

RECOMMANDATION UIT-R P.680-3

DONNÉES DE PROPAGATION NÉCESSAIRES POUR LA CONCEPTION DE SYSTÈMES DE TÉLÉCOMMUNICATION MOBILES MARITIMES TERRE-ESPACE

(Question UIT-R 207/3)

(1990-1992-1997-1999)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour planifier convenablement les systèmes de télécommunication mobiles maritimes Terre-espace, il est nécessaire de disposer de données de propagation et de méthodes de prévision appropriées;
- b) que les méthodes de la Recommandation UIT-R P.618 sont recommandées pour la planification de systèmes de télécommunication Terre-espace;
- c) que de nouveaux développements des méthodes de prévision pour des applications spécifiques aux systèmes mobiles maritimes par satellite sont nécessaires pour donner une précision adéquate dans toutes les conditions d'exploitation;
- d) qu'il existe toutefois des méthodes donnant une précision suffisante dans de nombreuses applications,

recommande

1 que l'on adopte les méthodes actuelles exposées dans l'Annexe 1 pour la planification des systèmes de télécommunication mobiles maritimes Terre-espace, ces méthodes s'ajoutant à celles qui sont préconisées dans la Recommandation UIT-R P.618.

ANNEXE 1

1 Introduction

Les télécommunications sur des liaisons Terre-espace pour les systèmes à satellites du service mobile maritime conduisent à des problèmes de propagation qui diffèrent sensiblement des problèmes qui se posent dans le service fixe par satellite. Par exemple, les effets des réflexions et de la diffusion dues à la surface de la mer sur les signaux reçus se font sérieusement ressentir, en particulier dans les cas où l'on utilise des antennes ayant un faisceau à grande ouverture. De plus, les systèmes mobiles maritimes à satellites peuvent fonctionner sur une base mondiale, y compris sur des trajets dont les angles d'élévation sont peu élevés.

La présente Annexe étudie les données et les modèles spécifiquement nécessaires pour caractériser les différentes dégradations sur les trajets mer-espace, à savoir:

- effets troposphériques, y compris affaiblissement dû à la pluie, absorption par les gaz, réfraction, scintillation et propagation anormale se produisant pour de faibles angles d'élévation;
- effets ionosphériques tels que scintillation et rotation de Faraday;
- effets de la réflexion due à la surface (propagation par trajets multiples en raison de trajets secondaires dus à la réflexion des ondes radioélectriques sur la surface de la mer);
- effets de l'environnement local (mouvements des navires et état de la mer);
- effets du brouillage dus à l'évanouissement sélectif entre un signal utile et un signal brouilleur, affectés tous deux par des évanouissements par trajets multiples.

2 Effets troposphériques

2.1 Affaiblissement

Les affaiblissements du signal dans la troposphère sont causés par les gaz atmosphériques, la pluie, le brouillard et les nuages. Exception faite du cas où les angles d'élévation sont peu élevés, l'affaiblissement troposphérique est négligeable aux fréquences inférieures à environ 1 GHz et il est généralement faible jusqu'à environ 10 GHz. Au-dessus de 10 GHz, l'affaiblissement peut être fort pendant des pourcentages importants du temps sur de nombreux trajets.

On dispose de méthodes de prévision pour évaluer l'absorption par les gaz (voir la Recommandation UIT-R P.676) et l'affaiblissement dû aux précipitations (voir la Recommandation UIT-R P.618). L'affaiblissement par le brouillard et les nuages est normalement négligeable pour des fréquences allant jusqu'à 10 GHz.

2.2 Scintillation

Les variations irrégulières du niveau du signal à la réception et de l'angle d'arrivée sont occasionnées par la turbulence troposphérique et par les évanouissements atmosphériques dus à des trajets multiples. Ces effets deviennent plus importants à mesure que la fréquence augmente et que l'angle d'élévation du trajet diminue, mais les fluctuations de l'angle d'arrivée imputables à la turbulence sont indépendantes de la fréquence. L'ouverture de l'antenne influe aussi sur l'amplitude de ces scintillations. C'est l'été que l'on constate le niveau maximum de ces effets. La Recommandation UIT-R P.618 présente une méthode de prévision.

3 Effets ionosphériques

Les effets ionosphériques (voir la Recommandation UIT-R P.531) peuvent être importants, notamment aux fréquences inférieures à 1 GHz. Par commodité, ces effets ont été calculés pour les fréquences de 0,1; 0,25; 0,5; 1; 3 et 10 GHz; ils sont présentés dans le Tableau 1 pour les valeurs élevées du contenu électronique total (CET) indiquées.

3.1 Scintillation ionosphérique

Les hétérogénéités de la densité électronique de l'ionosphère provoquent, par réfraction, une focalisation ou une défocalisation des ondes radioélectriques, conduisant à des fluctuations d'amplitude appelées scintillations. La scintillation ionosphérique est maximale au voisinage de l'équateur magnétique et minimale aux latitudes moyennes. Les zones aurorales sont aussi des régions à forte scintillation. Dans le cas des fortes scintillations, les amplitudes obéissent à la loi de distribution de Rayleigh; pour les scintillations plus faibles, la loi de distribution est sensiblement du type log-normal. Ces fluctuations diminuent quand la fréquence augmente; elles dépendent de la géométrie du trajet, de l'emplacement, de la saison, de l'activité solaire et de l'heure locale. Le Tableau 2 donne des valeurs de la profondeur des évanouissements dans les gammes des ondes métriques et décimétriques aux latitudes moyennes, d'après les données de la Recommandation UIT-R P.531.

La fluctuation d'amplitude est accompagnée d'une fluctuation de phase. La densité spectrale de la fluctuation de phase est proportionnelle à $1/f^3$, où f est la fréquence de Fourier de la fluctuation. Cette caractéristique spectrale, semblable à celle produite par le papillotement de fréquence dans les oscillateurs, peut dégrader très sensiblement la qualité de fonctionnement des récepteurs.

3.2 Rotation de Faraday

Lorsqu'elle se propage dans l'ionosphère, une onde à polarisation rectiligne y subit une rotation progressive dans le plan de la polarisation. Les effets sont résumés au Tableau 1.

Le rapport axial d'une onde incidente à polarisation elliptique peut augmenter ou diminuer après réflexion (notamment pour de faibles angles d'incidence) puisque la rotation de Faraday modifie l'orientation de l'axe principal de polarisation de l'onde incidente. Ce fait résulte de la différence des coefficients de réflexion entre les composantes verticale et horizontale à laquelle on peut s'attendre dans la plupart des cas de trajets multiples.

La rotation de Faraday peut avoir des effets notables sur les performances des systèmes à large bande. On ne peut pas corriger entièrement les effets de rotation différentielle pour les ondes métriques en agissant sur l'orientation de l'axe de l'antenne lorsqu'elle est à polarisation rectiligne. Si l'antenne est à polarisation circulaire, l'effet se manifeste sous forme de déphasages différentiels des composantes du signal dans toute la bande. Par suite, les composantes du signal de fréquences différentes seront probablement sujettes à une distorsion sélective en fréquence et en phase.

TABLEAU 1

Valeurs estimées* des effets ionosphériques pour un angle d'élévation d'environ 30° dans le cas d'une propagation dans un seul sens**

(d'après la Recommandation UIT-R P.531)

Effet	Variation en fonction de la fréquence	0,1 GHz	0,25 GHz	0,5 GHz	1 GHz	3 GHz	10 GHz
Rotation de Faraday	$1/f^2$	30 tours	4,8 tours	1,2 tours	108°	12°	1,1°
Temps de propagation	$1/f^2$	25 µs	4 µs	1 µs	0,25 µs	0,028 µs	0,0025 µs
Réfraction	$1/f^2$	< 1°	< 0,16°	< 2,4'	< 0,6'	< 4,2''	< 0,36''
Variation de la direction d'arrivée (valeur quadratique moyenne)	$1/f^2$	20'	3,2'	48''	12''	1,32''	0,12''
Absorption (aurorale et/ou calotte polaire)	$\approx 1/f^2$	5 dB	0,8 dB	0,2 dB	0,05 dB	6×10^{-3} dB	5×10^{-4} dB
Absorption (latitudes moyennes)	$1/f^2$	< 1 dB	< 0,16 dB	< 0,04 dB	< 0,01 dB	< 0,001 dB	< 10^{-4} dB
Dispersion	$1/f^3$	0,4 ps/Hz	0,026 ps/Hz	0,0032 ps/Hz	0,0004 ps/Hz	$1,5 \times 10^{-5}$ ps/Hz	4×10^{-7} ps/Hz
Scintillation ⁽¹⁾	Voir la Rec. UIT-R P.531	Voir la Rec. UIT-R P.531	Voir la Rec. UIT-R P.531	Voir la Rec. UIT-R P.531	>20 dB crête-à-crête	≈ 10 dB crête-à-crête	≈ 4 dB crête-à-crête

* Ces estimations sont fondées sur un contenu électronique total CET de 10^{18} électrons/m², qui est une valeur élevée du CET observée de jour aux basses latitudes en période de forte activité solaire.

** Les effets ionosphériques au-dessus de 10 GHz sont négligeables.

(1) Valeurs observées près de l'équateur géomagnétique pendant les premières heures de la nuit (heure locale) à l'équinoxe, pour un nombre élevé de taches solaires.

TABLEAU 2

Distribution de la profondeur des évanouissements dus à la scintillation ionosphérique aux latitudes moyennes (dB)

Pourcentage du temps (%)	Fréquence (GHz)			
	0,1	0,2	0,5	1
1,0	5,9	1,5	0,2	0,1
0,5	9,3	2,3	0,4	0,1
0,2	16,6	4,2	0,7	0,2
0,1	25,0	6,2	1,0	0,3

4 Evanouissement dû à la réflexion sur la surface de la mer

4.1 Profondeur d'évanouissement

La méthode simple décrite ci-après fournit des estimations approximatives de la puissance liée à la propagation par trajets multiples ou de la profondeur d'évanouissement, appropriées pour de nombreuses applications techniques.

Conditions d'application:

Gamme de fréquences: 0,8-8 GHz

Angle d'élévation: $5^\circ \leq \theta_i \leq 20^\circ$

où $G(\theta)$ est le diagramme de rayonnement du lobe principal de l'antenne, décrit par:

$$G(\theta) = -4 \times 10^{-4} (10^{G_m/10} - 1) \theta^2 \quad \text{dBi} \quad (1)$$

où:

G_m : valeur maximale du gain d'antenne (dBi)

θ : angle mesuré à partir de la ligne de visée (degrés)

Polarisation: circulaire

Etat de la mer: vagues de 1 à 3 m (la composante incohérente est totalement développée).

Etape 1: Déterminer le gain relatif d'antenne G dans la direction du point spéculaire de réflexion. Le gain relatif d'antenne se calcule approximativement par l'équation (1) dans laquelle $\theta = 2 \theta_i$ (degrés).

Etape 2: Calculer le coefficient de réflexion de Fresnel de la mer pour la polarisation circulaire, R_C :

$$R_C = \frac{R_H + R_V}{2} \quad (\text{polarisation circulaire}) \quad (2a)$$

où:

$$R_H = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\eta - \cos^2 \theta_i}} \quad (\text{polarisation horizontale}) \quad (2b)$$

$$R_V = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i)/\eta^2}}{\sin \theta_i + \sqrt{(\eta - \cos^2 \theta_i)/\eta^2}} \quad (\text{polarisation verticale}) \quad (2c)$$

et $\eta = \epsilon_r(f) - j 60 \lambda \sigma(f)$

où:

$\epsilon_r(f)$: permittivité relative de la surface à la fréquence f (d'après la Recommandation UIT-R P.527)

$\sigma(f)$: conductivité (S/m) de la surface à la fréquence f (d'après la Recommandation UIT-R P.527)

λ : longueur d'onde en espace libre (m).

Un ensemble de courbes est donné dans la Fig. 1 et indique la valeur du coefficient de réflexion de Fresnel de la mer pour la polarisation circulaire concernant cinq fréquences comprises entre 0,8 et 8 GHz. Les courbes sont obtenues au moyen de l'équation (2) avec des paramètres électriques correspondants à de l'eau de mer d'une salinité moyenne.

Etape 3: Déterminer le coefficient de diffusion normalisé (rapport entre la composante de diffusion de la réflexion et le coefficient de réflexion par mer calme), η_I (dB), à l'aide de la Fig. 2.

FIGURE 1
 Valeur du coefficient de réflexion de Fresnel, pour la polarisation circulaire, R_C ,
 de l'eau de mer d'une salinité moyenne

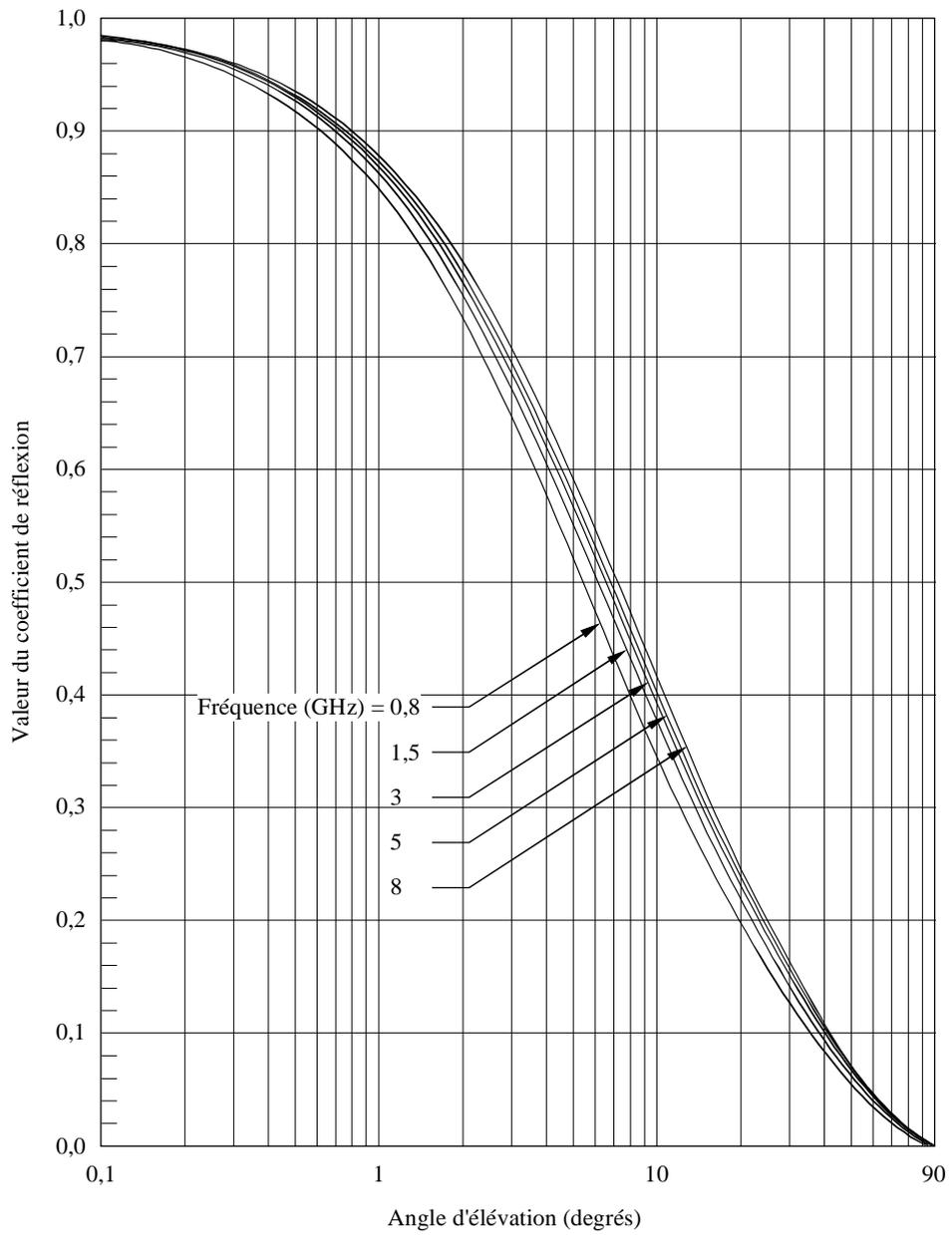
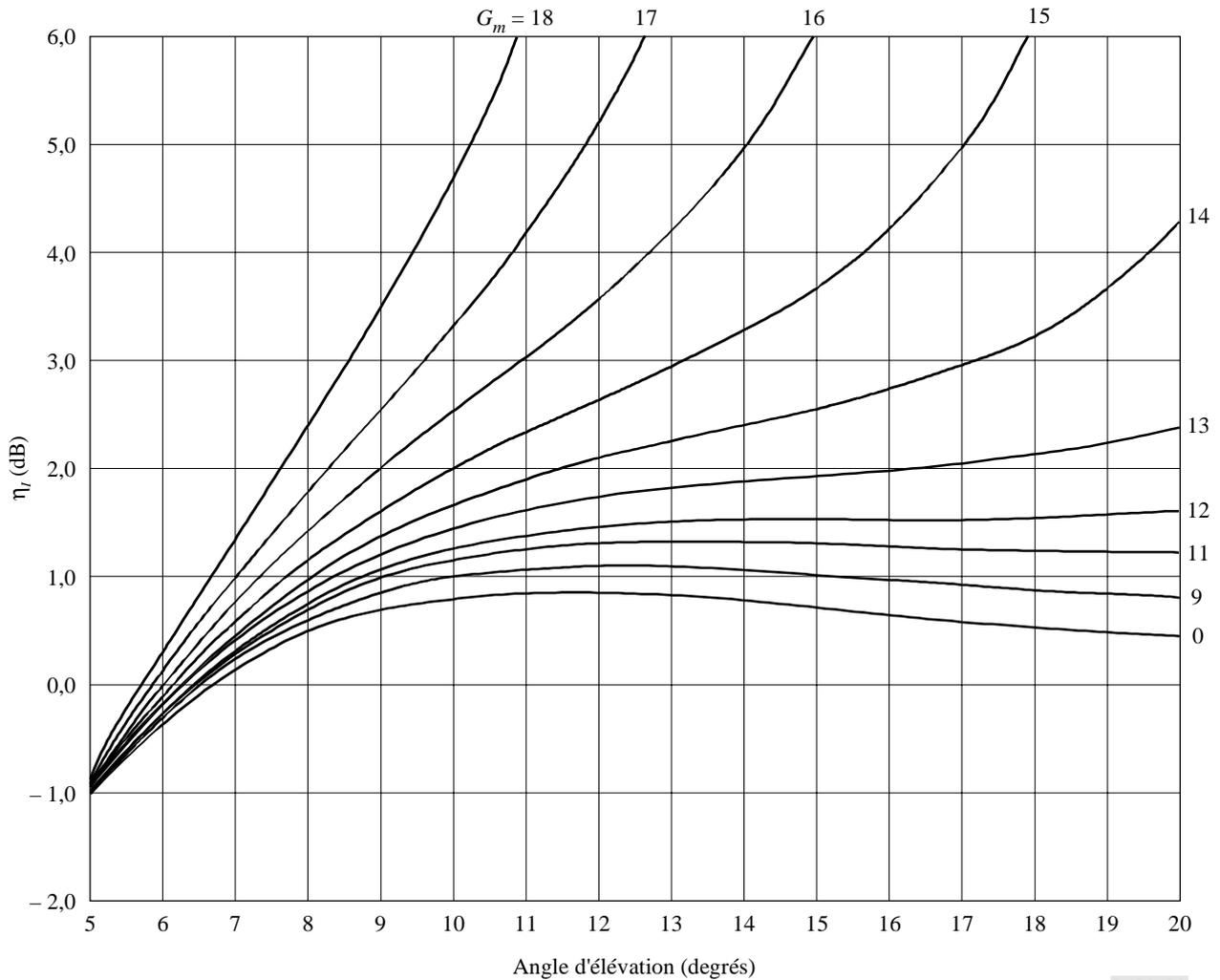


FIGURE 2
Coefficients de diffusion normalisés moyens dans la gamme de fréquences 0,8-8 GHz



0680-02

Etape 4: La puissance incohérente moyenne des ondes réfléchies par la mer, relative à celle de l'onde directe P_r , est donnée par l'équation:

$$P_r = G + R + \eta_I \quad \text{dB} \quad (3)$$

où:

$$R = 20 \log |R_C| \quad \text{dB} \quad (3a)$$

avec R_C calculé à l'aide des formules (2).

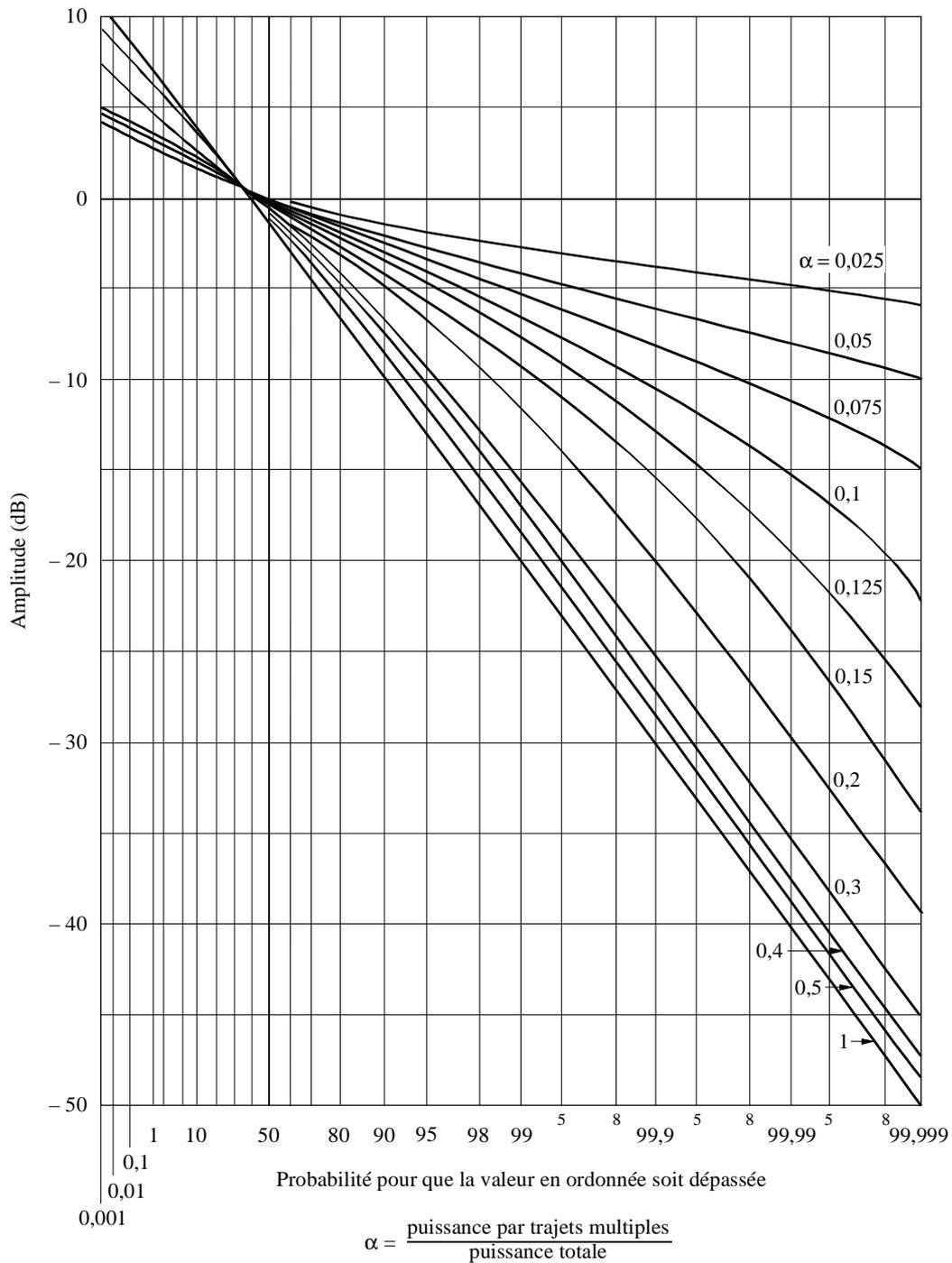
Etape 5: Dans l'hypothèse d'une distribution de Nakagami-Rice, on estime la profondeur d'évanouissement à partir de l'expression:

$$A + 10 \log \left(1 + 10^{P_r/10} \right) \quad (4)$$

où A est l'amplitude (dB) lue sur l'ordonnée de la Fig. 3.

FIGURE 3

Distribution de Nakagami-Rice pour une puissance totale constante avec le paramètre α



0680-03

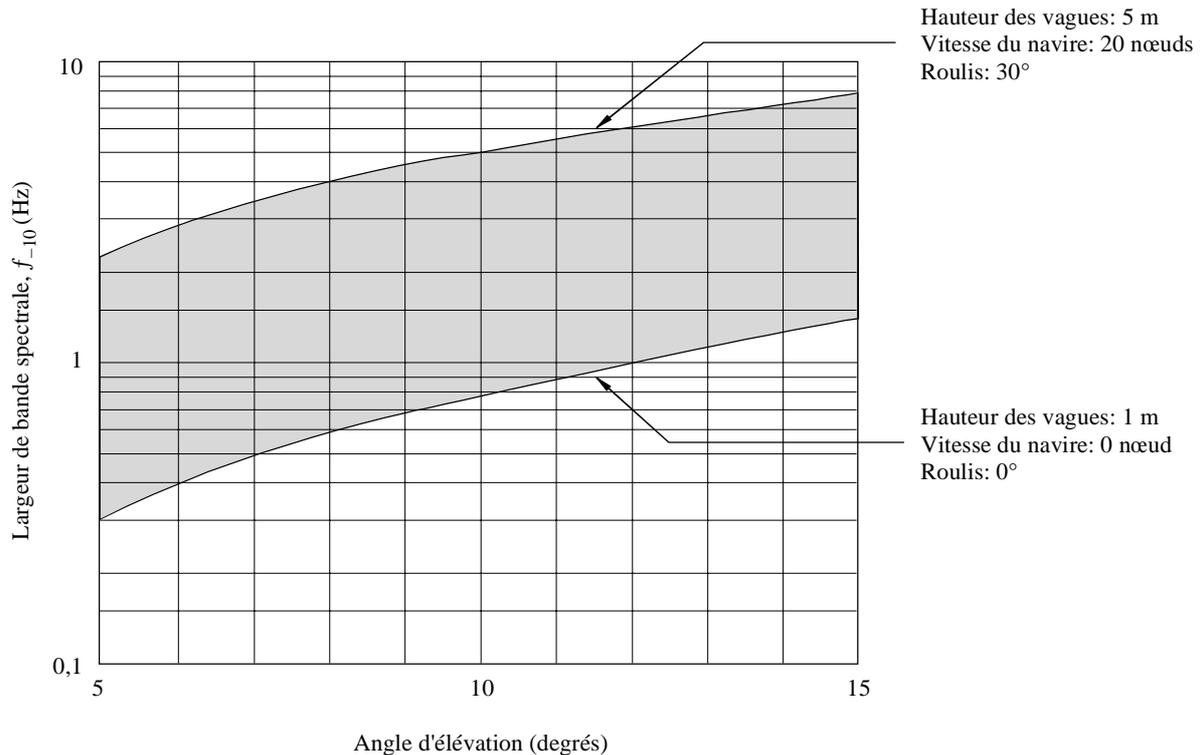
4.2 Spectre de fréquences et statistiques de la durée des évanouissements

En général, la largeur de bande spectrale augmente avec la hauteur de la vague, de l'angle d'élévation, de la vitesse de déplacement du navire et du mouvement relatif de l'antenne placée à bord de celui-ci (roulis/tangage). L'influence de la polarisation de l'antenne sur la forme du spectre est faible et l'influence du gain de l'antenne est peu élevée pour des gains inférieurs à 10 dB environ.

La largeur de bande spectrale à -10 dB, f_{-10} , se définit comme la largeur de bande dans laquelle la densité de puissance décroît à -10 dB par rapport à la densité de puissance de crête. La Fig. 4 indique le domaine probable de la largeur de la bande spectrale à -10 dB pour des évanouissements par trajets multiples dans la bande des 1,5 GHz, obtenu en utilisant le modèle théorique d'évanouissement en fonction de l'angle d'élévation, pour des conditions habituelles dans les communications maritimes par satellite (hauteur des vagues de 1 à 5 m, vitesse du navire de 0 à 20 nœuds et roulis de 0° à 30°).

FIGURE 4

**Largeur de bande spectrale à -10 dB en fonction de l'angle d'élévation,
à 1,5 GHz, pour des évanouissements par trajets multiples
dus à la réflexion sur la surface de la mer**



0680-04

Des valeurs moyennes de la durée des évanouissements, $\langle T_D \rangle$, et de l'intervalle entre évanouissements, $\langle T_I \rangle$, définis sur la Fig. 5, peuvent être obtenues par les formules suivantes, en utilisant la largeur de bande spectrale à -10 dB, f_{-10} :

$$\langle T_I(p) \rangle = \langle T_I(50\%) \rangle \exp [m(p)^2/2]$$

$$\langle T_D(p) \rangle = \langle T_I(p) \rangle (1 - p/100)$$

où:

$$\langle T_I(50\%) \rangle = \sqrt{3} / f_{-10}$$

$$m = 2,33 - 0,847 a - 0,144 a^2 - 0,0657 a^3$$

$$a = \log(100 - p) \quad \text{pour } 70\% \leq p \leq 99,9\%$$

Les valeurs prévues de $\langle T_D \rangle$ et de $\langle T_I \rangle$ pour 99% du temps et pour des angles d'élévation compris entre 5° et 10° sont comprises entre 0,05 et 0,4 s pour $\langle T_D \rangle$ et entre 5 et 40 s pour $\langle T_I \rangle$.

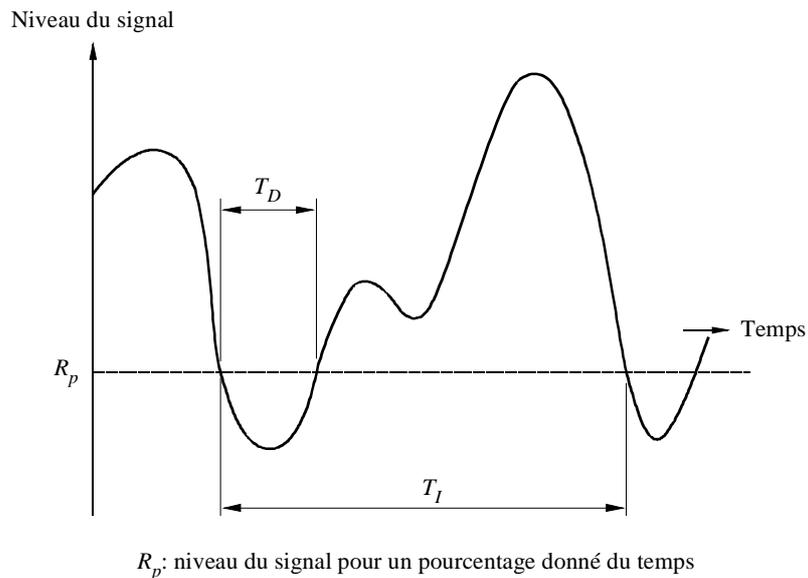
Les fonctions de densité de probabilité de T_D et de T_I sont proches de la distribution exponentielle pour les pourcentages du temps compris entre 50% et 99%.

5 Brouillages provenant de systèmes à satellites adjacents

5.1 Généralités

Dans les systèmes de télécommunication mobiles à satellites, l'amplitude du signal utile provenant du satellite et celle d'un signal brouilleur émanant d'un satellite adjacent subissent des fluctuations de niveau indépendantes en raison de l'évanouissement par trajets multiples, ce qui exige, par rapport aux systèmes fixes à satellites, un traitement différent. L'un des points essentiels réside à cet égard dans les statistiques d'évanouissement différentiel, c'est-à-dire la différence d'amplitude entre l'onde directe et l'onde brouilleuse, subissant toutes deux un évanouissement par trajets multiples.

FIGURE 5
Durée des évanouissements et intervalle entre évanouissements



0680-05

La méthode pratique de prévision pour les statistiques du rapport signal/brouillage décrite ci-après tient compte de l'effet du bruit thermique et du brouillage qui varie avec le temps.

5.2 Méthode de prévision

D'une manière générale, il existe deux types de brouillage entre systèmes à satellites adjacents. L'un est le «brouillage sur le trajet descendant» qui intéresse la station terrienne mobile, l'autre est le «brouillage sur le trajet montant», qui intéresse le satellite. Un autre cas est celui du brouillage entre faisceaux dans l'exploitation à plusieurs faisceaux ponctuels, où la même fréquence est attribuée de façon répétée. La méthode est applicable dans les cas précités.

Les paramètres d'entrée (en unités de puissance et non en dB) sont les suivants:

D : puissance de l'onde directe du signal désiré

M : puissance moyenne de l'onde réfléchie (c'est-à-dire la composante incohérente) du signal désiré

N : puissance moyenne de bruit du système

I_D : puissance de l'onde directe du signal brouilleur

I_M : puissance moyenne de l'onde réfléchie du signal brouilleur

(I : puissance moyenne du brouillage: $I = I_D + I_M$)

Les paramètres de sortie (en unités de puissance, non en dB) sont:

- $[c/n](p)$: rapport entre la puissance du signal utile et la puissance de bruit du système en fonction du pourcentage de temps p
- $[c/i](p)$: rapport entre la puissance du signal désiré et la puissance du signal brouilleur
- $[c/(i+n)](p)$: rapport entre la puissance du signal désiré et le bruit du système plus la puissance du signal brouilleur.

Le rapport porteuse/bruit en fonction de p est donné par:

$$[c/n](p) = (\eta_c)^2(p) D/N \quad (5)$$

où η_c est le facteur normalisé dépendant du pourcentage de temps de la puissance du signal désiré dont la fonction de densité de probabilité est celle d'une distribution de Nakagami-Rice, la puissance directe constante étant donnée à la Fig. 3, dans laquelle:

$$20 \log \eta_c = A + 10 \log ((D + M)/D) \quad (6)$$

où A est l'amplitude (dB) tracée en ordonnée sur la Fig. 3. Le paramètre de la figure pour cette application est $M/(D + M)$.

Le rapport signal/brouillage en fonction de p est donné par:

$$[c/i](p) = (\eta_{c/i})^2(p) D/I_{50} \quad (7)$$

où I_{50} est la valeur médiane (c'est-à-dire la valeur pour 50% du temps) des variations de puissance du signal brouilleur:

$$I_{50} = (\eta_{i,50})^2 I \quad (8)$$

et $\eta_{c/i}$ est le facteur normalisé dépendant du pourcentage de temps des variations $[c/i]$ que donne approximativement la formule:

$$[\log \eta_{c/i}(p)]^2 = [\log \eta_c(p)]^2 + [\log \eta_i(100 - p)]^2 \quad (9)$$

où η_i est le facteur normalisé dépendant du pourcentage de temps de la puissance du signal brouilleur. Une solution dans laquelle $\eta_{c/i} < 1$ doit être choisie pour le pourcentage de temps qui satisfait $\eta_c < 1$ et $\eta_i > 1$. En fixant $I_D/I = b$, les valeurs de $\eta_{i,50}$ et de η_i (toutes deux en dB) en fonction de b sont données au Tableau 3.

Enfin,

$$[c/(i+n)](p) = [1/[c/n](p) + 1/[c/i](p)]^{-1} \quad (10)$$

Les prévisions de la méthode pour $[c/i]$ et $[c/(n+i)]$ sont précises à 1 dB près dans tous les cas dans la gamme de paramètres suivante:

$$N \leq -5 \text{ dB}; \quad M \leq -5 \text{ dB}; \quad I \leq -10 \text{ dB}; \quad 0,5 \leq b \leq 1 \quad (11)$$

où toutes les quantités se rapportent à D .

