

RAPPORT 266-7*

**CARACTÉRISTIQUES DE LA PROPAGATION IONOSPHERIQUE ET DU BRUIT
QUI ENTRENT EN JEU LORS DE LA CONCEPTION DE SYSTÈMES
DE RADIOCOMMUNICATION DE TERRE
ET DE LA PLANIFICATION DES SERVICES
(Évanouissements)**

(Question 35/6)

(1953-1956-1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introduction

L'expérience a montré que des renseignements sur la valeur moyenne du signal reçu ne suffisent pas pour planifier les systèmes de radiocommunication. Il faut également considérer les variations du signal dans le temps, dans l'espace et en fréquence, que l'on groupe sous le terme général d'évanouissements. Les évanouissements ont une influence déterminante sur le fonctionnement des systèmes de radiocommunication et sur le type de modulation que l'on peut utiliser efficacement. Il est essentiel d'en connaître la profondeur et la rapidité afin de pouvoir spécifier la puissance à donner aux émetteurs, fixer les rapports de protection contre les brouillages et, si l'on connaît de plus la corrélation des champs reçus sur des antennes ou sur des fréquences différentes, déterminer les systèmes de diversité ou de codage les plus efficaces et les plus économiques. Les Rapports 413, 414 et 415 (Oslo, 1966) traitent de l'importance des évanouissements, en ce qui concerne l'utilisation des fréquences, et analysent leurs divers aspects.

2. Causes générales des évanouissements

Les évanouissements peuvent être causés par des phénomènes divers, tels que:

- le mouvement de l'ionosphère et les variations dues à la propagation par trajets multiples, provoquant des évanouissements par interférence,
- la rotation des axes des ellipses de polarisation,
- la variation de l'absorption ionosphérique dans le temps,
- la focalisation et la disparition temporaire du signal par suite d'une variation imprévue de la MUF [Davies, 1965].

Sur un trajet de transmission nord-sud de 8000 km, on a attribué les évanouissements de longue durée aux effets des ondes de gravité atmosphériques [Röttger, 1973].

Comme l'a fait observer Davies [1965], la durée du cycle d'évanouissement dépend en grande partie de la cause des évanouissements. Il s'ensuit que la durée des évanouissements dus aux interférences et à la polarisation peut se situer entre une fraction de seconde et plusieurs secondes, ceux dus à la focalisation peuvent être de l'ordre de 15 à 30 minutes, alors que les évanouissements dus à l'absorption peuvent durer plus d'une heure; les variations imprévues de la MUF sont très irrégulières, se produisant tantôt au début tantôt à la fin des évanouissements.

Des expériences visant à observer la fréquence relative des évanouissements et portant aussi bien sur des signaux réfléchis que sur des signaux diffusés par l'ionosphère ont été menées en URSS sur des trajets d'un millier de kilomètres environ [Kerblai et autres, 1974; Kerblai et autres, 1977; CCIR 1978-82].

Les évanouissements sont d'autant plus rapides que les fréquences sont plus élevées, car le déphasage provoqué par un mouvement donné de l'ionosphère est plus marqué pour les petites longueurs d'onde. Ce mouvement des régions ionisées donne lieu à des évanouissements sélectifs et à une distorsion de l'enveloppe de modulation du signal. Il peut en outre modifier la longueur du trajet et produire un effet Doppler sur chacune des composantes du signal.

3. Périodes d'échantillonnage

Il n'est pas toujours indispensable, quand on analyse un système de communication, d'identifier les différents phénomènes qui interviennent; on peut, au lieu de cela, observer la série «temporelle» correspondante et caractériser les fluctuations du niveau du signal dans le temps en les considérant comme un processus aléatoire ou stochastique [Brennan, 1961]. Cette interprétation de la série temporelle exige, en premier lieu, le choix d'une période d'observation T , assez longue pour inclure un nombre suffisant de fluctuations du niveau du signal. Si le choix de la valeur de T , est quelque peu arbitraire, il est dicté généralement par les objectifs de l'analyse. C'est ainsi que pour les trajets en ondes décimétriques et pour des évanouissements rapides, on a constaté qu'il y a intérêt à considérer des échantillons d'une durée comprise entre quelques minutes et une heure; pour estimer les variations aléatoires dans chaque période horaire moyenne d'une journée, on a utilisé des périodes d'échantillonnage d'un mois.

* Ce Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 3, 5, 8 et 10.

Il est commode de considérer séparément les évanouissements à court et à long terme. La composante d'évanouissement à court terme comprend l'interférence de phase entre les signaux transmis par propagation sur trajets multiples et les variations rapides de la puissance du signal dues aux irrégularités ionosphériques. La composante d'évanouissement à long terme résulte des variations aléatoires de la médiane à court terme du champ reçu. Par exemple, les évanouissements à long terme comprennent les variations d'un jour à l'autre de la médiane du champ mesuré pendant une heure donnée. Les variations diurnes, saisonnières et undécennales (cycle solaire) ont un caractère plus systématique et ne sont généralement pas associées aux évanouissements.

4. Profondeur et rapidité des évanouissements à court terme

Dans l'acception qui leur est donnée ici, les mots «profondeur» et «rapidité» se rapportent aux caractéristiques des variations de l'amplitude du signal reçu lorsque l'émission est stable en amplitude et en fréquence.

4.1 Profondeur des évanouissements

La fonction de distribution de l'amplitude du signal $P(v_0)$ généralement utilisée donne la probabilité pour que l'on trouve une amplitude v du signal supérieure à une valeur v_0 . Elle est liée à la fonction de densité de probabilité $p(v)$ par la relation:

$$P(v_0) = \int_{v_0}^{\infty} p(v) dv \quad (1)$$

Les fonctions de densité de probabilité, obtenues de façon analytique pour décrire l'enveloppe d'un signal sujet à des évanouissements, diffèrent selon les hypothèses faites relativement à la structure des éléments constituant le signal. Dans un des modèles les plus fréquemment utilisés, on admet que le signal reçu avant détection se compose d'une composante sinusoïdale stable et d'une composante de Rayleigh aléatoire avec une densité de probabilité de phase uniforme [McNicol, 1949; Bramley, 1951]. On aboutit à la fonction de densité de probabilité de Nakagami-Rice [Nakagami, 1943; Rice, 1944 et 1945]:

$$p(v) = (2v/v_n^2) \exp[-(v_1^2 + v^2)/v_n^2] I_0(2v_1 v/v_n^2) \quad (2)$$

dans laquelle:

$I_0(x)$: fonction de Bessel d'ordre zéro modifiée,

v : (tension de l'enveloppe du signal reçu)/ $\sqrt{2}$,

v_1 : valeur efficace de la tension de la composante sinusoïdale stable,

v_n : valeur efficace de la composante de tension aléatoire.

La Fig. 1 donne la fonction de distribution de l'amplitude du signal correspondante $P(v_0)$. Chaque courbe représente une probabilité constante $P(v_0)$ pour que le niveau v_0 (porté en ordonnée) soit dépassé. En abscisse est porté le rapport v_n/v_1 , paramètre nécessaire pour spécifier une distribution particulière de Nakagami-Rice. Par exemple, si le rapport de la tension aléatoire efficace à la tension stable efficace est égal à l'unité (soit 0 dB), un niveau inférieur de 7,5 dB à la médiane sera dépassé pendant 90% du temps.

Si $v_n/v_1 \gg 1$, l'expression (2) se ramène à la fonction de densité de Rayleigh:

$$p(v) = (2v/v_n^2) \exp(-v^2/v_n^2) \quad (3)$$

La Fig. 1 montre cependant que la distribution réelle est très voisine de la distribution de Rayleigh à condition que $v_n/v_1 > 2$ (6 dB).

Si $v_n/v_1 \ll 1$, et au voisinage de $v = v_1$, l'expression (2) se ramène à la fonction de distribution normale de Gauss:

$$p(v) = \frac{1}{v_n \sqrt{\pi}} \exp \left[-\frac{(v - v_1)^2}{v_n^2} \right] \quad (4)$$

Le signal varie donc symétriquement par rapport à la médiane v_1 avec un écart type $v_n/\sqrt{2}$. La Fig. 1 montre que la distribution est presque symétrique par rapport à la médiane, à condition que $v_n/v_1 < 0,1$ (-20 dB); on peut donc estimer que, si cette condition est satisfaite, la distribution est approximativement normale.

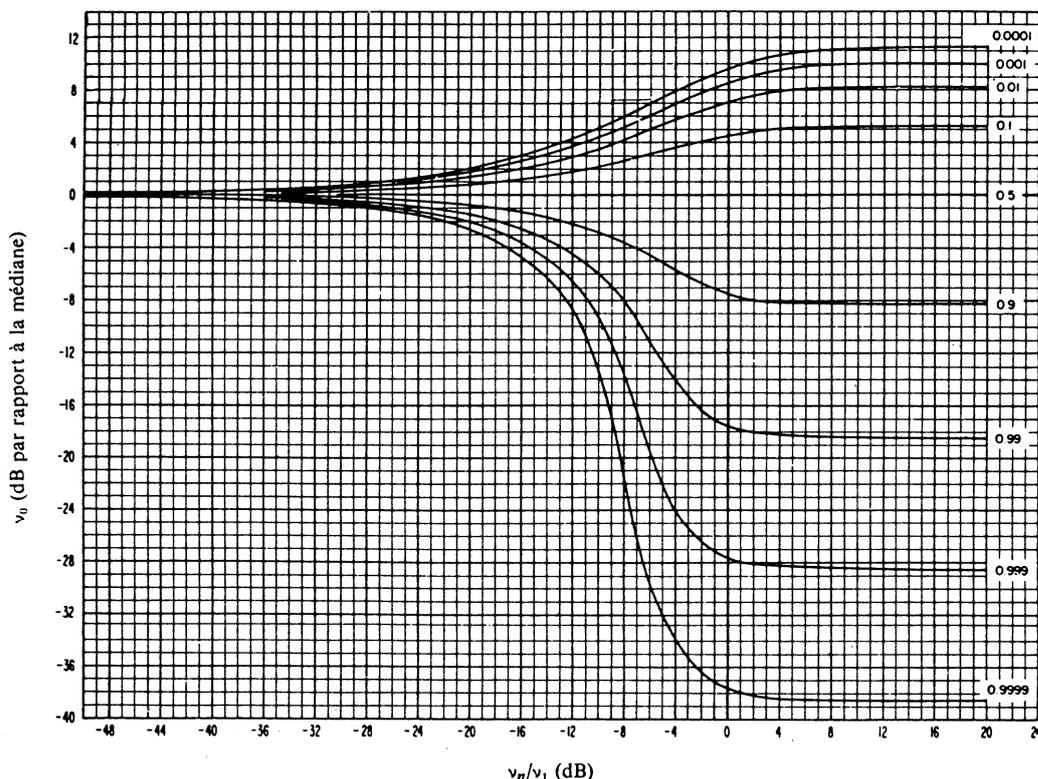


FIGURE 1 – Fonction de distribution $P(v_0)$ pour la distribution de Nakagami-Rice

(Les valeurs de $P(v_0)$ sont indiquées sur les courbes)

Quand l'intensité du signal est exprimée en décibels par rapport à un niveau spécifié, la distribution indiquée dans la formule (4) s'appelle distribution log-normale. Les fonctions de densité de probabilité normale et log-normale peuvent être exprimées l'une et l'autre par la même formule:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (5)$$

Dans le cas de la distribution normale, x est égal à $(v - v_m)$ tandis que dans la distribution log-normale en dB, x est égal à $20 \log(v/v_m)$, v_m étant la médiane de v , et σ_x , l'écart type de x .

En plus des densités de probabilité ci-dessus, qui sont liées à certaines hypothèses théoriques (phénomènes stationnaires, mouvement aléatoire des éléments rayonnants secondaires), il en est d'autres qui méritent d'être considérées parce qu'elles contiennent des paramètres arbitraires que l'on peut ajuster pour représenter les résultats expérimentaux. On peut, à cet égard, signaler la distribution en m [Nakagami, 1960] qui est analogue à la distribution en χ^2 et à la distribution gamma, souvent employées dans les statistiques. La distribution en m est voisine d'une distribution de Rice quand m est grand et d'une distribution de Rayleigh quand m est voisin de l'unité.

Dans les conditions réelles, le signal reçu sur un circuit en exploitation en ondes décimétriques est généralement la résultante de plusieurs signaux. Si les amplitudes de ces signaux sont des constantes arbitraires et leur déphasage relatif aléatoire, la distribution de l'amplitude de la somme de n signaux est donnée par l'intégrale de Kluyver [CCIR, 1986-1990a]. En particulier, pour $n = 2$, la distribution est donnée par:

$$\begin{aligned}
 p(v) &= 1 && \text{pour } v < |v_1 - v_n| \\
 p(v) &= \frac{1}{\pi} \arccos \frac{v^2 - v_n^2 - v_1^2}{2v_1 v_n} && \text{pour } |v_1 - v_n| \leq v \leq (v_1 + v_n) \\
 p(v) &= 0 && \text{pour } v > v_1 + v_n
 \end{aligned} \quad (6)$$

Si les amplitudes et les phases des signaux contributifs sont aléatoires, l'évanouissement affectant chacun des signaux peut être décrit par l'équation (2). Pour ce cas, la distribution des amplitudes a été calculée par Sergueev [1978a].

Dans ces deux cas, lorsque $n > 2$, les distributions correspondent approximativement aux distributions de Rice-Nikegami et de Rayleigh respectivement. Pour $n = 2$ cependant, les différences sont considérables. Le Tableau I donne les niveaux qui sont dépassés pour différents pourcentages de temps avec la distribution décrite par l'équation (6) ainsi que ceux correspondant aux distributions théoriques examinées précédemment [Norton et autres, 1955].

On a appliqué un autre procédé d'estimation des fonctions de densité de probabilité de l'enveloppe du signal. Selon la méthode de Diakov et Kiyanovsky [1981], sur des trajets à un seul bond et à deux bonds [Gorchkova et autres, 1985]. Cet exercice a montré la possibilité de décrire les données expérimentales par des lois théoriques uniques à un seul paramètre de forme ou sans aucun paramètre. Une description adéquate des fonctions de densité de probabilité est possible au moyen d'une famille de distributions; à cet effet, il convient d'utiliser la famille des distributions β , qui possède deux paramètres de forme et qui reflète pratiquement toute la diversité des distributions empiriques de l'enveloppe du signal [Doumbrava et autres, 1988].

TABLEAU I

Distribution	ν_n/ν_1 (dB)	Niveau (dB) par rapport à la médiane, dépassé pendant le pourcentage de temps suivant			
		1%	10%	90%	99%
1 signal constant + N signaux aléatoires	0	3,01	2,90	-13,10	-33,07
	-3	2,88	2,78	-9,87	-12,42
	-6	2,55	2,46	-6,23	-7,01
	-9	2,12	2,04	-3,97	-4,32
	-12	1,68	1,61	-2,59	-2,78
Nakagami-Rice	0	7,02	4,48	-7,53	-17,55
	-3	6,02	3,79	-6,28	-15,49
	-6	4,91	3,03	-4,57	-11,10
	-9	3,86	2,33	-3,17	-6,96
	-12	2,95	1,75	-2,18	-4,47
Rayleigh		8,22	5,21	-8,18	-18,39
Normale et logarithmique normale		$2,326\sigma_x$	$1,282\sigma_x$	$-1,282\sigma_x$	$-2,326\sigma_x$

Dans l'étude de la propagation des ondes radioélectriques, on connaît souvent la valeur mensuelle médiane de l'amplitude du signal, mais il faut connaître en outre la distribution de probabilité de la valeur instantanée de cette amplitude. Les valeurs médianes de l'amplitude du signal, exprimées en décibels, pendant un intervalle de temps spécifié (par exemple, 1 h) sur une série de jours, présentent une distribution normale avec un écart type σ dB.

C'est-à-dire que ces valeurs médianes sont log-normales. Si la distribution des valeurs instantanées par rapport à la valeur médiane pendant chaque intervalle de temps particulier est une distribution de Rayleigh, on peut calculer la distribution de probabilité totale pour tous les intervalles de temps d'après ces deux distributions [Spaulding, 1982]. La Fig. 2 [Picquenard, 1974] indique le niveau au-dessous duquel tombe le signal pendant des pourcentages donnés du temps total, pour des valeurs de σ allant jusqu'à 20 dB. Dans le cas de la propagation sans brouillage de l'onde ionosphérique, on peut calculer la valeur de σ à l'aide de la formule de $\sigma_{S,N}$ de Sailors et autres [1977]. Si le rapport signal/bruit est élevé en présence de brouillage, la formule de $\sigma_{S,N}$ due aux mêmes auteurs permet de calculer la valeur de σ .

Spaulding, [1982] a présenté des algorithmes de calcul permettant de déterminer la distribution totale des évanouissements d'amplitude pour un signal composé d'une ou plusieurs composantes dont, pour chacune, la médiane horaire présente des évanouissements à court terme de Rayleigh tandis que les évanouissements à long terme ont une distribution log-normale.

Des mesures effectuées dans la bande des ondes hectométriques [Spaulding, 1982] semblent montrer que les médianes horaires du champ pour une heure de nuit donnée sont, d'un jour à l'autre, distribuées selon une loi log-normale, tandis que les évanouissements à court terme, au cours d'une heure, peuvent s'écarter de la distribution de Rayleigh couramment admise.

Les propriétés de la distribution du champ de l'onde ionosphérique dans les bandes des ondes hectométriques et des ondes kilométriques montrent que la distribution log-normale et celle de Rayleigh ne s'appliquent que dans des cas marginaux, et que des enregistrements effectués pendant 30 et 60 min suivent une loi de distribution différente s'ils ont été effectués pendant plusieurs années et différentes saisons [Täumer et Sulanke, 1967 et 1968].

Un récapitulatif des renseignements contenus dans les documents du CCIR et dans d'autres publications ainsi que de nouvelles analyses des données disponibles effectuées au Royaume-Uni ont permis de dégager les valeurs des écarts des déciles du champ par rapport à ses valeurs médianes, ces écarts étant dus à la variabilité au cours d'une heure. Les résultats sont les suivants: pour le décile inférieur, l'écart par rapport à la médiane horaire est d'environ 6 dB, alors que, pour le décile supérieur, il est d'environ 5 dB, ce qui conduit à penser que la distribution du champ est en gros plus proche d'une distribution log-normale que d'une distribution de Rayleigh ou de Nakagami-Rice.

Après cet exposé de quelques formules mathématiques qui peuvent servir à décrire l'évanouissement, on présentera quelques résultats de mesure. La distribution des évanouissements obtenue en calculant la moyenne des estimations expérimentales individuelles sur des périodes de deux à trois minutes dépend des rayons qui contribuent au signal. Lorsque le nombre de rayons augmente, la distribution tend vers une distribution de Rayleigh. On se rapproche également d'une distribution de Rayleigh lorsque la période d'observation augmente jusqu'à 30 minutes [Sergueev, 1978b; Sergueev et Fiks, 1982]. Avec des intervalles d'analyse plus longs (30 à 60 min), la distribution semble suivre la loi logarithmique normale plutôt que celle de Rayleigh. La dynamique d'évanouissement est souvent définie par la différence (dB) entre les niveaux du signal qui sont dépassés pendant 10% et 90% du temps, et l'on a indiqué pour des trajets en ondes décimétriques à grande distance les valeurs $13 \pm 3,2$ dB [Grosskopf, 1953] et $16,6 \pm 3,2$ dB [Konopleva, 1964].

Ces valeurs ne semblent pas dépendre beaucoup de l'heure, de la saison et de la longueur du trajet entre 1 500 et 6 000 km [Konopleva, 1964]. Pour un trajet plus court (650 km) et un intervalle d'analyse de 10 minutes, on a signalé une loi log-normale avec une dynamique d'évanouissement de près de 11 dB [Gibson, 1989].

Il est intéressant de noter que, si les distributions mesurées peuvent avoir une allure différente de celle de la distribution de Rayleigh, la dynamique d'évanouissement observée est du même ordre de grandeur que la valeur 13,4 dB prévue pour la distribution de Rayleigh. Toutefois, on a constaté que pour des signaux de niveau élevé cet intervalle s'abaisse en dessous de la valeur de Rayleigh, peut-être à cause de la présence d'une composante constante importante due à une réflexion

spéculaire; dans ces conditions, ce sont des distributions du type Nakagami-Rice qui se manifestent. Les écarts des déciles de médianes de 2 à 10 min par rapport à la médiane horaire ont aussi été étudiés en URSS. Pour des liaisons radioélectriques fonctionnant à $f/MUF \leq 0,85$, ces écarts sont de 5 à 7,5 dB aux latitudes moyennes et de 6,5 à 10 dB aux latitudes septentrionales [Kosikov, 1957; Khmelnsky, 1975]. Des études ont montré que le taux de fluctuation au cours d'une moyenne intra-horaire par rapport à la médiane horaire dépend de la durée d'intégration. Pour une liaison de 3000 km de longueur en latitude moyenne, l'écart décile par rapport à la médiane horaire est de 6, 5 et 2 dB pour des périodes d'intégration respectives de 1, 2 et 15 min [Malygin et Sergueev, 1982; Sergueev et autres, 1985].

Les données relatives aux bruits atmosphériques se trouvent dans le Rapport 322. Elles proviennent de mesures normalisées faites dans les stations d'un réseau mondial, les valeurs moyennes ayant été déterminées pour une période d'un quart d'heure chaque heure, prise comme représentative de l'heure pendant laquelle elles ont été faites. L'hypothèse sur laquelle repose le programme de mesure est la suivante: à l'exception des périodes de transition (aube et crépuscule) et des périodes d'orages locaux, il n'y a, en général, aucune variation significative du bruit au cours d'une heure.

Des renseignements relatifs aux bruits radioélectriques artificiels se trouvent dans le Rapport 258. La puissance moyenne de bruit y est indiquée, en fonction de la fréquence, pour plusieurs catégories de milieux (quartiers des affaires, quartiers résidentiels, zones rurales), accompagnée des écarts des déciles correspondants par rapport à la moyenne horaire du champ, ces écarts étant dus à la variabilité au cours d'une heure en un endroit donné. Le Tableau II fait connaître les valeurs du décile supérieur qui conviennent pour les ondes décamétriques. S'il est vrai que la variabilité est un peu plus faible pour les zones rurales à la fréquence 5 MHz, les autres résultats diffèrent peu entre eux. La médiane de toutes ces valeurs est 10,0 dB; c'est d'ailleurs aussi la médiane pour les quartiers résidentiels.

TABLEAU II – *Ecarts du décile supérieur par rapport à la médiane horaire du champ pour les bruits artificiels (dB)*

Fréquence (MHz)	Catégorie de milieu		
	Quartier des affaires	Quartier résidentiel	Zone rurale
5	11,0	10,0	5,9
10	10,9	8,4	9,0
20	10,5	10,6	7,8

4.2 Rapidité des évanouissements

La rapidité des évanouissements peut être caractérisée de diverses manières [McNicol, 1949; Ratcliffe, 1956; Price, 1957; Rice, 1958]. Une description des évanouissements, qui peut être utile dans un certain nombre d'applications, est donnée par la fonction d'autocorrélation dans le temps ou par le spectre de puissance correspondant.

Moyennant certaines hypothèses théoriques (répartition normale des composantes de vitesses des éléments rayonnants secondaires), la fonction d'autocorrélation devrait être représentée par une courbe normale:

$$R(\tau) \approx R(0) \exp(-\tau^2/2\tau_0^2) \quad (7)$$

où τ_0 s'appelle constante de temps de corrélation (ou de cohérence) de la voie sujette à évanouissement. La densité spectrale de puissance correspondante est proportionnelle à $\exp(-\tau_0^2 f^2/2)$, fonction d'allure gaussienne dont l'écart type est $1/\tau_0$. Cette fonction porte aussi le nom de largeur de bande de corrélation (ou de cohérence) de la voie sujette à évanouissement.

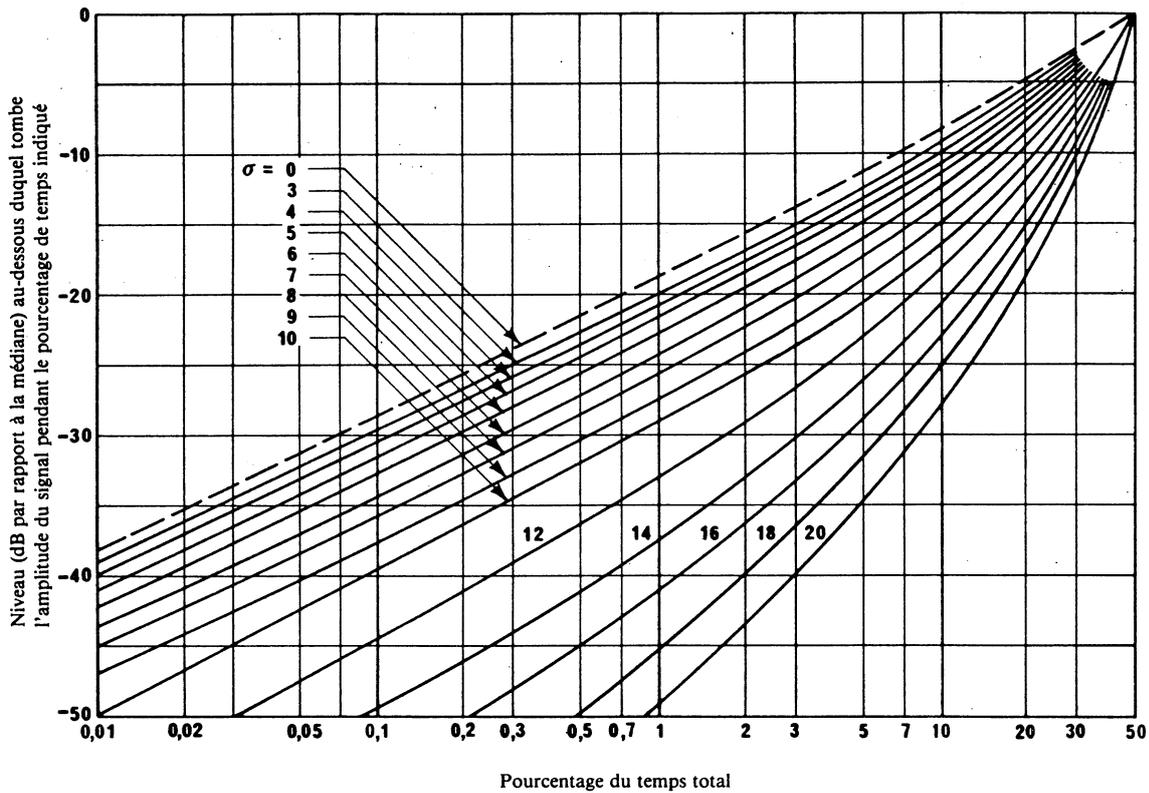


FIGURE 2 - Niveau au-dessous duquel tombe l'amplitude du signal quand la distribution des valeurs instantanées de l'amplitude du signal est une distribution de Rayleigh, mais que la distribution des valeurs journalières médianes de l'amplitude du signal est une distribution log-normale, avec un écart-type de σ dB

On peut toutefois se demander si l'hypothèse faite sur la répartition des vitesses des éléments rayonnants secondaires est toujours justifiée. Il convient donc de prendre en considération la possibilité d'autres fonctions de répartition des vitesses. Ces dernières peuvent conduire à d'autres formes de la fonction d'autocorrélation et à des étalements différents par effet Doppler.

On a souvent utilisé d'autres paramètres pour caractériser la rapidité des évanouissements, tout d'abord la fréquence des évanouissements définie par le nombre de fois où le champ traverse une certaine valeur spécifiée, dans le sens ascendant, pendant une unité de temps.

Lorsque les évanouissements du signal obéissent à l'équation (2), la rapidité d'évanouissement définie par le passage au niveau v est donnée par:

$$N(v) = (f_n v \sqrt{4\pi}/v_n) \exp [-(v_1^2 + v^2)/v_n^2] I_0(2v_1 v/v_n^2) \quad (8)$$

où

f_n : moyenne quadratique de la fréquence des évanouissements, donnée par:

$$f_n^2 = \frac{\int_0^\infty f^2 G(f) df}{\int_0^\infty G(f) df} = \frac{1}{4\pi^2 R(0)} \left. \frac{d^2 R(\tau)}{d\tau^2} \right|_{\tau=0} \quad (9)$$

Dans l'expression (9), $R(\tau)$ est la fonction d'autocorrélation, $G(f)$ est le spectre de puissance des évanouissements et f est mesuré à partir de la fréquence centrale de la bande [Rice, 1948].

Dans le cas particulier de la distribution de Rayleigh, on peut introduire la valeur médiane v_m , d'où [Rice, 1958]:

$$N(v) = 2,95 f_n (v/v_m) \exp(-0,693 v^2/v_m^2) \quad (10)$$

dans laquelle, si $v = v_m$, $N(v_m) = 1,47 f_n$. On peut obtenir des résultats similaires à ceux-ci pour différentes distributions de l'évanouissement du signal, telles que les distributions normale ou log-normale (formule (5)). L'important est que $N(v_m)$ soit proportionnel à f_n .

La fréquence des évanouissements, définie par le passage au niveau du champ dépassé pendant 90% du temps, a fait l'objet de mesures en République fédérale d'Allemagne (enregistrement du champ de la station WWV sur 15 MHz). La fréquence d'évanouissement était comprise entre 6 et 16 par minute, la valeur moyenne étant de 11,25 par minute.

La rapidité des évanouissements du signal en raison de brouillages dépend des caractéristiques des modes de propagation qui, à leur tour, sont déterminées dans une large mesure par le rapport entre la fréquence de travail et la fréquence maximale utilisable [Sergueev, 1974, 1975; Malygin et autres, 1982]. Des données expérimentales sur des trajets de longueur allant jusqu'à 3000 km, à des latitudes moyennes donnent des périodes de corrélation des évanouissements τ_0 comprises entre 2 et 18 s selon la fréquence de travail et la saison [CCIR, 1982-86a]. Les valeurs les plus faibles sont obtenues lorsque les rayons empruntent des trajets multiples (par exemple, dédoublement magnéto-ionique ou présence du rayon de Pedersen). Sur des trajets à plusieurs bonds sur une distance allant jusqu'à 6000 km, avec une structure complexe du trajet du signal, on obtient une valeur $\tau_0 = 3-4$ s, indépendante de la fréquence de travail.

Dans les régions tropicales, certains trajets en ondes décimétriques peuvent subir, pendant un pourcentage de jours déterminé, des évanouissements beaucoup plus rapides que d'autres trajets situés à des latitudes plus élevées [Osborne, 1952; Yeh et Villard, 1958; Bennington, 1960; Koster, 1963]. Ce phénomène est lié à la diffusion par la couche F équatoriale; il commence habituellement vers 20h00 (heure locale) et dure environ de 2 à 4 heures. On peut s'attendre à ce qu'il affecte les trajets de transmission dont le point de réflexion sur la couche F est situé entre les latitudes magnétiques $\pm 15^\circ$. On constate des variations saisonnières ainsi que des variations dues à l'activité solaire, mais elles peuvent être de nature différente selon l'orientation du trajet. Les trajets de grande longueur semblent davantage affectés à l'époque des équinoxes et au moment du maximum de l'activité solaire [Humby, 1959]. En plus de l'augmentation de la profondeur des évanouissements, on a observé de brèves variations de fréquence de l'ordre de 20 à 30 Hz; ces variations peuvent affecter une fréquence inférieure sans qu'il en soit de même pour une fréquence supérieure [Davies et Barghausen, 1964]. Il faudrait disposer d'un plus grand nombre de données pour pouvoir déterminer avec davantage de précision les diverses caractéristiques des évanouissements.

5. Variations à long terme

Dans le cas de variations à long terme, on analyse généralement la composante aléatoire en prenant les valeurs médianes horaires et en évaluant les distributions d'amplitude sur une longue période. On admet d'ordinaire, pour simplifier, que les variations à long terme ont une distribution log-normale et cette méthode donne souvent une bonne approximation de la distribution réelle. Une étude très complète des variations à long terme effectuée en République fédérale d'Allemagne [Grosskopf, 1953; 1955a; 1955b] a montré que les courbes de distribution correspondant à une rotation solaire étaient proches de la loi log-normale pour 50% des 28 périodes de rotation étudiées; 25% pouvaient se partager en deux populations à distribution log-normale valable chacune pour une gamme donnée de champs. Les autres ne pouvaient se ramener à la distribution log-normale que par un partage en un nombre plus élevé de population partielles.

Les résultats relatifs à la dispersion des variations à long terme ont été étudiés dans un certain nombre de pays. Exprimées sous forme de l'écart type σ_x de la distribution log-normale (équation (5)), les analyses mentionnées ci-dessus ont donné un résultat moyen de 8 dB, certaines indications montrant que, pendant la nuit, les valeurs peuvent être plus grandes que pendant le jour. Des expériences ont été faites en URSS sur des trajets à ondes décimétriques de 1500, 3000 et 6000 km, en toutes saisons et à toutes les heures du jour; les valeurs obtenues étaient comprises entre 5 et 10 dB [Konopleva, 1964]. Les variations systématiques de caractère saisonnier ou correspondant aux heures du jour et de la nuit paraissent relativement faibles. Les résultats obtenus au Royaume-Uni pour les trajets Accra-Royaume-Uni, Bombay-Royaume-Uni et Colombo-Royaume-Uni ont donné des valeurs de l'ordre de 5,5 à 7 dB. Dans certaines régions, on peut trouver des valeurs plus élevées; par exemple, il se peut que l'on obtienne une valeur de 10 dB ou plus pour des trajets traversant les régions polaires à forte absorption.

Des études de Bradley et Vernon [1982], fondées sur des travaux théoriques, ainsi qu'un examen des résultats de mesure conduisent à penser que l'influence de la latitude sur les écarts des déciles l'emporte sur celle de la fréquence. Les auteurs ont montré que certains résultats sont mutuellement incompatibles: dans certaines mesures, les écarts des déciles diminuent lorsque la fréquence augmente alors que, dans d'autres mesures, ils augmentent.

Des études de l'évanouissement à long terme ont été entreprises en URSS [Khmelnitsky, 1970a et 1975; Bogdanov et Segal, 1967; Blagovechtchensky, 1981] pour des liaisons radioélectriques fonctionnant à des fréquences pas trop rapprochées de la MUF (jusqu'à 0,85) aux latitudes moyennes et septentrionales. Aux latitudes moyennes, les écarts des déciles sont de 4 à 5 dB sur les trajets de moins de 3000 km et de 6,5 à 10 dB sur les trajets de plus de 3000 km. Aux latitudes septentrionales, les écarts des déciles sont respectivement de 7,5 à 12 dB et 12,5 à 15 dB.

D'autres études effectuées sur des trajets aux latitudes moyennes et basses ont montré que l'écart type σ est maximal pour des fréquences voisines de la MUF (jusqu'à 12 - 15 dB). En hiver, on observe une augmentation pour des valeurs de MUF plus faibles pour des distances de 4 000 à 5 000 km; l'écart type est variable et compris entre 1 et 15 dB. Sur des trajets de longueur inférieure à 3 700 km et pour une valeur de f/MUF comprise entre 0,3 et 0,85, $\bar{\sigma} = 3,4$ dB; lorsque f/MUF est comprise entre 0,85 et 1,15, $\bar{\sigma} = 5,2$ dB; pour des distances de 3 700 à 7 500 km et f/MUF comprise entre 0,3 et 0,85, $\bar{\sigma} = 4,8$ dB [CCIR, 1986-90b].

Les résultats des mesures de champ en ondes décimétriques effectuées en Chine en 1983 et 1984 sur 5 trajets (distances comprises entre 1 000 à 7 000 km, fréquences comprises entre 5 et 15 MHz) montrent que la valeur moyenne de l'écart type mensuel des évanouissements à long terme (fluctuations au jour le jour) est de 4,4 dB [CCIR, 1986-90c].

En URSS a été élaborée une méthodologie pour calculer les distributions d'amplitudes des évanouissements lents et leurs caractéristiques en tenant compte des fluctuations de la MUF [Tchernov, 1989]. On a obtenu une expression analytique pour la densité de distribution, qui peut comporter 1 à 3 maxima, selon les paramètres réels de fluctuation de la MUF et de fluctuation des niveaux de signal lorsque l'écart entre la MUF et la fréquence de travail est important.

Une étude a été entreprise ———— en République fédérale d'Allemagne, basée sur environ 40 000 valeurs des médianes horaires mensuelles (et leurs écarts de déciles) du champ de signaux en ondes décimétriques. Ces mesures ont porté à la fois sur des trajets à un seul bond et à plusieurs bonds sous toutes les latitudes [CCIR, 1982-86b]. L'évanouissement à long terme ne semble pas varier beaucoup avec la longueur du trajet, l'heure de la journée, la saison ou le nombre de taches solaires. Il varie toutefois sensiblement en fonction du rapport de la fréquence du signal à la médiane mensuelle de la MUF de référence.

On trouve, dans le Supplément au Rapport 252, des valeurs représentatives des écarts du décile inférieur et du décile supérieur du champ par rapport à sa médiane mensuelle, ces écarts étant dus à la variabilité d'un jour à l'autre. Les valeurs indiquées ont été calculées à partir de résultats de mesures; elles sont données séparément pour les trajets de moins de 2500 km et pour ceux de plus de 2500 km, en fonction de l'heure locale au milieu du trajet, de la saison et de la latitude géomagnétique du milieu du trajet. On trouvera dans le Rapport 432 des renseignements sur les variations à long terme dans les bandes des ondes kilométriques et des ondes hectométriques.

Le Rapport 322 donne des valeurs des écarts des déciles correspondants de la puissance des bruits atmosphériques, en fonction de la fréquence, de la saison et de l'heure locale.

On ne possède pour le moment aucun renseignement sur la variabilité d'un jour à l'autre des bruits artificiels, mais on peut s'attendre à constater une certaine influence de l'activité générale, par exemple, une diminution des bruits artificiels les jours non ouvrables.

6. Marges contre les évanouissements pour la planification d'un service

La mise en œuvre d'une méthode de planification d'un service fondée sur une analyse de compatibilité requiert deux choses:

- une comparaison du champ des signaux utiles avec le bruit, afin de voir si l'on obtient la qualité de réception désirée en l'absence de brouillage,
- une comparaison avec les signaux brouilleurs transmis dans la même voie et dans la voie adjacente pour voir si les brouillages sont préjudiciables.

On doit ajouter aux estimations des médianes mensuelles des marges appropriées contre les évanouissements. Il convient d'examiner ces marges séparément selon que le bruit de fond est un bruit atmosphérique, un bruit artificiel ou un signal brouilleur mais, dans tous les cas, elles dépendent:

- de l'évanouissement au cours d'une heure et de l'évanouissement d'un jour à l'autre du signal utile,
- de l'évanouissement au cours d'une heure et de l'évanouissement d'un jour à l'autre du bruit de fond,
- de la corrélation entre le champ du signal utile et celui de la perturbation,
- de la fraction du temps pendant laquelle la qualité de réception désirée doit être atteinte.

La médiane mensuelle du rapport «signal utile/bruit de fond» nécessaire pour une réception satisfaisante étant donnée, il convient en premier lieu d'évaluer le renforcement ou la marge contre les évanouissements $F_{b,90}$ nécessaire pour atteindre la qualité de réception désirée pendant 90% du temps en présence de l'évanouissement au cours d'une heure et de l'évanouissement d'un jour à l'autre à la fois du signal et du bruit de fond. Les marges contre les évanouissements pour d'autres pourcentages du temps peuvent alors être exprimées en fonction de $F_{b,90}$.

Dans l'hypothèse où il n'y a pas de corrélation entre l'évanouissement au cours d'une heure ni entre l'évanouissement d'un jour à l'autre des signaux utiles et de la perturbation, on peut donner pour $F_{b,90}$ l'expression approchée suivante [CCIR, 1982-86c]:

$$F_{b,90} = \sqrt{S_{wh}^2 + S_{dd}^2 + B_h^2 + B_d^2} \quad \text{dB} \quad (11)$$

dans laquelle:

- S_{wh} : écart du décile inférieur du signal utile par rapport à la médiane horaire du champ, cet écart provenant des variations au cours d'une heure (dB)
- S_{dd} : écart du décile inférieur du signal utile par rapport à la médiane mensuelle du champ, cet écart provenant des variations d'un jour à l'autre (dB)
- B_h : écart du décile supérieur du bruit de fond par rapport à la médiane horaire du champ, cet écart provenant des variations au cours d'une heure (dB)
- B_d : écart du décile supérieur du bruit de fond par rapport à la médiane mensuelle du champ, cet écart provenant des variations d'un jour à l'autre (dB).

Pour l'évanouissement du signal à court terme, la première session de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la planification des bandes d'ondes décimétriques attribuées au service de radiodiffusion (CAMR HFBC(1)), Genève, 1984, a adopté un écart de 5 dB pour le décile supérieur et un écart de -8 dB pour le décile inférieur. En ce qui concerne l'évanouissement du signal à long terme, les écarts du décile sont fonction du rapport de la fréquence de fonctionnement à la MUF de référence, indiqué au Tableau III.

TABLEAU III – *Écarts à 90% et 10% par rapport à la valeur médiane mensuelle prévue du champ du signal (dB), provenant de la variabilité d'un jour à l'autre*

Latitude géomagnétique corrigée (1)	< 60°		≥ 60°	
	90%	10%	90%	10%
≤ 0,8	-8	6	-11	9
1,0	-12	8	-16	11
1,2	-13	12	-17	12
1,4	-10	13	-13	13
1,6	-8	12	-11	12
1,8	-8	9	-11	9
2,0	-8	9	-11	9
3,0	-7	8	-9	8
4,0	-6	7	-8	7
> 5,0	-5	7	-7	7

(1) Si un point quelconque de cette partie du grand cercle qui passe par l'émetteur et par le récepteur et qui se trouve entre les points directeurs situés à 1000 km de chaque extrémité du trajet atteint une latitude géomagnétique corrigée de 60° ou plus, il faut utiliser les valeurs correspondant aux latitudes ≥ 60°.

En principe, les marges contre les évanouissements devraient aussi tenir compte de la fréquence des évanouissements, laquelle peut affecter la qualité de la réception, mais on ne dispose pas encore de données à cet effet. La marge $F_{b,x}$ contre les évanouissements pour $x\%$ du temps s'exprime facilement en fonction de $F_{b,90}$ par la formule:

$$F_{b,x} = c \cdot F_{b,90} \quad \text{dB} \quad (12)$$

x étant compris entre 50 et 90%, les valeurs de c pour une distribution log-normale du rapport signal/perturbation, pour une distribution de Rayleigh et pour une distribution composite intermédiaire sont tout à fait semblables et très voisines de ce qu'indique le Tableau IV.

TABLEAU IV - Valeurs du coefficient c

x (%)	c
50	0
60	0,18
70	0,36
80	0,63
90	1

7. Corrélation des signaux dans l'espace, dans le temps, en fréquence et en polarisation

L'étude de la corrélation entre deux signaux reçus, en fonction de leur séparation dans l'espace, dans le temps, en fréquence ou en polarisation, peut fournir d'utiles renseignements pour l'établissement d'un système de télécommunication en présence d'évanouissements.

Outre le procédé qui consiste à augmenter la puissance de l'émetteur, on a recours également [Stein, 1966] à des méthodes de modulation et de réception qui sont moins sensibles aux évanouissements. Le procédé le plus répandu est celui de la réception en diversité qui consiste à associer plusieurs récepteurs. Selon le mécanisme de propagation, on peut avoir recours à l'un des procédés suivants pour obtenir des signaux dont les périodes d'évanouissement sont indépendantes les unes des autres:

- diversité d'espace (antennes espacées);
- diversité en fréquence;
- diversité selon l'angle d'arrivée des ondes;
- diversité de polarisation;
- diversité dans le temps (répétition du signal);
- diversité par trajets multiples (Rake).

Les deux derniers de ces procédés ont surtout été utilisés dans la transmission de signaux numériques.

Ce n'est pas ici le lieu d'étudier dans le détail les caractéristiques des voies et des méthodes de réception en diversité, mais il convient de signaler que la plupart des études sur ce mode de réception se rapportent à des évanouissements lents, non sélectifs. Or, depuis quelques années, les évanouissements rapides non sélectifs retiennent de plus en plus l'attention. Balsler et Smith [1962] ont obtenu des données très utiles sur la propagation ionosphérique par trajets multiples, au moyen de sondeurs à incidence oblique dont les impulsions ont des durées de l'ordre de 10 à 100 μ s.

D'après les données typiques recueillies [Stein, 1966], on peut conclure que si l'on tente de transmettre en série des séquences de signaux numériques à de grandes distances, par l'intermédiaire de l'ionosphère, à des vitesses supérieures à 100-200 impulsions par seconde, et sans prendre de mesures spécifiques contre la propagation par trajets multiples, on risque d'obtenir d'importantes interférences entre symboles.

Les opérateurs s'efforcent de pallier les inconvénients dus à la propagation par trajets multiples en utilisant des fréquences voisines de la MUF. Une autre méthode consiste à mettre en œuvre des systèmes d'antennes très directives à orientation automatique, telles que les MUSA [Polkinghorn, 1940], qui favorisent certains trajets à bonds multiples par rapport à d'autres trajets.

Pour caractériser le degré d'approximation des évanouissements lents non sélectifs, on dispose d'un paramètre utile qui est le *facteur d'étalement* [Stein, 1966]. Si T est la durée de l'impulsion d'information, les évanouissements sont essentiellement non sélectifs si l'étalement T_M dans une transmission par trajets multiples est tel que:

$$T_M \ll T \quad (13)$$

De même, si B_D est l'étalement dû à l'effet Doppler (largeur du spectre de puissance reçu avec porteuse non modulée), les évanouissements seront essentiellement lents si l'on a:

$$T \ll 1/B_D \quad (14)$$

Pour obtenir une approximation des évanouissements lents non sélectifs, il faut que T satisfasse à la fois aux formules (12) et (13) et il faut que le facteur d'étalement L défini par l'expression:

$$L = B_D T_M \quad (15)$$

soit tel que

$$L \ll 1 \quad (16)$$

7.1 Réception en diversité

Pour en revenir à la réception en diversité, Stein [1966] donne la liste suivante des méthodes linéaires usuelles (applicables à la fois à la réception numérique et à la réception sans distorsion de signaux analogiques):

- combinaison de signaux sélectionnés,
- combinaison des signaux ayant des rapports d'intensité maximaux,
- combinaison de signaux sur la base de l'égalité du gain.

Stein décrit également des méthodes plus complexes: diversité basée sur le niveau de décision (transmission numérique), où l'on renonce à la fidélité des signaux considérée comme superflue et où le seul but recherché consiste à réduire au minimum le taux d'erreur.

Il convient de signaler une série limitée d'essais de réception en diversité d'espace effectués au Royaume-Uni avec des transmissions téléphoniques à bande latérale unique. Ces essais ont montré que l'avantage acquis était modeste pour ce type de transmission: la largeur de bande de corrélation était insuffisante et l'amplitude «instantanée» de la porteuse réduite ne constituait pas un bon indice pour la transmission de la bande de fréquences vocales. En revanche, la réception en diversité présente de grands avantages dans la téléphonie à modulation d'amplitude avec double bande latérale (et transmission de la porteuse) et dans la transmission de signaux télégraphiques typiques.

Dans la propagation ionosphérique, la limitation la plus importante est normalement l'étalement par trajets multiples, T_M . Une largeur de bande Δf peut se définir en fonction de l'inverse de T_M :

$$\Delta f = 1/T_M$$

qui est analogue à la «largeur de bande de cohérence», à la «largeur de bande d'évanouissements uniformes» ou à la «largeur de bande d'évanouissements sélectifs» [Stein et Jones, 1967]. L'étalement par trajets multiples dans la propagation ionosphérique résulte:

- des différences entre les temps de propagation suivant le mode ordinaire et extraordinaire,
- des différences entre les temps de propagation entre le trajet supérieur et le trajet inférieur,
- des différences entre les temps de propagation suivant des modes multiples,
- des différences entre les temps de propagation dues à des irrégularités (F-diffus, etc.),
- de l'élargissement des impulsions dans la réflexion normale dû à la dispersion.

Pickering [1975] a calculé l'étalement par trajets multiples et par effet Doppler pour le canal ionosphérique à ondes décamétriques. Ces calculs ont abouti à l'établissement du «facteur de réduction par effet Doppler», comparable au «facteur de réduction par trajets multiples» de Bailey [1959] et de Salaman [1962], et qui peut servir à déterminer la fréquence de travail appropriée sur une liaison donnée en ondes décamétriques.

Les premières recherches sur la diversité d'espace, de polarisation et de fréquence ont été faites avant 1940. Cependant, les méthodes mathématiques nécessaires aux recherches sur les aspects théoriques et empiriques de la réception en diversité ont été largement développées depuis 1947 [Briggs et autres, 1950; Booker et autres, 1950; Glazer et Farber, 1953; Ratcliffe, 1956].

En se fondant sur un modèle simple, sinon entièrement satisfaisant, de la diffusion sur une ionosphère non homogène et variable avec le temps, on peut établir une fonction de corrélation dans l'espace $\rho(d)$, réduite à l'unité pour $d = 0$, pour montrer la relation existant entre les signaux d'onde entretenue pour deux antennes séparées par une distance d [Bramley, 1951; Grisdale et autres, 1957; Brennan, 1960; Khmel'nitsky, 1960]:

$$\rho(d) = \exp[-d^2/2 x^2] \quad (17)$$

Le paramètre x est une fonction de l'échelle de structure des non-homogénéités ionosphériques, de la longueur du trajet et de la fréquence. A la distance $d = x$, la corrélation est de 0,61 et à la distance $d = x\sqrt{2}$, elle est de 0,37. L'expérience et la théorie montrent que tous les avantages de la diversité sont pratiquement obtenus pour la plus courte de ces distances. Par exemple, pour deux signaux subissant des évanouissements indépendants ($\rho = 0$), l'amélioration due à la réception en diversité est de 14 à 15 dB au niveau de fiabilité de 99,9%. Pour $\rho = 0,61$, l'amélioration due à la diversité est de 13 dB. Il semble donc justifié de désigner la distance $d = x\sqrt{2}$ par l'expression «distance de séparation de diversité» ou «distance de corrélation».

On a fait au Royaume-Uni des essais dans la gamme 6-18 MHz, sur des distances de 2000 à 17 000 km et les valeurs obtenues pour x étaient comprises entre 150 et 400 m, correspondant à des distances de corrélation comprises entre 210 et 560 m (soit 10 à 25 longueurs d'onde). Ces conclusions ont été confirmées par des enregistrements de WWV sur 15 MHz faits en République fédérale d'Allemagne. De plus, on a montré que les distances de séparation requises, lorsque la réflexion spéculaire sur l'ionosphère est prédominante, sont beaucoup plus grandes qu'en présence d'une composante erratique importante.

Dans une autre série de mesures faites aux Etats-Unis d'Amérique, sur des fréquences inférieures à celles des ondes décimétriques, la distance de corrélation moyenne à 540 kHz était de $29,4 \lambda \pm 17,1 \lambda$ [Brennan et Phillips, 1957] alors qu'à 85 kHz [Bowhill, 1957], on observait deux périodes distinctes d'évanouissement, l'une de 7 min et l'autre de 1,5 min. La distance de corrélation a été évaluée à 5 km dans le premier cas et à 1 km dans le second.

La diversité de polarisation dans la gamme de 6 à 18 MHz a été étudiée aux Etats-Unis d'Amérique et au Royaume-Uni. Les antennes étaient situées au même emplacement mais disposées de manière à recevoir des ondes perpendiculaires l'une à l'autre. Le résultat fut que l'action de la diversité est à peu près la même qu'avec une séparation équivalente de 240 à 480 m [Grisdale et autres, 1957] en diversité d'espace.

Des expériences effectuées en Australie et en Nouvelle-Guinée, avec des émissions de radiodiffusion à incidence verticale dans les bandes d'ondes hectométriques et décimétriques, ont montré qu'un système fonctionnant en diversité de polarisation permettrait de réduire sensiblement les évanouissements et la distorsion.

7.2 Corrélation en fréquence

Pour transmettre une information, il faut obligatoirement disposer d'une bande de fréquences. On démontre que, pour les besoins de l'analyse, il suffit de savoir ce qui se passe avec deux fréquences différentes, transmises simultanément [Stein, 1966]. En pratique, si l'espacement entre les deux fréquences est suffisant, la corrélation des fluctuations des évanouissements sur les deux fréquences tend vers zéro, le manque de corrélation entre ces évanouissements est désigné par le terme *évanouissements sélectifs*.

Une étude ancienne sur les évanouissements sélectifs observés avec des signaux à plusieurs tonalités sur un trajet transocéanique a fait l'objet d'un mémoire devenu classique de Potter [1930]. D'autres recherches ont été effectuées au cours des années 1950 [Briggs, 1951; Price et Green, 1958].

La constante de corrélation en fréquence (rayon de corrélation) de l'évanouissement sélectif est, en général, inversement proportionnelle à la valeur du retard maximal entre les rayons des trajets multiples. Sur des trajets de latitude moyenne atteignant 3 000 km, la constante de corrélation en fréquence est comprise entre 250 et 7 500 Hz, en fonction du rapport de la fréquence de travail à la MUF de référence, et atteint un maximum lorsque ce rapport est compris entre 0,6 et 0,8 [Malygin et Sergueev, 1984]. Toutefois, pour un trajet de 650 km, le coefficient de corrélation est en général de 0,67 pour des espacements entre les fréquences allant jusqu'à 10 kHz [Gibson, 1989].

D'autres études ont été effectuées en Chine (en 1983 et 1984) sur 5 trajets. Une analyse des évanouissements à long terme des champs dans le cas d'émissions simultanées sur des fréquences différentes ($Df \geq 900$ kHz), montre que la valeur moyenne des coefficients de corrélation est de 10% (18,4% pour des trajets identiques, 3,1% pour des trajets différents) et que les écarts types sont respectivement de 35,1, 36,7 et 32,5%. Le test statistique indique que les évanouissements sur les différents trajets peuvent être considérés fondamentalement comme non corrélés, alors que dans le cas de trajets identiques on observe une certaine corrélation. [CCIR, 1986-90c].

7.3 Corrélations intéressant les marges contre les évanouissements pour la planification d'un service

Il est nécessaire d'améliorer l'expression approximative (11) correspondant à la marge contre les évanouissements $F_{b,90}$ afin de tenir compte de la corrélation entre le champ du signal utile et celui de la perturbation. Il faut recueillir des informations analogues pour les évanouissements d'un jour à l'autre ainsi que des données relatives à la corrélation des signaux et du bruit. Il est probable que les évanouissements des signaux d'un jour à l'autre feront l'objet d'une corrélation sur des espacements plus grands, aussi bien dans l'espace qu'en fréquence, que les évanouissements au cours d'une heure. D'après des mesures préliminaires [Gibson, 1989], le coefficient de corrélation est élevé (supérieur à 99,9%) pour les variations d'un jour à l'autre à des fréquences espacées de 10 kHz au maximum, mais la corrélation n'est pas importante pour des emplacements de réception espacés de 20 à 100 km.

7.4 *Caractéristiques du signal se rapportant au codage*

Dans les applications aux communications numériques modernes, on emploie invariablement des schémas de diversité à propos du codage des signaux. Le format de base du codage est le codage avec correction d'erreurs sans voie de retour (ou codage CED) [Wu, 1971; Diffie et Hellman, 1976; Fang, 1975]. Pour ce codage, on fait plusieurs hypothèses communes au sujet des caractéristiques du canal ionosphérique. Le signal reçu est généralement modélisé comme ayant une composante additive de bruit gaussien blanc, un faible évanouissement (< 4 dB) instantané et un évanouissement profond (> 4 dB) occasionnel.

Plusieurs paramètres sont d'une très grande importance: le nombre n_1 de bits pendant la durée d'un évanouissement profond et le nombre n_2 de bits pendant celle d'un évanouissement instantané, n_1 et n_2 étant tous deux en relation avec le débit binaire sur le canal et avec la dynamique de l'ionosphère. Les méthodes diversité dans le temps/codage CED valables pour ce type de canal appartiennent à deux grandes catégories. Dans la première, on procède par entrelacement pour disperser les bits transmis au cours d'un évanouissement profond de manière que chaque erreur binaire semble indépendante des autres. On applique alors un code CED capable de corriger la plupart de ces erreurs. Dans la seconde catégorie, on utilise un code CED capable de corriger la plupart des erreurs qui se produisent au cours d'une durée sans évanouissement profond, de manière à garantir que le canal donnera satisfaction pendant la période sans évanouissement. On trouvera plus de détails dans [Wu, 1971; Diffie et Hellman, 1976 et Fang, 1975].

8. **Spécification des canaux pour signaux modulés**

La théorie a fait l'objet de développements mathématiques rigoureux dans lesquels les canaux se trouvent caractérisés comme des filtres variables avec le temps [Zadeh et Desoer, 1963]. Une méthode empirique pour la spécification des canaux radioélectriques exige que l'ensemble des paramètres radioélectriques soit identifié de façon plus complète qu'il n'a été possible de la faire jusqu'à présent en raison des limitations imposées aux expériences de propagation. Certes, les principes théoriques de base ont été, en grande partie, dégagés par un certain nombre de chercheurs [Green, 1963; Bello, 1963, 1964], mais il reste beaucoup à faire.

D'autres auteurs ont également apporté leur contribution à cette étude [Turin, 1956; Brennan, 1959; Barrow, 1963; Staras, 1956; Pierce et Stein, 1960; Wozencraft, 1961; Baghdady, 1961; Bello et Nelin, 1963].

On a élaboré un certain nombre de modèles pour caractériser les canaux et le Rapport 549 traite en détails les simulateurs de la propagation ionosphérique en ondes décimétriques. Watterson et autres [1970] décrivent l'un de ces modèles et le justifient expérimentalement. Cet article, qui contient également une longue liste de références bibliographiques, est résumé ci-après à titre d'exemple des recherches faites sur ce sujet:

«Résumé. — On a mesuré et analysé les signaux d'une transmission expérimentale en ondes décimétriques à propagation ionosphérique pour vérifier le bien-fondé et les limitations de largeur de bande d'un modèle stationnaire proposé. Dans le modèle, le signal d'entrée (émis) est appliqué à une ligne à retard à caractéristiques idéales, et on le prélève en plusieurs points (prises) avec des retards réglables selon les composantes du signal. Chaque composante retardée est modulée en amplitude et en phase par une fonction de gain pour chaque point où l'on prélève la bande de base. Le signal de sortie (reçu) est constitué par la somme des signaux retardés et modulés (avec adjonction d'un bruit additif). La définition des spécifications statistiques des fonctions de gain aux prises de prélèvement est fondée sur trois hypothèses: 1) chaque fonction de gain obéit à la loi gaussienne complexe qui produit des évanouissements de Rayleigh, 2) les fonctions de gain sont indépendantes et 3) le spectre de chaque fonction de gain représente en général la somme de deux fonctions gaussiennes de la fréquence, une pour chaque composante magnéto-ionique. On a appliqué des tests statistiques aux résultats des mesures (diurnes et nocturnes), confirmant la validité des trois hypothèses et, par voie de conséquence, celle du modèle. Pour les applications pratiques, on peut considérer que le modèle est utilisable sur une largeur de bande égale au quart environ de l'inverse des étalements effectifs (pondérés) dans le temps, pour les composantes du mode de propagation ionosphérique. Le modèle devrait pouvoir servir aussi bien dans les études théoriques des performances des systèmes de radiocommunication que dans la réalisation de simulateurs de canaux.»

On a appliqué une autre méthode, qui met en œuvre des modèles de trajets de propagation; cette méthode permet d'évaluer quantitativement avec plus de précision les possibilités de transmission de l'information [Konopleva et Khmel'nitsky, 1970; 1972]. Il conviendrait de vérifier la précision de cette méthode d'évaluation, ainsi que la possibilité d'effectuer les calculs sur la base des caractéristiques de voies effectives, en ce qui concerne la variation des paramètres du signal utile [Khmel'nitsky, 1970b] et du signal brouilleur [Khmel'nitsky, 1969]. Cette vérification devrait se faire sur des circuits ayant des orientations et des longueurs variables.

En Espagne, des mesures effectuées sur la réponse impulsionnelle d'un canal en ondes décimétriques [CCIR, 1982-86d] ont mené à la conclusion que cette méthode est valable pour caractériser ces types de canaux et peut même être appliquée à l'étude de canaux dans d'autres bandes de fréquences.

9. Autres études souhaitables

Il serait souhaitable de poursuivre les études sur les sujets exposés dans les § 7 et 8 ci-dessus, notamment en ce qui concerne les trajets ionosphériques dans les différentes parties du monde.

Par exemple, parmi les causes physiques des évanouissements, les effets de focalisation et de défocalisation [Fok, 1950; Liakhova, 1965; Rawer, 1952; Kerblai, 1963] devraient, semble-t-il, être étudiés de plus près. Ces phénomènes se manifestent avec une remarquable périodicité, ce qui porte à croire qu'ils sont susceptibles d'une description plus satisfaisante que celle fournie actuellement par des modèles statistiques aléatoires.

Pour améliorer les connaissances sur la profondeur et la rapidité des évanouissements, il faudrait élaborer des théories nouvelles pour résoudre le problème pratique important que posent les évanouissements de plus longue durée ainsi que les augmentations du champ liées aux irrégularités de l'ionosphère, afin de compléter la théorie des grandeurs statistiques aléatoires. Les méthodes d'autocorrélation seraient de nature à faciliter l'étude des phénomènes qui peuvent être considérés comme intermédiaires entre les processus réguliers et les processus aléatoires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAGHDADY, E. J. [1961] *Lectures on Communication System Theory*. Chapitres 5 et 6, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- BAILEY, D. K. [1959] The effect of multipath distortion on the choice of operating frequencies for high-frequency communication circuits. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-7, 397-405.
- BALSER, M. et SMITH, W. B. [1962] Some statistical properties of pulsed oblique HF ionospheric transmissions. *NBS J. Res.*, Vol. 66D, 6, 721-730.
- BARROW, B. B. [1963] Diversity combination of fading signals of unequal mean strengths. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 73.
- BELLO, P. A. [1963] Characterization of randomly time-variant linear channels. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 360-393.
- BELLO, P. A. [1964] Measurement of the complex time-frequency channel correlation function. *NBS J. Res.*, Vol. 68D, 1161-1165.
- BELLO, P. A. et NELIN, B. D. [1963] The effect of frequency selective fading on the binary error probabilities of incoherent and differentially coherent matched filter receivers. *IEEE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-11, 170.
- BENNINGTON, T. W. [1960] Equatorial ionospheric effects. *Wireless World*, Vol. 66, 10, 501-506.
- BLAGOVECHTCHENSKY, D. V. [1981] Rasprostraneniye dekametrovykh radiovoln v vysokikh chirotoakh (Propagation des ondes décimétriques aux latitudes élevées), 180. Nauka Maison d'édition, Moscou, URSS.

- BOGDANOV, S. E. et SEGAL, G. F. [1967] Statisticheskie svoitva srednikh znachenii napryajonnosti poly a korotkovolnovykh signalov (Caractéristiques statistiques des valeurs moyennes du champ dans le cas de signaux en ondes décimétriques). Recueil d'articles du NIIR, 3, (47).
- BOOKER, H. G., RATCLIFFE, J. A. et SHINN, D. H. [1950] Diffraction from an irregular screen with applications to ionospheric problems. *Phil. Trans. Roy. Soc. (Londres)*, Série A, 242, 579.
- BOWHILL, S. A. [1957] Ionospheric irregularities causing random fading of very low frequencies. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 11, 91-101.
- BRADLEY, P. A. et VERNON, A. [1982] Decile deviations of HF daily signal strengths. GTI 6/1 Doc. 218.
- BRAMLEY, E. N. [1951] Diversity effects in spaced-aerial reception of ionospheric waves. *Proc. IEE*, 98, Part III, 19-25.
- BRENNAN, D. G. [1959] Linear diversity combining techniques. *Proc. IRE*, Vol. 47, 6, 1075-1102.
- BRENNAN, D. G. [1960] The extrapolation and interpolation of spatial correlation functions. *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, 296-305. Ed. W. C. Hoffman, Pergamon Press, New York/Oxford.
- BRENNAN, D. G. [1961] Probability theory in communication system engineering (Chapter 2); Analysis of long-term variability (Chapter 20). *Lectures on Communication System Theory*. Ed. E. Baghdady, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- BRENNAN, D. G. et PHILLIPS, M. L. [1957] Phase and amplitude variability in medium frequency ionospheric transmission. Lincoln Lab., MIT, TR-93.
- BRIGGS, B. H. [1951] An investigation of certain properties of the ionosphere by means of a rapid frequency change experiment. *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 64B, Part 3, 375B, 255-274.
- BRIGGS, B. H., PHILLIPS, G. J. et SHINN, D. H. [1950] The analysis of observations on spaced receivers of the fading of radio signals. *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 63B, Part 2, 362B, 106-121.
- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. NBS Monograph N° 80.
- DAVIES, K. et BARGHAUSEN, A. F. [1964] The effect of spread F on the propagation of radio waves near the equator. AGARD Ninth Meeting of the Ionospheric Research Committee, Copenhagen, Denmark.
- DIAKOV, A. V., et KIYANOVSKIY, M. P. [1981], Metodika alternativnoï otsenki prinadlejnosti statisticheskoï vyborki k konkretnym zakonam raspredeleniya. Issledovaniya po gueomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa (Autre méthode d'estimation de la correspondance entre le choix statistique et les lois concrètes de distribution. Etudes de géomagnétisme, aéronomie et de physique du Soleil), Moscou, Naouka, N° 55.
- DIFFIE, W. et HELLMAN, M. E. [1976] New directions in cryptography. *IEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 22, 644-654.
- DOUMBRAVA, Z. F., GORCHKOVA, E. Z., KIYANOVSKI, M. P., et MACHKOVA, E. A. [1988] Approksimatsiya empiritcheskikh raspredelenii amplitoudy dekametrovogo signala. Issledovaniya po gueomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa (Approximation des distributions empiriques de l'amplitude d'un signal à ondes décimétriques. Etudes de géomagnétisme, aéronomie et physique du Soleil), Moscou, Naouka, N° 80.
- FANG, R. J. [1975] DIVEC, a combined diversity and error control scheme. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 5, 105-133.
- FOK, V. A. [1950] Obobchtchenie otrajatelnykh formul na slutchai otrajeniia proizvolnoï volny ot poverkhonsti proizvolnoï formy (Généralisation des formules de réflexion pour le cas de la réflexion d'une onde arbitraire sur une surface de forme arbitraire). *Journ. Eksp. Teoret. Fisiki*, 20, 961.
- GIBSON, A. J. [1989] Measurements of fading on HF communication links. Proc. 6th Intl. Conf. on Antennas and Propagation (ICAP 89), IEE Conf. Pub. N° 301, (Partie 2) pages 23-30.
- GLAZER, J. et FARBER, L. [1953] Evaluation of polarization diversity performance. *Proc. IRE*, Vol. 41, 1774-1778.
- GORCHKOVA, E. Z., DOUMBRAVA, Z. F., DIAKOV, A. V., KIYANOVSKIY, M. P., et PISSAREVA, L. V. [1985], Alternativaia otsenka prinadlejnosti empiritcheskikh raspredelenii k konkretnym teoreticheskim zakonam. Issledovaniya po gueomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa (Autre méthode d'estimation de la correspondance entre les distributions statistiques et les lois théoriques concrètes. Etudes de géomagnétisme, aéronomie et physique du Soleil), Moscou, Naouka, N° 73.

- GREEN, P. E., Jr. [1963] Time-varying channels with delay spread. *Monograph on Radio Waves and Circuits*. Ed. S. Silver, Elsevier, Londres, Royaume-Uni.
- GRISDALE, G. L., MORRIS, J. G. et PALMER, D. S. [1957] Fading of long-distance radio signals and a comparison of space- and polarization-diversity reception in the 6-18 Mc/s range. *Proc. IEE*, Vol. 104B, 13, 39-51.
- GROSSKOPF, J. [1953] Statistical studies of short-wave transmission paths. *NTZ*, 6, 373-378.
- GROSSKOPF, J. [1955a] Feldstärkemessungen im Kurzwellenbereich, I. Teil (Mesures du champ dans la bande des ondes décimétriques, Partie I). *NTZ*, 8, 114.
- GROSSKOPF, J. [1955b] Feldstärkemessungen im Kurzwellenbereich, II. Teil (Mesures du champ dans la bande des ondes décimétriques, Partie II). *NTZ*, 8, 146.
- HUMBY, A. M. [1959] Equatorial sunset effect. *Wireless World*, Vol. 65, 7/8, 343-345.
- KERBLAĬ, T. S. [1963] Vliianie gorizontalnykh gradientov elektronnoi konsentratsii v ionosphere na velitchinou MPTCH (Influence des gradients horizontaux de la concentration d'électrons dans l'ionosphère sur la valeur de la MUF). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 3, 772.
- KERBLAĬ, T. S., NOSOVA, G. N., ALLABERDIEV, D. et POROSNAYA, A. P. [1974] O kharaktere zamiraniia signala pri razlichnykh sposobakh rasprostraneniia radiovoln (Caractéristiques des évanouissements des signaux selon le mode de propagation). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 14, 6, 1024.
- KERBLAĬ, T. S., NOSOVA, G. N., MINULLIN, R. G. et KURGANOV, R. A. [1977] Periodi fluktuatsii signalov obuslovlennikh ionosfernim rasseianiem i otrazheniem ot sloia Es na chastotakh 27.8 i 40.3 MHz (Périodes de fluctuation du signal causées par la diffusion ionosphérique et par les réflexions sur la couche Es aux fréquences 27,8 et 40,3 MHz). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 17, 2, 231.
- KHMELNITSKY, E. A. [1960] *Raznessennyi priem i opredelenie ego effektivnosti* (La réception en diversité et la détermination de son efficacité). Sviazizdat, Moscou, URSS.
- KHMELNITSKY, E. A. [1969] Veroyatnost sboya na kv liniyakh svyazi pri pomekhakh ot sosednykh po chastote stantsii (Probabilité d'erreur sur des circuits radioélectriques à ondes courtes du fait du brouillage causé par des stations fonctionnant sur des fréquences voisines). *Elektrosviaz*, 4, 22-30.
- KHMELNITSKY, E. A. [1970a] Sravnenie eksperimentalnykh i rastchotnykh znachenii urovnya signala v KV diapazone (Comparaison entre valeurs expérimentales et valeurs calculées des niveaux du signal dans les gammes d'ondes décimétriques). *Elektrosviaz*, 6, 45-51.
- KHMELNITSKY, E. A. [1970b] Otsenka kachestva kv kanala svyazi dlya peredatchi diskretnykh signalov (Evaluation de la qualité d'un circuit radioélectrique à ondes courtes transmettant des signaux discrets). *Elektrosviaz*, 10, 18-32.
- KHMELNITSKY, E. A. [1975] Otsenka realnoi pomekhozachchichennosti priima signalov v KV diapazone (Evaluation de la protection réelle contre les brouillages de la réception dans les gammes d'ondes décimétriques). Sviaz, Moscou, URSS.
- KONOPLEVA, E. N. [1964] La fiabilité des communications et le rapport signal/bruit nécessaire dans les voies radioélectriques en ondes décimétriques (en russe) *Elektrosviaz*, 5, 3-8.
- KONOPLEVA, E. N. et KHMELNITSKY, E. A. [1970] Vozmozhnye sostoyaniya kv kanala svyazi po usloviyam rasprostraneniya radiovoln (Etats possibles d'un canal radioélectrique, selon les conditions de propagation). *Elektrosviaz*, 12, 19-24.
- KONOPLEVA, E. N. et KHMELNITSKY, E. A. [1972] Modeli rasprostraneniya radiovoln na kv liniyakh svyazi neoptimalnoi protyajennosti (Modèles de propagation sur les circuits à ondes courtes de longueur non optimale). *Elektrosviaz*, 1, 33-38.
- KOSIKOV, K. M. [1957] Zamiranie signala (Evanouissement des signaux). Recueil d'articles du NIIR, 2(6), 42-45.
- KOSTER, J. R. [1963] Some measurements on the sunset fading effect. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, 2571-2578.
- LIAKHOVA, L. N. [1965] Otsenka efekta fokoussirovki pri rasprostraneniia radiovoln po rikochetirouemoi traektorii (Evaluation de l'effet de focalisation lors de la propagation des ondes radioélectriques sur une trajectoire à ricochets). *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 5, 351.
- MALYGIN, V. B. et SERGUEEV, O. I. [1982] Rezultaty eksperimentalnoi otsenki korrelyatsionnoi i spektralnoi founktsii ogibayouchchei KV-signala (Résultats d'une évaluation expérimentale de la fonction de corrélation et de la fonction spectrale de l'enveloppe d'un signal en ondes décimétriques). *NIIR Proc.*, 2.
- MALYGIN, V. B. et SERGUEEV, O. I. [1984] Otsenka intervalov chastotnoy korrelyatsii ogibayouchchei KV-signala pri razlichnykh usloviyakh rasprostraneniya (Evaluation des intervalles de corrélation en fréquence de l'enveloppe d'un signal en ondes décimétriques pour diverses conditions de propagation). *Radiotekhnika*, 10.
- MALYGIN, V. B., SERGUEEV, O. I. et CHERNOV, Y. A. [1982] Otsenka mnogoloutchevosti KV-signala po rezultatam impulsnogo naklonnogo zondirovaniya (Evaluation des caractéristiques des signaux de trajets multiples en ondes décimétriques à partir de résultats de sondages obliques impulsifs). *Radiotekhnika*, Vol. 37, 5.
- McNICOL, R. W. E. [1949] The fading of radio waves of medium and high frequencies. *Proc. IEE*, Part III, 96, 517-524.
- NAKAGAMI, M. [1943] Statistical character of short-wave fading. *J. Inst. Elec. Comm. Engrs. Japan*, 27, 145.
- NAKAGAMI, M. [1960] The m-distribution: a general formula of intensity distribution of rapid fading. *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*. Ed. W. C. Hoffman, 3-36, Pergamon Press, New York/Oxford.
- NORTON, K. A., VOGLER, L. E., MANSFIELD, W. V. et SHORT, P. J. [1955] The probability distribution of the amplitude of a constant vector plus a Rayleigh distributed vector. *Proc. IRE*, Vol. 43, 1354-1361.

- OSBORNE, B. W. [1952] Note on ionospheric conditions which may affect tropical broadcasting after sunset. *J. Brit. Inst. Radio Engrs.*, 12, 110.
- PICKERING, L. W. [1975] The calculation of ionospheric Doppler Spread on HF communication channels. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-23, 526-537.
- PICQUENARD, A. [1974] *Radio Wave Propagation*. Halsted Press, John Wiley and Sons, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- PIERCE, J. N. et STEIN, S. [1960] Multiple diversity with non-independent fading. *Proc. IRE*, Vol. 48, 1, 89-104.
- POLKINGHORN, F. A. [1940] A single-sideband Musa receiving system for commercial operation on transatlantic radiotelephone circuits. *Proc. IRE*, Vol. 28, 4, 157-170.
- POTTER, R. K. [1930] Transmission characteristics of a short-wave telephone circuit. *Proc. IRE*, Vol. 18, 581-648.
- PRICE, R. [1957] The autocorrelogram of a complete carrier wave received over the ionosphere at oblique incidence. *Proc. IRE*, Vol. 45, 879-880.
- PRICE, R. et GREEN, P. E. [1958] A communication technique for multipath channels. *Proc. IRE*, Vol. 46, 555-570.
- RATCLIFFE, J. A. [1956] Some aspects of diffraction theory and their application to the ionosphere. *Reports on Progress in Physics*, 19, 188, Proc. Physical Society, Londres, Royaume-Uni.
- RAWER, K. [1952] Calculation of sky-wave field strength. *Wireless Engineer*, Vol. 29, 287-301.
- RICE, S. O. [1944, 1945] Mathematical analysis of random noise. *BSTJ*, Vol. XXIII, 282 et Vol. XXIV, 46.
- RICE, S. O. [1948] Statistical properties of a sine wave plus random noise. *BSTJ*, Vol. XXVII, 109-157.
- RICE, S. O. [1958] Distribution of the duration of fades in radio transmission: Gaussian noise model. *BSTJ*, Vol. XXXVII, 3, 581-635.
- RÖTTGER, J. [1973] Langperiodisches Fading von Kurzwellensignalen (Les évanouissements d'une période prolongée des signaux en ondes décimétriques). *Kleinheubacher Berichte*, 16, 167-178.
- SAILORS, D. B., KUGEL, C. P. et HAYDON, G. W. [1977] Predicting the compatibility of high frequency sky-wave communication systems. *IEEE Trans., Electromag. Compt.*, Vol. EMC-19, 332-343.
- SALAMAN, R. K. [1962] A new ionospheric multipath reduction factor (MRF). *IRE Trans. Comm. Systems*, Vol. CS-10, 220-221.
- SERGUEEV, O. I. [1974] Rezultaty eksperimentalnoi otsenki kharakteristik vybrosov KV-signalov (Résultats d'une évaluation expérimentale des caractéristiques des évanouissements brusques d'un signal en ondes décimétriques). *NIIR Proc.*, 2.
- SERGUEEV, O. I. [1975] Rezultaty izmereniya skorosti interferentsionnykh zamiraniy KV-signalov pri razlichnykh usloviyakh rasprostraneniya (Mesures de la rapidité d'évanouissement des signaux brouilleurs en ondes décimétriques pour différentes conditions de propagation). *NIIR Proc.*, 1.
- SERGUEEV, O. I. [1978a]. Rezultaty teoreticheskogo isledovaniya raspredeleniya oguibayouchtchei interferentsionnykh zamiraniy KV signala (Résultats d'études théoriques de la distribution de l'enveloppe des évanouissements par interférence des signaux HF). *Trudy NIIR*, 1.
- SERGUEEV, O. I. [1978b] - Eksperimentalnye otsenki raspredeleniya oguibayouchtchei KV signala (Evaluations expérimentales de la distribution de l'enveloppe du signal en ondes décimétriques). *Trudy NIIR*, 4, 13-18.
- SERGUEEV, O. I., DOTOLEV, V. G., JILTSOV, A. U., PELEVIN, Y. V. et TCHERNOV, Y. A. [1985] K voprosu ob eksperimentalnoi otsenke srednego ourovnya oguibayouchtchei KV-signalov (De l'évaluation expérimentale du niveau moyen de l'enveloppe d'un signal en ondes décimétriques). *NIIR Proc.*, 4.
- SERGUEEV, O. I. et FIKS, Y. A. [1982]. Otsenka veroyatnosti oshibok v radiokanale s zamiranyami pri ogranitchennom intervale nablyoudeniya (Evaluation de la probabilité d'erreur dans une voie radioélectrique sujette à évanouissements, avec un temps d'observation limité) *Elektrosvyaz*, 9.
- SPAULDING, A. D. [juin 1982] Fading signals in the MF band. National Telecommunications and Information Administration Report 82-102. NTIS Accession No. PB 82-262916. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- STARAS, H. [1956] Diversity reception with correlated signals. *J. Appl. Phys.*, (Lett.), Vol. 27, 1, 93-94.
- STEIN, S. [1966] PART III of *Communication Systems and Techniques*, par Schwartz, Bennett et Stein, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- STEIN, S. et JONES, J. J. [1967] *Modern Communication Principles*. McGraw-Hill, New York et Londres.
- TÄUMER, F. et SULANKE, H. [1967-68] Die Eigenschaften von Häufigkeitsverteilungen der Raumwellenfeldstärke im Frequenzbereich von 150-1600 kHz (Les propriétés des distributions des champs de l'onde ionosphérique dans les bandes 5 et 6). *Techn. Mitt. RFZ*, Vol. 11, 4, 192-195 et Vol. 12, 1, 32-39.
- TCHERNOV, Y. A., Raspredelenie medlennykh zamiraniy VTch signala vblizi MPTch (Distribution des évanouissements lents d'un signal en ondes décimétriques proches de la MUF). *Trudy NIIR*, 1989, N° 2.

- TURIN, G. L. [1956] Communication through noisy, random-multipath channels. *IRE Nat. Conv. Record*, Partie 4, 154.
- WATTERSON, C. C., JURUSHEK, J. R. et BENSEMA, W. D. [1970] Experimental confirmation of an HF channel model. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. 18, 792-803.
- WOZENCRAFT, J. M. [1961] Sequential reception of time-variant transmissions. Ch. 12. *Lectures on Communication Theory*. Ed. E. Baghdady, McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- WU, W. W. [1971] Applications of error-coding techniques to satellite communications. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 1, 183-219.
- YEH, K. C. et VILLARD, O. G. [1958] A new type of fading observable on high-frequency radio transmission propagated over paths crossing the magnetic equator. *Proc. IRE*, Vol. 46, 1968-1970.
- ZADEH, L. A. et DESOER, C. A. [1963] *Linear system theory*. McGraw-Hill, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

Documents du CCIR

[1978-82]: 6/63 (URSS).

[1982-86]: a. 6/187 (URSS); b. 6/54 (Allemagne (République fédérale d')); c. GTI 6/12 Doc. D14 (GTI 10/5 Doc. 58); d. 6/212 (Espagne).

[1986-90]: a. 6/182 (Allemagne (République fédérale d'));
b. 6/37 (URSS); c. 6/237 (Chine).

RAPPORT 892-2*

**CALCUL DE LA FIABILITÉ DES SYSTÈMES RADIOÉLECTRIQUES
EN ONDES DÉCAMÉTRIQUES**

(Question 35/6)

(1982-1986-1990)

1. Introduction

La principale caractéristique fournie par la plupart des méthodes de prévision de la propagation des ondes décimétriques est la valeur prévue de la puissance du signal ou du champ correspondant. Pourtant, comme il est souligné par exemple dans le Rapport 729 et dans le Supplément au Rapport 252, les données de champ ne suffisent pas pour quantifier entièrement la qualité de fonctionnement d'un service radioélectrique.

La fiabilité prévue est l'une des caractéristiques d'un système radioélectrique à ondes décimétriques qui peut servir de facteur de qualité. D'une manière générale, la fiabilité est définie comme la probabilité pour qu'une qualité de fonctionnement spécifiée soit atteinte par le système. Des définitions plus précises des différents types de fiabilité sont données dans l'Appendice I. On trouvera dans le Rapport 657 une étude portant sur la compatibilité des circuits, terme lié à la fiabilité.

Les fiabilités prévues sont utiles pour l'optimisation de la conception des antennes et pour le choix des combinaisons de fréquences préférées ainsi que des puissances d'émission nécessaires pour atteindre une qualité de fonctionnement désirée. Il faut donc disposer de méthodes précises pour évaluer les valeurs de fiabilité et pour appliquer ces valeurs à l'évaluation de la qualité de fonctionnement des systèmes radioélectriques.

C'est pourquoi le présent Rapport décrit les principales méthodes de calcul employées. Presque toutes ces méthodes impliquent des hypothèses ou des approximations, en raison de l'insuffisance des données disponibles en ce qui concerne la corrélation entre les divers modes pouvant exister simultanément sur un circuit donné.

Les fiabilités examinées dans le présent Rapport constituent une hiérarchie, comme l'indique la Fig. 1. le § 3 traite de la fiabilité de mode, les § 4 et 5 de la fiabilité de circuit, le § 6 de la fiabilité de réception et le § 7 de la fiabilité de service. Les fiabilités de trajet et de communication, qui se rapportent aux réseaux à ondes décimétriques, sont traitées au § 9.

* Ce Rapport est porté à l'attention des Commissions d'études 3, 8 et 10.