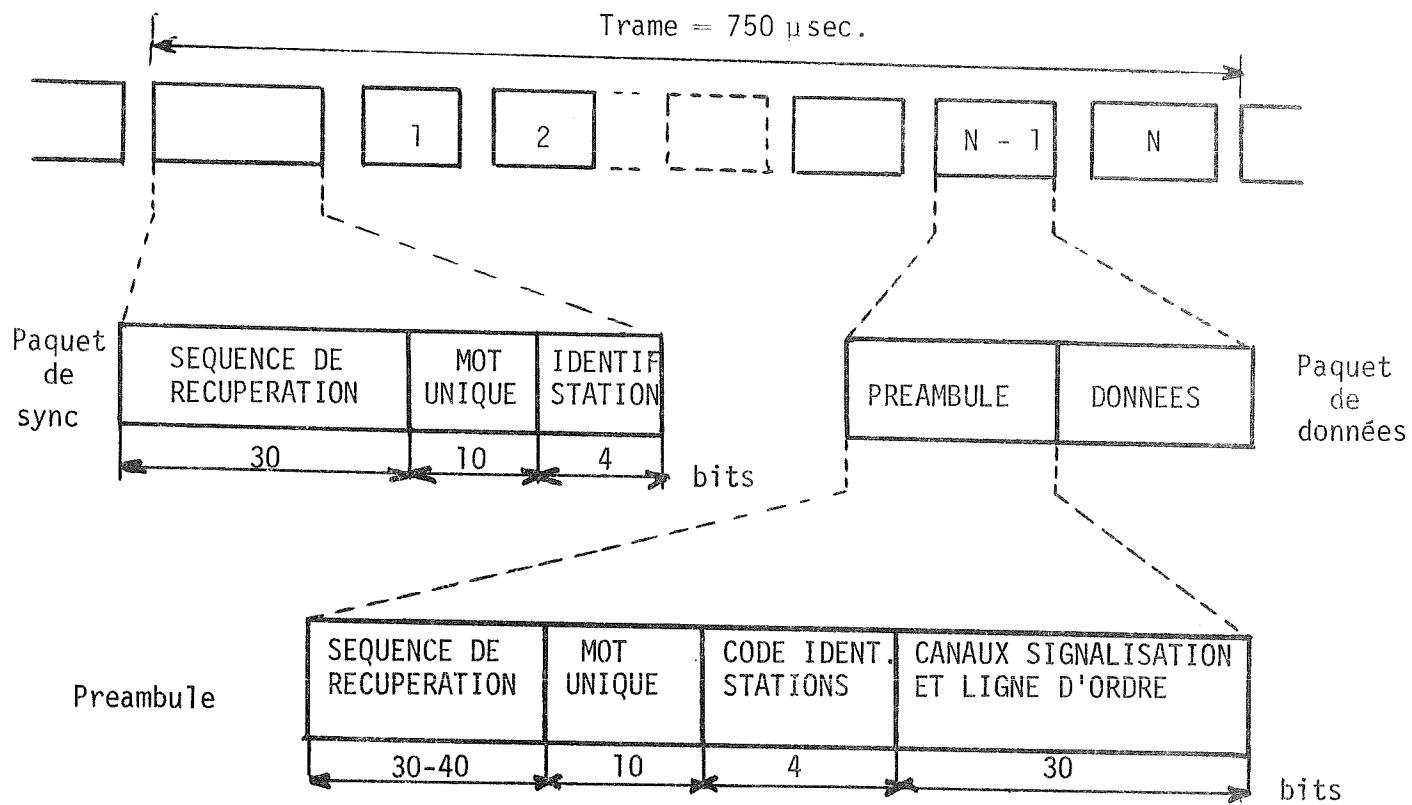


Figure 5.20 Format de la trame d'un système AMRT.

A chaque station terrienne, l'instant d'émission est choisi par rapport aux impulsions de référence qui se situent au début de chaque trame. Chaque station corrige son temps d'émission en mesurant l'écart entre les impulsions de référence et ses propres impulsions retransmises par le satellite. En résumé, comparé au système AMRF, le procédé AMRT présente de nombreux avantages. Le principal avantage est de n'avoir qu'un seul signal qui traverse le TOP. Il n'y a donc ni recul de puissance de sortie, ni bruit d'intermodulation, ce qui permet d'utiliser le tube en son point de saturation. De plus, le plan de fréquences est très simplifié.

La contrepartie de cet avantage est la nécessité d'un dispositif de synchronisation du réseau. De plus, les démodulateurs AMRT doivent fonctionner dans des conditions particulièrement difficiles. En effet, les démodulateurs cohérents ne disposent que d'un temps très restreint pour acquérir la phase et la fréquence de l'onde reçue. Enfin, une légère perte de capacité est imposée par la présence indispensable des temps de garde et des préambules et informations de service. La perte grandit avec le nombre de préambules transmis par unité de temps. Dans le système INTELSAT, la trame est choisie égale à $6 \times 125 \mu s = 750 \mu s$, et le rendement du système AMRT est d'environ 90%.

5.3.5 Accès multiple par répartition codée en temps et en fréquence (AMRC ou CDMA)

Dans les systèmes AMRC, les transmissions sont de nature numérique, et une liaison est définie pendant chaque durée de trame T par une bande de fréquence b_i et un intervalle de temps t_j . Dans le système d'axes temps-fréquence b_i et t_j définissent une case C_{ij} , et pendant chaque durée de trame une (ou plusieurs) case C_{ij} définit une liaison. La méthode des C_{ij} constitue donc l'adresse. (Voir figure 5.21)

Les trois procédés d'accès multiples AMRC sont:

- accès multiple par saut de fréquence ("frequency hopping");

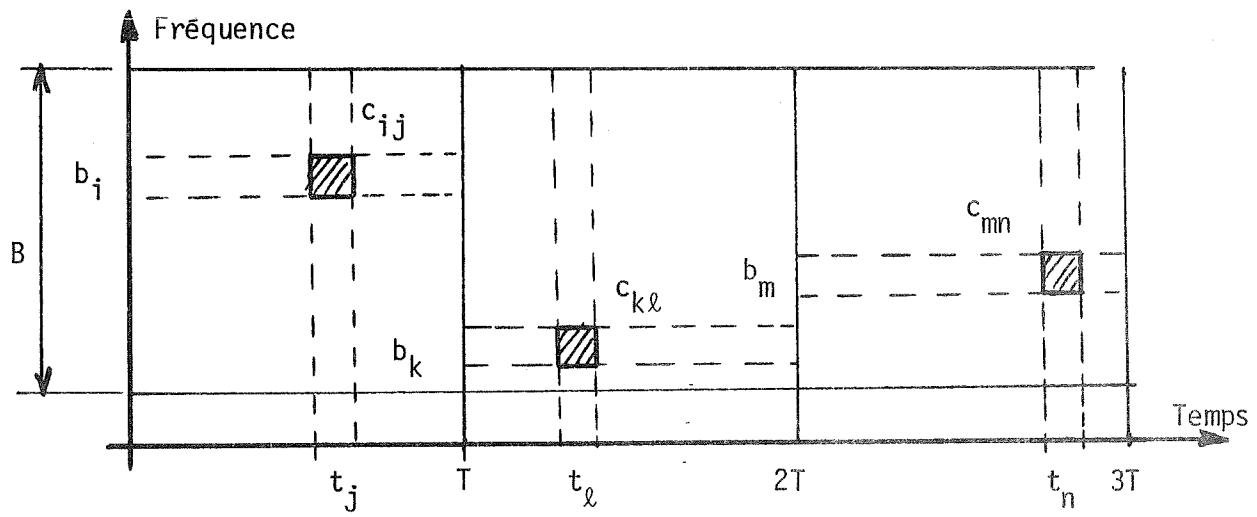


Figure 5.21: Temps – fréquence pour le système AMRC

- accès multiple à spectre étalé, ou SSMA ("spread Spectrum Multiple Access");
- accès multiple par impulsion d'adresse ou PAMA ("Pulse Address Multiple Access").

Un certain nombre d'autres procédures d'accès multiple par répartition codée ont été analysées théoriquement. Ces techniques sont généralement des combinaisons des trois procédés mentionnés ci-après et sont appelées MADA ("Multiple Access Discrete Address") ou RADA ("Random Access Discrete Address"). Ces nouvelles techniques qui exploitent souvent la théorie du codage n'en sont cependant qu'au stade d'étude théorique et d'expérimentation.

5.3.5.1 Accès multiple par saut de fréquence

Dans cette technique, pour chaque intervalle de temps T , une bande de fréquence b_i est utilisée pour la liaison. (voir figure 5.22) Une loi pseudo-aléatoire détermine la fréquence de la porteuse, c'est-à-dire la bande b , à chaque T sec.

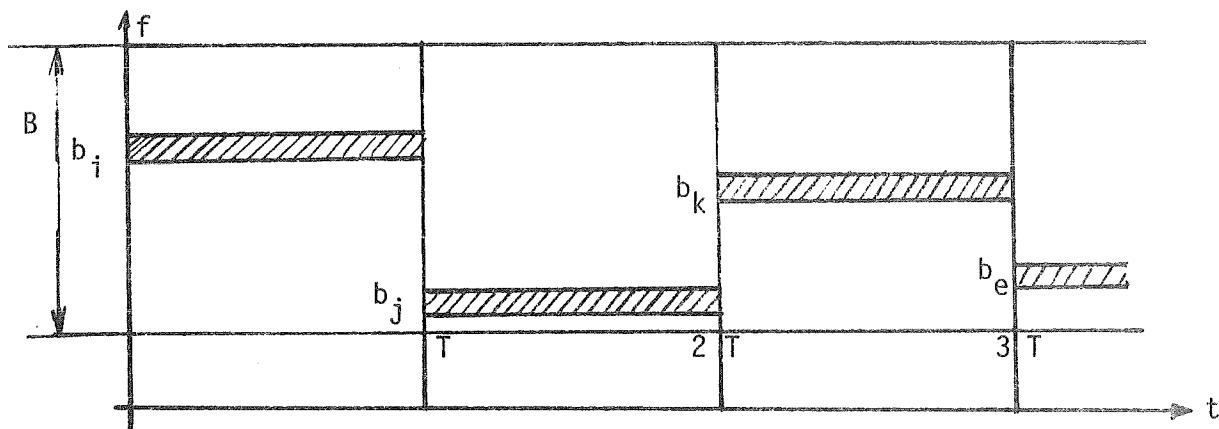


Figure: 5.22 Temps-fréquence pour le système saut de fréquence

A l'émetteur, le choix de la fréquence est déterminé par un code pseudo-aléatoire. Naturellement, le récepteur doit connaître à chaque intervalle de temps T la fréquence utilisée par l'émetteur, c'est-à-dire doit connaître

tre le code. Pour générer la séquence codée, on utilise à l'émetteur et au récepteur un générateur de signaux pseudo-aléatoires. Les deux générateurs doivent être identiques et doivent être calés (c'est-à-dire démarrer dans un même état) au début de la liaison, puis être maintenus en synchronisme pendant la durée de la liaison. Ces générateurs qui sont très faciles à construire et à synchroniser, commandent un synthétiseur de fréquence qui à son tour génère les fréquences à utiliser à chaque trame.

On peut montrer que la technique de saut de fréquence avec codage pseudo-aléatoire offre une protection contre le brouillage créé par une porteuse indésirable, en étalant la puissance de cette porteuse sur toute la bande B du répéteur.

5.3.5.2 Accès multiple à spectre étalé (SSMA)

L'accès multiple à spectre étalé (SSMA) est une technique qui utilise pour chaque liaison toutes les cellules de l'espace temps-fréquence. Chaque station terrienne occupe toute la bande passante du répéteur et toutes les stations peuvent occuper simultanément cette même bande passante. Il y a donc brouillage intrinsèque. Dans ce système, on assigne à chaque station émettrice une porteuse selon un code pseudo-aléatoire distinct. La station module son information sur cette porteuse aléatoire et la transmet vers le satellite. Les fréquences de rythme sont choisies de telle sorte que chaque porteuse étale son énergie dans toute la largeur de bande du répéteur.

A la réception, chaque station utilise un corrélateur capable de se verrouiller sur n'importe quelle porteuse pseudo-aléatoire tout en rejetant toutes les autres. Une fois la porteuse désirée acquise, le message est extrait par détection synchrone. Naturellement, les stations de réception doivent être dotées des mêmes générateurs de signaux pseudo-aléatoires que les stations émettrices.

Tout comme en technique par saut de fréquence, le brouillage créé en SSMA par une onde porteuse non modulée est réduit par l'étalement de l'énergie du brouilleur sur toute la bande du répéteur. Cependant, la protection est plus faible en SSMA qu'en saut de fréquence. Mais dans le cas où le brouilleur occupe toute la bande (brouilleur à bruit blanc), l'efficacité du SSMA est supérieure à celle par saut de fréquence.

Si chaque message transmis occupe une bande b , alors pour n accès dans la bande du répéteur B , le taux d'utilisation de la bande est donné par nb/B . A cause du brouillage intrinsèque créé par les autres stations, et à cause des pertes d'intermodulation, le pourcentage utile de la largeur de bande du répéteur est relativement faible. Cependant, à l'encontre du système FDMA, ce pourcentage ne varie que très peu en fonction du nombre d'accès n .

5.3.5.3 Accès multiple par impulsion d'adresse (PAMA)

La technique d'accès multiple par impulsion d'adresse (PAMA) est une technique hybride combinant les techniques AMRC et AMRF. L'espace temps-fréquence est donc subdivisé selon une matrice ayant MK cellules. Chaque station émettrice choisit de façon pseudo-aléatoire un certain nombre m de cellules dans cette matrice pour représenter les "1" et un autre ensemble (qui ne chevauche pas l'ensemble précédent) pour représenter les "0". Une cellule C_{ij} est occupée lorsqu'on transmet durant le temps t_i une sinusoïde d'amplitude constante et de fréquence égale à la fréquence milieu de la bande b_j caractéristique de la cellule C_{ij} . Il va de soi que les stations réceptrices doivent connaître les codes utilisés par les stations émettrices et une station qui veut décoder les signaux provenant d'un émetteur particulier doit être synchronisée en temps et en fréquence avec cet émetteur. Ajoutons que certains codes se prêtent particulièrement bien à la technique PAMA.

En général, la méthode PAMA possède les caractéristiques suivantes: syn-

chronisation rapide, référence de temps pour tout le réseau inutile. De plus, la méthode PAMA permet d'accommoder un nombre d'accès relativement important.

5.3.6 Comparaison des techniques d'accès multiple

Les techniques AMRF, AMRT et AMRC (SSMA) présentent toutes des avantages et des inconvénients. Prenant comme critères de comparaison l'utilisation de la puissance et de la bande fréquences disponibles au répéteur, on peut faire les observations suivantes:

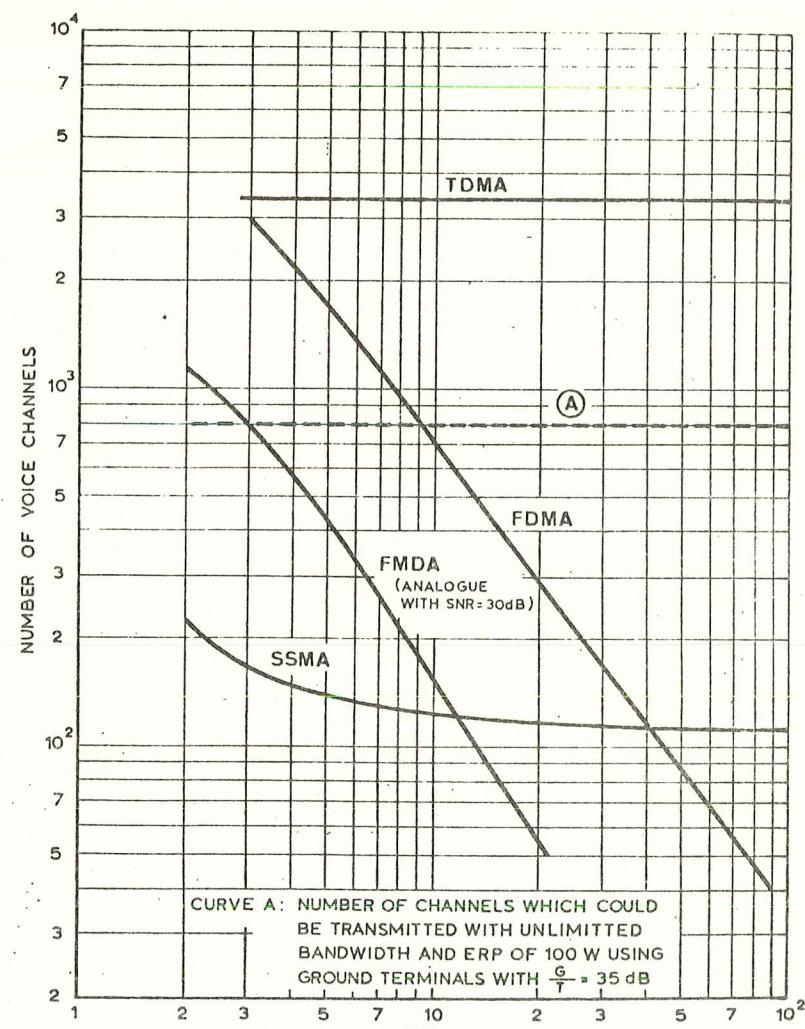
Utilisation de la puissance du répéteur. En AMRF et SSMA, les produits d'intermodulation consomment une partie de la puissance disponible (environ 20%). En AMRT, toute la puissance du répéteur est utilisée mais le rendement n'est pas égal à 100% à cause des temps de garde et de service. Ces pertes de temps correspondent à une perte de puissance de quelque 10%.

Utilisation de la bande de fréquences du répéteur. En AMRF, les produits d'intermodulation consomment une largeur de bande qui croît avec le nombre d'accès. Le pourcentage d'utilisation de la bande utile décroît rapidement avec le nombre d'accès.

En AMRT, le pourcentage d'utilisation de la bande est indépendant du nombre d'accès, ce qui est un grand avantage par rapport à l'AMRF.

Le SSMA utilise mal la bande du répéteur, mais au delà de 10 accès le pourcentage d'utilisation ne varie que très peu avec le nombre d'accès. La Figure 5.23 résume ces résultats.

D'autres considérations doivent entrer en ligne de compte dans le choix d'une technique d'accès multiple. La technique AMRF est probablement la plus simple du point de vue des équipements des stations au sol. La modulation peut être analogique (FM) ou numérique (PSK ou DPSK).



Nombre d'accès

Figure 5.23 Nombre maximal de voies à 2400 bit/s qui peuvent être transmises par un répéteur de 20 MHz de bande passante

En AMRF, la configuration du réseau est la plus simple car il n'y a pas de synchronisation des stations. Cependant, il faut contrôler la puissance des stations au sol afin d'éviter l'effet de capture d'une porteuse à faible puissance par une autre à haute puissance. De plus, toute extension du réseau nécessite une réallocation des fréquences.

En AMRT, les informations ne peuvent être transmises que sous forme numérique. Bien que la puissance du satellite soit bien utilisée, les stations sont plus complexes et une synchronisation du réseau est indispensable. Contrairement à l'AMRF, de grandes variations de la puissance de transmission des stations sont tolérables, et le réseau n'est pas très sensible à l'introduction de nouvelles liaisons.

En SSMA, la modulation est encore sous forme numérique et un multiplexage temporel (TDM) est nécessaire. Le système offre une protection contre le brouillage, mais toutes les liaisons doivent être synchronisées.

En première approximation, la technique AMRT est recommandée dans un réseau qui se développe, alors que le nombre d'utilisateurs n'a pas atteint la saturation. La technique AMRF est recommandée dans un réseau relativement établi. Pour un système de grande envergure, ayant un grand nombre de stations, l'AMRT offre plusieurs avantages et suit la tendance actuelle vers les systèmes numériques. Le problème de la synchronisation ne présente pas de difficultés majeures pour la technologie actuelle ou de proche avenir.

Pour un système relativement petit (quelques canaux), une technique particulièrement simple est celle où chaque canal est doté de sa porteuse et même de son propre amplificateur linéaire à bord du répéteur.

Les systèmes actuels utilisent un satellite dont l'antenne assure une couverture globale et recouvre toutes les stations participant au réseau. Cependant, la nouvelle génération de satellites utilisera des satellites à

faisceaux en pinceaux, très directifs, et des fréquences supérieures à 10 GHz. L'utilisation de ces faisceaux en pinceaux conduit à un bilan de liaison plus avantageux que l'utilisation de faisceaux plus larges. Les conséquences de ces tendances n'ont pas été abordées dans ce rapport.

Dans la gestion du réseau, l'affectation des circuits aux stations peut être permanente ou temporaire, selon la demande. L'assignation permanente correspond à des liaisons de grosses capacités semblables à celles des réseaux micro-ondes. C'est celle utilisée dans le système INTELSAT III.

Une assignation permanente présente l'inconvénient que des voies momentanément inoccupées sur une liaison ne peuvent servir à établir une autre liaison. Cette difficulté est contournée en affectant les circuits selon la demande. Ainsi un circuit n'est affecté à la liaison entre deux stations que pour une durée limitée à la communication. Les prochains systèmes de communications par satellite vont probablement utiliser de plus en plus l'assignation sur demande. Parmi les systèmes d'assignation sur demande existants, citons le système SPADE ("Single Channel Per Carrier PCM Multiple Access Demand Assignment Equipment") qui est en exploitation depuis 1973 et utilisé par plusieurs stations du réseau INTELSAT.

REFERENCES

Il existe un très grand nombre d'articles de revues et d'ouvrages traitant des communications par satellites. Nous ne citerons que quelques-unes de ces références:

- Progress in Astronautics and Aeronautics: volumes no 19, 25, 32
- Mueller G.E. and Spangler E.R., Communications Satellites, John Wiley, 1964
- Pares J. et Toscer V., "Les systèmes de Communications par satellites", Masson, 1975
- Pritchard W.L., Gould R.G., Steiner R.D., "Communications Satellite systems Worldwide, 1975-1985", Horizon House - Microwave Inc., 1975
- INTELSAT/IEEE Conference Publication No 59, "International Conference on Digital Satellite Communication", Nov. 1969
- Colloque International sur les Télécommunications numériques par satellite, Kyoto, NOV. 1975
- Proceedings of the national Telecommunications Conference (Sections sur les satellites).
- Proceedings of the IEEE, Special issue on Satellite Communications, Feb. 1971.
- Proceedings of the International Communication Conference (sections sur les Satellites).
- COMSAT Technical Revue.

Ajoutons à ces références les articles techniques sur les communications par satellites apparaissant régulièrement dans les revues mensuelles:

- IEEE Transactions on Communications;

- IEEE Spectrum;
- Proceedings of the IEEE;
- IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry.

De plus depuis la préparation de ce rapport deux importants ouvrages sont apparus :

- GOULD R.G., and LUM Y.F., "Communications Satellite Systems: An Overview of the technology", IEEE Press, N.Y., 1976
- SPILKER, J.J.Jr, "Digital Communications by Satellites", Prentice Hall, 1977.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00258817 4