

RAPPORT 762-2

**INFLUENCE DES TRAJETS MULTIPLES SUR LA TRANSMISSION NUMÉRIQUE
DANS LES LIAISONS DU SERVICE MOBILE MARITIME PAR SATELLITE**

(Programme d'études 17A/8)

(1978-1982-1986)

1. Introduction

L'influence de la propagation par trajets multiples sur la transmission numérique a été analysée par la théorie et évaluée par des expériences.

L'analyse théorique faite par le Japon permet de prévoir le taux d'erreur dans le cas d'une modulation MDP-2 cohérente et dans celui d'une modulation MDF-2 non cohérente.

L'analyse théorique effectuée par les Etats-Unis donne le taux d'erreur pour la modulation par déplacement de phase cohérente différentielle (MDPCD); les résultats des expériences réalisées par les Etats-Unis avec le satellite ATS-6 déterminent la gamme des valeurs de la propagation par trajets multiples utilisées dans le modèle théorique. Le taux d'erreur calculé est comparé avec les mesures réalisées à l'aide d'un simulateur de voie en laboratoire.

Les essais faits par la France en 1975 à l'aide du satellite ATS-6 ont permis d'obtenir les courbes du taux d'erreur sur les éléments binaires en transmission numérique MDP-2 pour divers angles de site du satellite.

Dans des essais effectués en République fédérale d'Allemagne en 1979, à l'aide du radiophare de poursuite Marisat, on a enregistré, à bord du navire, la réponse en amplitude et en phase du signal se propageant par trajets multiples dans le sens satellite-navire, pour différentes antennes de réception et plusieurs angles de site. Les données enregistrées ont servi à commander un simulateur de voie en laboratoire (principe de la voie mise en mémoire) en vue de déterminer la marge de protection contre les évanouissements pour différentes méthodes de transmission de données. La réponse en amplitude a été évaluée statistiquement et comparée à des modèles théoriques.

2. Analyse théorique

2.1 Distribution en m , dite de Rice-Nakagami

2.1.1 Généralités

Ces travaux sont fondés sur l'hypothèse selon laquelle la distribution d'amplitude du signal réfléchi par la mer est une distribution en m et permettent de déterminer ensuite la distribution probabilistique de l'amplitude d'évanouissement [Nakagami, 1960]; cette distribution est également appelée la distribution Rice-Nakagami et elle est assez générale pour décrire la plupart des phénomènes d'évanouissement, y compris l'évanouissement de Rayleigh.

La Fig. 1 représente un exemple de distribution en m , où cette grandeur est prise comme paramètre. Il convient de noter que cette figure représente un évanouissement gaussien monolatéral quand $m = 0,5$ et un évanouissement de Rayleigh quand $m = 1$, où m est l'inverse de la variance normalisée du carré de l'amplitude du signal réfléchi.

2.1.2 Probabilité d'erreur

La probabilité d'erreur, $p(\rho, C/M, m)$ correspondant à la distribution Rice-Nakagami a également été établie [Mizuno et autres, 1975] pour le cas de la modulation MDP-2 cohérente et pour celui de la modulation MDF-2 non cohérente. Dans cette expression, ρ est le rapport de l'énergie par bit à la densité de puissance du bruit (E/N_0) au démodulateur et C/M est le rapport des puissances signal direct/signal reçu en propagation par trajets multiples.

2.1.3 Résultats des calculs

Les Fig. 2 à 4 donnent les courbes de taux d'erreur binaire calculées selon les méthodes d'analyse mentionnées ci-dessus.

La Fig. 5 représente la variation de la dégradation équivalente du rapport de l'énergie par bit à la densité de puissance du bruit (E/N_0) en fonction du rapport des puissances signal direct/signal reçu en propagation par trajets multiples. La dégradation équivalente est égale à la différence entre les valeurs que doit atteindre le rapport E/N_0 si l'on veut obtenir un taux d'erreur binaire de 1×10^{-5} en présence de bruit thermique, respectivement avec et sans réflexions sur la mer. En d'autres termes, elle correspond à la marge de puissance à prévoir pour protéger le signal contre les évanouissements dus aux interférences par trajet multiple pour les modulations considérées.

Il ressort de la Fig. 5 que:

- si le rapport C/M est constant, la dégradation due à une propagation par trajets multiples augmente quand m diminue;
- si l'évanouissement est profond ($m < 1$), la dégradation équivalente du rapport E/N_0 que subit le signal MDP-2 cohérent est inférieure à celle que subit le signal MDF-2 non cohérent;
- pour une valeur donnée de m , la marge à prévoir pour atteindre un taux d'erreur binaire égal à 1×10^{-5} , considéré comme une dégradation de E/N_0 à la Fig. 5, augmente à mesure que le rapport C/M diminue. Si $C/M = 12$ dB et $m = 1/2$, ce qui correspond à un phénomène à dispersion gaussienne pour la propagation par trajets multiples, il faut augmenter la puissance du signal de 11 dB environ si l'on veut que le taux d'erreur sur les bits d'un récepteur à modulation cohérente MDP-2 soit le même que celui que l'on obtient en présence du bruit thermique seul. On peut noter aussi dans ce cas qu'une petite diminution du rapport de puissance du signal direct au signal reçu par trajets multiples C/M , entraîne une forte augmentation de la marge requise.

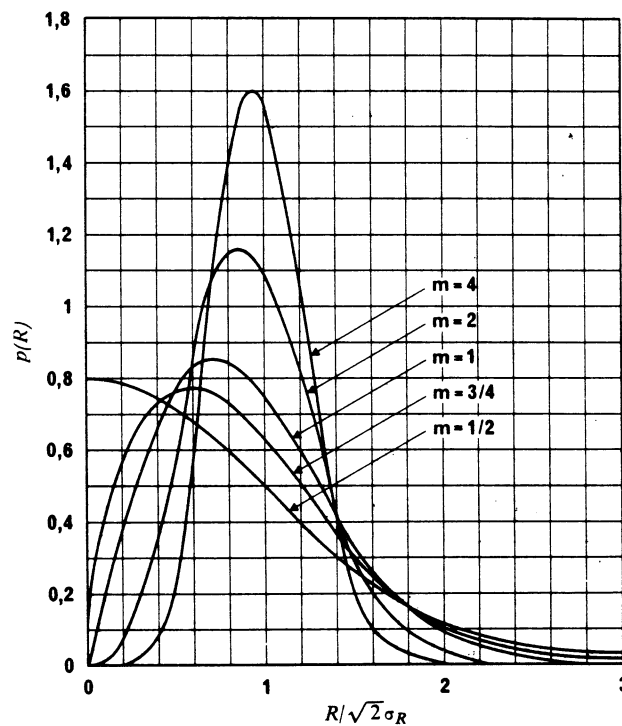


FIGURE 1 — Courbes de distribution en m

R : amplitude du signal réfléchi
 σ_R : valeur efficace du signal réfléchi

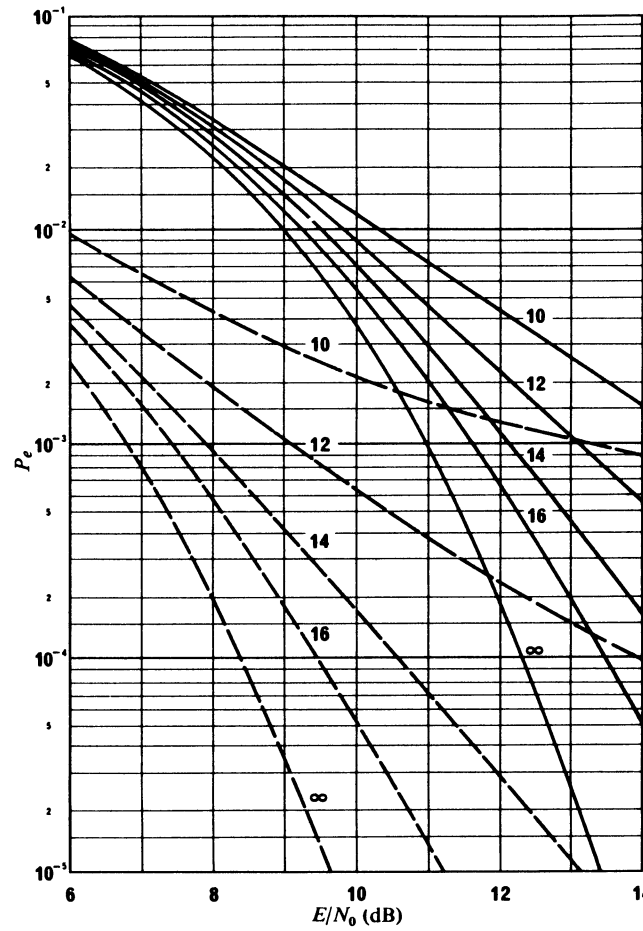


FIGURE 2 – Probabilité d'erreur pour le signal MDP-2 cohérent et le signal MDF-2 non cohérent ($m = 1/2$)

(Paramètre: C/M (dB))

----- MDP-2 cohérent
 ——— MDF-2 non cohérent

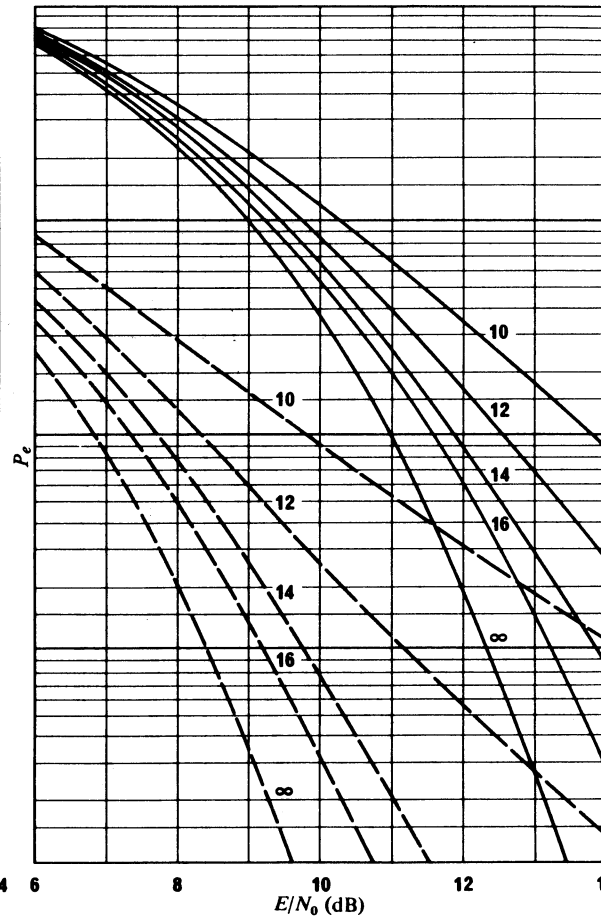


FIGURE 3 – Probabilité d'erreur pour le signal MDP-2 cohérent et le signal MDF-2 non cohérent ($m = 1$)

(Paramètre: C/M (dB))

----- MDP-2 cohérent
 ——— MDF-2 non cohérent

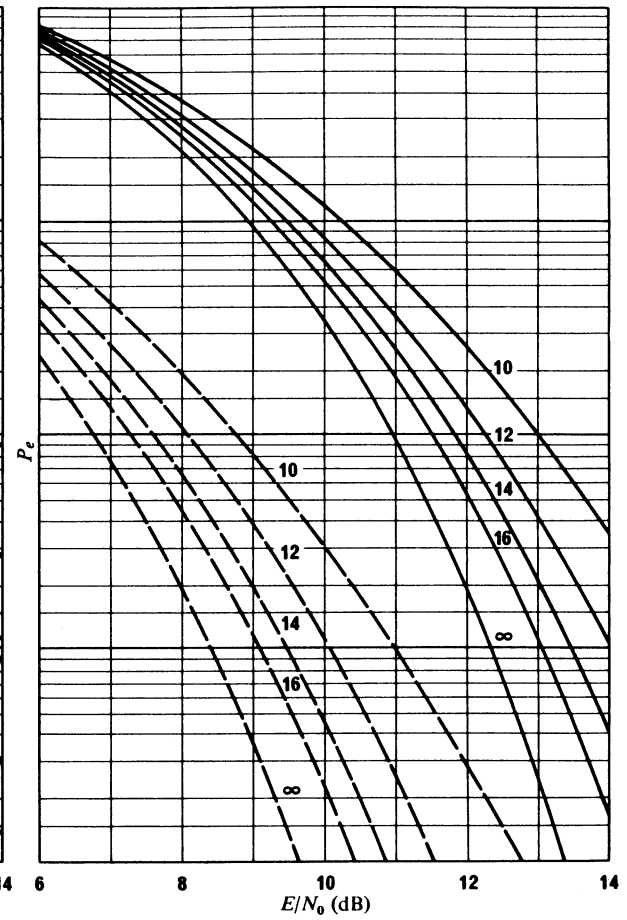


FIGURE 4 – Probabilité d'erreur pour le signal MDP-2 cohérent et le signal MDF-2 non cohérent ($m = 4$)

(Paramètre: C/M (dB))

----- MDP-2 cohérent
 ——— MDF-2 non cohérent

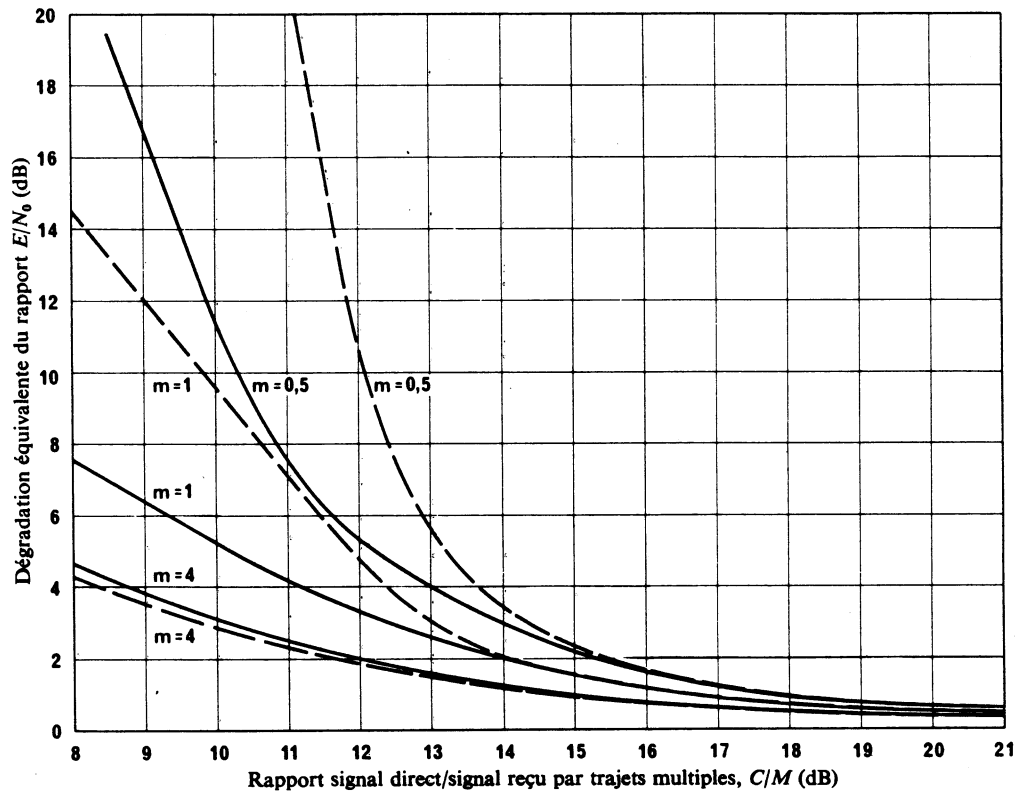


FIGURE 5 - Dégradation équivalente du rapport E/N_0
(taux d'erreur binaire = 1×10^{-3})

--- MDP-2 cohérent
— MDF-2 non cohérent

2.2 Analyse de Modestino-Mui

2.2.1 Généralités

On peut établir un modèle de voie de satellite maritime de la manière représentée à la Fig. 6. Ce modèle est fondé sur des études analytiques antérieures [Salwen, 1972].

Le modèle de voie de la Fig. 6 peut représenter des conditions de réflexion par trajets multiples de type spéculaire ou de type diffus. A mesure que la propagation par trajets multiples devient plus spéculaire, la puissance au carré moyen sur les trajets multiples (M) tend à augmenter alors que les largeurs de bande des composantes en phase et en quadrature de phase du temps de propagation complexe qui caractérise la propagation par trajets multiples tendent vers zéro.

Les données rassemblées pendant les essais effectués avec le satellite maritime ATS-6 confirment la conclusion selon laquelle la propagation réfléchiée par trajets multiples est de type diffus. En particulier, on a constaté que l'énergie transmise par trajets multiples provient d'une vaste région de la surface de l'océan plutôt que du point de réflexion spéculaire par trajets multiples.

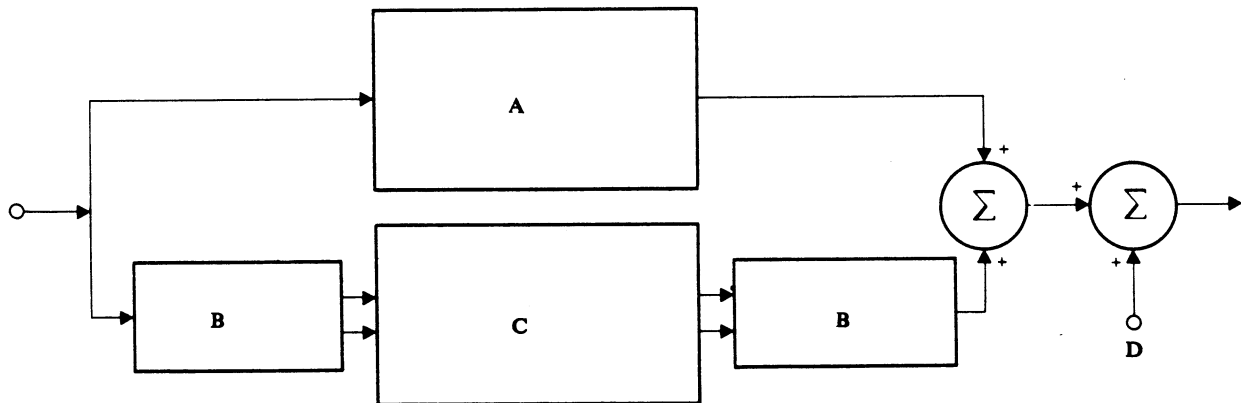


FIGURE 6 — Modèle de voie représentatif d'une liaison satellite-navire

- A: trajet direct (facteur de gain complexe constant)
- B: hybride avec modulation en quadrature
- C: propagation par trajets multiples (facteur de gain complexe variant avec le temps)
- D: bruit, $n(t)$

2.2.2 Probabilité d'erreur

La probabilité d'erreur sur les bits pour un système MDPC qui comporte une erreur de poursuite de la porteuse variant lentement et une amplitude d'évanouissement variant elle aussi lentement (l'évanouissement est lent par rapport au débit binaire) a été calculée pour le cas de la modulation MDP-2 cohérente [Modestino et Mui, 1976]. Les résultats peuvent être étendus au cas de la MDPCD en tenant compte du fait que la probabilité d'erreur sur les bits est alors environ de $2P_b$ pour $P_b \ll 1$.

2.2.3 Résultat des calculs

La Fig. 7 représente la valeur prévue de la probabilité de l'erreur sur les bits pour la MDPCD en fonction de C/N_0 et C/M qui sont obtenus par la solution numérique d'ordinateur de l'expression tirée des calculs théoriques [Modestino et Mui, 1976]. Les courbes de la Fig. 7 sont fondées sur un rapport signal/bruit de 15 dB dans la boucle de poursuite de la porteuse. A ce niveau, les erreurs de poursuite de la porteuse ont très peu d'effet sur la probabilité de l'erreur sur les bits.

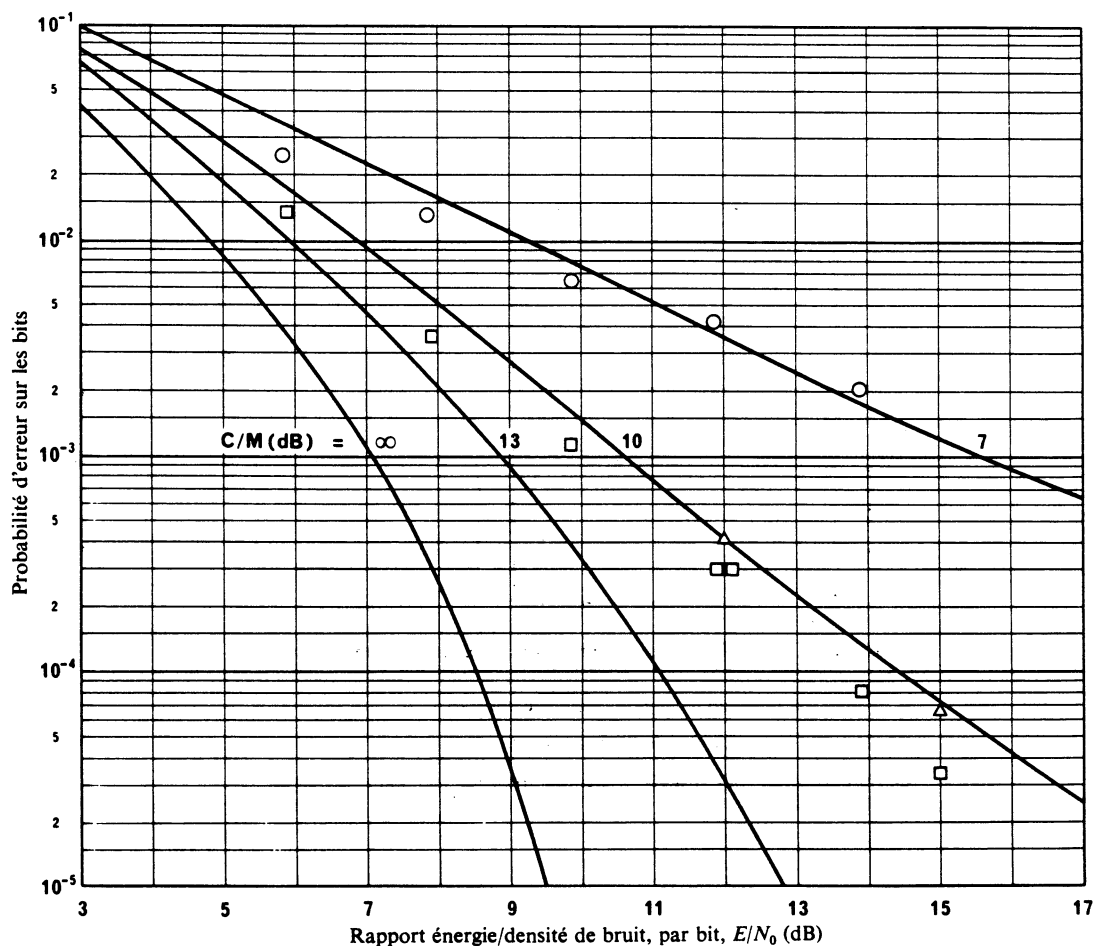


FIGURE 7 – Qualité de fonctionnement d'un modem MDPCD à 1200 bit/s dans le cas d'un simulateur de propagation par trajets multiples

Notes:

- les courbes en trait plein représentent les résultats théoriques avec effet Doppler (taux d'évanouissement) bien inférieur au débit binaire
- données relatives au simulateur :
 - $C/M = 8$ dB
 - △ $C/M = 10$ dB
 - $C/M = 11$ dB.

3. Résultats expérimentaux

3.1 Essais effectués par les Etats-Unis avec ATS-6 et avec un simulateur de voie

3.1.1 Essais effectués par les Etats-Unis avec ATS-6

La Fig. 8 représente la puissance observée par trajets multiples rapportée à la puissance du signal transmis par trajet direct pour les données rassemblées pendant les essais ATS-6. La puissance relative par trajets multiples est comprise entre 5,7 dB et 8,8 dB. Ces valeurs excluent les effets de discrimination d'antenne mais tiennent compte des effets de discrimination de polarisation. Les rapports C/M observés, compte tenu du facteur de directivité de l'antenne, étaient généralement de 10 dB ou plus. Toutefois, dans certains cas, on a mesuré des rapports C/M aussi faibles que 6 dB [Engels et autres, 1976].

Le Tableau I résume les valeurs moyennes des données relatives aux trajets multiples; ces données ont été obtenues pour de faibles angles de site pendant les essais du satellite maritime ATS-6. La largeur du faisceau de l'antenne du navire était de 35°.

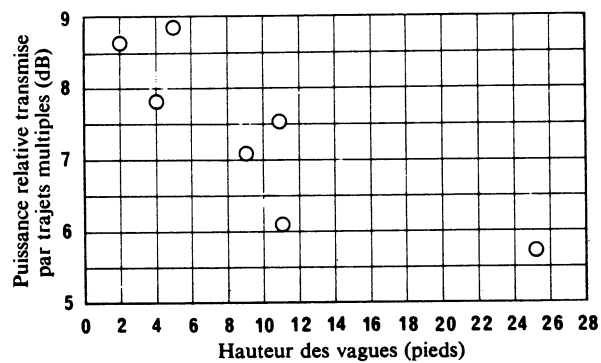


FIGURE 8 — Relation entre la puissance relative transmise par trajets multiples et la hauteur des vagues à la surface de la mer

TABLEAU I — Données relatives aux trajets multiples ATS-6

Angle de site du satellite (°)	Etat de la mer (de crête à creux) (m)	Date	C/M (dB)	Largeur de bande à -20 dB (Hz)
8,2	2,4-3	13 novembre 1974	10,02	4,5
8,3	7,5	14 novembre 1974	8,65	5,35
8,4	3,0-3,6	15 novembre 1974	9,1	4,55
16,9	1,2	19 novembre 1974	14,2	5,5
16,9	3,3	20 novembre 1974	14,76	3,75
17,0	1,5	21 novembre 1974	16,2	4,47
17,0	0,6	31 mars 1975	15,65	3,35

3.1.2 Essais effectués par les Etats-Unis avec un simulateur de voie

L'analyse décrite dans la section 2.2 a fait l'objet d'un essai expérimental à l'aide d'un modem MDPCD et d'un simulateur de voie en laboratoire; les résultats obtenus sont superposés aux résultats théoriques de la Fig. 7 [Salwen et Duncombe, 1975; Salwen, 1975]. On constate une très bonne concordance entre les données théoriques et les données expérimentales. Les résultats expérimentaux de la Fig. 7 sont obtenus pour le meilleur modem testé dans le cadre d'un important effort de mesures effectuées en laboratoire [Salwen et Duncombe, 1975]. La qualité de fonctionnement des autres modems MDPCD testés était sensiblement moins bonne dans des conditions simulées de propagation par trajets multiples.

Les marges requises pour obtenir des taux d'erreur de 10^{-4} et 10^{-5} peuvent être déterminées pour un modem MDPCD d'après les résultats représentés à la Fig. 8. Ces marges sont indiquées au Tableau II.

TABLEAU II — Marges sur le C/N_0

C/M (dB)	Marge (dB) pour $P_e = 10^{-4}$	Marge (dB) pour $P_e = 10^{-5}$
13	2,5	3,2
11	5,3	7,4
10	5,5	9
8	—	30 (estimé)

Dans les meilleures conditions, une marge de 5 dB permettrait d'obtenir un taux d'erreur binaire de 1×10^{-5} lorsque C/M est de l'ordre de 12 dB. Toutefois dans la plupart des cas, une marge plus importante serait requise pour tenir compte des autres facteurs de dégradation de la qualité de fonctionnement tels que:

- erreur de pointage de l'antenne,
- affaiblissement ionosphérique,
- affaiblissement atmosphérique,
- dégradation de la qualité de fonctionnement du modem (en présence de trajets multiples).

3.2 Essais effectués par la France avec le satellite ATS-6

3.2.1 Type de transmission

On recevait à bord d'un navire croisant au large des Açores une voie numérique MDP-2 à 19,2 kbit/s transmise par l'intermédiaire du satellite ATS-6. On comparait une séquence pseudo-aléatoire transmise sur cette voie à une séquence non perturbée en vue d'en déduire le taux d'erreur sur les éléments binaires.

3.2.2 Antenne utilisée par le navire

L'antenne utilisée était du type hélicoïdal quadrangulaire et avait un gain maximal de 20 dB environ et une ouverture de faisceau à mi-puissance de 14° . Sa hauteur au-dessus de la mer était de 20 m environ. L'antenne était stabilisée à 1° près environ, au moyen d'un repère vertical et du compas gyroscopique du navire.

3.2.3 Etat de la mer

Les mesures ont été prises par mer agitée, c'est-à-dire que la hauteur moyenne de la houle, de crête à creux, était de 3 m environ.

3.2.4 Résultats obtenus

On a tracé, à la Fig. 9, les courbes du taux d'erreur sur les éléments binaires, pour la MDP-2 cohérente, en fonction du rapport énergie par élément binaire à densité de bruit (E/N_0), exprimé en dB, pour les angles de site de 5° , 10° , 15° et 20° . On y a indiqué aussi la courbe théorique.

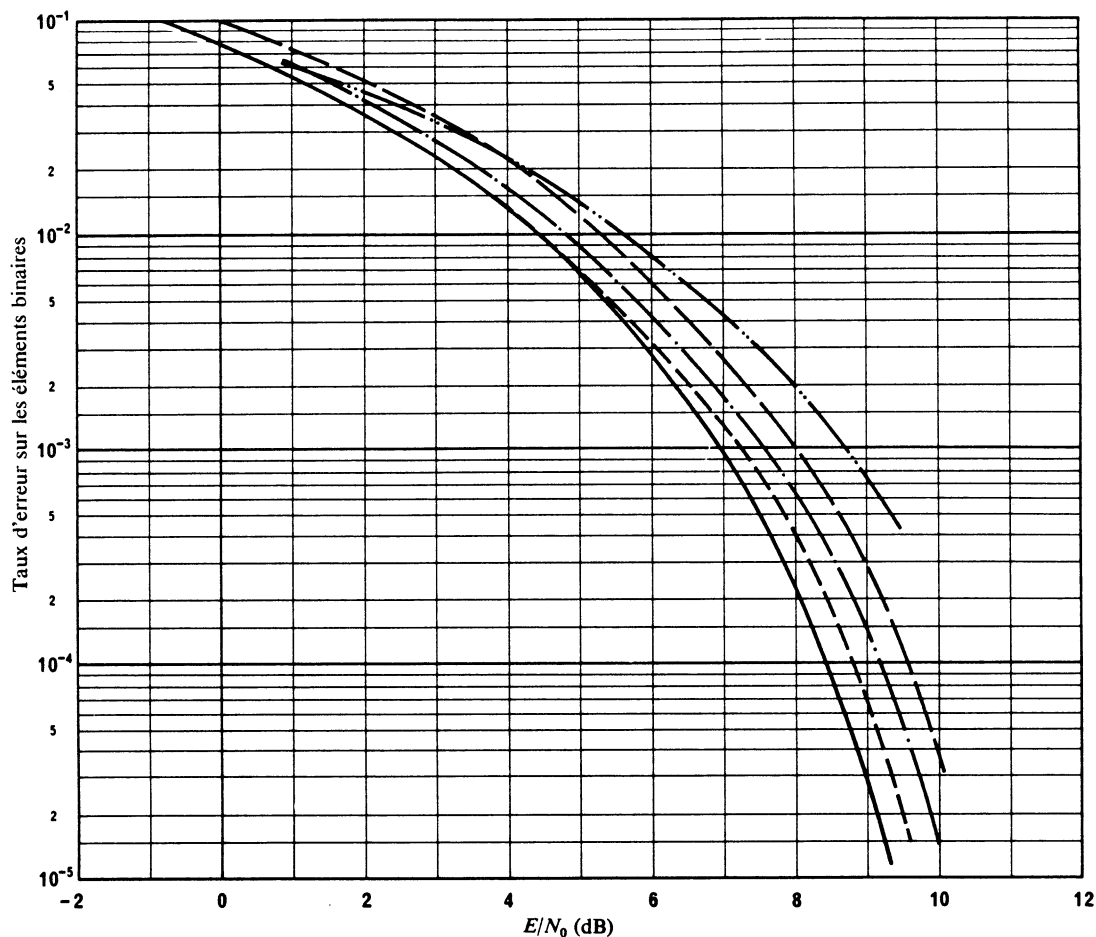
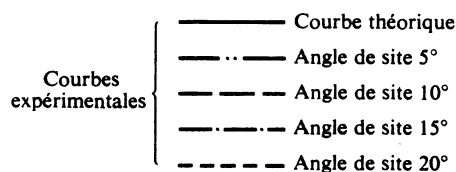


FIGURE 9 — Influence de l'angle de site sur le taux d'erreur



3.2.5 Comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux

Si l'on veut comparer directement les résultats théoriques avec les résultats expérimentaux, il faut connaître les valeurs de m et du rapport des puissances du signal direct au signal reçu par trajets multiples.

En utilisant les données de l'exemple cité sous 2.1 et en admettant qu'il n'y a pas de discrimination par l'antenne, on trouve que la marge à prévoir pour le système est théoriquement de 11 dB. Si le satellite est vu sous un angle de site de 5°, le signal direct et le signal réfléchi arrivent l'un et l'autre à l'intérieur du lobe principal de l'antenne à gain élevé utilisée dans l'expérience. Par extrapolation de la courbe de 5° de la Fig. 9, on trouve que la dégradation mesurée du rapport E/N_0 pour un taux d'erreur binaire de 1×10^{-5} est approximativement de 2,5 dB.

A la petitesse de cette valeur, la discrimination due à la propagation par trajets multiples doit avoir contribué substantiellement en plus de celle exercée par l'antenne. Il convient de reprendre l'expérience pour confirmer le bien-fondé des hypothèses faites ci-dessus sur les valeurs pratiques de m et de C/M .

3.3 Essais effectués en République fédérale d'Allemagne avec MARECS et selon la méthode de la voie mise en mémoire

3.3.1 Description de la méthode de la voie mise en mémoire

La propagation par trajets multiples à la surface de la mer et les conditions de poursuite de l'antenne compliquent les communications à destination et en provenance de navires, par l'intermédiaire de satellites géostationnaires. Avec les antennes relativement grandes utilisées jusqu'à présent, les affaiblissements qui se produisent à des angles de site supérieurs à 5° ne causaient qu'une très légère dégradation. Les antennes plus petites, compte tenu de leur grande ouverture de faisceau, n'exigent pas une poursuite précise mais introduisent une plus forte dégradation. On ne disposait que de renseignements limités sur la dégradation de la qualité de transmission à prévoir en raison de la propagation par trajets multiples. Etant donné qu'il est extrêmement difficile de reproduire fidèlement un évanouissement, on a eu recours à la méthode de la voie mise en mémoire. Dans les essais en service réel, la réponse de la voie en amplitude et en phase a été enregistrée à bord du navire et évaluée en laboratoire. La voie correspondait au modèle représenté à la Fig. 10. Les corrélations entre les paramètres du modèle et les divers types d'antennes, l'état de la mer et les angles de site, ont aussi été déterminées au laboratoire. En commandant un simulateur de voie à l'aide d'évanouissements enregistrés, il est possible de reproduire avec précision la réponse en amplitude et en phase.

L'adjonction d'un bruit permet de comparer les diverses méthodes de modulation et de codage pour un rapport signal/bruit variable. Le taux d'erreur binaire et la marge de protection requise contre les évanouissements dans les diverses méthodes de transmission ont été déterminés en laboratoire, pour différents états de la mer et plusieurs angles de site (0° - 28°) avec des types d'antennes et de mécanismes de poursuite [Schweikert et autres, 1980].

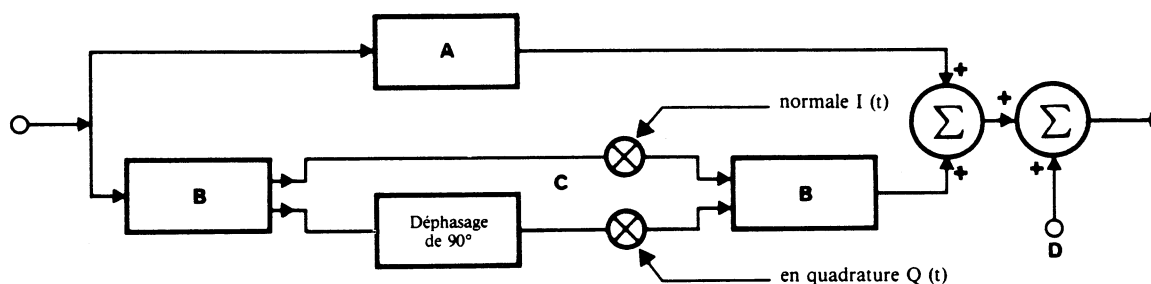


FIGURE 10 - Modèle de voie représentatif d'une liaison satellite-navire

- A: trajet direct (facteur de gain complexe constant)
- B: hybride avec modulation en quadrature
- C: propagation par trajets multiples (facteur de gain complexe variant avec le temps, composante normale et en quadrature)
- D: bruit, $n(t)$

3.3.2 Essais en service réel avec des antennes «standard C»

Les essais en service réel ont été exécutés de janvier à mars 1983 à bord du «Gauss» du «Deutsches Hydrographisches Institut DHI». Quatre antennes différentes avec des gains de 3 à 14 dB et trois récepteurs ont été utilisés en parallèle pour recevoir un signal à onde entretenue transmis par la station terrienne de Villafranca (Espagne) par l'intermédiaire du satellite Marecs de l'océan Atlantique. La puissance du signal non modulé était équivalente à celle de dix voies téléphoniques à modulation de fréquence (p.i.r.e. de 28 dBW). La bande de base normale et les composantes en quadrature des trois récepteurs étaient enregistrées à bord du navire pour des sites compris entre 4° et 30° et l'état de la mer comportait des hauteurs de vague comprises entre 1 et 6 m (conditions de pleine mer). L'enregistrement a été réparti sur trois périodes de 80 h [Hagenauer et autres, 1984].

3.3.3 *Evaluations statistiques et modèle de voie*

Au laboratoire, toutes les bandes ont été numérisées et des évaluations statistiques de toutes sortes ont été effectuées sur l'ordinateur central. Les résultats [Hagenauer et autres, 1984] de ces évaluations appellent les remarques suivantes:

- La voie maritime standard C peut correspondre au modèle d'évanouissement de Rice-Nakagami comportant un signal direct de puissance C et un signal de diffusion éparse de puissance moyenne M . On n'a pas observé de composantes réfléchies spéculaires notables.
- Le paramètre de Rice-Nakagami C/M en limite de couverture du satellite (site de 5°) est de 8 à 9,5 dB pour toutes les antennes et croît avec le site suivant les antennes (voir la Fig. 11).
- L'influence de l'état de la mer est pratiquement sans action si on la compare à celle du site.
- La plage des fluctuations de puissance (plage des évanouissements) à un angle de site de 5° est approximativement:
de 14 dB pour 98% des fluctuations et
de 19 dB pour 99,8% de celles-ci.
- La largeur de bande d'évanouissements pour un angle de site de 5° (largeur du spectre de densité de puissance) est approximativement:
0,5 à 1 Hz (largeur de bande à 3 dB)
5 Hz (largeur de bande à 20 dB) (voir la Fig. 12).
- La durée moyenne d'un évanouissement à des seuils de -3 à -5 dB au-dessous de la puissance moyenne du signal est approximativement de 0,1 s.
- On peut disposer des statistiques d'évanouissements et des durées de connexion et ces statistiques donnent une description suffisante de la voie dans le domaine temporel. La Fig. 13 indique certains résultats significatifs.
- On a relevé des décalages Doppler (voir la Note) de ce navire de dimensions moyennes (1600 tonnes), de l'ordre de ± 10 Hz avec une vitesse de 1 Hz/s.

Note. – On peut noter que les décalages Doppler qu'on peut observer sur un navire sont fonction de la vitesse relative du satellite par rapport au navire et à la station terrienne côtière (voir le Rapport 214).

3.3.4 *Essais de modems MDP-2 avec transmission de données non codées*

3.3.4.1 *Modems*

On a essayé quatre modems MDP-2 pour la voie maritime. Afin d'assurer la possibilité de comparaison, le débit des données de la voie a été fixé à 1200 bit/s et on a utilisé un codage différentiel pour lever l'ambiguïté de phase.

Les modems essayés sont les suivants:

- a) Récepteur cohérent Costas
- b) Récepteur cohérent à filtre accordé
- c) Récepteur MDPCD
- d) Récepteur Costas/CAF.

3.3.4.2 *Largeurs de bande*

Pour tous les récepteurs, les largeurs de bande de filtres et de boucles ont été optimisées, soit au moyen de simulation par ordinateur lors de leur réalisation, soit par optimisation au cours des essais.

Pour l'évanouissement de Rayleigh synthétique, les meilleurs résultats sont donnés par le récepteur a) dans le cas d'un rapport S/N élevé (35 dB) et par le récepteur d) dans le cas d'un rapport S/N faible (20 dB). Contrairement à ce qu'indiquent les courbes théoriques qui supposent une parfaite synchronisation de phase, les courbes de TEB plafonnent à 1×10^{-4} avec un rapport S/N de 35 dB, en raison des variations de phase.

3.3.4.3 *Récepteurs*

Pour les voies mises en mémoire, le récepteur d) convient le mieux car il est apte à suivre les variations de phase et de fréquence de la liaison. Les marges d'évanouissement sont indiquées au Tableau III. Le récepteur qui convient le mieux après le récepteur d) est le récepteur c).

3.3.4.4 *Conclusions*

En conclusion, les résultats de mesure sur les caractéristiques de modems obtenues par l'intermédiaire de voies mises en mémoire, indiquent que, parmi les diverses solutions envisagées, la plus indiquée consiste probablement à utiliser un récepteur cohérent combiné Costas/CAF ou un récepteur MDPCD. Si on utilise une correction d'erreur sans voie de retour, le choix des récepteurs est moins critique parce que, pour des taux d'erreur de voie compris entre 5×10^{-3} et 1×10^{-2} , la caractéristique du récepteur ne varie que de 1 dB. Ces résultats qui figurent au Tableau III ne s'appliquent qu'aux modems mis à l'essai. Il convient de noter que l'application de certaines techniques (correction d'erreur sans voie de retour, notamment) implique une diminution de la marge nécessaire et donc de la p.i.r.e. de la station spatiale et de la station terrienne de navire (voir le Rapport 921).

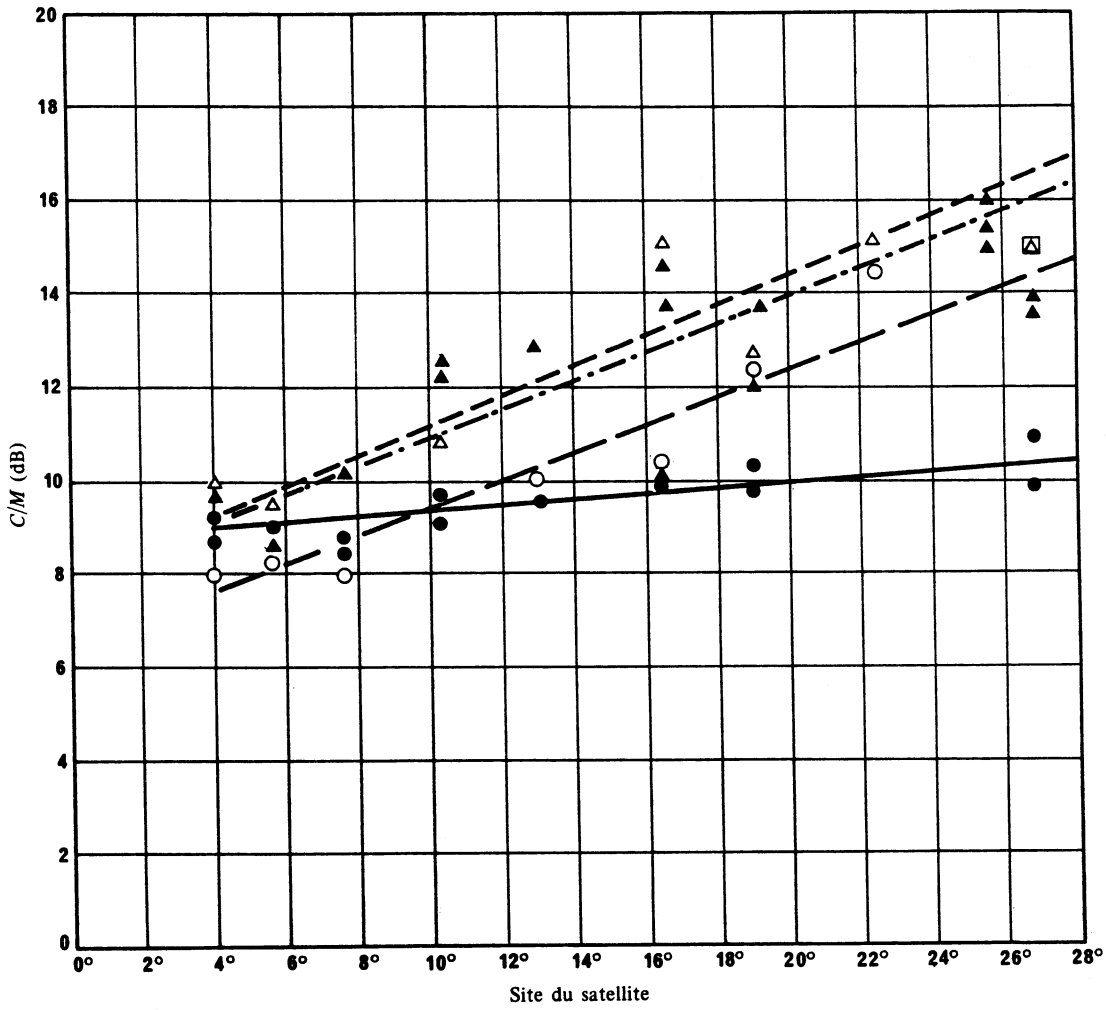


FIGURE 11 - Rapport de la puissance du signal par le trajet direct à la puissance du signal par trajet multiples (C/M), exprimé en dB, en fonction du site du satellite

●	Mesuré	antenne C3	gain de 3 dB
—	Meilleure adaptation		
○	Mesuré	antenne C5	gain de 5 dB
- - -	Meilleure adaptation		
▲	Mesuré	antenne C11	gain de 11 dB
- · - · -	Meilleure adaptation		
△	Mesuré	antenne C14	gain de 14 dB
- - - - -	Meilleure adaptation		

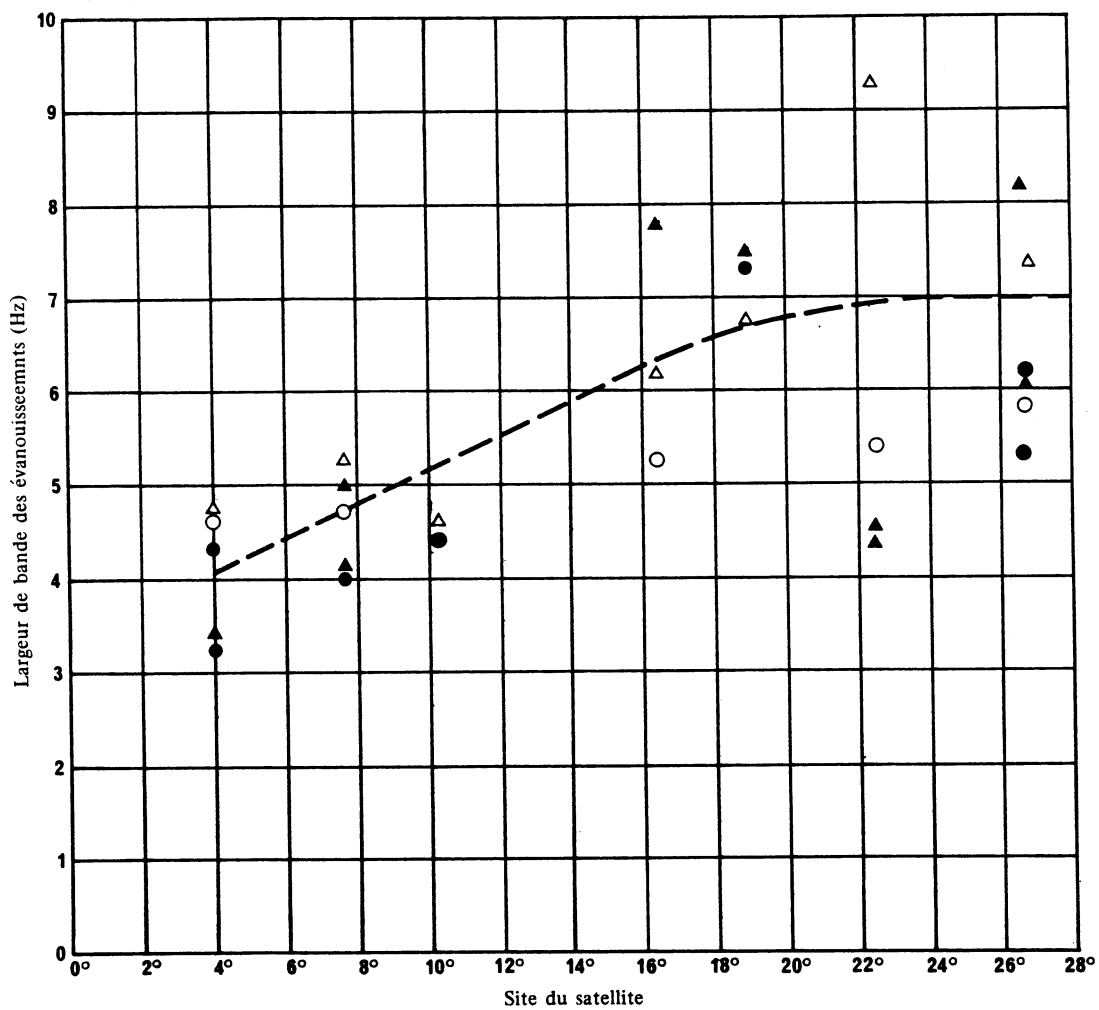


FIGURE 12 - Largeur de bande d'évanouissement à 20 dB, exprimée en Hz, en fonction du site du satellite

- antenne C3 gain de 3 dB
- antenne C5 gain de 5 dB
- ▲ antenne C11 gain de 11 dB
- △ antenne C14 gain de 14 dB

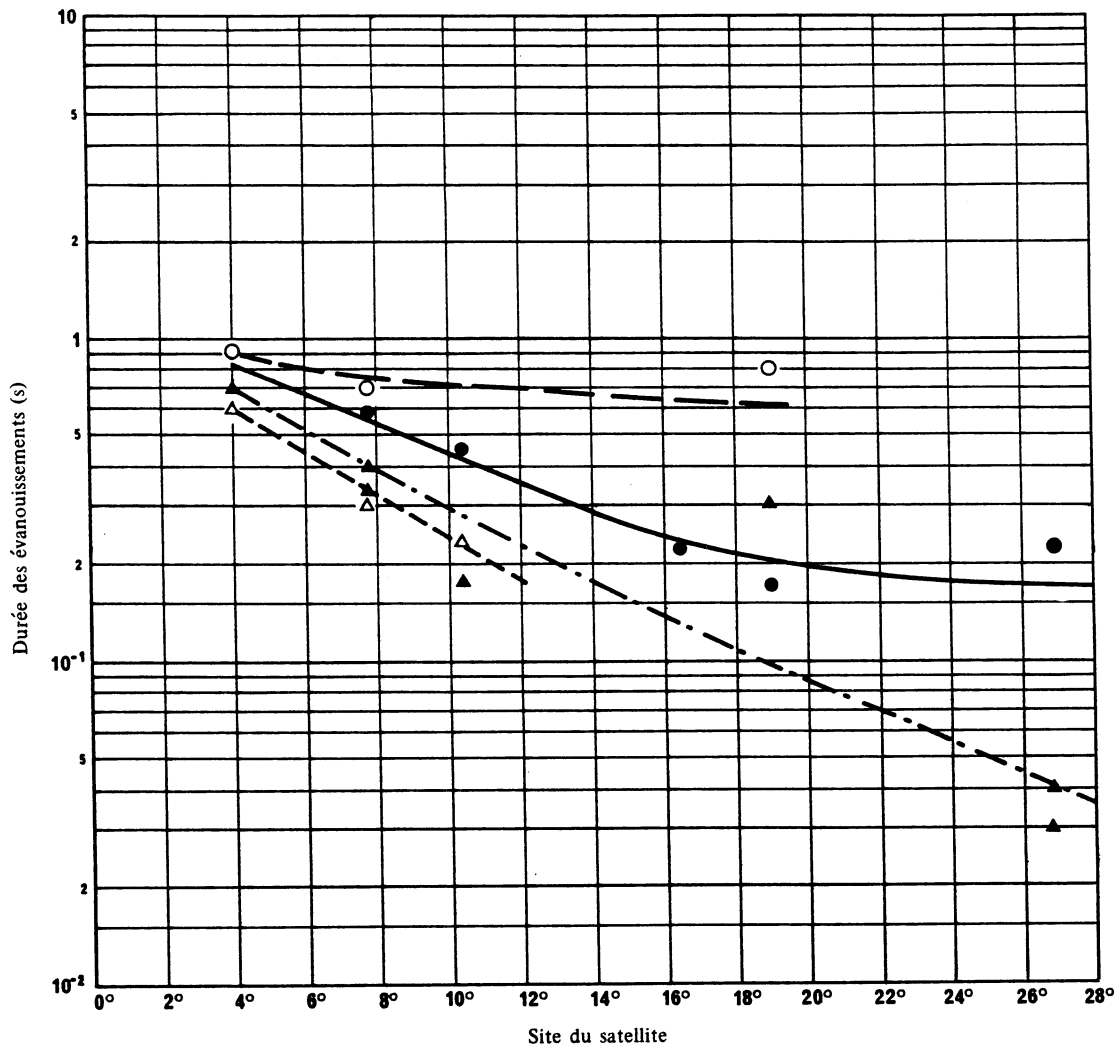


FIGURE 13 - Durée maximale des évanouissements (de 5 dB en dessous de la puissance moyenne) pour 99,9% du temps en fonction du site du satellite

- | | | | |
|-----------|----------------------|-------------|---------------|
| ● | Mesuré | antenne C3 | gain de 3 dB |
| — | Meilleure adaptation | | |
| ○ | Mesuré | antenne C5 | gain de 5 dB |
| - - - | Meilleure adaptation | | |
| ▲ | Mesuré | antenne C11 | gain de 11 dB |
| - · - · - | Meilleure adaptation | | |
| △ | Mesuré | antenne C14 | gain de 14 dB |
| - - - - - | Meilleure adaptation | | |

TABLEAU III — Rapports E_b/N_0 nécessaires et marges d'évanouissement pour des antennes et des angles de site différents (Récepteur MDP-2 Costas/CAF)

Gain d'antenne (dB)	Angle de site (degrés)	E_b/N_0 nécessaire avec évanouissement (dB)		E_b/N_0 nécessaire sans évanouissement (dB)		Marge d'erreur nécessaire (dB) (long terme)	
		TEB = 1×10^{-4}	TEB = 1×10^{-5}	TEB = 1×10^{-4}	TEB = 1×10^{-5}	TEB = 1×10^{-4}	TEB = 1×10^{-5}
3	4	19	25	10	11	9	14
	19	14	18	10	11	4	7
5	4	20	30	10	11	10	19
11	4	18	33	10	11	8	22
	19	12	14	10	11	2	3

Note. — Les antennes utilisées pour ces mesures étaient du type non stabilisé et le pointage du satellite était manuel.

4. Conclusions

Le Japon a analysé théoriquement l'influence exercée sous la forme d'interférences par une propagation par trajets multiples — due à des réflexions sur la surface de la mer — sur le taux d'erreur sur les bits d'un signal MDP-2 cohérent et d'un signal MDF-2 non cohérent, dans l'hypothèse où la distribution d'amplitude de la composante réfléchie est une distribution en m . La distribution en m permet de traiter presque tous les phénomènes d'évanouissement, que la réflexion du signal soit du type spéculaire ou présente une distribution gaussienne. Les méthodes et graphiques contenus dans le § 2.1 servent utilement à estimer la marge de puissance appropriée à une protection contre les évanouissements, mais il faudrait évaluer m et C/M expérimentalement.

Les résultats d'analyses théoriques et les données expérimentales obtenus par les Etats-Unis avec ATS-6 en utilisant une antenne de navire dont le faisceau était large de 35° indiquent qu'une marge de 5 dB rendra possible dans des conditions idéales une valeur de 10^{-5} pour P_e lorsque $C/M = 12$ dB. Il est probable que dans la réalité, une marge de 5 dB ne permettra d'obtenir $P_e = 10^{-5}$ que lorsque la valeur de C/M dépassera 14 dB environ. Ce niveau (ou un niveau moindre) par trajets multiples a été typiquement obtenu lorsque l'angle de site en direction du satellite était égal à la moitié (ou plus) de la largeur du faisceau de l'antenne.

Les courbes expérimentales tracées à la Fig. 9 et obtenues par la France avec ATS-6 illustrent l'influence d'une propagation par trajets multiples sur le taux d'erreur avec l'antenne de gain 20 dB utilisée. On constate que ces courbes expérimentales sont décalées par rapport à la courbe du bruit thermique d'une valeur (en dB) qui croît quand l'angle de site diminue, comme le prévoit la théorie. Pour un taux d'erreur compris entre 1×10^{-3} et 1×10^{-4} , on trouve que les suppléments de puissance nécessaires du fait de la propagation par trajets multiples sont en moyenne les suivants:

- angle de site 5° : 2 dB
- angle de site 10° : 1 dB
- angle de site supérieur ou égal à 15° : 0,5 dB environ.

La discrimination exercée par l'antenne à 20 dB stabilisée a amélioré sensiblement la qualité de la transmission numérique à modulation par déplacement de phase bivalente.

Pour les essais qu'elle a effectués avec MARECS en 1983, la République fédérale d'Allemagne a appliqué le principe de la voie mise en mémoire. La comparaison entre les transmissions de données par satellite et par la voie mise en mémoire en laboratoire ainsi que l'évaluation des statistiques d'amplitude ont confirmé que l'on pouvait utiliser valablement la méthode de la voie mise en mémoire et le modèle d'évanouissements Rice-Nakagami.

On a constaté que les valeurs suivantes étaient caractéristiques d'une antenne de norme C, avec un angle de site de 5° :

- $C/M = 9$ dB
- une marge de protection contre les évanouissements de 8 dB pour une transmission de données avec modulation MDP-2 et un taux d'erreur binaire (TEB) = 1×10^{-4} .

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ENGELS, P. et autres [février 1976] Maritime communications experiments and search-and-rescue evaluations with the NASA ATS-6 satellites. Rapport N° DOT-TSC-USCG-76.
- HAGENAUER, J., DOLAINSKY, ETBAUER, GRÄBEL, LOTZ, PAPKE, W., PLÖCHINGER et SCHWEIKERT, R. [novembre 1984] Multipath fading effects and data transmission for small ship earth stations (Standard C). DFVLR Final Report, 223 pages (en allemand). DFVLR, D-8031 Oberpfaffenhofen, Allemagne (République fédérale d'). Préparé au titre du contrat ESA/ESTEC N° 5323/82/NL/JS.
- MIZUNO, T., MORINAGA, N., NAMEKAWA, T. et HIRATA, Y. [juin 1975] Effects of multipath interference in aeronautical and maritime satellite communication links. IEEE International Conference on Communications (ICC '75) San Francisco, Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record 10.11-10.15.
- MODESTINO, J. W. et MUI, S. Y. [juin 1976] Convolutional code performance in the Rician fading channel. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-24, 6, 592-606.
- NAKAGAMI, M. [1960] The m-distribution – a general formula of intensity distribution of rapid fading. *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, W. C. Hoffman, éd. Oxford, UK, 3.
- SALWEN, H. [9 août 1972] Multipath effects in the Marsat system, Tech. Memo A100-1, Transportation Systems Center, Dept. of Transportation, Cambridge, Mass, Etats-Unis d'Amérique.
- SALWEN, H. [mars 1975] Differential phase shift keying performance under time selective multipath fading, *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-23, 3, 383-385.
- SALWEN, H. et DUNCOMBE, C. [juillet 1975] Performance evaluation of data modems for the aeronautical satellite channel. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-23, 7, 695-705.
- SCHWEIKERT, R., PAPKE, W., HAGENAUER J. [1980] Mesures dans les voies et transmission de données par une voie maritime réelle via satellite et par une voie mise en mémoire (MARISAT) – Rapport interne DFVLR, NE-NT-T-26/80, 144 pages (en allemand). Peut être obtenu au DFVLR/NT, D-8031 Oberpfaffenhofen, Allemagne (République fédérale d').
-