

## RAPPORT 1169\*

INFLUENCE DES TRAJETS MULTIPLES DUS A LA REFLEXION SUR LA MER  
SUR LE SERVICE MOBILE AERONAUTIQUE PAR SATELLITE

(Question 88/8)

1. Introduction

(1990)

Les trajets multiples, surtout ceux qui sont dus à la réflexion sur la mer, représentent un paramètre significatif dont il y a lieu de tenir compte dans la définition d'un système mobile aéronautique à satellites dans la bande 1,5/1,6 GHz. Les nouvelles informations contenues au § 3 du présent rapport confirment, une fois encore, les résultats des expériences précédentes et complètent les recherches effectuées en vue de caractériser les trajets multiples.

Un certain nombre d'éléments interviennent dans l'influence que les trajets multiples dus aux réflexions sur la mer peuvent avoir sur les communications mobiles aéronautiques par satellite, et c'est précisément pour cette raison que la caractérisation de ce paramètre a reçu un rang de priorité élevé dans les premières expériences, amorcées au début des années 70:

- 1) niveau prévu de puissance du signal réfléchi par rapport au signal par trajet direct;
- 2) caractéristiques des signaux transmis par trajets multiples;
- 3) faible capacité des antennes d'aéronef en matière de discrimination des signaux réfléchis par la mer (particulièrement dans le cas de faibles angles de site et d'antennes relativement peu onéreuses, à large faisceau et faible gain).

Le § 4 du présent Rapport donne les tous premiers renseignements sur la qualité de fonctionnement d'un réseau d'antennes à commande de phase destiné à être installé sur des aéronefs, en ce qui concerne l'influence des trajets multiples dus à la réflexion sur la mer.

2. Expériences en conditions réelles par l'intermédiaire de satellites ATS

Les premières expériences complètes portant sur les trajets multiples effectuées par le service mobile aéronautique par satellite dans la bande 1,5 / 1,6 GHz se sont déroulées à l'initiative de l'Administration aéronautique fédérale des Etats-Unis d'Amérique (U.S. Federal Aviation Administration (FAA)); elles reposaient sur l'utilisation du satellite ATS N° 5 (Application Technology Satellite) de l'Agence spatiale des Etats-Unis d'Amérique (U.S. National aeronautic and Space Administration - NASA). Diverses expériences de caractérisation des trajets multiples et des transmissions de données ont été effectuées en ondes entretenues dans des conditions - état de la mer, angle de site, rapports trajet direct/trajets multiples - très diverses [FAA, 1973].

---

\* Ce Rapport devra être communiqué à la Commission d'études 5 pour information.

Le Canada a lui aussi procédé à des expériences sur les trajets multiples, destinées à compléter celles de la FAA, en utilisant des codes pseudo-aléatoires [Chinnick et Matt, 1971]. Au milieu des années 70, la FAA a parrainé un programme d'expérimentation plus poussé portant sur la caractérisation des trajets multiples à large bande; il s'agissait de définir un simulateur de canal, en utilisant le satellite ATS-6 de la NASA [FAA, 1976]. La qualité de diverses liaisons de données et techniques de modulation téléphonique a également été évaluée au moyen de ce satellite ATS-6, beaucoup plus puissant, doté d'une antenne de 9 mètres de diamètre. Le programme général ATS-6 recouvrait également les programmes élaborés par le Canada et l'Agence spatiale européenne (dont la dénomination officielle était à l'époque Organisation européenne de recherches spatiales).

Ces programmes et leurs résultats sont résumés dans les documents mentionnés plus haut et dans les documents du CCIR (Rapports 505 et 599, Kyoto, 1978). Les expériences de caractérisation des trajets multiples dus à la réflexion sur la mer ont fourni les principaux résultats suivants:

- 1) la relation entre la puissance du signal multitrajet et l'angle de site correspond, dans l'ensemble, aux valeurs prévues;
- 2) le signal multitrajet présente des caractéristiques analogues au bruit (distribution de Rayleigh, et non pas spéculaire);
- 3) la somme du trajet direct et des trajets multiples était caractérisée par une distribution de Rice, et
- 4) les caractéristiques d'affaiblissement du signal résultant reçu montrent qu'il est nécessaire de structurer le signal (par voie de codage et d'entrelacement, par exemple) pour limiter les salves d'erreurs périodiques qui se produisent dans le canal des fréquences radioélectriques; les résultats obtenus ont facilité cette tâche.

### 3. Expériences effectuées par la République fédérale d'Allemagne

3.1 Au cours de mesures effectuées en 1985 et 1986 en République fédérale d'Allemagne, on émettait à partir d'un satellite INMARSAT MARECS, une porteuse continue stable, et on enregistrait séparément à bord d'un avion le signal direct et le signal réfléchi sur des trajets multiples. Au moyen des enregistrements on commandait un simulateur de voie en laboratoire (principe de la voie mise en mémoire) et on déterminait la fonction de distribution de probabilité du signal réfléchi. En outre, on déterminait la durée moyenne des évanouissements sur une liaison avec une antenne d'aéronef préopérationnelle de 3 dB de gain [Hagenauer et autres, 1986]. Ce programme de mesures est exposé plus en détail dans la suite du présent Rapport.

#### 3.1.1 Modèle du canal et vérification

#### 3.1.2 Modèle théorique du canal

Si le satellite transmet un signal  $x(t)$  l'aéronef reçoit en général deux composantes. La composante directe  $y_d(t-t_0)$  et la composante réfléchie (trajets multiples)  $y_r(t-t_0-\tau)$  venant de la surface de la Terre. Le temps de propagation  $t_0$  n'a pas d'influence sur le modèle de la voie et on le négligera donc ci-après. Le délai différentiel  $\tau$  dépend essentiellement de la configuration géométrique. On peut le calculer en fonction de l'angle de site  $\epsilon$  par rapport au satellite, et le lire sur la Figure 1 en fonction de l'altitude de l'aéronef.

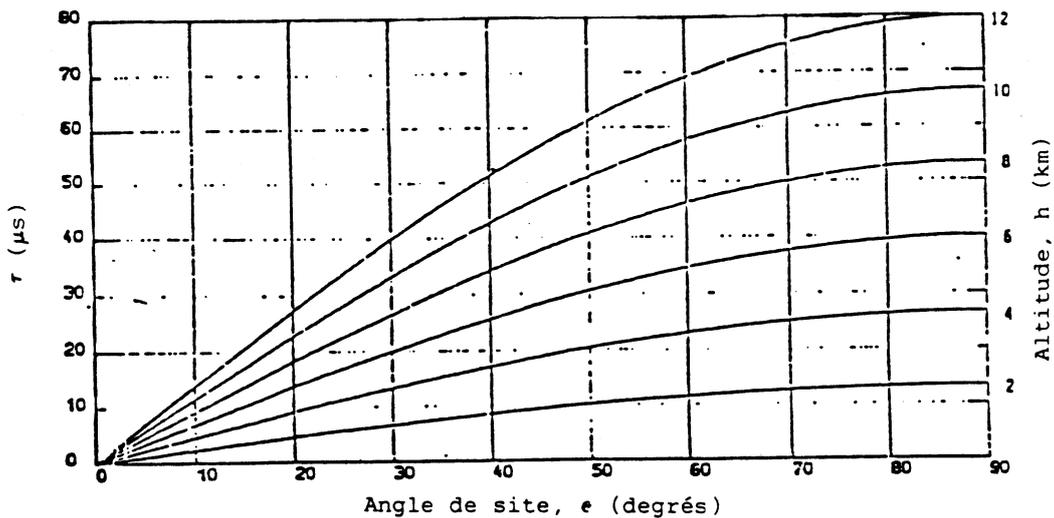


FIGURE 1

Décalage différentiel  $\tau$  entre les signaux direct et réfléchi en fonction de l'angle de site et de l'altitude

Au récepteur de l'aéronef le signal  $y(t)$  résulte de l'addition dans l'antenne utilisée des composantes directe et réfléchie. Cette réception par trajets multiples est à l'origine des évanouissements du signal. Etant donné que le coefficient de réflexion du sol est beaucoup plus faible que celui de l'eau salée, on considère surtout ci-après la réception avec trajets multiples au-dessus de la mer.

En raison du déplacement de l'aéronef et des irrégularités de la surface terrestre on prend en principe pour modèle de la voie aéronautique une voie qui varie de façon aléatoire avec le temps. La théorie des voies à variation aléatoire avec le temps est exposée dans un article fondamental [Bello, 1963]. En l'appliquant au cas de l'aéronautique, on peut considérer que la composante réfléchie du signal est émise sur une voie dispersée non corrélée stationnaire au sens large [Bello, 1973 - FAA, 1976, Vol. 5]. Pour toutes les largeurs de bande  $B$  de signal considérées [Hagenauer, Papke, 1982] on caractérise la voie par des évanouissements multiplicatifs (non sélectifs en fréquence); c'est-à-dire que la fonction temporelle de transfert,  $T(f, t)$ , est indépendante de la fréquence dans les limites suivantes:

$$T(f, t) = T(t) \text{ pour } f_0 - \frac{B}{2} < f < f_0 + \frac{B}{2} \quad (1)$$

$f_0$  = fréquence de la porteuse

### 3.1.3 Vérification de la voie

Les signaux direct et réfléchi sont reçus au moyen de deux chaînes de réception distinctes et enregistrés finalement sur bande sous forme analogique. On peut utiliser en laboratoire les enregistrements des signaux direct et réfléchi ainsi que le simulateur de voie mise en mémoire [Hagenauer, Papke, 1982], pour simuler tous les diagrammes d'antenne voulus. On peut en outre effectuer après coup une évaluation statistique précise.

Ces deux chaînes de réception étaient équipées d'une antenne pour la réception du signal direct (antenne de gain 10 dB, orientable électroniquement, à réseau d'éléments en phase non coplanaires) [Splitt, Forster, 1986] et d'une paire d'antennes de réception des signaux réfléchis à polarisation gauche et droite (antennes de gain 10 dB, type hélice, orientables mécaniquement, installées près de la queue, orientées vers le point de réflexion spéculaire).

## 3.2

Résultats3.2.1 Facteur de Rice C/M

La Figure 2 présente, pour une antenne idéale à gain égal à 0 dBi et pour une antenne de 3 dBi de gain les rapports mesurés "puissance directe reçue C" sur "puissance de la composante en polarisation circulaire droite du trajet multiple M" en fonction de l'angle de site.

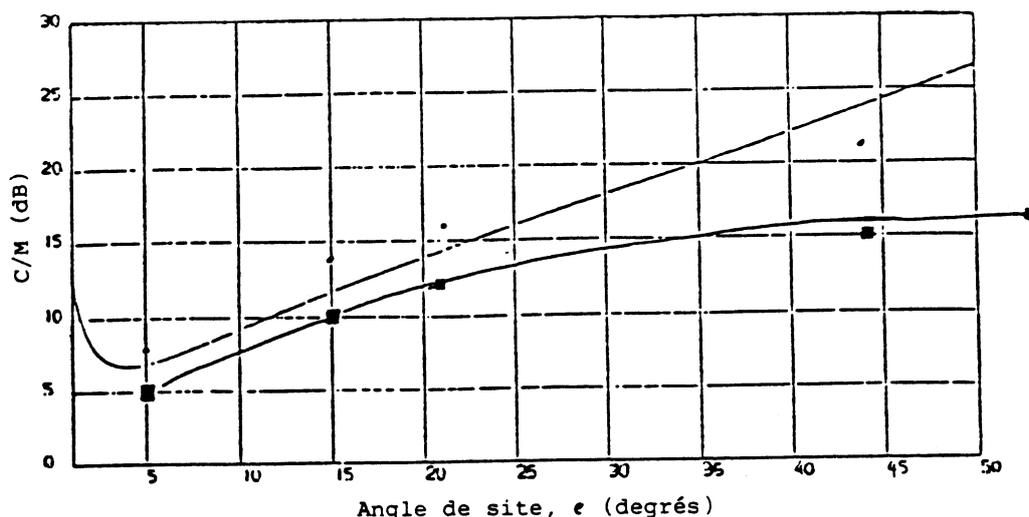


FIGURE 2

Rapports entre la puissance directement recue mesurés et la puissance des trajets multiples en fonction de l'angle de site pour les antennes indiquées, et prévisions théoriques

- Antenne 0 dBi
- Antenne préopérationnelle, 3 dBi

Dans un vaste domaine, il y a une bonne concordance avec le C/M calculé à partir des coefficients de réflexion de Fresnel pour des réflexions spéculaires et le facteur de divergence [Beckmann, Spizzichino, 1963].

3.2.2 Largeur de bande du spectre de puissance Doppler

Conformément à la théorie exposée dans [Bello, 1973], le spectre de puissance Doppler du signal réfléchi a une allure gaussienne:

$$P(\nu) = \frac{\sqrt{2}}{B_{rms} \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{2\nu^2}{B_{rms}^2}\right) \quad (2)$$

Toutes les mesures ont confirmé cette allure gaussienne.

Dans (2) on évalue la valeur quadratique moyenne de l'étalement Doppler au double de l'écart type de  $P(\nu)$

$$B_{rms} = 4 \frac{\alpha}{\lambda_0} \cdot v \cdot \sin \epsilon \quad (3)$$

où  $\alpha$  est la valeur quadratique moyenne de la pente de la surface,  $\lambda$  la longueur d'onde de la porteuse émise et  $v$  la vitesse de l'aéronef le long d'un trajet à angle de site constant. La Figure 3 compare les valeurs de  $B_{rms}$  mesurées à celles que donne l'équation ci-dessus, où  $\alpha$  égal 0,04, 0,12 et 0,2,  $\lambda_0 = 0,2$  m et  $v = 380$  noeuds.

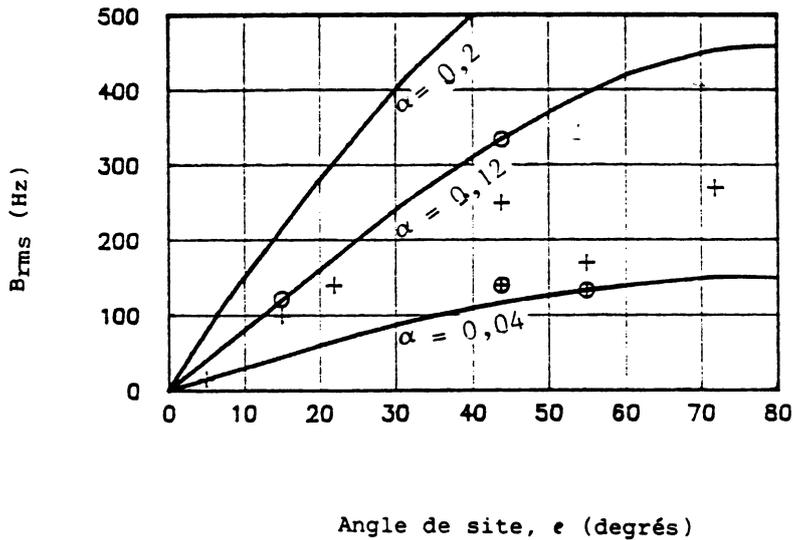


FIGURE 3

Valeurs mesurées de l'étalement Doppler en fonction de l'angle de site et des valeurs quadratiques moyennes de la pente de la surface

- x Composante gauche au niveau de vol 30 000 pieds
- O Composante droite au niveau de vol 30 000 pieds
- ⊕ Composante gauche au niveau de vol 6 000 pieds

3.2.3 Durée des évanouissements et intervalle de connexion

On est en présence d'un évanouissement lorsque la puissance reçue tombe au-dessous d'un certain seuil. Dans ce qui suit on considère les seuils "puissance moyenne (0 dB)" et "5 dB au-dessous de la puissance moyenne".

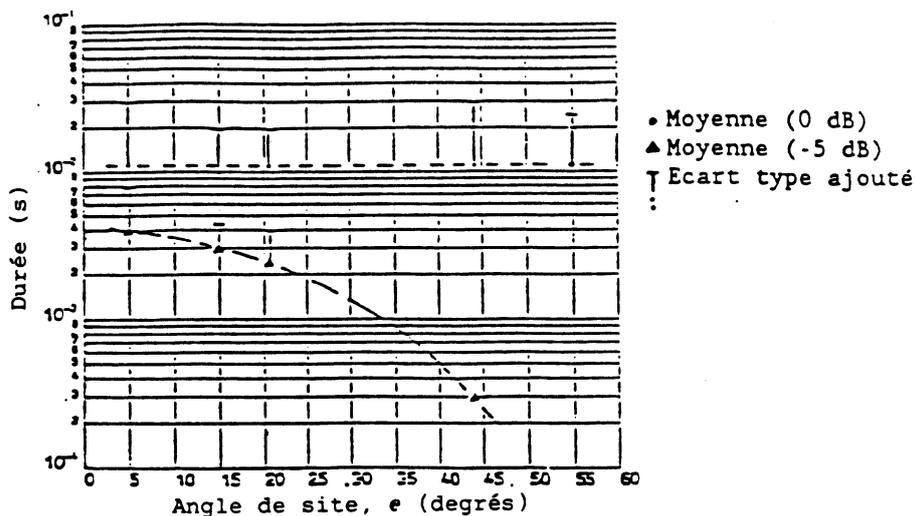


FIGURE 4

Durée moyenne des évanouissements en fonction de l'angle de site

La Figure 4 présente les durées moyennes des évanouissements  $T_{f\text{mean}}$ , obtenues en traitant les résultats de cinq vols d'essai, en fonction de l'angle de site.

Pour le seuil de 0 dB la durée moyenne des évanouissements est pratiquement indépendante de l'angle de site alors qu'elle décroît sensiblement pour le seuil de -5 dB. On notera que l'écart type est assez élevé.

Il est aussi intéressant de considérer la durée maximale des évanouissements  $T_{f\text{max}}$  et la durée  $T_{f99,9}$  qui a une probabilité de 99,9% de ne pas être dépassée par un évanouissement. La Figure 5 présente ces deux valeurs pour de faibles angles de site de vol.

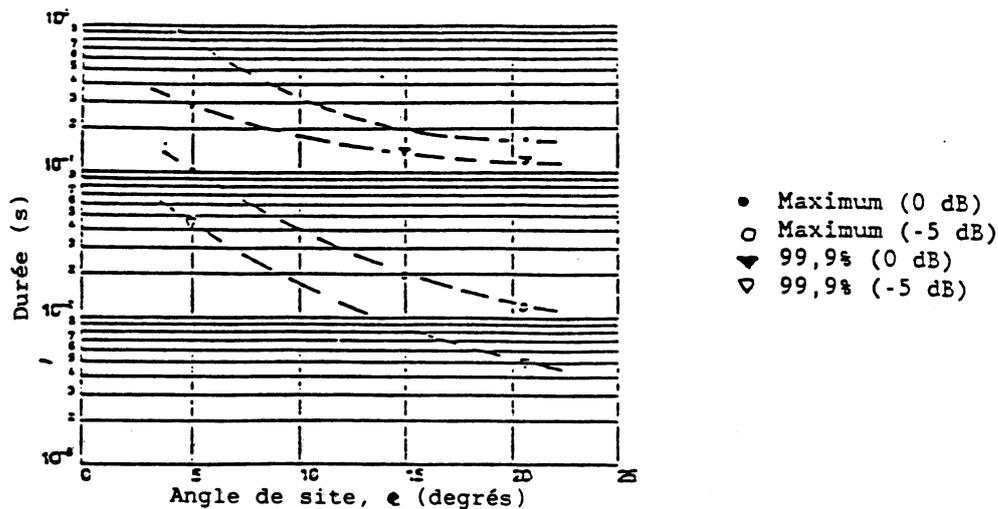
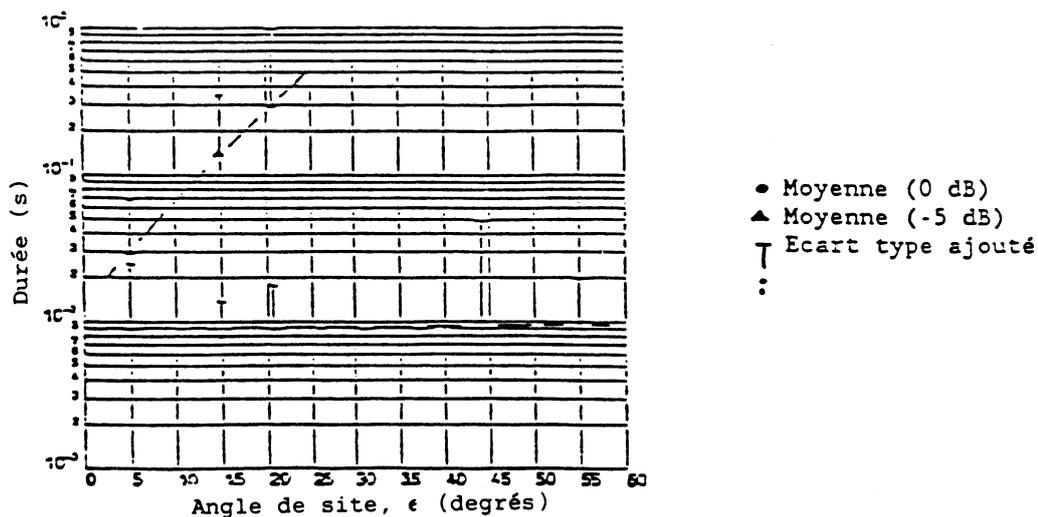
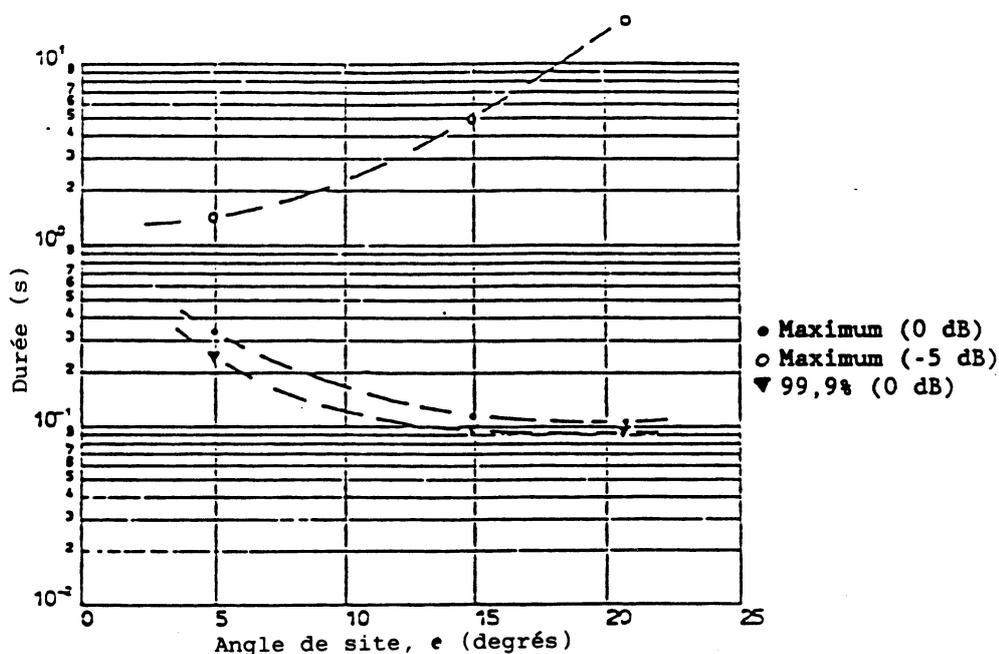


FIGURE 5

Durée maximale et à 99,9% des évanouissements en fonction de l'angle de site

L'événement complémentaire de l'évanouissement est la connexion. Les intervalles de connexion ont une grande importance pour le débit des transmissions de données mises en paquets. Les Figures 6 et 7 présentent les résultats obtenus pour  $T_{c\text{mean}}$ ,  $T_{c\text{max}}$  et  $T_{c99,9}$ .

FIGURE 6 - Durée moyenne de connexion en fonction de l'angle de siteFIGURE 7 - Durée maximale et à 99,9% de la connexion en fonction de l'angle de site

### 3.3 Conclusions

Au cours des mesures effectuées en 1985 et 1986 en République fédérale d'Allemagne on s'est servi, pour représenter la voie de télécommunications par satellite aéronautique, d'une porteuse continue émise par un satellite INMARSAT MARECS. Les essais mettaient en jeu le principe de la voie mise en mémoire et comprenaient une réception séparée des composantes du signal direct et réfléchi ainsi que des mesures au moyen d'une antenne préopérationnelle d'aéronef, de 3 dB de gain. Des données résultant de ce programme de mesures, qui figurent dans le présent rapport, on peut tirer les conclusions ci-dessous:

- 1) La composante du signal réfléchi s'est révélée suivre exactement une distribution de Rayleigh. On a trouvé que la valeur quadratique moyenne de l'étalement Doppler se situait entre 10 Hz (à 5° d'angle de site) et 330 Hz (à 44° d'angle de site).

- 2) L'étude statistique des données mesurées avec l'antenne préopérationnelle confirme la validité du modèle d'évanouissements de Rice avec des C/M compris entre 5 dB pour un angle de site de 5° et 15 dB pour 55° d'angle de site.
- 3) Avec un seuil de 5 dB au-dessous de la puissance moyenne la durée moyenne des évanouissements est de 4 ms pour un angle de site de 5° et n'est plus que 0,3 ms à 44°. Pour 5° d'angle de site, on a mesuré une durée maximale d'évanouissement de 100 ms.
- 4) Pour un seuil de 5 dB au-dessous de la puissance moyenne, la durée moyenne d'un intervalle de connexion (puissance du signal au-dessus du seuil) est de 30 ms pour un angle de site de 5° et atteint 300 ms à 21°.

4. Expériences de radionavigation aéronautique par satellite effectuées par le Japon

Au Japon, des expériences de radionavigation aéronautique par satellite par l'intermédiaire des satellites ETS-V et INMARSAT ont été effectuées dans les bandes 1,5/1,6 GHz à l'aide d'avions à réaction commerciaux sur des vols transocéaniques. Un réseau d'antennes de type opérationnel à réseau de phase en deux étages de 16 éléments utilisant des portions circulaires de ruban a été installé sur le fuselage d'un aéronef de type B-747.

Aucun évanouissement par trajets multiples dû à la réflexion sur la mer n'a été observé, même pour de petits angles de site. Cela tient au fait que les signaux réfléchis par la mer ont été arrêtés par les ailes et le fuselage sans pouvoir atteindre l'antenne installée sur la partie supérieure du fuselage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BECKMANN, P., SPIZZICHINO, A. [1963] - The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces", New York: Pergamon.

BELLO, P.A. [décembre 1963] - Characterization of randomly time-variant linear channels, IRE Trans. Comm. Syst., Vol. CS-11, p. 360-393.

BELLO, P.A. [mai 1973] - Aeronautical channel characterization", IEEE Trans. Comm., Vol. COM-21, p. 548-563.

CHINNICK, J., MATT, E. [décembre 1971] - Spread spectrum measurements of multipath channel characterization in a satellite mobile communication system, Canadian Communication Research Centre.

FAA [avril 1973] - ATS-5 Multipath/digital data/ranging L-Band experimental programme, Report N° FAA-RD-73-57, Multivolume.

FAA [février 1976] - Air traffic control experimentation and evaluation with the NASA ATS-6 satellite", Report N° FAA-RD-75-173, 10 Volumes.

HAGENAUER, J., PAPKE, W. [mai 1982] - Data transmission for maritime and land mobile using stored channel simulation, Proc. of the 32nd IEEE Vehicular Tech. Conference, San Diego, p. 379-383.

HAGENAUER, J., NEUL, A. et autres, - The aeronautical satellite channel. Final report, 1986, DFVLR, 8031 Oberpfaffenhofen, République fédérale d'Allemagne.

SPLITT, G., FORSTER, H. - Eine konforme Flugzeug-Array-Antenne mit schwenkbarer Strahlungscharakteristik zur Satellitenkommunikation im L-Band, DFVLR-FB 86-47, DFVLR, 8031 Oberpfaffenhofen, République fédérale d'Allemagne.

#### BIBLIOGRAPHIE

HASE, Y., TAIRA, S., WAKANA, H. et OHMORI, S. [juin, 1989] ETS-V/EMSS experiments on aeronautical communications. IEEE International Conference on Communications (ICC '89), Boston, Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record.

MAKITA, F., NAKAMURA, H., KASHIWABARA, S., SAITOH, H., KOSAKA, K. et MAEKITA, M. [octobre, 1988] Fields Trials of Aeronautical Satellite Communication System. 4th International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigations.

---