

RECOMMANDATION UIT-R P.1240*

**MÉTHODES DE PRÉVISION DES MUF DE RÉFÉRENCE ET
D'EXPLOITATION ET DU TRAJET DES RAYONS DE L'UIT-R****

(Questions UIT-R 212/3 et UIT-R 223/3)

(1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'il est nécessaire de disposer de données ionosphériques de référence à long terme et de méthodes de prévision de la propagation pour la conception des circuits de radiocommunications en ondes décamétriques, la planification des services et le choix des bandes de fréquences;
- b) que les cartes numériques ionosphériques sont données dans la Recommandation UIT-R P.1239,

recommande

- 1 que les éléments contenus dans l'Annexe 1 (pour les définitions, voir la Recommandation UIT-R P.373) soient utilisés pour la prévision des MUF de référence et d'exploitation;
- 2 que les éléments contenus dans l'Annexe 2 soient utilisés pour la prévision du trajet des rayons.

ANNEXE 1

Prévision des MUF de référence et d'exploitation**1 Introduction**

La présente Annexe propose des formules empiriques pour l'évaluation des valeurs médianes mensuelles de la MUF de référence pour la liaison.

Cette MUF est la plus élevée des valeurs des MUF de référence pour les modes de propagation appropriés pour la longueur du trajet considéré.

La relation entre la MUF de référence et la MUF d'exploitation se trouve indiquée, de même qu'un programme informatique permettant d'estimer la MUF de référence, la MUF d'exploitation et la fréquence optimale de travail d'un trajet de propagation point à point de longueur quelconque.

* La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2000 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

** Des programmes informatiques relatifs aux procédures de prévision et aux données décrites dans la présente Recommandation sont disponibles dans les pages du site web de l'UIT-R traitant de la Commission d'études 3 des radiocommunications.

2 Considérations sur les modes

Les modes considérés sont:

1F2	0 à d_{max}
modes F2 d'ordre supérieur	au-delà de d_{max}
1F1	2 000-3 400 km
1E	0-2 000 km
2E	2 000-4 000 km

où la portée maximale au sol d_{max} (km) pour un seul bond en mode F2 est donnée par:

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

avec:

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

et $x = foF2/foE$, ou 2, la valeur la plus grande étant retenue.

On utilise les valeurs des caractéristiques ionosphériques au point milieu du trajet le long du grand cercle.

3 Prévion de la MUF de référence de la couche F2

3.1 Portée au sol D inférieure ou égale à d_{max}

La MUF de référence de la couche F2 est donnée par:

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

où:

f_H : gyrofréquence appropriée (voir la Recommandation UIT-R P.1239)

et:

$$C_D = 0,74 - 0,591 Z - 0,424 Z^2 - 0,090 Z^3 + 0,088 Z^4 + 0,181 Z^5 + 0,096 Z^6$$

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

C_{3000} : valeur de C_D pour $D = 3000$ km, où D est la distance (km) le long du grand cercle.

Les formules ci-dessus s'appliquent à la MUF de référence à une distance nulle pour les ondes se propageant selon le mode x, à d_{max} ou au-delà pour les ondes se propageant selon le mode o et à des distances intermédiaires pour certaines ondes composites. Pour toutes les distances, la MUF de référence correspondante pour les ondes se propageant selon le mode o s'obtient en supprimant le dernier terme en f_H dans la première formule.

3.2 Portée au sol D supérieure à d_{max}

Les valeurs de $F2(d_{max})MUF$ sont déterminées pour les emplacements des deux points directeurs à $d_0/2$ de chaque extrémité de la liaison sur le grand cercle qui les relie; d_0 est la longueur du bond du mode F2 le plus bas. La MUF pour la liaison est la plus basse des deux valeurs obtenues.

4 Prévion de la MUF de référence de la couche F1

La propagation ionosphérique par la couche F1 présente de l'importance pour les distances de 2000 à 3400 km, aux latitudes moyennes et élevées pendant les mois d'été. Pour ces distances de transmission, la MUF de référence de la couche F1 est égale au produit de la valeur de foF1 au point milieu du trajet (voir la Recommandation UIT-R P.1239) et du facteur M_{F1} . Ce facteur M est dérivé de calculs par tracé des rayons sur des profils de densité électronique en fonction de la hauteur, profils déterminés à partir d'ionogrammes représentatifs pour midi, enregistrés sous des latitudes

moyennes et élevées. On admet que ces facteurs sont applicables pour toutes les valeurs de la distance zénithale du Soleil. Le facteur M peut se déduire des expressions numériques suivantes:

$$M_{F1} = J_0 - 0,01 (J_0 - J_{100}) R_{12}$$

où:

$$J_0 = 0,16 + 2,64 \times 10^{-3} D - 0,40 \times 10^{-6} D^2$$

$$J_{100} = -0,52 + 2,69 \times 10^{-3} D - 0,39 \times 10^{-6} D^2$$

D étant la distance le long du grand cercle (km) comprise entre 2 000 et 3 400 km.

5 Prévision de la MUF de référence de la couche E

5.1 Portée au sol inférieure à 2 000 km

La propagation ionosphérique par réflexion simple sur la couche E est importante pour des distances inférieures à 2 000 km. La MUF de référence de la couche E d'un mode de propagation donné peut être considérée comme le produit de la valeur de foE au point milieu du trajet (voir la Recommandation UIT-R P.1239) et du facteur M , M_E . Ce facteur M est déduit de calculs de tracé de rayons pour un modèle parabolique de couche E ayant pour paramètres hmE = 110 km, ymE = 20 km, les effets du champ magnétique terrestre étant négligés. Il est donné par la formule:

$$M_E = 3,94 + 2,80 x - 1,70 x^2 - 0,60 x^3 + 0,96 x^4$$

où:

$$x = \frac{D - 1\,150}{1\,150}$$

D étant la distance de transmission (km).

5.2 Portée au sol comprise entre 2 000 et 4 000 km

La 2E MUF, pour des distances comprises entre 2 000 et 4 000 km, est prise comme équivalant à E(2000)MUF exprimée en fonction de la foE au milieu du trajet.

6 Prévision de la MUF d'exploitation

Aux fins des prévisions, la MUF d'exploitation (voir la Recommandation UIT-R P.373), lorsqu'elle est déterminée par un mode F2, est exprimée en fonction de la MUF de référence pour des saisons, des heures et des puissances rayonnées d'émission différentes comme indiqué dans le Tableau 1. Il est suggéré d'employer les valeurs correspondant aux conditions au milieu du trajet. Lorsque la MUF d'exploitation est déterminée par un mode E ou un mode F1, elle est considérée comme égale à la MUF de référence correspondante.

TABLEAU 1

Rapport R_{op} de la MUF d'exploitation médiane à la MUF de référence médiane pour un mode F2

Puissance isotrope rayonnée équivalente (dBW)	Été		Équinoxe		Hiver	
	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour
≤ 30	1,20	1,10	1,25	1,15	1,30	1,20
> 30	1,25	1,15	1,30	1,20	1,35	1,25

7 Prévision de la fréquence optimale de travail

La FOT (voir la Recommandation UIT-R P.373) est évaluée en fonction de la MUF d'exploitation en appliquant le facteur de conversion F_l égal à 0,95 si la MUF de référence du trajet est déterminée par un mode E ou F1, et comme l'indique le Tableau 2 si la MUF de référence du trajet est déterminée par un mode F2.

TABLEAU 2

Rapport F_1 de la FOT à la MUF d'exploitation dans le cas d'un mode F2

- a) Pour R_{12} inférieur à 50, en fonction de la saison, du temps local t au point milieu du trajet et de la latitude géographique λ (latitude N ou S) de ce point

$\lambda \backslash t$	22-02	02-06	06-10	10-14	14-18	18-22	
$> 75^\circ$	0,60	0,65	0,69	0,72	0,68	0,67	H i v e r
65-75°	0,68	0,71	0,75	0,76	0,75	0,70	
55-65°	0,74	0,76	0,80	0,80	0,82	0,73	
45-55°	0,79	0,78	0,83	0,85	0,84	0,76	
35-45°	0,81	0,79	0,85	0,87	0,89	0,77	
25-35°	0,81	0,74	0,86	0,82	0,85	0,78	
15-25°	0,78	0,67	0,87	0,75	0,77	0,79	
$< 15^\circ$	0,71	0,70	0,88	0,86	0,87	0,79	
$> 75^\circ$	0,67	0,72	0,74	0,73	0,80	0,65	É q u i n o x e
65-75°	0,70	0,75	0,76	0,74	0,82	0,69	
55-65°	0,73	0,78	0,80	0,75	0,81	0,73	
45-55°	0,75	0,80	0,81	0,76	0,81	0,76	
35-45°	0,77	0,81	0,81	0,77	0,80	0,78	
25-35°	0,78	0,80	0,82	0,78	0,81	0,74	
15-25°	0,77	0,75	0,83	0,81	0,83	0,69	
$< 15^\circ$	0,76	0,66	0,86	0,89	0,86	0,75	
$> 75^\circ$	0,68	0,79	0,84	0,87	0,85	0,76	É t é
65-75°	0,70	0,81	0,83	0,86	0,86	0,77	
55-65°	0,72	0,84	0,83	0,84	0,86	0,81	
45-55°	0,75	0,85	0,82	0,83	0,85	0,84	
35-45°	0,79	0,85	0,80	0,82	0,83	0,85	
25-35°	0,79	0,82	0,78	0,80	0,81	0,80	
15-25°	0,77	0,78	0,77	0,79	0,79	0,73	
$< 15^\circ$	0,74	0,75	0,80	0,83	0,82	0,69	

- b) Pour R_{12} , supérieur ou égal à 50 et inférieur ou égal à 100, en fonction de la saison, du temps local t au point milieu du trajet et de la latitude géographique λ (latitude N ou S) de ce point

$\lambda \backslash t$	22-02	02-06	06-10	10-14	14-18	18-22	
$> 75^\circ$	0,76	0,78	0,68	0,67	0,62	0,70	H i v e r
65-75°	0,79	0,81	0,74	0,70	0,73	0,73	
55-65°	0,82	0,83	0,79	0,75	0,80	0,76	
45-55°	0,84	0,82	0,83	0,81	0,84	0,78	
35-45°	0,83	0,81	0,85	0,86	0,86	0,79	
25-35°	0,78	0,76	0,85	0,85	0,85	0,78	
15-25°	0,74	0,71	0,85	0,83	0,82	0,76	
$< 15^\circ$	0,77	0,69	0,87	0,86	0,85	0,78	
$> 75^\circ$	0,64	0,61	0,73	0,74	0,74	0,67	É q u i n o x e
65-75°	0,68	0,71	0,77	0,74	0,78	0,70	
55-65°	0,70	0,75	0,80	0,72	0,78	0,73	
45-55°	0,73	0,77	0,81	0,74	0,76	0,75	
35-45°	0,75	0,78	0,82	0,78	0,76	0,76	
25-35°	0,77	0,76	0,82	0,83	0,78	0,72	
15-25°	0,75	0,73	0,84	0,87	0,81	0,69	
$< 15^\circ$	0,79	0,68	0,86	0,89	0,84	0,80	
$> 75^\circ$	0,82	0,80	0,82	0,85	0,80	0,79	É t é
65-75°	0,83	0,82	0,79	0,82	0,82	0,82	
55-65°	0,83	0,82	0,77	0,79	0,82	0,83	
45-55°	0,81	0,81	0,76	0,77	0,81	0,82	
35-45°	0,78	0,78	0,75	0,78	0,78	0,78	
25-35°	0,77	0,83	0,75	0,79	0,77	0,74	
15-25°	0,77	0,69	0,78	0,82	0,78	0,73	
$< 15^\circ$	0,79	0,63	0,84	0,85	0,81	0,77	

Hiver: novembre, décembre, janvier et février dans l'hémisphère Nord
mai, juin, juillet et août dans l'hémisphère Sud

Été: mai, juin, juillet et août dans l'hémisphère Nord
novembre, décembre, janvier et février dans l'hémisphère Sud

Équinoxe: mars, avril, septembre et octobre dans les deux hémisphères

TABLEAU 2 (suite)

c) Pour R_{12} supérieur à 100, en fonction de la saison, du temps local t au point milieu du trajet et de la latitude géographique λ (latitude N ou S) de ce point

$\lambda \backslash t$	22-02	02-06	06-10	10-14	14-18	18-22	
$> 75^\circ$	0,62	0,70	0,74	0,67	0,64	0,73	H i v e r
65-75°	0,69	0,74	0,77	0,72	0,72	0,78	
55-65°	0,77	0,78	0,81	0,80	0,79	0,82	
45-55°	0,83	0,80	0,84	0,87	0,84	0,86	
35-45°	0,86	0,81	0,87	0,90	0,87	0,87	
25-35°	0,83	0,76	0,89	0,90	0,88	0,86	
15-25°	0,78	0,70	0,89	0,89	0,89	0,83	
$< 15^\circ$	0,83	0,76	0,89	0,90	0,89	0,84	
$> 75^\circ$	0,66	0,67	0,75	0,66	0,70	0,72	É q u i n o x e
65-75°	0,67	0,71	0,73	0,70	0,70	0,72	
55-65°	0,69	0,75	0,71	0,71	0,71	0,72	
45-55°	0,73	0,78	0,70	0,72	0,74	0,73	
35-45°	0,79	0,82	0,75	0,78	0,80	0,84	
25-35°	0,81	0,82	0,87	0,87	0,87	0,86	
15-25°	0,81	0,77	0,89	0,92	0,90	0,85	
$< 15^\circ$	0,80	0,79	0,86	0,90	0,90	0,82	
$> 75^\circ$	0,73	0,74	0,82	0,83	0,79	0,75	É t é
65-75°	0,75	0,75	0,77	0,80	0,80	0,77	
55-65°	0,77	0,76	0,74	0,77	0,80	0,80	
45-55°	0,79	0,76	0,73	0,75	0,80	0,84	
35-45°	0,80	0,76	0,75	0,75	0,79	0,84	
25-35°	0,81	0,76	0,82	0,81	0,79	0,83	
15-25°	0,81	0,77	0,85	0,86	0,81	0,80	
$< 15^\circ$	0,80	0,79	0,86	0,89	0,85	0,78	

Hiver: novembre, décembre, janvier et février dans l'hémisphère Nord
mai, juin, juillet et août dans l'hémisphère Sud

Été: mai, juin, juillet et août dans l'hémisphère Nord
novembre, décembre, janvier et février dans l'hémisphère Sud

Équinoxe: mars, avril, septembre et octobre dans les deux hémisphères

8 Programme informatique

Les procédures décrites dans la présente Annexe sont implantées dans le programme informatique MUFFY, qui prévoit, en fonction de l'heure, la MUF de référence, la MUF d'exploitation et la fréquence optimale de travail pour des trajets de propagation, des mois et des nombres de taches solaires donnés.

ANNEXE 2

Prévision du trajet des rayons

Pour une estimation simplifiée du trajet des rayons obliques, on peut admettre que la réflexion se produit sur un miroir plan équivalent situé à une hauteur h_r .

Dans ce qui suit:

$$x = foF2 / foE \quad \text{et} \quad H = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 316$$

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 $x_r = f/\text{foF2} \geq 1$, où f est la fréquence de l'onde

$h_r = h$ ou 800 km, la valeur la plus faible étant seule retenue

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

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:

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

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 $x_r < 1$

$h_r = h$ ou 800 km, la valeur la plus faible étant seule retenue

où: $h = A_2 + B_2 b$ pour $B_2 \geq 0$
 $= A_2 + B_2$ sinon

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:

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

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

c) Pour $x \leq 3,33$

$h_r = 115 + H J + U d$ ou 800 km, la valeur la plus faible étant seule retenue

avec: $J = -0,7126 y^3 + 5,863 y^2 - 16,13 y + 16,07$

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