

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.533-12
(09/2013)

**Méthode de prévision de la qualité de
fonctionnement des circuits en ondes
décamétriques**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systemes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2014

© UIT 2014

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R P.533-12

**Méthode de prévision de la qualité de fonctionnement des circuits
en ondes décamétriques***

(1978-1982-1990-1992-1994-1995-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013)

Domaine d'application

La présente Recommandation contient une méthode de prévision des fréquences disponibles, des niveaux des signaux et de la fiabilité des systèmes de modulation analogique et numérique en ondes décamétriques, compte tenu non seulement du rapport signal/bruit mais aussi des étalements temporel et fréquentiel attendus pour le canal.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les tests utilisant la banque de données D1 de l'UIT-R montrent que la précision de la méthode décrite en Annexe 1 est comparable à celle des autres méthodes plus complexes;
- b) que des renseignements sur les caractéristiques de fonctionnement des antennes d'émission et de réception sont nécessaires à l'application pratique de cette méthode¹,

recommande

- 1 que l'on utilise les renseignements contenus dans l'Annexe 1 pour les prévisions de la propagation de l'onde ionosphérique aux fréquences comprises entre 2 et 30 MHz;
- 2 que les administrations et l'UIT-R s'efforcent de perfectionner les méthodes de prévision pour améliorer les installations d'exploitation et obtenir une meilleure précision.

* Un programme informatique (ITURHFProp) associé aux procédures de prévision décrites dans la présente Recommandation est disponible dans la partie du site web de l'UIT-R consacrée à la Commission d'études 3 des radiocommunications.

¹ Des renseignements détaillés sur une gamme d'antennes associés à un programme informatique sont disponibles à l'UIT; pour de plus amples détails, voir la Recommandation UIT-R BS.705.

Annexe 1

Table des matières

	<i>Page</i>
1 Introduction	4
Partie 1 – Disponibilité des fréquences	4
2 Emplacement des points directeurs	4
3 Fréquences maximales utilisables de référence et d'exploitation	4
3.1 Fréquences maximales utilisables de référence	4
3.2 Fréquence critique de la couche E (f_oE).....	4
3.3 MUF de référence pour la couche E	6
3.4 Caractéristiques de la couche F2	6
3.5 MUF de référence pour la couche F2	6
3.6 Probabilité que la propagation ionosphérique soit assurée au cours d'un mois..	7
3.7 MUF d'exploitation de la liaison.....	8
4 Fréquence maximale d'occultation par la couche E (f_s).....	8
Partie 2 – Champ médian de l'onde ionosphérique	9
5 Champ médian de l'onde ionosphérique.....	9
5.1 Angle d'élévation	9
5.2 Trajets de longueur inférieure à 9 000 km.....	10
5.3 Trajets de longueur supérieure à 7 000 km.....	16
5.4 Trajets de longueur comprise entre 7 000 et 9 000 km.....	21
6 Puissance médiane disponible dans le récepteur	21
Partie 3 – Prévion de la qualité de fonctionnement des systèmes	22
7 Valeur médiane mensuelle du rapport signal/bruit (S/N)	22
8 Champ de l'onde ionosphérique, puissance de signal disponible dans le récepteur et rapport S/N pour d'autres pourcentages de temps.....	22
9 Fréquence minimale utilisable (LUF).....	23
10 Fiabilité de référence de circuit (BCR).....	23

	<i>Page</i>
10.1 Fiabilité des systèmes de modulation analogique.....	23
10.2 Fiabilité des systèmes de modulation numérique, compte tenu de l'étalement temporel et fréquentiel du signal reçu	23
10.3 Diffusion équatoriale	25
Pièce jointe 1 à l'Annexe 1 – Modèle de diffusion équatoriale des signaux à ondes décamétriques	26

1 Introduction

Cette procédure de prévision consiste à appliquer l'analyse du trajet des rayons pour les trajets de longueur inférieure à 7 000 km, des formules pour des modes composites obtenues empiriquement par comparaison avec des données de mesure pour les trajets de longueur supérieure à 9 000 km, et une interpolation entre ces deux techniques pour les trajets de longueur comprise entre 7 000 et 9 000 km.

On détermine la valeur médiane mensuelle de la MUF de référence, le champ de l'onde ionosphérique incidente et la puissance disponible dans le récepteur avec une antenne de réception de gain donné, sans perte. La méthode inclut une estimation des paramètres de la fonction de transfert de canal à utiliser pour la prévision de la qualité de fonctionnement des systèmes numériques. Des méthodes d'évaluation de la fiabilité des circuits sont proposées. Les intensités du signal sont normalisées conformément à une banque de données de mesures de l'UIT-R. La méthode nécessite la détermination d'un certain nombre de caractéristiques ionosphériques et de paramètres de propagation en des «points directeurs» spécifiés.

Dans les régions équatoriales, des distorsions des résultats prévus sont possibles le soir (heure locale) en raison des instabilités structurelles ionosphériques régionales qui ne sont pas entièrement prises en compte dans cette méthode.

Partie 1

Disponibilité des fréquences

2 Emplacement des points directeurs

On part de l'hypothèse d'une propagation le long du trajet du grand cercle entre l'emplacement de l'émetteur et l'emplacement du récepteur selon les modes E (pour des distances inférieures à 4 000 km) et les modes F2 (pour toutes les distances). Les points directeurs sont choisis selon les indications du Tableau 1, en fonction de la longueur du trajet et de la couche réfléchissante.

3 Fréquences maximales utilisables de référence et d'exploitation

L'estimation de la MUF d'exploitation (fréquence la plus élevée qui permet d'assurer un service de radiocommunication de qualité acceptable) se fait en deux étapes: premièrement, l'estimation de la MUF de référence à partir de caractéristiques ionosphériques; deuxièmement, détermination d'un facteur de correction pour tenir compte des mécanismes de propagation aux fréquences supérieures à la MUF de référence.

3.1 Fréquences maximales utilisables de référence

On évalue les MUF de référence des différents modes de propagation en fonction des fréquences critiques des couches ionosphériques correspondantes, et d'un facteur lié à la longueur des bonds. Lorsque l'on considère à la fois les modes E et les modes F2, la MUF de référence pour le trajet sera la plus élevée des MUF de référence des modes E et F2 d'ordre le plus bas.

3.2 Fréquence critique de la couche E (foE)

La valeur médiane mensuelle de foE est déterminée comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.1239.

TABLEAU 1

**Emplacements des points directeurs pour la détermination de la MUF de référence,
l'occultation par la couche E, les hauteurs de réflexion spéculaire du trajet
du rayon et l'absorption ionosphérique**

a) MUF de référence et gyrofréquence associée des électrons

Longueur du trajet, D (km)	Modes E	Modes F2
$0 < D \leq 2\,000$	M	M
$2\,000 < D \leq 4\,000$	$T + 1\,000, R - 1\,000$	–
$2\,000 < D \leq d_{max}$	–	M
$D > d_{max}$	–	$T + d_0 / 2, R - d_0 / 2$

b) Occultation par la couche E

Longueur du trajet, D (km)	Modes F2
$0 < D \leq 2\,000$	M
$2\,000 < D < 9\,000$	$T + 1\,000, R - 1\,000$

c) Hauteurs de réflexion spéculaire

Longueur du trajet, D (km)	Modes F2
$0 < D \leq d_{max}$	M
$d_{max} < D < 9\,000$	$T + d_0 / 2, M, R - d_0 / 2$

d) Absorption ionosphérique et gyrofréquence associée des électrons

Longueur du trajet, D (km)	Modes E	Modes F2
$0 < D \leq 2\,000$	M	M
$2\,000 < D \leq 4\,000$	$T + 1\,000, M, R - 1\,000$	–
$2\,000 < D \leq d_{max}$	–	$T + 1\,000, M, R - 1\,000$
$d_{max} < D < 9\,000$	–	$T + 1\,000, T + d_0 / 2, M,$ $R - d_0 / 2, R - 1\,000$

M : point milieu du trajet

T : emplacement de l'émetteur

R : emplacement du récepteur

d_{max} : longueur maximale du bond pour le mode F2 calculée au point directeur à mi-trajet

d_0 : longueur du bond pour le mode d'ordre le plus bas

Les distances sont indiquées en kilomètres.

3.3 MUF de référence pour la couche E

La valeur de foE est déterminée aux points directeurs donnés par le Tableau 1a) et, pour les trajets de longueur comprise entre 2000 et 4000 km, on choisit la plus petite des valeurs obtenues. La MUF de référence pour un mode E à n bonds pour un trajet de longueur D est donnée par:

$$n E(D)MUF = foE \cdot \sec i_{110} \quad (1)$$

où i_{110} est l'angle d'incidence à une hauteur de réflexion spéculaire de 110 km au point milieu du bond, pour un bond de longueur $d = D/n$.

La MUF de référence pour la couche E, pour le trajet, est la valeur de $E(D)MUF$ pour le mode E d'ordre le plus bas.

3.4 Caractéristiques de la couche F2

Les représentations numériques des valeurs médianes mensuelles des caractéristiques ionosphériques foF2 et M(3000)F2, pour des valeurs de l'indice solaire $R_{12} = 0$ et 100 et pour chaque mois proviennent de la Recommandation UIT-R P.1239, dans laquelle le champ magnétique est évalué à une altitude de 300 km. On utilise ces représentations pour déterminer ces valeurs pour les temps voulus et pour les emplacements des points directeurs donnés dans le Tableau 1a). On applique une extrapolation ou une interpolation linéaire pour les valeurs d'indice comprises entre $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 160$ (voir la Recommandation UIT-R P.371). Dans le cas de foF2 seulement et pour une activité solaire plus forte, R_{12} est considéré comme égal à 160.

3.5 MUF de référence pour la couche F2

3.5.1 Mode d'ordre le plus bas

3.5.1.1 Trajets de longueur inférieure à d_{max} (km)

Le mode d'ordre le plus bas n_0 est déterminé par des considérations géométriques utilisant la hauteur de réflexion spéculaire h_r obtenue, pour le point directeur au milieu du trajet par la formule:

$$h_r = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \text{ km ou } 500 \text{ km, la valeur la plus petite étant retenue} \quad (2)$$

Pour le mode du n_i ème ordre, la MUF de référence de la couche F2 est calculée par la formule:

$$n_0 F2(D)MUF = \left[1 + \left(\frac{C_d}{C_{3000}} \right) (B - 1) \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{d}{d_{max}} \right) \quad (3)$$

où:

f_H : valeur de la gyrofréquence, pour une altitude de 300 km, déterminée en chacun des points directeurs appropriés donnés dans le Tableau 1a)

$$C_d = 0,74 - 0,591 Z - 0,424 Z^2 - 0,090 Z^3 + 0,088 Z^4 + 0,181 Z^5 + 0,096 Z^6 \quad (4)$$

avec $Z = 1 - 2d/d_{max}$

$$d_{max} = 4780 + (12610 + 2140/x^2 - 49720/x^4 + 688900/x^6) (1/B - 0,303) \quad (5)$$

$$B = M(3000)F2 - 0,124 + \left[[M(3000)F2]^2 - 4 \right] \cdot \left[0,0215 + 0,005 \sin \left(\frac{7,854}{x} - 1,9635 \right) \right] \quad (6)$$

où:

- d : D/n_0 et d_{max} sont exprimés en kilomètres
- C_{3000} : valeur de C_d pour $d = 3\ 000$ km
- x : f_oF_2/f_oE , ou 2, la valeur la plus grande étant retenue
 f_oE est calculé comme au § 3.2.

La $MUF_nF_2(D)$ du mode d'ordre le plus bas, n_0 , est la MUF de référence sur le trajet. Pour calculer la MUF de référence, d_{max} est prise inférieure à 4 000 km.

3.5.1.2 Trajets de longueur supérieure à d_{max} (km)

Pour la MUF de référence du mode d'ordre le plus bas $n_0 F_2(D)MUF$, pour un trajet de longueur D , on prend la plus basse des valeurs de $F_2(d_{max})MUF$ déterminées à l'aide de l'équation (3) pour les deux points directeurs donnés par le Tableau 1a). C'est également la MUF de référence pour la liaison.

3.5.2 Modes d'ordre supérieur (trajets jusqu'à 9 000 km)

3.5.2.1 Trajets de longueur inférieure à d_{max} (km)

La MUF de référence de la couche F2 pour un mode à n bonds est calculée en utilisant les équations (3) à (6) au point directeur au milieu du trajet donné par le Tableau 1a) pour un bond de longueur $d = D/n$.

3.5.2.2 Trajets de longueur supérieure à d_{max} (km)

La MUF de référence de la couche F2 pour un mode à n bonds se calcule en fonction de $F_2(d_{max})MUF$ et d'un coefficient de distance qui dépend des longueurs respectives des bonds du mode considéré et du mode d'ordre le plus bas possible. Pour calculer M_n et M_{n_0} , la longueur maximale du bond d_{max} est recalculée au point directeur et peut être supérieure à 4 000 km.

$$n F_2(D)MUF = F_2(d_{max})MUF \cdot M_n / M_{n_0} \quad (7)$$

où M_n/M_{n_0} est obtenu en utilisant l'équation (3) comme suit:

$$\frac{M_n}{M_{n_0}} = \frac{n F_2(d)MUF}{n_0 F_2(D)MUF} \quad (8)$$

On choisit la plus basse des valeurs calculées aux deux points directeurs du Tableau 1a).

3.6 Probabilité que la propagation ionosphérique soit assurée au cours d'un mois

Dans certains cas, il peut suffire de prévoir la probabilité que l'ionisation soit suffisante pour assurer la propagation sur le trajet, sans tenir compte des caractéristiques de système et d'antenne ni de la qualité de fonctionnement requise. En pareils cas, la probabilité que la MUF dépasse la fréquence de travail est nécessaire. Les § 3.3 et 3.5 donnent les valeurs médianes de la MUF(50) pour les modes de propagation E et F2.

Pour les modes F2, le rapport entre le décile inférieur, δ_l , de la MUF dépassée pendant 90% des jours d'un mois, MUF(90), et la MUF(50) est donné dans le Tableau 2 de la Recommandation UIT-R P.1239, en fonction de l'heure locale, de la latitude, de la saison et du nombre de taches solaires.

Lorsque la fréquence de travail, f , est inférieure à la MUF(50), la probabilité que la propagation ionosphérique soit assurée est donnée par:

$$F_{prob} = 130 - \frac{80}{1 + MUF(50)/(f \cdot \delta_l)} \quad \text{ou} = 100, \text{ la valeur la plus petite étant retenue} \quad (9)$$

Le rapport entre le décile supérieur, δ_u , de la MUF dépassée pendant 10% des jours du mois, MUF(10) et la MUF(50), est donné dans le Tableau 3 de la Recommandation UIT-R P.1239, en fonction de l'heure locale, de la latitude, de la saison et du nombre de taches solaires.

Lorsque la fréquence de travail, f , est supérieure à la MUF(50), la probabilité que la propagation ionosphérique soit assurée est donnée par:

$$F_{prob} = \frac{80}{1 + f / (MUF(50) \cdot \delta_u)} - 30 \quad \text{ou} = 0, \text{ la valeur la plus grande étant retenue} \quad (10)$$

Pour les modes E, les facteurs appropriés pour la gamme interdécile sont respectivement de 1,05 et 0,95.

On peut obtenir la distribution de la MUF d'exploitation à une heure donnée au cours d'un mois à partir de la distribution donnée au § 3.6.

Il est à noter que les MUF d'exploitation dépassées pendant 90% et 10% des jours d'un mois sont respectivement définies comme la fréquence de travail optimale et la fréquence la plus probable.

3.7 MUF d'exploitation de la liaison

La MUF d'exploitation de la liaison est la plus grande de la MUF d'exploitation pour les modes F2 et de la MUF d'exploitation pour les modes E. La relation entre les MUF d'exploitation et de référence dépendra notamment des caractéristiques de système et d'antenne et de la longueur du trajet, et devrait être déterminée à partir de données d'expérience relatives à la qualité de fonctionnement des circuits. Lorsque ces données d'expérience ne sont pas disponibles, pour les modes F2, la MUF d'exploitation est égale au produit de la MUF de référence par R_{op} , R_{op} étant donné dans le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.1240; pour les modes E, la MUF d'exploitation est égale à la MUF de référence.

On peut faire une estimation de la MUF d'exploitation dépassée pendant 10% et 90% des jours en multipliant la valeur médiane de la MUF d'exploitation par les facteurs appropriés indiqués dans les Tableaux 2 et 3 de la Recommandation UIT-R P.1239 dans le cas des modes F et par 1,05 et 0,95 respectivement dans le cas des modes E.

4 Fréquence maximale d'occultation par la couche E (f_s)

L'occultation par la couche E des modes F2 est considérée pour des trajets jusqu'à 9 000 km (voir le Tableau 1b). La valeur de foE au point milieu du trajet (pour des trajets d'une longueur maximale de 2 000 km) ou la plus élevée des valeurs de foE aux deux points directeurs situés à 1 000 km de chaque extrémité du trajet (pour des trajets d'une longueur supérieure à 2 000 km) est utilisée pour le calcul de la fréquence maximale d'occultation par la couche E.

$$f_s = 1,05 \text{ foE} \sec i \quad (11)$$

avec:

$$i = \arcsin \left(\frac{R_0 \cos \Delta_F}{R_0 + h_r} \right) \quad (12)$$

où:

- i : angle d'incidence à l'altitude $h_r = 110$ km
- R_0 : rayon de la Terre, 6 371 km
- Δ_F : angle d'élévation pour le mode F2 (déterminé à partir de l'équation (13)).

Partie 2

Champ médian de l'onde ionosphérique

5 Champ médian de l'onde ionosphérique

Le champ prévu est la médiane mensuelle sur tous les jours du mois. La procédure de prévision comporte trois parties, suivant la longueur du trajet. Pour des trajets de plus de 7 000 km, les prévisions du champ médian de l'onde ionosphérique sont réalisées uniquement selon la méthode indiquée au § 5.2. Pour des trajets de plus de 9 000 km, les prévisions du champ médian de l'onde ionosphérique sont réalisées uniquement selon la méthode indiquée au § 5.3. Pour les trajets de longueur comprise entre 7 000 et 9 000 km, on utilise les 2 méthodes et les résultats sont interpolés selon la méthode décrite au § 5.4.

5.1 Angle d'élévation

L'angle d'élévation, qui s'applique pour toutes les fréquences, y compris celles supérieures à la MUF de référence, est donné par:

$$\Delta = \arctg \left(\cotg \frac{d}{2 R_0} - \frac{R_0}{R_0 + h_r} \operatorname{cosec} \frac{d}{2 R_0} \right) \quad (13)$$

où:

d : longueur du bond pour un mode à n bonds, donnée par $d = D/n$

h_r : hauteur de réflexion spéculaire équivalente

pour les modes E: $h_r = 110$ km

pour les modes F2, h_r est fonction du temps, de l'emplacement et de la longueur du bond.

La hauteur de réflexion spéculaire h_r pour les modes F2 est calculée avec les expressions suivantes:

$$x = f_oF2/f_oE \quad \text{et} \quad H = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 316$$

avec:

$$\Delta M = \frac{0,18}{y - 1,4} + \frac{0,096(R_{12} - 25)}{150}$$

et $y = x$ ou 1,8, la valeur la plus grande étant seule retenue.

a) Pour $x > 3,33$ et $x_r = f/f_oF2 \geq 1$, où f est la fréquence de l'onde:

$$h_r = h \text{ ou } 800 \text{ km, la valeur la plus faible étant seule retenue} \quad (14)$$

où:

$$h = A_1 + B_1 2,4^{-a} \text{ pour } B_1 \text{ et } a \geq 0$$

$$= A_1 + B_1 \quad \text{sinon}$$

$$\text{avec } A_1 = 140 + (H - 47) E_1$$

$$B_1 = 150 + (H - 17) F_1 - A_1$$

$$E_1 = -0,09707 x_r^3 + 0,6870 x_r^2 - 0,7506 x_r + 0,6$$

F_1 est tel que:

$$F_1 = -1,862 x_r^4 + 12,95 x_r^3 - 32,03 x_r^2 + 33,50 x_r - 10,91 \quad \text{pour } x_r \leq 1,71$$

$$F_1 = 1,21 + 0,2 x_r \quad \text{pour } x_r > 1,71$$

et a varie avec la distance d et la distance de saut d_s de la façon suivante:

$$a = (d - d_s) / (H + 140)$$

$$\text{où: } d_s = 160 + (H + 43) G$$

$$G = -2,102 x_r^4 + 19,50 x_r^3 - 63,15 x_r^2 + 90,47 x_r - 44,73 \quad \text{pour } x_r \leq 3,7$$

$$G = 19,25 \quad \text{pour } x_r > 3,7$$

b) Pour $x > 3,33$ et $x_r < 1$:

$$h_r = h \text{ ou } 800 \text{ km, la valeur la plus faible étant seule retenue} \quad (15)$$

où:

$$h = A_2 + B_2 b \quad \text{pour } B_2 \geq 0$$

$$= A_2 + B_2 \quad \text{sinon}$$

$$\text{avec } A_2 = 151 + (H - 47) E_2$$

$$B_2 = 141 + (H - 24) F_2 - A_2$$

$$E_2 = 0,1906 Z^2 + 0,00583 Z + 0,1936$$

$$F_2 = 0,645 Z^2 + 0,883 Z + 0,162$$

où $Z = x_r$ ou 0,1, la valeur la plus grande étant seule retenue et b varie avec la distance normalisée d_f , Z et H de la façon suivante:

$$b = -7,535 d_f^4 + 15,75 d_f^3 - 8,834 d_f^2 - 0,378 d_f + 1$$

$$\text{où: } d_f = \frac{0}{115 d; Z(H + 140)} \text{ ou } 0,65, \text{ la valeur la plus faible étant seule retenue}$$

c) Pour $x \leq 3,33$:

$$h_r = 115 + H J + U d \text{ ou } 800 \text{ km, la valeur la plus faible étant seule retenue} \quad (16)$$

$$\text{avec } J = -0,7126 y^3 + 5,863 y^2 - 16,13 y + 16,07$$

$$\text{et } U = 8 \times 10^{-5} (H - 80) (1 + 11 y^{-2,2}) + 1,2 \times 10^{-3} H y^{-3,6}$$

Dans le cas de trajets inférieurs à d_{max} (km), h_r est évalué au point milieu du trajet. Pour les trajets plus longs, h_r est déterminé à tous les points directeurs donnés au Tableau 1c) et on en prend la valeur moyenne.

5.2 Trajets de longueur inférieure à 9000 km

Pour des trajets de moins de 7000 km, les prévisions du champ médian de l'onde ionosphérique sont réalisées uniquement selon la méthode indiquée au § 5.2. Pour les trajets de longueur comprise entre 7 000 et 9 000 km, on utilise les 2 méthodes indiquées aux § 5.2 et 5.3. Les résultats obtenus avec chaque méthode sont ensuite interpolés selon la méthode décrite au § 5.4.

5.2.1 Modes considérés

On choisit jusqu'à trois modes E (pour les trajets de longueur inférieure à 4 000 km) et jusqu'à six modes F2, chacun respectant les différents critères suivants:

- hauteurs de réflexion spéculaire:
 - pour les modes E, à partir d'une hauteur $h_r = 110$ km;
 - pour les modes F2, à partir d'une hauteur h_r déterminée par la formule (2), avec $M(3000)F2$ évalué au point milieu du trajet (trajets de longueur inférieure à d_{max} (km)) ou au point directeur, donné dans le Tableau 1c), pour lequel foF2 a la valeur la plus basse (trajets de longueur comprise entre d_{max} et 9 000 km);
- modes E – le mode d'ordre le plus bas avec une longueur de bond inférieure à 2 000 km et les deux modes d'ordre immédiatement supérieur;
- modes F2 – le mode d'ordre le plus bas avec une longueur de bond inférieure à d_{max} (km) et les cinq modes d'ordre immédiatement supérieur pour lesquels la fréquence d'occultation maximale par la couche E, évaluée comme indiqué au § 4, est inférieure à la fréquence d'exploitation.

5.2.2 Détermination du champ

Pour chaque mode w déterminé au § 5.2.1, le champ médian est donné par:

$$E_w = 136,6 + P_t + G_t + 20 \log f - L_b \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (17)$$

où:

- f : fréquence d'émission (MHz)
- P_t : puissance de l'émetteur (dB(1 kW))
- G_t : gain de l'antenne d'émission aux angles d'azimut et d'élévation (Δ) requis par rapport à une antenne isotrope (dB)
- L_b : affaiblissement de transmission de référence sur le trajet du rayon pour le mode considéré, donné par:

$$L_b = 32,45 + 20 \log f + 20 \log p' + L_i + L_m + L_g + L_h + L_z \quad (18)$$

avec:

- p' : distance oblique virtuelle (km)

$$p' = 2R_0 \sum_1^n \left[\frac{\sin(d/2R_0)}{\cos[\Delta + (d/2R_0)]} \right] \quad (19)$$

- L_i : affaiblissement par absorption (dB), pour un mode à n -bonds, donné par:

$$L_i = \frac{n(1 + 0,0067R_{12}) \cdot \sec i}{(f + f_L)^2} \cdot \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k AT_{midi} \cdot \frac{F(\chi_j)}{F(\chi_{j\text{midi}})} \cdot \Phi_n \left(\frac{f_v}{\text{foE}} \right) \quad (20)$$

avec:

$$F(\chi) = \cos^p (0,881 \chi) \text{ ou } 0,02, \text{ en prenant la valeur la plus grande} \quad (21)$$

où:

$$f_v = f \cos i \quad (22)$$

et

i : angle d'incidence à 110 km

k : nombre de points directeurs (du Tableau 1d))

f_L : moyenne des valeurs de la gyrofréquence des électrons pour la composante du champ magnétique terrestre le long de la direction de propagation, à une altitude de 100 km, déterminées aux points directeurs donnés au Tableau 1d). Pour l'inclinaison magnétique I , cette quantité peut être calculée comme suit:

$$f_L = |f_H \cdot \sin(I)| \quad (23)$$

χ_j : distance zénithale du Soleil au j -ième point directeur ou 102° en prenant la valeur la plus faible. L'équation de temps, pour le milieu du mois considéré, est incorporée dans le calcul de ce paramètre

$\chi_{j\text{midi}}$: valeur de χ_j à midi local

AT_{midi} : facteur d'absorption à midi local, pour $R_{12} = 0$, fourni par la Fig. 1 en fonction de la latitude géographique et du mois

$\Phi_n \left(\frac{f_v}{f_oE} \right)$: facteur d'absorption due à la pénétration dans la couche, fourni par la Fig. 2, en fonction du rapport à foE de la fréquence équivalente à la fréquence en incidence verticale f_v

p : exposant d'absorption diurne, fourni par la Fig. 3 en fonction du mois et de l'inclinaison magnétique modifiée calculée à une hauteur de 100 km (voir la Recommandation UIT-R P.1239, Annexe 1).

Pour les fréquences supérieures à la MUF de référence, l'absorption continue de varier avec la fréquence; elle est calculée en considérant des trajets de rayons similaires à ceux de la MUF de référence.

L_m : affaiblissement «au-dessus de la MUF».

Pour une fréquence f égale ou inférieure à la MUF de référence (f_b) du mode considéré:

$$L_m = 0 \quad (24)$$

Pour les modes E et $f > f_b$:

$$L_m = 130 \left[\left(\frac{f}{f_b} \right) - 1 \right]^2 \quad \text{dB} \quad (25)$$

ou 81 dB, en prenant la valeur la plus faible.

Pour les modes F2 et pour $f > f_b$:

$$L_m = 36 \left[\left(\frac{f}{f_b} \right) - 1 \right]^{1/2} \quad \text{dB} \quad (26)$$

ou 62 dB, en prenant la valeur la plus faible.

L_g : somme des affaiblissements par réflexion sur le sol aux points de réflexion intermédiaires:

Pour un mode à n bonds:

$$L_g = 2(n - 1) \quad \text{dB} \quad (27)$$

L_h : facteur qui permet de tenir compte des affaiblissements auroraux et autres, indiqués dans le Tableau 2. Il est évalué en fonction de la latitude géomagnétique G_n (nord ou sud de l'équateur) et de l'heure locale t pour un doublet centré sur la Terre, les pôles étant $78,5^\circ$ N et $68,2^\circ$ O. On prend les valeurs moyennes pour les points directeurs du Tableau 1d).

Dans l'hémisphère Nord, l'hiver correspond aux mois de décembre, janvier et février, l'équinoxe aux mois de mars, avril et mai et de septembre, octobre, novembre, et l'été aux mois de juin, juillet, août. Dans l'hémisphère Sud, les mois pour l'hiver et l'été sont intervertis.

Pour $G_n < 42,5^\circ$, $L_h = 0$ dB

L_z : terme contenant les effets de la propagation ionosphérique qui ne sont pas inclus dans cette méthode. La valeur actuelle recommandée est 10,3 dB (voir le § 5.2).

NOTE 1 – On notera que la valeur de L_z dépend des éléments de la méthode de prévision; en conséquence, toute modification de ces éléments doit entraîner une modification de la valeur de L_z .

Si on ne tient pas compte des modes occultés par la couche E, on prend comme valeur médiane équivalente résultante globale du champ de l'onde ionosphérique, E_s , la valeur quadratique de la somme des champs pour les N modes, N comprenant les modes F2 et E pour lesquels des prévisions ont été faites, c'est-à-dire:

$$E_{ts} = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{E_{tw}/10} \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (28)$$

Pour la prévision de la qualité de fonctionnement des systèmes de modulation numérique, on tient compte de la valeur médiane équivalente du champ de l'onde ionosphérique pour chaque mode (voir le § 10.2).

FIGURE 1
Facteur d'absorption, AT_{midi}

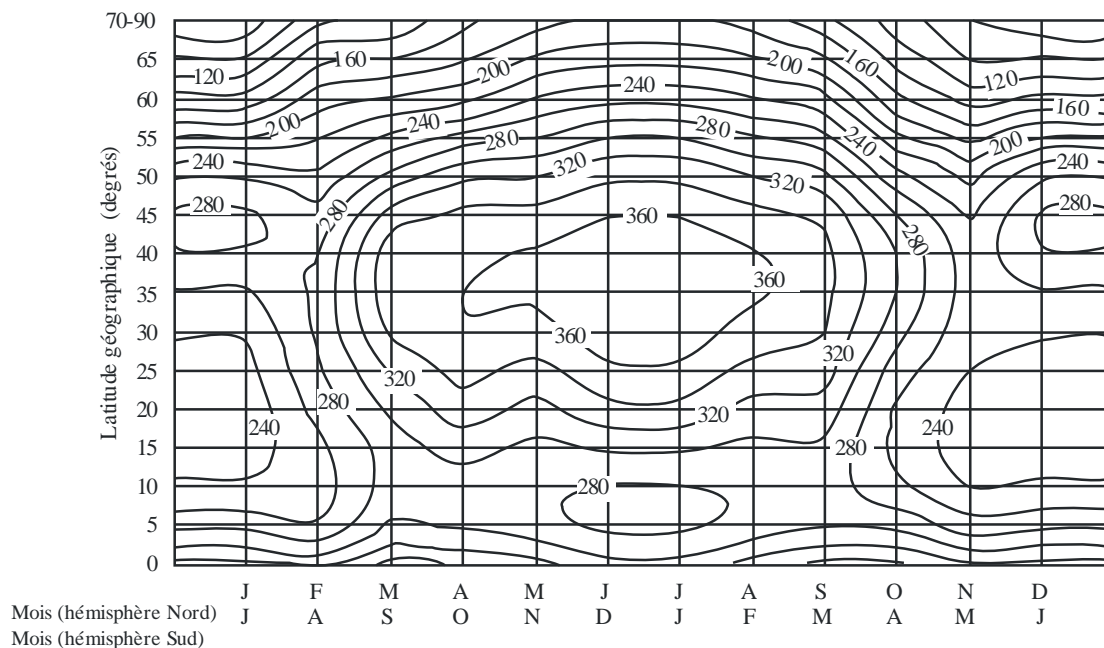
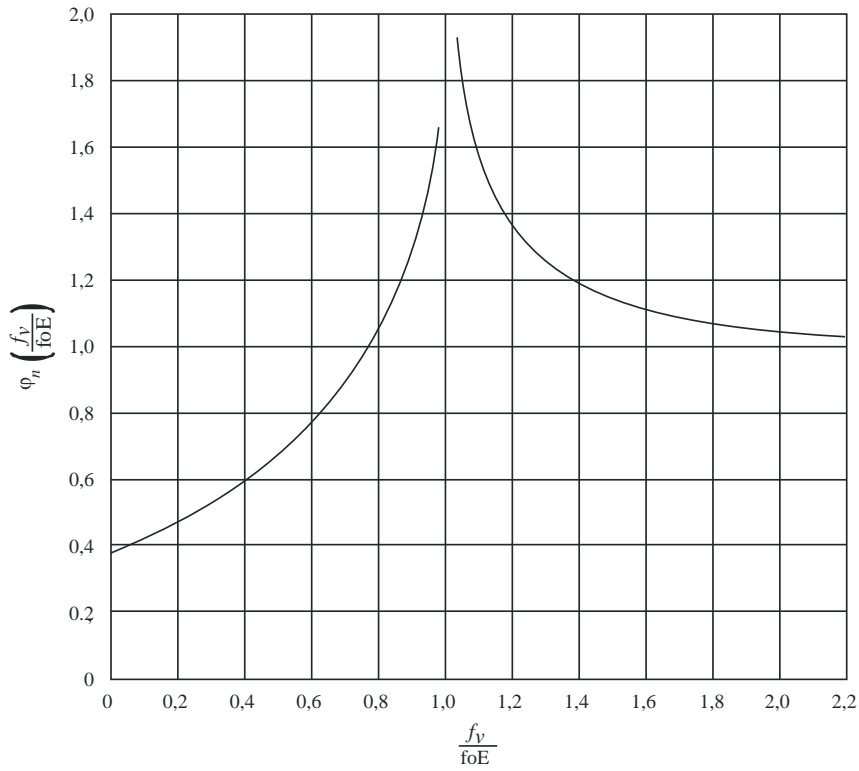


FIGURE 2

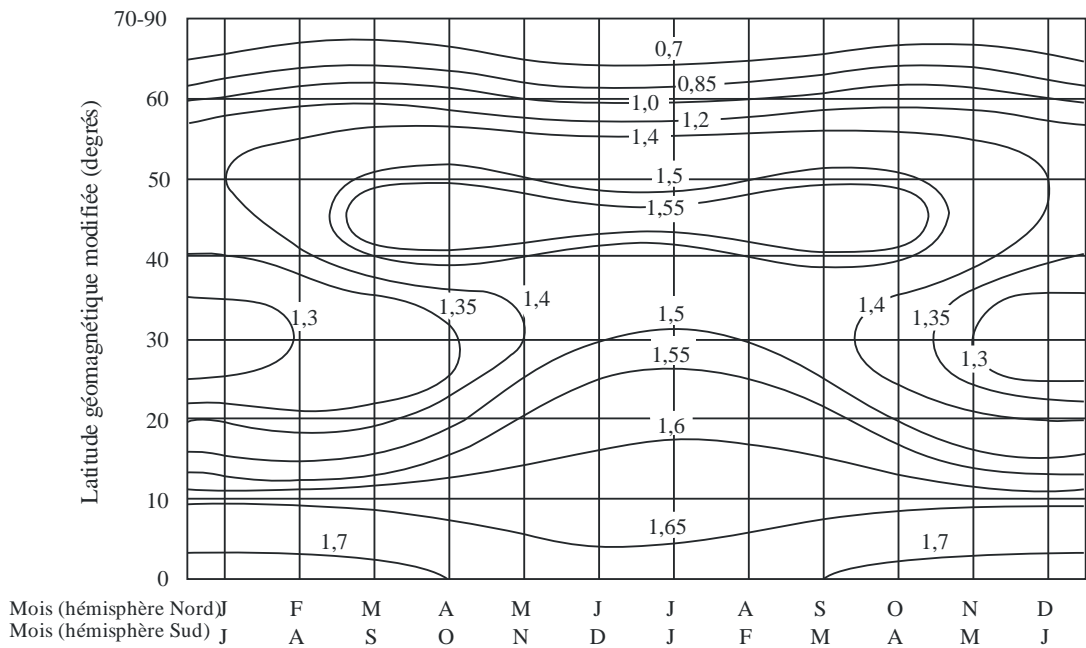
Facteur d'absorption due à la pénétration dans la couche, $\phi_n \left(\frac{f_Y}{f_oE} \right)$



P0533-02

FIGURE 3

Exposant d'absorption diurne, p



P0533-03

TABLEAU 2

Valeurs de L_h indiquant les affaiblissements auroraux et autres (dB)

	a) Distances de transmission égales ou inférieures à 2 500 km								
	Heure locale au milieu du trajet, t								
	01 ≤ t < 04	04 ≤ t < 07	07 ≤ t < 10	10 ≤ t < 13	13 ≤ t < 16	16 ≤ t < 19	19 ≤ t < 22	22 ≤ t < 01	
G_n									
$77,5^\circ \leq G_n$	2,0	6,6	6,2	1,5	0,5	1,4	1,5	1,0	H i v e r
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	3,4	8,3	8,6	0,9	0,5	2,5	3,0	3,0	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	6,2	15,6	12,8	2,3	1,5	4,6	7,0	5,0	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	7,0	16,0	14,0	3,6	2,0	6,8	9,8	6,6	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,0	4,5	6,6	1,4	0,8	2,7	3,0	2,0	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	1,3	1,0	3,2	0,3	0,4	1,8	2,3	0,9	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,9	0,6	2,2	0,2	0,2	1,2	1,5	0,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,4	0,3	1,1	0,1	0,1	0,6	0,7	0,3	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,4	2,5	7,4	3,8	1,0	2,4	2,4	3,3	E q u i n o x e
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	3,3	11,0	11,6	5,1	2,6	4,0	6,0	7,0	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	6,5	12,0	21,4	8,5	4,8	6,0	10,0	13,7	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	6,7	11,2	17,0	9,0	7,2	9,0	10,9	15,0	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,4	4,4	7,5	5,0	2,6	4,8	5,5	6,1	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	1,7	2,0	5,0	3,0	2,2	4,0	3,0	4,0	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,1	1,3	3,3	2,0	1,4	2,6	2,0	2,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,5	0,6	1,6	1,0	0,7	1,3	1,0	1,3	
$77,5^\circ \leq G_n$	2,2	2,7	1,2	2,3	2,2	3,8	4,2	3,8	E t é
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	2,4	3,0	2,8	3,0	2,7	4,2	4,8	4,5	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	4,9	4,2	6,2	4,5	3,8	5,4	7,7	7,2	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	6,5	4,8	9,0	6,0	4,8	9,1	9,5	8,9	
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	3,2	2,7	4,0	3,0	3,0	6,5	6,7	5,0	
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	2,5	1,8	2,4	2,3	2,6	5,0	4,6	4,0	
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,6	1,2	1,6	1,5	1,7	3,3	3,1	2,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,8	0,6	0,8	0,7	0,8	1,6	1,5	1,3	

TABLEAU 2 (fin)

	b) Distances de transmission supérieures à 2 500 km								
	Heure locale au milieu du trajet, t								
	$01 \leq t < 04$	$04 \leq t < 07$	$07 \leq t < 10$	$10 \leq t < 13$	$13 \leq t < 16$	$16 \leq t < 19$	$19 \leq t < 22$	$22 \leq t < 01$	
G_n									
$77,5^\circ \leq G_n$	1,5	2,7	2,5	0,8	0,0	0,9	0,8	1,6	
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	2,5	4,5	4,3	0,8	0,3	1,6	2,0	4,8	H
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	5,5	5,0	7,0	1,9	0,5	3,0	4,5	9,6	i
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	5,3	7,0	5,9	2,0	0,7	4,0	4,5	10,0	v
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	1,6	2,4	2,7	0,6	0,4	1,7	1,8	3,5	e
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	0,9	1,0	1,3	0,1	0,1	1,0	1,5	1,4	r
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,6	0,6	0,8	0,1	0,1	0,6	1,0	0,5	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,3	0,3	0,4	0,0	0,0	0,3	0,5	0,4	
$77,5^\circ \leq G_n$	1,0	1,2	2,7	3,0	0,6	2,0	2,3	1,6	E
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	1,8	2,9	4,1	5,7	1,5	3,2	5,6	3,6	q
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	3,7	5,6	7,7	8,1	3,5	5,0	9,5	7,3	u
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	3,9	5,2	7,6	9,0	5,0	7,5	10,0	7,9	i
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	1,4	2,0	3,2	3,8	1,8	4,0	5,4	3,4	n
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	0,9	0,9	1,8	2,0	1,3	3,1	2,7	2,0	o
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	0,6	0,6	1,2	1,3	0,8	2,0	1,8	1,3	x
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,3	0,3	0,6	0,6	0,4	1,0	0,9	0,6	e
$77,5^\circ \leq G_n$	1,9	3,8	2,2	1,1	2,1	1,2	2,3	2,4	
$72,5^\circ \leq G_n < 77,5^\circ$	1,9	4,6	2,9	1,3	2,2	1,3	2,8	2,7	
$67,5^\circ \leq G_n < 72,5^\circ$	4,4	6,3	5,9	1,9	3,3	1,7	4,4	4,5	
$62,5^\circ \leq G_n < 67,5^\circ$	5,5	8,5	7,6	2,6	4,2	3,2	5,5	5,7	E
$57,5^\circ \leq G_n < 62,5^\circ$	2,8	3,8	3,7	1,4	2,7	1,6	4,5	3,2	t
$52,5^\circ \leq G_n < 57,5^\circ$	2,2	2,4	2,2	1,0	2,2	1,2	4,4	2,5	é
$47,5^\circ \leq G_n < 52,5^\circ$	1,4	1,6	1,4	0,6	1,4	0,8	2,9	1,6	
$42,5^\circ \leq G_n < 47,5^\circ$	0,7	0,8	0,7	0,3	0,7	0,4	1,4	0,8	

5.3 Trajets de longueur supérieure à 7 000 km

Pour des trajets de plus de 9 000 km, les prévisions du champ médian de l'onde ionosphérique sont réalisées uniquement selon la méthode indiquée au § 5.3. Pour des trajets de longueur comprise entre 7 000 et 9 000 km, on utilise les 2 méthodes indiquées aux § 5.2 et 5.3. Les résultats obtenus avec chaque méthode sont ensuite interpolés selon la méthode décrite au § 5.4.

Pour des trajets de plus de 7 000 km, il est trop difficile de calculer tous les modes possibles. Par conséquent, on utilise la méthode suivante dans laquelle la LUF (f_L) et la MUF d'exploitation (f_M) définissent la gamme de fréquences des transmissions. Les valeurs f_M et f_L sont les paramètres les plus importants dans la formule empirique utilisée pour le calcul du champ. Toutefois, pour les trajets de

longueur comprise entre 7 000 et 9 000 km, les résultats obtenus avec les deux méthodes sont interpolés afin d'obtenir une transition progressive (voir le § 5.4).

Cette méthode comporte trois étapes:

- Détermination de f_M
- Détermination de f_L
- Estimation du champ.

5.3.1 Détermination de f_M

Pour déterminer f_M , on effectue les prévisions en divisant le trajet en un nombre minimal (n_M) de bonds d'égale longueur (d_M), d'au plus 4 000 km. On calcule l'angle d'élévation selon l'équation (13), en tenant compte de la longueur du trajet et pour une hauteur fixe de 300 km. Si l'angle d'élévation est inférieur à $3,0^\circ$, on ajoute un bond et on recalcule la longueur du trajet et l'angle d'élévation jusqu'à ce que l'angle d'élévation soit supérieur à $3,0^\circ$. Ensuite, les emplacements des deux points directeurs sont déterminés à partir du Tableau 1a). Dans ce cas, d_0 est égal à d_M , de sorte que les points directeurs sont situés à mi-longueur du trajet ($d_M/2$) entre l'émetteur et le récepteur.

Aux deux points directeurs, foF2, M(3000) et la gyrofréquence (f_H) sont déterminés conformément au § 3.4. Ces valeurs sont utilisées pour calculer F2(4000) MUF (f_4), F2(Zero)MUF (f_z) et la MUF de référence (f_{BM}) pour les points directeurs:

$$f_{BM} = f_z + (f_4 - f_z)f_D \quad \text{MHz} \quad (29)$$

où:

$$f_4 = 1.1 \cdot f_oF2 \cdot M(3000)F2$$

$$f_z = f_oF2 + \frac{f_H}{2}$$

Le facteur de réduction de la distance (f_D) est utilisé pour ramener la MUF pour un trajet de 4 000 km à la longueur effective du trajet. Le facteur f_D varie entre 0,0 (pour un bond de 0 km) et 1,0 (pour un bond de 4 000 km).

$$f_D = \left(\left(\left(\left(\left(\left(C_6 d_M + C_5 \right) d_M + C_4 \right) d_M + C_3 \right) d_M + C_2 \right) d_M + C_1 \right) d_M + C_0 \right) d_M \quad (30)$$

où:

$$C_6: -2,40074637494790 \cdot 10^{-24}$$

$$C_5: 25,8520201885984 \cdot 10^{-21}$$

$$C_4: -92,4986988833091 \cdot 10^{-18}$$

$$C_3: 102,342990689362 \cdot 10^{-15}$$

$$C_2: 22,0776941764705 \cdot 10^{-12}$$

$$C_1: 87,4376851991085 \cdot 10^{-9}$$

$$C_0: 29,1996868566837 \cdot 10^{-6}$$

d_M : longueur du trajet (km).

La valeur f_{BM} est déterminée séparément pour les deux points directeurs et la valeur la moins élevée est la valeur de la MUF de référence sur l'ensemble du trajet.

La valeur f_M est déterminée séparément pour les deux points directeurs à partir du produit du facteur K et de la MUF de référence. La valeur la moins élevée est la MUF d'exploitation sur l'ensemble du trajet.

$$f_M = K \cdot f_{BM} \quad \text{MHz} \quad (31)$$

Le facteur K est utilisé pour calculer la MUF d'exploitation MUF f_M à partir de la MUF de référence f_{BM} :

$$K = 1.2 + W \frac{f_{BM}}{f_{BM,noon}} + X \left[\sqrt[3]{\frac{f_{BM,noon}}{f_{BM}}} - 1 \right] + Y \left[\frac{f_{BM,min}}{f_{BM,noon}} \right]^2 \quad (32)$$

où

$f_{BM,noon}$: valeur de f_{BM} à une heure correspondant au midi local

$f_{BM,min}$: valeur la plus faible de f_{BM} sur une durée de 24 heures.

W, X et Y sont données dans le Tableau 3. L'angle d'azimut du trajet du grand cercle est déterminé au centre de l'ensemble du trajet; cet angle est utilisé pour effectuer une interpolation linéaire des valeurs de l'angle entre les directions Est-Ouest et Nord-Sud.

TABLEAU 3

Valeurs de W, X et Y utilisées pour la détermination du facteur de correction K

	W	X	Y
Est-Ouest	0,1	1,2	0,6
Nord-Sud	0,2	0,2	0,4

5.3.2 Détermination de f_L

La LUF est fortement influencée par l'absorption non dérivée. Les ondes décamétriques sont absorbées lorsqu'elles pénètrent dans la couche D. Pour déterminer la LUF, on divise le trajet en un nombre n_L de bonds d'égale longueur d_L , dont aucun ne dépasse 3 000 km. Les points de pénétration sont déterminés dans l'hypothèse d'une hauteur de réflexion fixe de 300 km et d'une hauteur de pénétration de 90 km (deux points de pénétration par bond).

La valeur f_L est calculée à l'aide de l'équation (33):

$$f_L = \left(5.3 \left[\frac{(1+0.009R_{12}) \sum_1^m \cos^{0.5}(\chi)}{\cos(i_{90}) \log_e \left(\frac{9.5 \cdot 10^6}{p'} \right)} \right]^{0.5} - f_H \right) (A_w + 1) \quad \text{MHz} \quad (33)$$

où:

m : nombre de points de pénétration $2n_L$

R_{12} : nombre de tâches solaires qui ne sature pas pour des valeurs élevées et qui peut être supérieur à 160

χ : distance zénithale du soleil qui peut être calculée à l'aide de l'équation suivante:

$$\cos(\chi) = \sin(\varphi_m) \sin(\delta) + \cos(\varphi_m) \cos(\delta) \cos(\eta) \quad (34)$$

où:

δ : déclinaison du Soleil (radians)

φ_m : latitude géographique du m ème point de pénétration (radians)

η : angle horaire du soleil (radians).

On peut obtenir une approximation de la déclinaison du soleil en utilisant la latitude subsolaire pour le milieu du mois (s_x) indiquée dans le Tableau 4:

TABLEAU 4
Latitude subsolaire pour le milieu du mois

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
s_x (degrés)	-21,2	-12,7	-2,2	9,7	18,8	23,3	21,6	14,1	3,1	-8,4	-18,4	-23,3

Une approximation de l'angle horaire solaire est donnée par:

$$\eta \cong \left(\frac{UTC}{12} - 1\right) \cdot \pi + y_m \tag{35}$$

où:

UTC : temps universel (heures)

y_m : longitude géographique du m ème point de pénétration (radians).

Dans la formule, la valeur de χ est calculée pour chaque traversée du trajet du rayon à l'altitude 90 km. Lorsque $\chi > 90^\circ$, $\cos^{0,5} \chi$ est pris égal à zéro.

i_{90} : angle d'incidence à une hauteur de 90 km

p' : longueur du trajet oblique

A_w : facteur d'anomalie d'hiver déterminé au point milieu du trajet; il est égal à 1 pour des latitudes géographiques de 0° à 30° et de 90° et atteint les valeurs maximales données au Tableau 5 à 60° . Les valeurs aux latitudes intermédiaires s'obtiennent par interpolation linéaire.

TABLEAU 5
Valeurs du facteur d'anomalie d'hiver A_w , à la latitude géographique de 60° utilisée dans l'expression de f_L

Hémisphère	Mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Nord	0,30	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,15	0,30
Sud	0,00	0,00	0,00	0,03	0,15	0,30	0,30	0,15	0,03	0,00	0,00	0,00

Au départ, la valeur de f_L sur 24 heures est déterminée à partir de l'équation (33) ou de la LUF en période nocturne. La LUF en période nocturne (f_{LN}) est calculée comme suit:

$$f_{LN} = \sqrt{\frac{D}{3000}} \tag{36}$$

Pour chaque heure, les plus grandes des valeurs calculées à partir des équations (32) et (35) sont prises comme étant f_L pour cette heure. Ainsi la valeur minimale sur 24 heures de f_L est f_{LN} . Ensuite, on calcule la décroissance de la LUF en période diurne à la LUF en période nocturne. En effet, l'absorption ne suit pas exactement l'angle zénithal du soleil et elle est retardée aux environs en période du coucher du soleil. Il faut procéder comme suit pour déterminer la décroissance de la LUF en période diurne à la LUF en période nocturne.

L'heure de passage de la LUF en période diurne à la LUF en période nocturne (t_r) est définie comme étant l'heure à laquelle la valeur de f_L au temps t est inférieure à $2 \cdot f_{LN}$, la valeur de f_L pour l'heure

précédente étant supérieure à $2 \cdot f_{LN}$. Si t_r existe, il faut recalculer f_L pour les heures t_r et les trois heures suivantes. Si t_r n'existe pas, la détermination de f_L sur 24 heures est terminée.

Lorsque t_r existe, la valeur de f_L pour l'heure considérée et les trois heures suivantes doit être recalculée de la façon suivante. Pour l'heure (t_r), la valeur de f_L est calculée comme suit:

$$f_L(t_r) = e^{-0.23} \cdot f_L(t_r - 1) \cdot (dt \cdot (1 - e^{-0.23}) + e^{-0.23}) \quad (37)$$

où:

$$dt = \frac{2 \cdot f_{LN} - f_L(t_r)}{f_L(t_r - 1) - f_L(t_r)}$$

Pour les trois heures suivantes ($n = 1, 2$ et 3), la valeur de f_L est calculée comme suit:

$$f_L(t_r + n) = f_L(t_r + n - 1) \cdot e^{-0.23} \quad (38)$$

Les valeurs de f_L nouvellement recalculées remplacent les valeurs initiales de f_L uniquement si elles sont supérieures. Une fois toutes les valeurs de f_L sur une période de 24 heures calculées, la valeur de f_L pour l'heure considérée est sélectionnée et le calcul de la valeur de f_L est terminé.

5.3.3 Estimation du champ E_{tl}

Le champ médian résultant E_{tl} est donné par la formule:

$$E_{tl} = E_0 \left[1 - \frac{(f_M + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2 + (f_L + f_H)^2} \left[\frac{(f_L + f_H)^2}{(f + f_H)^2} + \frac{(f + f_H)^2}{(f_M + f_H)^2} \right] \right] - 30,0 + P_t + G_{tl} + G_{ap} - L_y \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (39)$$

dans laquelle E_0 est le champ en espace libre pour une p.i.r.e. de 3 MW. Dans ce cas:

$$E_0 = 139,6 - 20 \log p' \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (40)$$

où:

p' est calculé à l'aide des équations (19) et (13), pour $h_r = 300$ km

G_{tl} : valeur la plus élevée du gain de l'antenne d'émission à l'azimut requis, pour un angle d'élévation compris entre 0° et 8° (dB)

G_{ap} : accroissement du champ dû à la focalisation aux longues distances, donné par la formule:

$$G_{ap} = 10 \log \frac{D}{R_0 |\sin(D/R_0)|} \quad \text{dB} \quad (41)$$

Comme G_{ap} , selon la formule ci-dessus, tend vers l'infini lorsque D est multiple de πR_0 , il est limité à la valeur de 15 dB.

L_y : terme analogue à L_z . La valeur actuelle recommandée est $-0,9$ dB.

On notera que la valeur de L_y dépend des éléments de la méthode de prévision; en conséquence, toute modification de ces éléments doit entraîner une modification de la valeur de L_y .

f_H : moyenne des valeurs de la gyrofréquence des électrons déterminées aux deux points directeurs

f_M : MUF (voir § 5.3.1)

f_L : LUF (voir § 5.3.2).

5.4 Trajets de longueur comprise entre 7 000 et 9 000 km

Dans cet intervalle de distances, le champ médian de l'onde ionosphérique, E_{ti} , est déterminé par interpolation entre les valeurs E_s et E_l . E_s est le champ quadratique moyen donné par la formule (28) et E_l correspond à un mode composite et est donné par la formule (39).

$$E_i = 100 \log_{10} X_i \quad \text{dB}(1 \mu\text{V/m}) \quad (42)$$

avec:

$$X_i = X_s + \frac{D - 7\,000}{2\,000} (X_l - X_s)$$

où: $X_s = 10^{0,01E_s}$

et $X_l = 10^{0,01E_l}$

La MUF de référence pour la liaison est égale à la plus faible des valeurs de la MUF de référence données par la formule (3) pour les deux points directeurs indiqués au Tableau 1a).

6 Puissance médiane disponible dans le récepteur

Pour les distances inférieures à 7 000 km, lorsque le champ est calculé par la méthode du § 5.2, et pour un mode w donné dont le champ de l'onde ionosphérique est E_w (dB(1 μ /m)) à la fréquence f (MHz), la puissance correspondante du signal disponible P_{rw} (dBW) provenant d'une antenne de réception sans perte dont le gain est G_{rw} (dB par rapport à une antenne isotrope) dans la direction de l'incidence du signal a pour expression:

$$P_{rw} = E_w + G_{rw} - 20 \log_{10} f - 107,2 \quad \text{dBW} \quad (43)$$

La puissance médiane disponible qui en résulte, P_r (dBW), est donnée par la somme des puissances provenant des différents modes, la contribution de chaque mode dépendant du gain de l'antenne de réception dans la direction d'incidence de ce mode. Pour les N modes contribuant à la somme:

$$P_r = 10 \log_{10} \sum_{w=1}^N 10^{P_{rw}/10} \quad \text{dBW} \quad (44)$$

Pour des distances supérieures à 9 000 km, lorsque le champ est calculé par la méthode du § 5.3, le champ E_l correspond à celui de la résultante des modes composites. Dans ce cas, P_r est déterminé en utilisant l'équation (43), dans laquelle G_{rw} est la plus grande valeur du gain de l'antenne de réception pour l'azimut requis pour un angle d'élévation compris entre 0° et 8°.

Pour les distances comprises entre 7 000 et 9 000 km, la puissance est déterminée à partir de la formule (42) en utilisant les puissances correspondant à E_s et E_l .

Partie 3

Prévision de la qualité de fonctionnement des systèmes

7 Valeur médiane mensuelle du rapport signal/bruit (S/N)

La Recommandation UIT-R P.372 donne des valeurs médianes de la puissance du bruit atmosphérique à la réception sur une antenne unipolaire verticale courte sans perte au-dessus d'un sol parfait, et donne également les intensités du bruit artificiel et de bruit cosmique. Le facteur de bruit extérieur résultant est donné par F_a (dB(kTb)) à la fréquence f (MHz), où k est la constante de Boltzmann et T est une température de référence de 288 K. En général, lorsqu'on utilise une autre antenne de réception, le facteur de bruit résultant peut être différent de cette valeur de F_a . Toutefois, comme on ne dispose pas de données de mesure de bruit complètes pour différentes antennes, on peut supposer, en première approximation, que la valeur de F_a obtenue à partir de la Recommandation UIT-R P.372 est applicable. Par conséquent, la médiane mensuelle du rapport S/N (dB) obtenue dans une largeur de bande b (Hz) est égale à:

$$S/N = P_r - F_a - 10 \log_{10} b + 204 \quad (45)$$

où:

P_r : est la valeur médiane de la puissance disponible dans le récepteur déterminée comme indiqué au § 6.

8 Champ de l'onde ionosphérique, puissance de signal disponible dans le récepteur et rapport S/N pour d'autres pourcentages de temps

Le champ de l'onde ionosphérique, la puissance disponible dans le récepteur et le rapport S/N peuvent être déterminés pour un pourcentage de temps spécifié en fonction des écarts au cours d'une heure et d'un jour à l'autre des signaux et du bruit. En l'absence d'autres données, on peut prendre comme marges d'évanouissement du signal celles qui ont été adoptées par la CAMR HFBC-87 avec un écart à court terme 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 pour un décile sont fonction du rapport de la fréquence de fonctionnement à la MUF de référence, comme indiqué au Tableau 2 de la Recommandation UIT-R P.842.

Dans le cas du bruit atmosphérique, les écarts de la puissance du bruit, pour un décile provenant de la variabilité d'un jour à l'autre, sont tirés de la Recommandation UIT-R P.372. A l'heure actuelle, aucune marge n'est appliquée pour la variabilité au cours d'une heure. S'agissant du bruit artificiel, en l'absence d'informations directes sur la variabilité temporelle, on prend aussi comme écarts pour un décile ceux qui sont indiqués dans la Recommandation UIT-R P.372 même si ceux-ci sont établis uniquement en fonction d'une combinaison des variabilités temporelle et spatiale.

La variabilité combinée du bruit galactique, pour un décile, au cours d'une heure et d'un jour à l'autre, est considérée comme étant égale à ± 2 dB.

Le rapport S/N dépassé pendant 90% du temps est donné par:

$$S/N_{90} = S/N_{50} - \left(S_{wh}^2 + S_{dd}^2 + N_{dd}^2 \right) \quad (46)$$

où:

S_{wh} : écart entre le décile inférieur du signal utile et la valeur médiane horaire du champ découlant des variations au cours d'une heure (dB)

S_{dd} : écart entre le décile inférieur du signal utile et la valeur médiane mensuelle du champ découlant des variations d'un jour à l'autre (dB)

N_{dd} : écart entre le décile supérieur du bruit de fond et la valeur médiane mensuelle du champ découlant des variations d'un jour à l'autre (dB).

Pour les autres pourcentages de temps, les écarts peuvent être obtenus à partir des informations relatives à une distribution log-normale figurant dans la Recommandation UIT-R P.1057.

9 Fréquence minimale utilisable (LUF)

La LUF est définie dans la Recommandation UIT-R P.373. Selon cette définition, la LUF est la fréquence minimale, exprimée au 0,1 MHz le plus proche, pour laquelle on obtient un rapport S/N requis égal à la médiane mensuelle du rapport S/N .

10 Fiabilité de référence de circuit (BCR)

10.1 Fiabilité des systèmes de modulation analogique

La BCR est définie dans la Recommandation UIT-R P.842, où la fiabilité est la probabilité (indiquée en pourcentage dans ladite Recommandation) que le critère de qualité de fonctionnement spécifié (c'est-à-dire le rapport S/N spécifié) soit respecté. Dans le cas des systèmes analogiques, elle est évaluée à partir des rapports S/N en incorporant les écarts pour un décile, au cours d'une heure et d'un jour à l'autre, de l'intensité du signal et du bruit de fond. La distribution autour de la médiane est telle que décrite au § 8. La procédure est définie dans la Recommandation UIT-R P.842.

10.2 Fiabilité des systèmes de modulation numérique, compte tenu de l'étalement temporel et fréquentiel du signal reçu

Pour les systèmes de modulation qui sont robustes par rapport à l'étalement temporel et fréquentiel attendu, la fiabilité est le pourcentage de temps pendant lequel le rapport S/N requis est attendu, la procédure décrite au § 8 étant utilisée.

D'une manière générale, pour les systèmes de modulation numérique, il convient de tenir compte de l'étalement temporel et fréquentiel du signal reçu.

10.2.1 Paramètres de système

On utilise une représentation simplifiée de la fonction de transfert de canal. Pour la méthode de modulation concernée, l'estimation de la fiabilité est fondée sur quatre paramètres:

- *Fenêtre temporelle*, T_w : intervalle de temps à l'intérieur duquel les modes du signal contribueront à la qualité de fonctionnement du système et en dehors duquel ils réduiront la qualité de fonctionnement du système.
- *Fenêtre fréquentielle*, F_w : intervalle de fréquences à l'intérieur duquel les modes du signal contribueront à la qualité de fonctionnement du système et en dehors duquel ils réduiront la qualité de fonctionnement du système.
- *Rapport signal/bruit requis*, S/N_r : rapport entre la somme des valeurs médianes horaires des puissances des modes du signal et le bruit, qui est requis pour respecter la qualité de fonctionnement spécifiée dans les conditions où tous les modes du signal sont situés dans les fenêtres temporelle et fréquentielle, T_w et F_w .

- *Rapport d'amplitude, A*: pour chaque mode de propagation, la valeur médiane horaire du champ sera prévue, compte tenu de la puissance de l'émetteur et du gain d'antenne pour ce mode. On déterminera le mode pour lequel cette valeur est la plus élevée à l'heure considérée. Le rapport d'amplitude, *A*, est le rapport entre le champ du mode dominant et celui d'un mode sous-dominant, qui affectera tout juste la qualité de fonctionnement du système si le mode sous-dominant arrive avec un temps de propagation situé en dehors de T_w ou avec un étalement fréquentiel situé en dehors de F_w .

10.2.2 Temps de propagation

Le temps de propagation d'un mode individuel est donné par:

$$\tau = (p'/c) \times 10^3 \quad \text{ms} \quad (47)$$

où:

- p' : distance oblique virtuelle (km) donnée par les équations (13) et (19), et la hauteur de réflexion, h_r , déterminée comme indiqué dans le § 5.1
- c : vitesse de la lumière (km/s) en espace libre.

Le temps de propagation différentiel entre les modes peut être déterminé à partir des temps de propagation de chaque mode.

10.2.3 Procédure de prévision de la fiabilité

Pour la prévision de la fiabilité, on utilise la procédure suivante:

Pour les trajets de longueur inférieure à 9 000 km:

Etape 1: Le champ du mode dominant mode, E_w , est déterminé au moyen des méthodes données aux § 5.2 et 5.3.

Etape 2: Tous les autres modes actifs pour lesquels le champ dépasse ($E_w - A$ (dB)) sont identifiés.

Etape 3: Parmi les modes identifiés aux étapes 1 ou 2, on identifie le premier mode arrivant ainsi que tous les modes situés à l'intérieur de la fenêtre temporelle, T_w , mesurée à partir du premier mode arrivant.

Etape 4: Pour les trajets de longueur inférieure à 7 000 km, on fait la somme des puissances des modes arrivant à l'intérieur de la fenêtre. Pour les trajets de longueur comprise entre 7 000 et 9 000 km, on utilise la procédure d'interpolation figurant au § 5.4 et on détermine la fiabilité de référence de circuit (BCR) au moyen de la procédure donnée au § 10.1, qui fait appel à la procédure du Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.842. Le rapport S/N_r est utilisé à l'étape 10 de ce tableau.

Etape 5: Si, parmi les modes actifs identifiés à l'étape 2, certains ont un temps de propagation différentiel situé en dehors de la fenêtre temporelle, T_w , on détermine la réduction de fiabilité due à ces modes au moyen d'une méthode analogue à la méthode relative à la fiabilité de circuit globale figurant dans le Tableau 3 de la Recommandation UIT-R P.842, en remplaçant les rapports de protection relatifs de l'étape 3 du Tableau 3 par le rapport A et en ignorant la variabilité d'un jour à l'autre en mettant à 0 dB tous les paramètres des étapes 5 et 8. Le résultat obtenu à l'étape 14 de la Recommandation UIT-R P.482 est la fiabilité du circuit numérique (DCR) en l'absence de diffusion. La dégradation de la fiabilité due au brouillage multimode, MIR, correspond donc au rapport des valeurs obtenues pour les étapes 14 et 13 du Tableau 3 de la Recommandation UIT-R P.842 et est donnée par la fonction $DCR = ((BCR) \times (MIR/100)\%)$.

Il est à noter qu'il pourra être nécessaire de réexaminer les valeurs des écarts pour le décile donnés aux étapes 6 et 9 du Tableau 3, étant donné que la distribution de probabilité pourra être différente pour la prise en compte des modes individuels.

Etape 6: En dehors des régions et des heures pour lesquelles une diffusion est attendue, le décalage de fréquence dû au mouvement de masse des couches réfléchissantes devrait être de l'ordre de 1 Hz et, dans la présente méthode, on suppose qu'un tel décalage de fréquence est négligeable.

Pour les trajets de longueur supérieure à 9 000 km:

L'intensité du signal composite est telle qu'obtenue au § 5.3. On suppose que l'étalement des temps de propagation des modes constituant ce signal composite est de 3 ms à 7 000 km et atteint linéairement 5 ms à 20 000 km. Si la fenêtre temporelle spécifiée pour le système est inférieure à cet étalement des temps de propagation, on prévoit que le système ne respectera pas sa qualité de fonctionnement requise.

10.3 Diffusion équatoriale

En complément de la procédure décrite au § 10.2 ci-dessus, il convient de suivre les étapes suivantes pour calculer l'étalement dû à la diffusion, le modèle de diffusion équatoriale donné dans la Pièce jointe 1 étant invoqué.

Etape 7: L'étalement temporel potentiel dû à la diffusion est indiqué au § 1 de la Pièce jointe 1, la fonction de diffusion temporelle est appliquée à chaque mode de la région F situé à l'intérieur de la fenêtre temporelle et le champ de diffusion $p_{Tspread}$ est rencontré à la limite de la fenêtre temporelle, T_w .

Etape 8: L'étalement fréquentiel potentiel dû à la diffusion est indiqué au § 2 de la Pièce jointe 1, la fonction de diffusion fréquentielle, $p_{Fspread}$, est appliquée au mode dominant de la région F et le champ de diffusion fréquentielle est rencontré de façon symétrique aux limites de la fenêtre fréquentielle, F_w .

Etape 9: Si la valeur de n'importe quel $p_{Tspread}$ et/ou $p_{Fspread}$, aux limites des fenêtres dépasse $(E_w - A)$ la probabilité pour qu'une diffusion se produise doit être déterminée aux points directeurs pour les modes de la région F, comme indiqué au § 3 de la Pièce jointe 1. Lorsqu'on considère plus d'un point directeur pour un mode de propagation, on doit opter pour la probabilité maximale.

Etape 10: La fiabilité de circuit numérique en présence de diffusion est donnée par la fonction:

$$((BCR) \times (MIR) \times (100 - prob_{occ})/10\,000)\% \quad (48)$$

où la probabilité pour qu'une diffusion se produise, $prob_{occ}$, est définie dans la Pièce jointe 1 à cette annexe.

Pièce jointe 1 à l'Annexe 1

Modèle de diffusion équatoriale des signaux à ondes décimétriques

1 Le modèle de diffusion temporelle de la puissance disponible provenant de la composante diffusée $p_{Tspread}$ est donné par une demi-distribution normale:

$$p_{Tspread} = 0.056 p_m e^{\frac{-(\tau - \tau_m)^2}{2T^2_{spread}}}$$

pour τ supérieur à τ_m ,

où:

p_m : puissance disponible reçue provenant de la réflexion spéculaire du mode

τ : temps de propagation considéré

τ_m : temps de propagation du mode spéculaire

T_{spread} : écart type de l'étalement temporel dans cette demi-distribution, pris égal à 1 ms.

2 Pour l'étalement fréquentiel, la diffusion est symétrique autour de la fréquence émise et la variation présente une forme analogue au cas de l'étalement temporel:

$$p_{Fspread} = 0.056 p_m e^{\frac{-(f - f_m)^2}{2F^2_{spread}}}$$

où:

f : fréquence considérée

f_m : fréquence centrale émise

F_{spread} : écart type de l'étalement fréquentiel, pris égal à 3 Hz.

3 La probabilité pour qu'une diffusion se produise pendant un jour au cours d'un mois $prob_{occ}$ est donnée par:

$$prob_{occ} = F_{\lambda_d} F_{T_l} F_R F_S$$

où:

$$F_{\lambda_d} = 1 \quad \text{pour } 0^\circ < |\lambda_d| < 15^\circ$$

$$F_{\lambda_d} = \left(\frac{25 - |\lambda_d|}{10} \right)^2 \left(\frac{|\lambda_d| - 10}{5} \right) \quad \text{pour } 15^\circ < |\lambda_d| < 25^\circ$$

$$F_{\lambda_d} = 0 \quad \text{pour } 25^\circ < |\lambda_d| < 90^\circ$$

où λ_d est l'inclinaison magnétique

$$\begin{aligned}
 F_{T_l} &= 1 && \text{pour } 00 < T_l < 03 \\
 F_{T_l} &= \left(\frac{7 - T_l}{4} \right)^2 \left(\frac{T_l - 1}{2} \right) && \text{pour } 03 < T_l < 07 \\
 F_{T_l} &= 0 && \text{pour } 07 < T_l < 19 \\
 F_{T_l} &= (T_l - 19)^2 (41 - 2T_l) && \text{pour } 19 < T_l < 20 \\
 F_{T_l} &= 1 && \text{pour } 20 < T_l < 24
 \end{aligned}$$

où:

$$\begin{aligned}
 T_l &: \text{ heure locale au point directeur (h)} \\
 F_R &= (0,1 + 0,008R_{12}) \text{ ou } 1, \text{ la valeur la plus petite étant retenue, et } R_{12} \text{ est le nombre} \\
 &\quad \text{de taches solaires}
 \end{aligned}$$

et

$$F_S = 0,55 + 0,45 \sin(60^\circ (m - 1,5))$$

où m est le numéro du mois.

4 La procédure de prévision consiste normalement à déterminer les niveaux des composantes de diffusion temporelle et fréquentielle aux limites des fenêtres temporelles et fréquentielle spécifiées pour le système de modulation utilisé. Si le rapport entre le plus élevé de ces niveaux et le niveau de la composante spéculaire du mode dominant est situé dans les limites du brouillage intersymboles spécifiées pour le système, on prévoit alors que la probabilité que le système présente une qualité de fonctionnement insuffisante sera donnée par la probabilité pour qu'une diffusion se produise.