

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



ETUDE EXPERIMENTALE DES TRAJETS MULTIPLES EMIS PAR LES REFLEXIONS SUR
LA SURFACE DE LA MER

Messieurs A. RIBES et JF. DULCK

C. N. E. S. (Centre National d'Etudes Spatiales) 18 avenue E. BELIN - 31400 - TOULOUSE

RESUME

Les liaisons radioélectriques entre un satellite et des plates-formes marines font intervenir le phénomène de réflexions multiples sur la surface de la mer. La dégradation supplémentaire sur l'atténuation en espace libre, causée par les interférences est un paramètre important à prendre en compte dans l'évaluation des bilans de liaison.

C'est à la demande de l'E.S.R.O. que le Centre National d'Etudes Spatiales a conçu et réalisé une expérience dans le but de préciser ces pertes pour le projet METEOSAT. C'est ainsi qu'une liaison satellite/bouée a été simulée : la fréquence émise et les types de modulation utilisés ont été choisis en fonction des impératifs liés à ce projet.

Les résultats obtenus sont groupés en deux catégories :

- la première, qui concerne la porteuse non modulée, traduit l'influence des interférences dues aux réflexions spéculaires, sur le signal reçu ;
- la seconde, qui concerne la porteuse modulée, traduit l'influence de la composante diffuse du signal réfléchi par la mer. Cette influence a été vérifiée au niveau de la probabilité d'erreur de bits ainsi que sur la statistique des intervalles de temps qui séparent les erreurs.

SUMMARY

The multipath phenomena has to be taken into account in satellite-sea platforms links budget computations ; path loss degradations due to interferences is a significant parameter.

After an ESRO request, C.N.E.S. has designed an experiment to specify these losses for METEOSAT project. The choice of transmitted frequency and modulation techniques of the satellite-platform link simulation are related to this project.

Two kinds of results have been obtained :

- interference effect of the specular part of the reflected wave on an unmodulated signal ;
- interference effect of the diffuse part of the reflected wave on a phase-modulated signal by measuring bit error probability and time intervals statistics.



ETUDE EXPERIMENTALE DES TRAJETS MULTIPLES EMIS PAR LES REFLEXIONS SUR LA SURFACE DE LA MER

I - OBJECTIFS DE L'EXPERIENCE

L'expérience "Trajets Multiples" a été entreprise dans le cadre de la mission Collecte de Données du satellite météorologique "METEOSAT". L'intérêt de cette expérience, réalisée à la demande de l'E.S.R.O., débordait largement du cadre choisi. Deux séries d'expériences en UHF basse (bande des 400 MHz), ont été réalisées. La première, effectuée en onde pure, avait pour objectif principal la détermination de la marge à prendre pour compenser les pertes de puissance dues aux Trajets Multiples. Le diagramme de rayonnement et la polarisation de l'antenne disposée au dessus de la surface de la mer, interviennent dans le calcul de cette marge. Aussi, nous avons expérimenté trois types d'antenne qui sont :

- une spirale plane - polarisation circulaire gauche - gain différentiel : 3 dB à 10° ;
- une spirale conique - polarisation circulaire gauche - gain différentiel : 4 dB à 10° ;
- une antenne cylindre - polarisation verticale gain différentiel : 6,5 dB à 10°.

La seconde, effectuée en onde modulée, avait pour objectif la comparaison des performances de différents types de modulation et de codage afin de déterminer celui qui est le moins sensible aux perturbations créées par les trajets multiples.

Les types de modulation qui ont fait l'objet de mesures sont les suivants (cf. figure n° 1) :

- PCM/Biphase à 128 b/s et 1024 b/s ;
- PCM/PSK à (128 et 1024) b/s sous porteuse à (1024 et 8192) Hz ;
- PCM/FSK/AM à 128 b/s ($f_0 = 936$ Hz, $f_1 = 1310$ Hz)
- PCM/Biphase avec codage convolutionnel de Viterbi dont les caractéristiques étaient :
 - taux d'extension de bande $R = 1/2$,
 - contrainte de code $K = 7$,
 - rythme des symboles : 2084 b/s.

En outre, il existait la possibilité de choix de l'indice de modulation de phase de la porteuse : 1,22 ou 0,8 radian. La faible cadence de bits correspondait au problème particulier du projet "METEOSAT".

II - PRINCIPE DE LA SIMULATION DE LA LIAISON SATELLITE

PLATE-FORME

Dans le cas du satellite "METEOSAT", une plate-forme collecte des données en mer et les envoie au satellite. Le satellite les renvoie à une station terrienne.

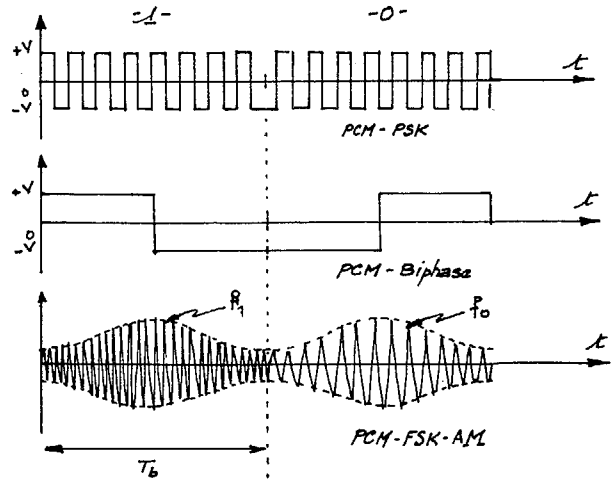


Figure n° 1 : Formes d'onde émises.

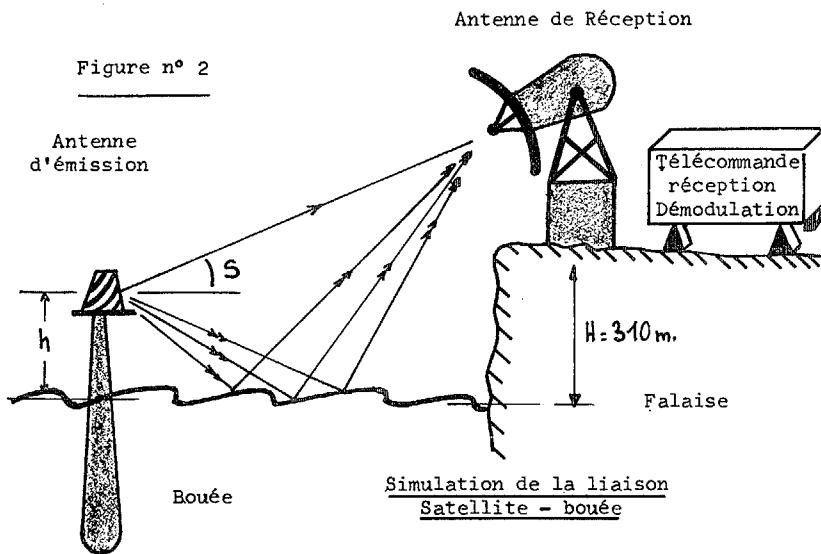
Les plates-formes sont disposées à la surface de la mer et par conséquent "voient" le satellite sous des angles de site différents. Pour simuler la liaison et pouvoir modifier la configuration géométrique de celle-ci, nous avons choisi l'utiliser (cf. figure n° 2) :

- une falaise en bordure de la Méditerranée sur laquelle ont été installés une antenne de réception et les équipements de mesure. Cette falaise, au profil abrupt, avait une altitude de 310 m et permettait d'obtenir des angles de site élevés (20 degrés) sans risque de réflexion parasite sur les parois. Avec les équipements de réception, cette falaise simulait le satellite ;
- une bouée, type perche de Froude, qui pouvait être déplacée en mer par remorquage. Ce type de bouée, pesant 9 tonnes, est caractérisé par une très grande stabilité dans son milieu. Elle n'a pratiquement pas de mouvement de translation vertical, seul subsiste un mouvement conique d'axe vertical (2 à 3° d'amplitude, 5 à 7 secondes de période). Cette excellente stabilité permet, avec des repères régulièrement espacés sur le corps de la bouée, d'évaluer la hauteur moyenne et la périodicité des vagues. Les superstructures de la bouée qui émergent de l'eau, sont d'une dimension telle que les plans réflecteurs des antennes les dissimulent entièrement, d'où une absence de réflexions parasites sur ces superstructures.

Les informations météorologiques ont été recueillies trois fois par jour directement auprès d'un observatoire de la Météorologie Nationale.



ETUDE EXPERIMENTALE DES TRAJETS MULTIPLES EMIS PAR LES REFLEXION SUR
LA SURFACE DE LA MER.



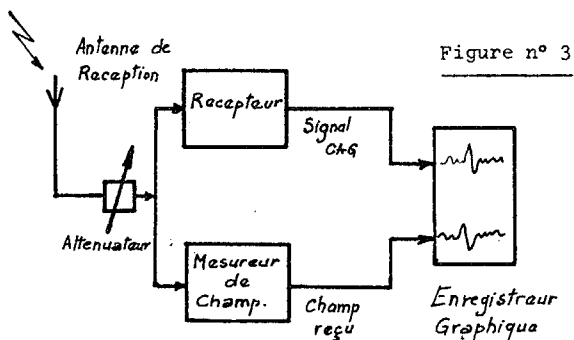
Les informations recueillies étaient :

- . la direction du vent, . la température atmos-
- . la vitesse du vent, phérique,
- . la direction de la houle et l'état de la mer.

L'état de la mer a été comparé aux observations de hauteur des vagues faites à l'aide des repères disposés sur le corps de la bouée. La concordance a toujours été excellente.

III - DESCRIPTION DE LA CHAINE DE MESURE EN PORTEUSE

PURE (cf. figure n° 3).



- Chaîne de mesures en porteuse pure -

La simulation de la liaison fait intervenir un ensemble d'émission disposé sur la bouée. Sur la falaise, un ensemble de réception adapté au mode d'émission est complété par les appareils de mesure nécessaires pour effectuer les relevés expérimentaux. En porteuse pure, la bouée émet une onde sinusoïdale continue à 402, 105 MHz, la P.I.R.E. varie de + 22 à + 26 dBm selon l'antenne d'émission dans la direction de l'antenne de réception. On utilise l'un des trois types d'antenne déjà cités, dans le but de caractériser l'in-

fluence du diagramme de rayonnement et/ou la polarisation d'émission sur le phénomène étudié. Le système de réception est constitué d'une antenne parabolique directive (ouverture de 16° à 3 dB) suivie d'un récepteur de télémessure et d'un mesureur de champ disposé en parallèle avec ce dernier. Deux signaux issus de ces appareils, qui sont le signal de C.A.G. pour le récepteur et un signal proportionnel au champ reçu pour le mesureur, constituent les deux sources d'information sur le signal reçu. Elles sont en fait redondantes mais nous ont permis de contrôler le bon fonctionnement du système de réception à tout instant. Dans chaque configuration étudiée, type d'antenne et hau-

teur au dessus du niveau de la mer, ces signaux ont fait l'objet d'enregistrements graphiques pendant le tractage de la bouée pour explorer les sites allant de 20° à 2°. La puissance du signal reçu a été ajustée pour chaque expérience à l'aide d'atténuateurs disposés entre l'antenne réception et l'entrée des récepteurs (cf. figure n° 2).

Le choix du point de fonctionnement a été fait en fonction de la dynamique et des caractéristiques de ces deux appareils. De même, nous avons tenu compte de l'atténuation prévisible due à la distance et aux interférences créées par les réflexions sur la surface. C'est ainsi que pour chaque expérience de tractage, la puissance reçue a évolué entre - 70 et -100 dBm environ : à cette gamme de valeurs correspondait un mode de fonctionnement parfaitement linéaire de nos récepteurs.

IV - MECANISME DES REFLEXIONS SUR LA SURFACE DE LA MER

Imaginons qu'au moyen d'une source émettrice, on illumine la surface de la mer de façon uniforme. En un point situé à quelques mètres au-dessus de cette surface, on reçoit d'une part un rayonnement qui arrive directement de la source émettrice, d'autre part un rayonnement qui a été réfléchi par un ou plusieurs points d'une surface irrégulière, celle de la mer. Il est nécessaire de préciser ce qu'on entend par, d'une part surface irrégulière, d'autre part par réflexion sur une telle surface. De nombreux auteurs (COX en 54, SCHCOLEG en 62) ont montré que la surface de la mer pouvait être modélisée par une surface aléatoire gaussienne (isotrope en première approximation). Dans ce cas, la différence de phase, φ , entre le signal direct



et le signal réfléchi dépend :

- de la longueur d'onde λ ,
- de l'altitude de l'antenne H et de l'angle d'incidence du rayonnement γ ,
- de la hauteur des irrégularités de la surface

Par l'intermédiaire des irrégularités, β , de la surface, la différence de phase, φ , est une variable aléatoire gaussienne. En réalité, φ est une variable aléatoire définie modulo 2π , et, dans ce cas, on peut montrer que sa loi dans l'intervalle $(-\pi, +\pi)$ est :

$$p(\varphi) d\varphi = \frac{1}{\sigma_\varphi \sqrt{2\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(\varphi + 2n\pi)^2}{2\sigma_\varphi^2}\right\} d\varphi \quad -\pi \leq \varphi \leq +\pi$$

avec : $\sigma_\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \sigma_h \sin \gamma$

Cette densité de probabilité tend rapidement vers une densité uniforme entre $(-\pi, +\pi)$ quand σ_φ augmente. L'écart-type, σ_φ , permet de caractériser la nature plus ou moins rugueuse de la surface.

On admet qu'on peut considérer la surface comme rugueuse lorsque la condition : $\sigma_\varphi \gg \frac{\pi}{2}$ est remplie, condition qui est équivalente à :

$$g \gg 1 \quad \text{avec } g = 8 \left(\frac{\sigma_h}{\lambda}\right) \sin \gamma \quad \text{facteur de rugosité}$$

(σ_h écart-type de la hauteur des irrégularités de la surface). Dans ce cas, on a une réflexion diffuse caractérisée par une phase aléatoire uniformément répartie sur $(-\pi, +\pi)$. L'énergie diffusée provient d'un ensemble de points brillants dispersés sur une zone beaucoup plus grande que la zone de Fresnel qui entoure le point de réflexion géométrique.

Il n'y a pas d'interférence et l'énergie totale reçue est supérieure en moyenne à l'énergie reçue directement par l'antenne.

Dans le cas où la condition, $g \ll 1 \Leftrightarrow \sigma_\varphi \ll \frac{\pi}{2}$, on admet que la surface est lisse. La distribution de phase tend vers une raie de Dirac. Tout se passe comme si on avait composition en amplitude et en phase entre un signal direct et un signal en provenance du point de réflexion géométrique. On observe dans ce cas, des interférences. Selon la géométrie du moment, on a une amplification ou une atténuation du signal reçu. L'expérience qui a été réalisée avait pour but de mettre en évidence ces phénomènes et d'en mesurer les effets sur des signaux non modulés, puis d'évaluer leurs influences sur 7 types de modulation et de codage.

V - REFLEXION SPECULAIRE

La longueur d'onde du rayonnement incident, l'angle d'incidence du rayonnement sur la surface, l'altitude de l'antenne d'émission au-dessus de la surface permettent le calcul de la position des maximums et des

minimums. Les maximums se produisent pour les angles de site γ_M tels que :

$$\sin \gamma_M = \frac{\lambda}{2H} \left(k + \frac{\delta}{2\pi}\right)$$

(δ : déphasage à la réflexion)

Les minimums se produisent pour les angles de site tels que :

$$\sin \gamma_m = \frac{\lambda}{2H} \left(k + \frac{\delta}{2\pi} + \frac{1}{2}\right)$$

L'amplitude des maximums et des minims est une fonction :

- du coefficient de réflexion de la surface de la mer pour la longueur d'onde utilisée : R ;
- les diagrammes des antennes d'émission et de réception :

$$G_o = \frac{G_r(e) \cdot G_r(r)}{G_d(e) \cdot G_d(r)}$$

Dans le cas de l'antenne de réception qu'on a utilisé, (antenne parabolique, 16° d'ouverture à 3 dB), on peut admettre qu'on a :

$$\frac{G_r(r)}{G_D(r)} \neq 1$$

La différence en dB entre la puissance reçue en espace libre et la puissance reçue pour un minimum d'interférences est la puissance supplémentaire qu'il faut fournir pour compenser les pertes de puissance dues à la composition en opposition de phase des signaux directs et réfléchis. Cette puissance supplémentaire, c'est la marge dont la valeur est donnée par la relation :

$$M_{dB} = (1 - A)^2$$

avec $A = R \cdot G_o$

Le rapport de puissance, exprimé en dB, entre un maximum et un minimum consécutif d'une interférence est :

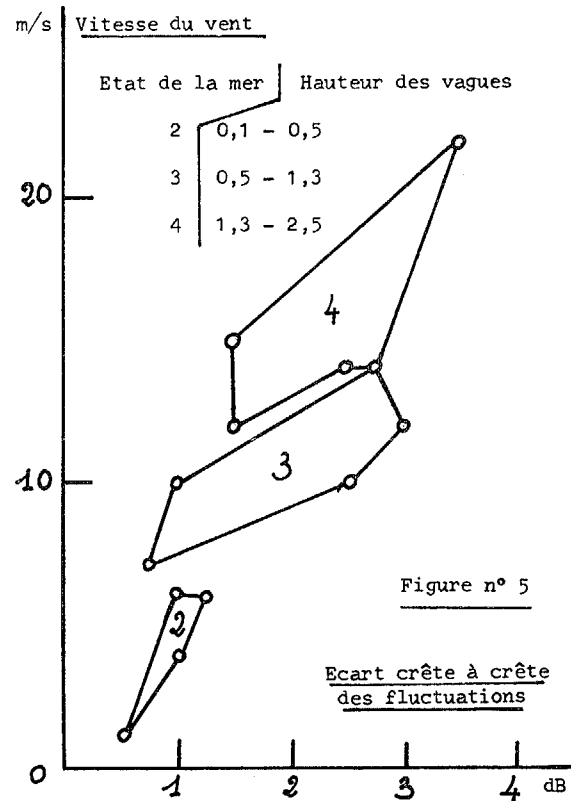
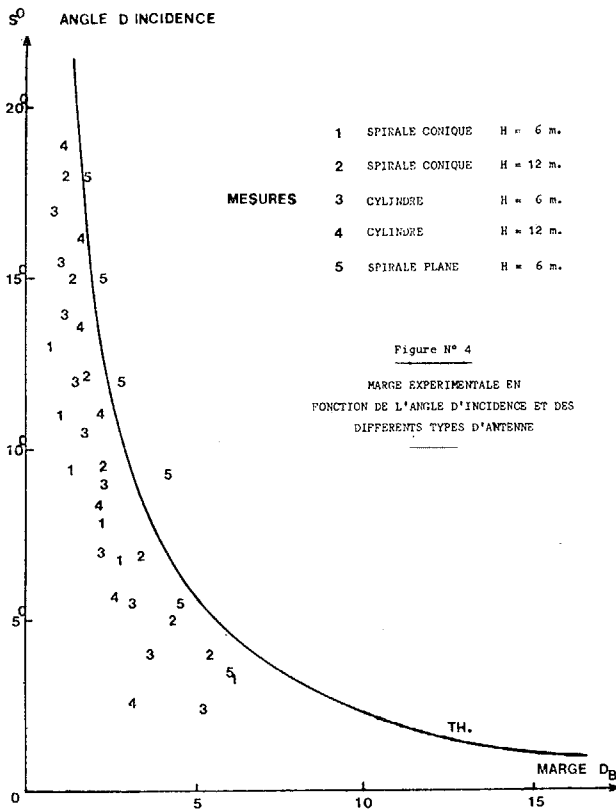
$$X_{dB} = \frac{(1+A)^2}{(1-A)^2} \cdot \frac{\sin^2 S_1}{\sin^2 S_0}$$

Les angles d'incidences, S_1 et S_0 , pour lesquels on observe les maximums et les minimums sont connus. Par conséquent, à partir des enregistrements de la variation de puissance reçue en fonction du site, qu'on a réalisé, on peut estimer la valeur du paramètre A et en déduire celle de la marge M_{dB} .

C'est ce qu'on a fait pour les trois types d'antennes à l'émission. Les résultats obtenus ont été comparés aux prévisions théoriques et font l'objet de la figure n° 4.



ETUDE EXPERIMENTALE DES TRAJETS MULTIPLES EMIS PAR LES REFLEXIONS SUR
LA SURFACE DE LA MER



VI - REFLEXION DIFFUSE

Les fluctuations de la puissance reçue, à niveau moyen constant, ont été enregistrées, dans des configurations géométriques invariables, à des emplacements fixes de la bouée pour des angles d'incidence : $S = 2^\circ$, $4,5^\circ$, 6° , 11° et 20° . Ces mesures se sont étendues sur plusieurs jours, permettant ainsi de rencontrer des conditions météorologiques diverses pour une même configuration géométrique. Elles ont permis de mettre en évidence une modélisation de la rugosité de la surface de la mer qui dépend essentiellement des conditions météorologiques : vitesse du vent en particulier. Pour une mer agitée (mer 4, vitesse du vent 22 m/s), la valeur maximum des fluctuations crête à crête observées est de 3,5 dB pour un angle d'incidence de 11° et une antenne à polarisation linéaire verticale. Dans ce cas, le coefficient de réflexion diffus a pour valeur estimée :

$$\rho \approx 0,12$$

La figure n° 5 montre les variations des fluctuations du signal reçu en fonction de la vitesse du vent et de l'état de la mer utilisé comme paramètre.

VII - ANALYSE SPECTRALE

Les points de la surface réfléchissante, qui ont un mouvement apparent, créent des effets Doppler différentiels. Ces effets Doppler sont à l'origine, d'une part de la réflexion diffuse, d'autre part de l'élargissement des raies.

L'analyse théorique du spectre de fréquence, dû aux effets Doppler différentiels, produits par des réflexions sur des points mouvants de la surface de la mer, montre qu'il dépend :

- de la vitesse de déplacement apparent des "points brillants" sur la surface de la mer : V ,
- de l'angle d'incidence : γ ,
- de la longueur d'onde du rayonnement incident λ ,
- de l'état de la mer caractérisé par un paramètre : $\text{tg } \beta$.

La largeur spectrale est donnée par la relation :

$$\Delta f = \frac{2V}{\lambda} \cdot \text{tg } \beta \cdot \sin \gamma$$

Une évaluation montre que l'élargissement est de l'ordre de quelques Hz, élargissement qui n'a pu être mis en évidence expérimentalement compte tenu de la largeur du filtre de l'analyseur de spectre utilisé (10Hz). Il semble donc bien que cet élargissement soit effectivement très faible.



VIII - DESCRIPTION DE LA CHAINE DE MESURE EN PORTEUSE MODULEE (cf. figure n° 6)

L'expérience effectuée en porteuse modulée devait nous permettre de chiffrer l'influence du phénomène trajet multiple sur le signal obtenu en sortie d'une démodulation cohérente de phase. Cette opération linéaire a été possible en raison des indices de modulation peu élevés que nous avons utilisés, à savoir 1,22 ou 0,8 radian. Ces valeurs correspondent aux extremums d'une plage fréquemment utilisée en transmission de données par l'intermédiaire de satellites utilisant le procédé MTC (l'indice 1,22 radian est celui retenu dans le cadre du projet METEOSAT). Au récepteur de télémétrie précédent, nous avons adjoint une chaîne de décommutation constituée par un synchronisateur primaire suivi d'un synchronisateur secondaire. Ce dernier adapté au message pseudo-aléatoire émis par la bouée, se synchronise sur un mot particulier et compare bit à bit le message reçu avec celui généré localement. Une impulsion apparaît lorsqu'il y a désaccord entre les deux, et traduit la présence d'une erreur. Le synchronisateur primaire utilisant des techniques de décommutation optimale (filtrage adapté des bits reçus) en présence de bruit blanc et gaussien, les courbes expérimentales ont été comparées à celles obtenues théoriquement avec ces techniques. A cette expérience de mesure de probabilité d'erreur de bit, nous avons ajouté une mesure du temps qui sépare deux erreurs consécutives. Ce paramètre constitue une variable aléatoire dont on connaît la distribution statistique lorsque le nombre d'erreurs obtenu par unité de temps suit une loi de Poisson. Un signaliseur utilisé pour la circonstance nous a permis de relever, pour chaque type de modulation étudié, les histogrammes et les fonctions de répartition de cette variable. Nous avons effectué des comparaisons graphiques et numériques avec les résultats théoriques attendus. Nous rappellerons brièvement ici que, si P est la probabilité d'erreur moyenne obtenue en présence de bruit gaussien, la probabilité d'obtention de k erreurs sur N bits est donnée par :

$$P(k, N) = \frac{(NP)^k}{k!} e^{-NP}$$

Alors, la densité de probabilité de la variable aléatoire constituée par les intervalles de temps u entre erreurs est donnée par :

$$f(u) = P \exp(-Pu)$$

et la fonction de répartition :

$$F(u) = 1 - \exp(-Pu)$$

La valeur moyenne est telle que $E(u) = 1/P$ et l'écart-type $u = 1/P$. La comparaison des résultats expérimentaux a consisté à évaluer l'écart, dans la mesure où il existait, entre les courbes relevées et les courbes théoriques. Le paramètre P, qui intervient dans les fonctions précédentes, a été déduit à partir des mesures du nombre d'erreur effectuées en parallèle avec cette expérience.

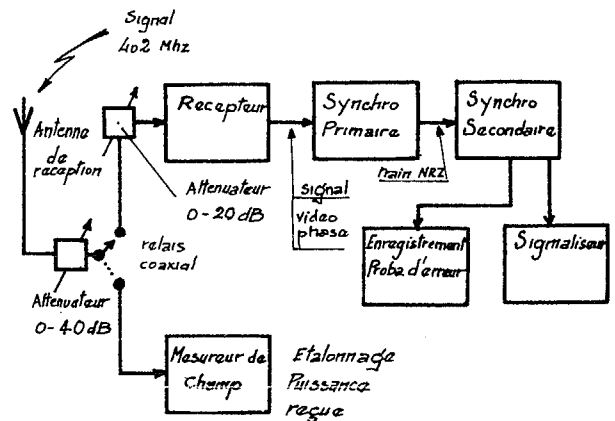


Figure n° 6 : Chaîne de mesures en porteuse modulée

IX - PROBABILITE D'ERREUR DE BIT EN PRESENCE DE REFLEXION DIFFUSE

Toute probabilité d'erreur de bit dépend du rapport E/N_0 et par là même de la puissance du signal reçu et de ses fluctuations :

$$P_e(E/N_0) = P_e(S/N_0 F)$$

Les fluctuations de la puissance reçue sont caractérisées par une distribution P(s). La probabilité d'erreur de bit est alors une fonction aléatoire par l'intermédiaire de la variable S. On peut définir une valeur moyenne :

$$P_e(E/N_0) = \int_0^{\infty} P_e(S/N_0 F) P(s) ds$$

Le calcul, compliqué, de la valeur moyenne de la probabilité d'erreur de bit montre qu'elle dépend essentiellement des deux paramètres :

- le rapport E/N_0 normal,
- le rapport $\gamma^2 = B/A$ qui exprime l'importance relative de la puissance réfléchie de façon diffuse B, par rapport à celle qui est réfléchie de façon spéculaire A.



ETUDE EXPERIMENTALE DES TRAJETS MULTIPLES EMIS PAR LES REFLEXIONS SUR
LA SURFACE DE LA MER

A partir des enregistrements de la puissance reçue, réalisés pendant les mesures de probabilités, on peut évaluer γ^2 et par conséquent comparer les résultats expérimentaux aux prévisions théoriques.

Théoriquement, on montre que dans la plage de variation utile de E/N_0 , la valeur moyenne de la probabilité d'erreur s'écarte de la théorie de moins de 1,5 dB. Expérimentalement, c'est ce qu'on a constaté. Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner les courbes expérimentales obtenues, et qui font l'objet des figures 7 à 10.

X - REPARTITION STATISTIQUE DES INTERVALLES DE TEMPS ENTRE ERREURS

C'est en sortie du synchronisateur secondaire que nous avons prélevé les impulsions significatives du temps entre deux erreurs consécutives. Ce temps est compté en nombre de bits. Pour effectuer le traitement en temps réel de cette variable, nous avons utilisé un signaliseur qui réalise un classement sous forme d'histogramme avec possibilité d'intégration, d'où l'obtention de la fonction de répartition. L'exploitation des résultats obtenus a consisté à comparer les fonctions de répartition théoriques et expérimentales. La probabilité d'erreur moyenne P est connue par ailleurs puisque mesurée séparément en effectuant le rapport d'un nombre d'erreurs au nombre total de bits reçus. Nous avons constaté des différences sensibles sur les courbes expérimentales qui se traduisent par une ascension plus rapide de l'exponentielle. L'analyse du phénomène nous a conduit à remplacer dans la formule théorique, le paramètre P par celui déduit des enregistrements de $f(u)$. Ceci a donné des résultats intéressants car la loi nouvelle ainsi obtenue s'apparente bien aux fonctions enregistrées.

Nous avons pu tracer une courbe (figure n° 11) donnant la probabilité d'erreur apparente en fonction de la probabilité d'erreur mesurée. Celle-ci montre que l'écart est d'autant plus important que la probabilité d'erreur mesurée est faible. Ceci traduit une apparition des erreurs sous forme de paquets dont l'explication peut être fournie par les fluctuations importantes du signal reçu autour d'une valeur moyenne (cf. figure n° 5). Celle-ci dépend de la géométrie émission/réception lors de la mesure, alors que les fluctuations sont fonction de l'état de la mer.

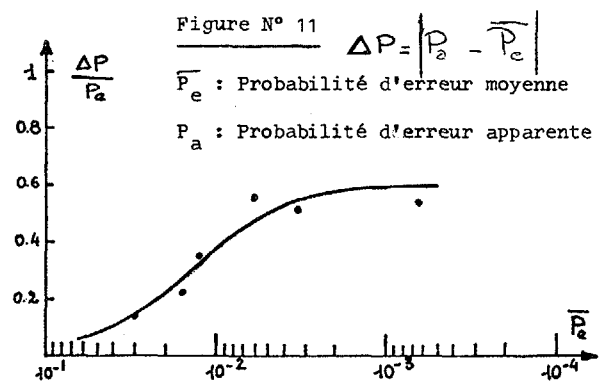
XI - CONCLUSION

En onde pure, à la fréquence de 400 MHz, les résultats expérimentaux obtenus au cours de cette campagne ont montré que la surface de la mer se comporte comme un miroir légèrement irrégulier.

En onde pure, deux phénomènes d'importance relative différente, ont été mis en évidence :

- les interférences dont la périodicité et les variations d'amplitudes sont en excellent accord avec les prévisions théoriques ;
- un bruit d'amplitude qui se superpose aux interférences : il est étroitement lié à l'état de la mer et a pour origine les irrégularités de sa surface.

En onde modulée, pour une géométrie donnée, la probabilité d'erreur de bit n'est pas affectée par les fluctuations de puissance mais par les irrégularités sur la surface. Par contre, l'analyse statistique des instants d'apparition des bits faux fait ressortir une distribution non Poissonnienne du nombre de bits obtenus par unité de temps.





ETUDE EXPERIMENTALE DES TRAJETS MULTIPLES EMIS PAR LES REFLEXIONS SUR
LA SURFACE DE LA MER.

