

Union internationale des télécommunications

**UIT-R**

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R P.1321-4**  
(09/2013)

**Facteurs de propagation qui influent sur les  
systèmes utilisant des techniques de  
modulation numérique dans les bandes  
d'ondes kilométriques et hectométriques**

**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
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	Service de radiodiffusion télévisuelle
<b>F</b>	Service fixe
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	<b>Propagation des ondes radioélectriques</b>
<b>RA</b>	Radio astronomie
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	Service fixe par satellite
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	Gestion du spectre
<b>SNG</b>	Reportage d'actualités par satellite
<b>TF</b>	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
<b>V</b>	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.1321-4

**Facteurs de propagation qui influent sur les systèmes utilisant des techniques de modulation numérique dans les bandes d'ondes kilométriques et hectométriques**

(Question UIT-R 225/3)

(1997-2005-2007-2009-2013)

**Domaine d'application**

La présente Recommandation contient des informations sur les caractéristiques de la propagation de l'onde de sol et de l'onde ionosphérique dans les bandes d'ondes kilométriques et hectométriques, qui peuvent affecter l'utilisation des méthodes de modulation numérique dans ces bandes.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que les méthodes de modulation numérique pour la radiodiffusion sonore en ondes kilométriques et hectométriques sont actuellement à l'étude;
- b) qu'il est nécessaire de disposer d'informations sur les caractéristiques de propagation à ces fréquences pour définir des méthodes de modulation,

*recommande*

d'utiliser les informations données en Annexe 1 pour définir des méthodes de modulation numérique utilisables en radiodiffusion en ondes hectométriques et kilométriques.

**Annexe 1****1 Introduction**

La plupart des services de radiodiffusion en ondes hectométriques et kilométriques sont fondés sur les caractéristiques du mode de propagation de l'onde de sol (voir la Recommandation UIT-R P.368). Dans ce mode, pendant la journée et en l'absence de brouillage, la portée est limitée par l'intensité du bruit radioélectrique causé par la foudre et par des sources artificielles (voir la Recommandation UIT-R P.372) et par le rapport signal à bruit spécifié. De nuit, les modes de propagation ionosphérique deviennent importants (voir la Recommandation UIT-R P.1147). Dans le cas de la modulation d'amplitude analogique, ces modes limitent la portée puisque le brouillage entre l'onde de sol et les modes de l'onde ionosphérique déphasés se traduit par une qualité du signal insuffisante. Les signaux transmis par l'onde ionosphérique provenant des autres émissions à distance peuvent également causer des brouillages nocturnes importants, ce qui peut également limiter la couverture du service à des portées où l'onde de sol permet d'obtenir un signal suffisamment intense; les différents aspects relatifs aux brouillages causés par d'autres signaux ne sont pas traités de façon détaillée dans la présente Annexe.

Les méthodes de modulation numérique peuvent également être influencées par la présence des modes de signaux retardés, mais il est possible par une définition d'une modulation convenable de compenser ou d'exploiter cet effet. La présente Annexe présente des modèles très simples de cet environnement multitrajet, qui sont censés être adaptés à la définition de techniques de modulation. Selon la technique de modulation retenue, il pourra être nécessaire de disposer de méthodes de prévision plus détaillées pour la planification des services.

## **2 Modes de propagation**

### **2.1 Mode de propagation de l'onde de sol**

Souvent, l'onde de sol peut ne pas être constante (voir le § 4). Comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.368, l'amplitude du signal dépend de la portée et des caractéristiques électriques du sol. De plus, l'amplitude du signal n'est pas constante pour des changements d'emplacement (de l'ordre de quelques centaines de mètres).

### **2.2 Mode de propagation de l'onde ionosphérique**

Pendant la journée, l'affaiblissement du signal dans la partie basse de la région D de l'ionosphère empêche effectivement la propagation de l'onde ionosphérique. La présente Annexe s'intéresse essentiellement aux conditions nocturnes lorsque la propagation de l'onde ionosphérique peut être importante.

La couche E de l'ionosphère diminue après le coucher du soleil, mais la fréquence critique,  $f_oE$ , se trouvera dans la bande de radiodiffusion des ondes hectométriques, au moins pendant la première partie de la nuit. Les signaux à des fréquences inférieures à la fréquence critique seront toujours réfléchis par la couche E, mais il y aura également des réflexions en plusieurs bonds. Les signaux aux fréquences supérieures à la fréquence critique peuvent toujours être réfléchis par la couche E, en particulier pour les portées plus importantes, mais les signaux franchiront également la couche E pour être réfléchis dans la région F plus haute. Établie à partir d'un modèle simple de la couche E, la Fig. 1 indique les modes de propagation des signaux disponibles pour trois fréquences dans la bande des ondes hectométriques, montrant la façon dont la présence de ces modes varie avec la portée au sol et dans le temps après le coucher du soleil. Ces modes seront différenciés par rapport au mode de propagation de l'onde de sol.

La Recommandation UIT-R P.1147 contient les prévisions de la puissance composite du signal pour les modes de propagation de l'onde ionosphérique disponibles et par conséquent ne donne pas les informations nécessaires sur les amplitudes relatives de chacun des modes. Cependant, la Recommandation UIT-R P.684 donne ce type d'information, bien qu'elle ne concerne que les fréquences inférieures à 500 kHz. En particulier, cette Recommandation donne les valeurs des coefficients de réflexion ionosphérique dans les conditions d'activité solaire minimale déterminées à partir de résultats expérimentaux, et de certaines hypothèses comme indiqué dans la Recommandation.

### 3 Etallement temporel par trajets multiples

Sur la base des modèles de propagation simples précités, la Fig. 2 montre les valeurs médianes attendues du champ et les retards temporels relatifs pour 3 portées (100, 200 et 500 km) et pour deux fréquences (700 kHz et 1 MHz). Les champs sont donnés pour une puissance e.m.r.p. de 1 kW et n'incluent pas les effets liés au diagramme de rayonnement vertical de l'antenne d'émission – ce qui peut réduire les niveaux des signaux de l'onde ionosphérique aux faibles distances.

Le mode indiqué à 0 ms concerne l'onde de sol, et les intensités sont indiquées pour trois valeurs de conductivité du sol à savoir 5 S/m (eau de mer),  $10^{-2}$  (sol de bonne qualité), et  $10^{-3}$  (sol de mauvaise qualité).

Les composantes de l'onde ionosphérique sont indiquées avec le mode associé et les niveaux représentent approximativement les valeurs médianes du champ quatre heures après le coucher du soleil en période d'activité solaire minimale.

FIGURE 1  
Modes de propagation disponibles

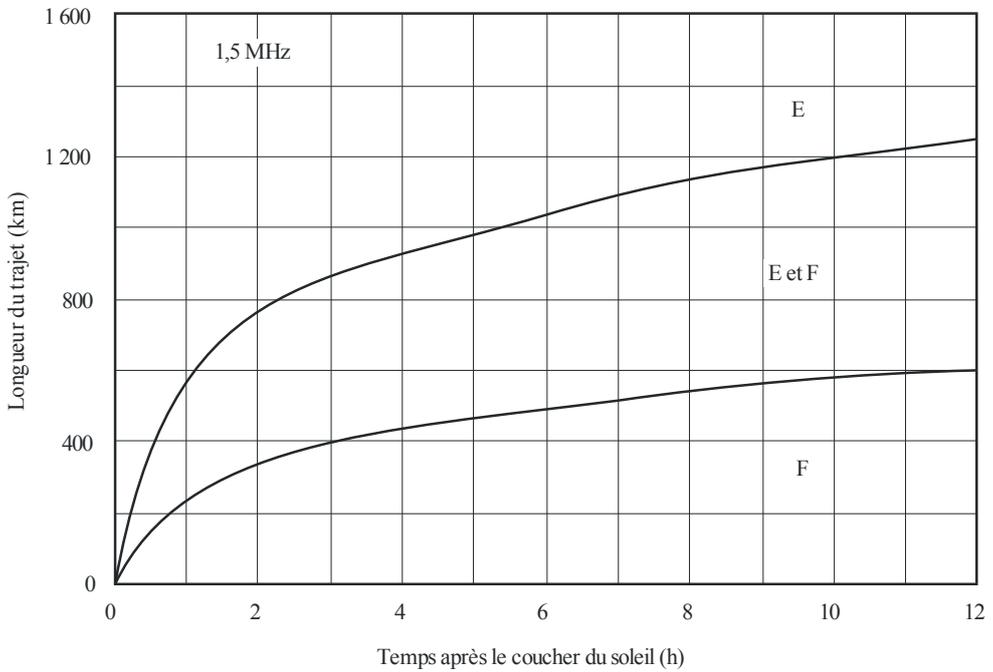
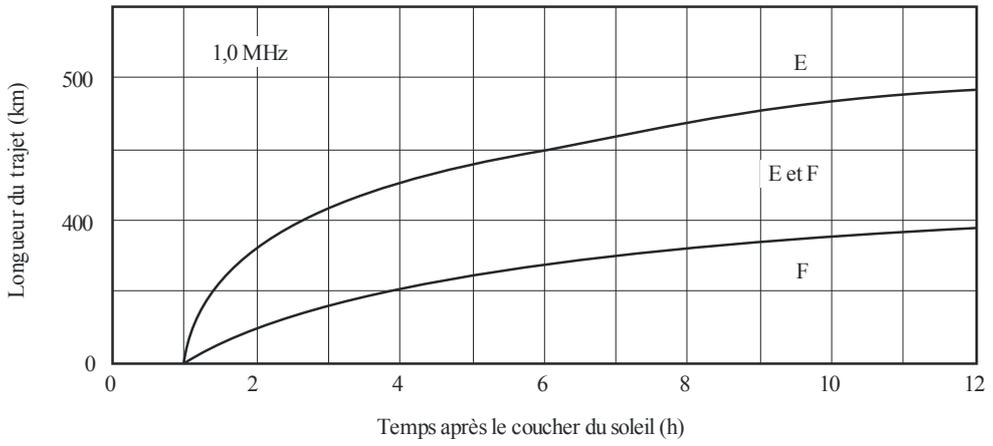
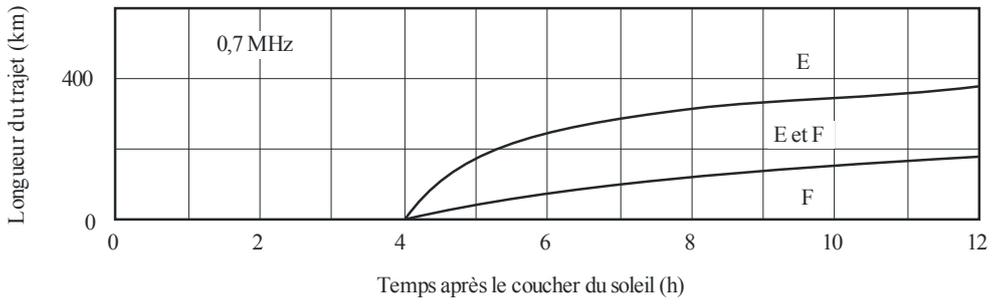
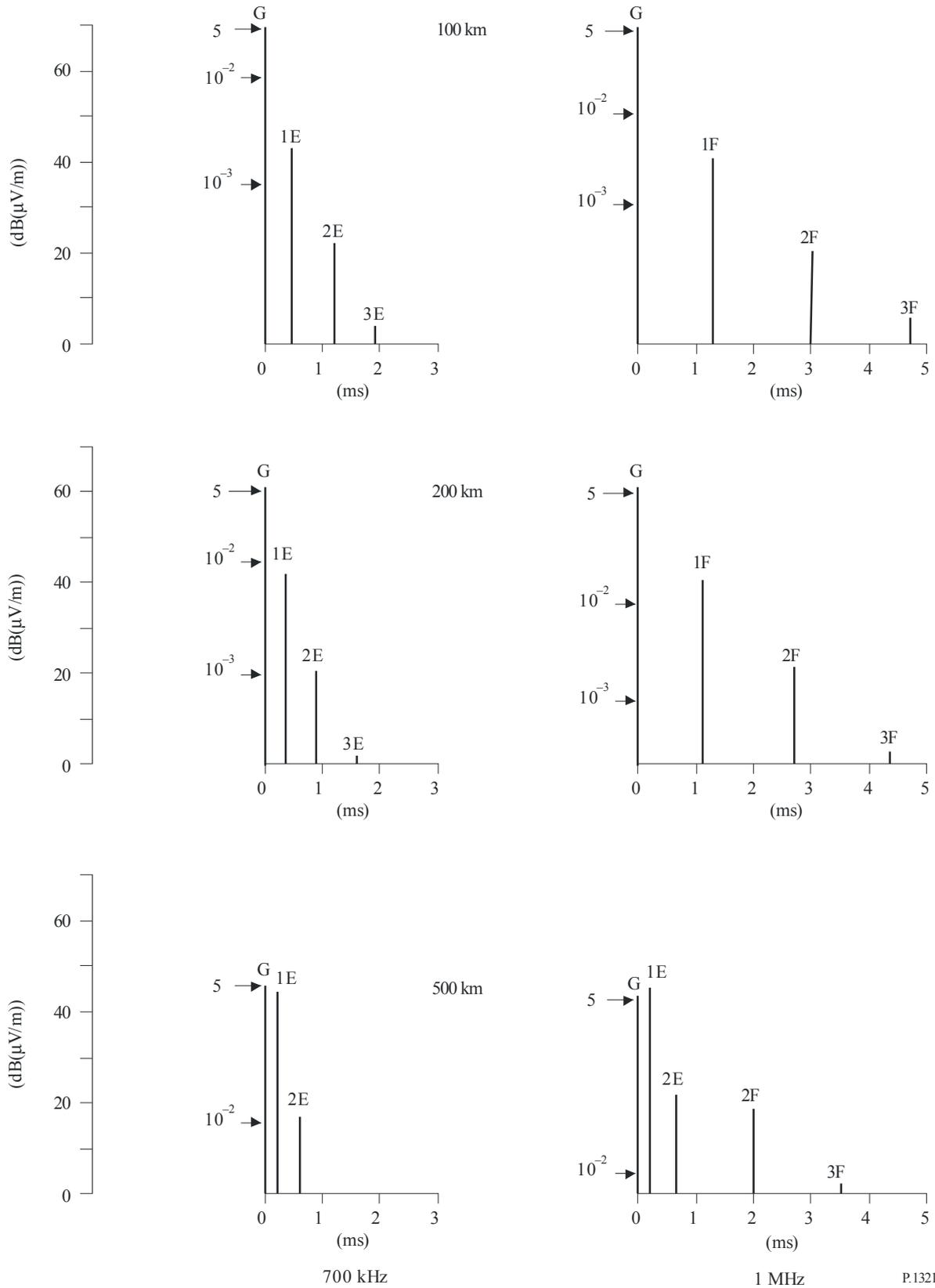
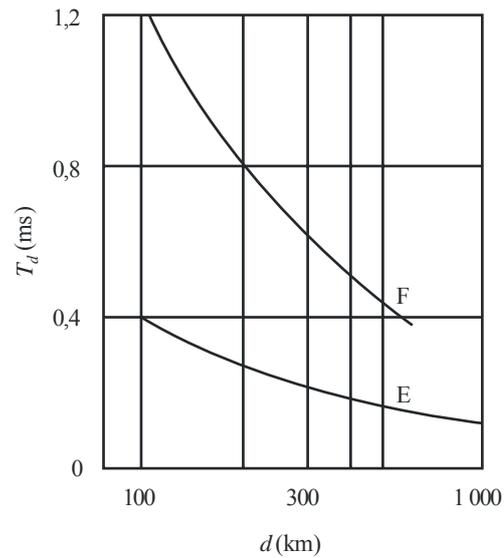


FIGURE 2  
Exemples d'étalement du retard



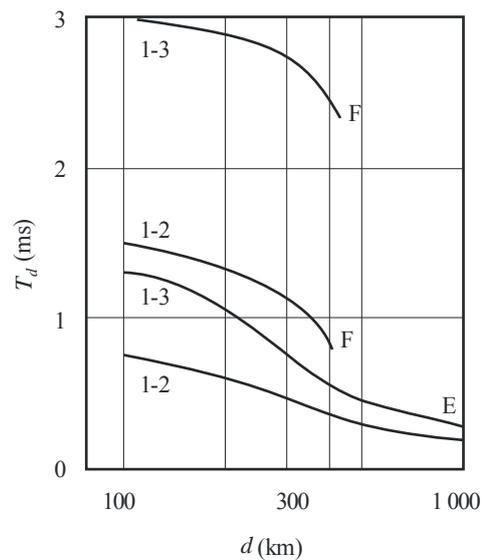
La Fig. 3 représente le retard des modes de propagation de l'onde ionosphérique en un bond dans les régions E et F par rapport à l'onde de sol pour des portées supérieures à 1 000 km et la Fig. 4 donne les retards relatifs entre les modes de propagation de l'onde de sol en un seul bond et en plusieurs bonds.

FIGURE 3  
Retard relatif du signal transmis par l'onde ionosphérique  
par rapport au signal transmis par l'onde de sol



P.1321-03

FIGURE 4  
Retard réciproque des signaux transmis par l'onde  
ionosphérique pour différents nombres de bonds



P.1321-04

La plage de distances pour laquelle les amplitudes de l'onde de sol et de l'onde ionosphérique sont similaires présente un intérêt particulier étant donné que l'évanouissement existant dans cette zone est particulièrement important. Cette zone a été appelée la zone d'évanouissement nocturne et a souvent déterminé la limite de portée pour la radiodiffusion en ondes hectométriques de bonne qualité.

## 4 Variabilité

### 4.1 Variations diurnes d'un signal au cours du temps

#### 4.1.1 Variations saisonnières

Le champ des ondes de Terre peut varier en fonction de la température hivernale. La fourchette moyenne annuelle (différence entre le champ médian par mois pendant l'été et l'hiver) pour la gamme 500-1 000 kHz est indiquée dans le Tableau 1 pour la latitude de l'hémisphère Nord où la température moyenne en janvier est inférieure à environ 4°C.

TABLEAU 1

Température moyenne en janvier dans l'hémisphère Nord (°C)	4	0	-10	-16
Gamme des champs été-hiver $U$ (dB)	4	8	13	15

Dans la bande d'ondes kilométriques, la gamme de variations du champ à des latitudes moyennes dans un climat continental (mesurée en Europe continentale et en Sibérie) dépend de la distance et de la fréquence, qui dépendent du paramètre  $q = d \cdot f^{1/2}$ , où  $d$  est la distance (km) et  $f$  la fréquence (MHz). Les valeurs de  $q < 500$ , environ, caractérisent la variation des ondes de sol et les valeurs de  $q > 500$  celle des ondes ionosphériques.

Formules correspondantes pour exprimer la gamme de variations:

- pour les trajets dans une zone peu boisée:

$$U_{s/w} = 3 + 2 \times 10^{-5} \times q^2 + 0,005q \quad \text{dB}$$

- pour les trajets dans une zone fortement boisée:

$$U_{L/w} = 6,409 \times \ln(q) - 21,124 \quad \text{dB}$$

Ici, les indices  $s/w$  et  $L/w$  désignent respectivement une zone peu boisée (jusqu'à 30% environ) et une zone fortement boisée (plus de 50%).

#### 4.1.2 Variations du champ médian par heure d'un jour à l'autre

L'écart quadratique moyen ( $\sigma_L$  dans la bande d'ondes kilométriques et  $\sigma_M$  dans la bande d'ondes hectométriques) du champ médian par heure par rapport à la valeur médiane mensuelle dépend de la longueur du trajet dans la bande d'ondes kilométriques, tandis qu'il dépend de la fréquence dans la bande d'ondes hectométriques.

Dans la bande d'ondes kilométriques, aux latitudes moyennes dans une zone moyennement boisée, on a:

$$\sigma_L = 0,073 d^{0,5} + 0,00122 d \quad \text{dB}$$

Dans la bande d'ondes hectométriques, l'écart quadratique moyen en fonction de la fréquence pour les trajets compris entre 20 km et 120 km, indépendamment de la saison, est donné par:

$$\sigma_M = 0,0018f + 0,6 \quad \text{dB}$$

Dans ces formules,  $\sigma_L$ ,  $\sigma_M$  sont des valeurs quadratiques moyenne en dB,  $d$  est la distance en km,  $f$  est la fréquence en kHz.

#### 4.2 Variations diurnes d'un signal d'un point à un autre

Dans la bande d'ondes hectométriques, on constate que les écarts types des variations de niveau d'un signal entre des points distants d'environ 1 km sont similaires dans les différentes parties du monde. La distribution de probabilité suit pratiquement une loi log-normale, avec un écart quadratique moyen  $\sigma = 3,7$  dB, comme le montre la Fig. 5.

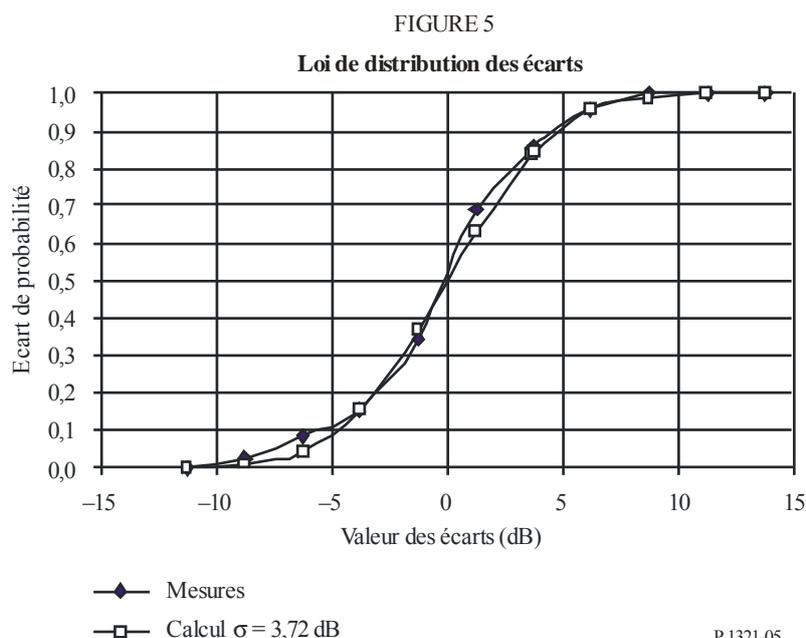
Dans un environnement urbain, dans les rues et les quartiers, l'écart type est aussi proche de 4 dB. Dans les zones urbaines densément construites, en particulier à des distances de l'émetteur (inférieures à 1 km), l'écart type augmente et atteint 7 à 8 dB. A l'intérieur des bâtiments, dans de rares cas, l'absorption additionnelle peut atteindre 20 dB.

#### 4.3 Variations nocturnes d'un signal

Les modes de propagation de l'onde ionosphérique seront sujets à une variabilité à long terme entre les nuits lorsque les valeurs médianes horaires présentent une distribution log-normale avec une plage semi-interdécile comprise entre 3,5 et 9 dB. Pendant une heure, l'évanouissement des modes individuels présentent également une distribution log-normale. Les données de mesure sont peu nombreuses, mais on peut prendre par hypothèse une valeur caractéristique de 3 dB environ pour l'écart type. La fréquence des évanouissements est comprise entre 10 et 30 évanouissements par heure.

Pour les cas où il faut prendre en considération les modes de propagation composites de l'onde de sol et de l'onde ionosphérique, c'est-à-dire dans les cas où ces modes ne peuvent être distingués dans le système de réception, la distribution des évanouissements du signal est indiquée dans l'Appendice 1 à l'Annexe 1.

Le décalage de fréquence des modes de propagation de l'onde ionosphérique, dû à l'effet Doppler résultant de la réflexion sur des couches ionosphériques en mouvement est faible.



#### 4.4 Caractéristiques des dépassements et des évanouissements dans les canaux ionosphériques dans les bandes d'ondes kilométriques et hectométriques

Pour l'analyse et la planification des systèmes de radiocommunication à modulation numérique dans les bandes d'ondes kilométriques et hectométriques, la description des caractéristiques des valeurs moyennes et de la dispersion du signal s'avère insuffisante. Il est nécessaire de prendre en compte des propriétés plus détaillées des dépassements et des évanouissements, il faut en particulier connaître la distribution de probabilité des durées des dépassements et des évanouissements, pour diverses valeurs du rapport signal/brouillage. L'Appendice 2 contient les caractéristiques statistiques des dépassements et des évanouissements qui ont été obtenues sur une période de deux ans pour deux liaisons, l'une dans la bande d'ondes kilométriques (1 550 km à 155 kHz) et l'autre dans la bande d'ondes hectométriques (860 km à 539 kHz). Les résultats concernent des latitudes géographiques moyennes dans l'hémisphère est et une activité modérée des taches solaires ( $SSN \approx 40$ ).

Les Tableaux 3 et 4 de l'Appendice 2 donnent le nombre de dépassements et d'évanouissements par heure sur chaque liaison. Les Figures 6 et 7 représentent les diagrammes de dispersion du nombre de durées des dépassements (%) pour le seuil correspondant à la valeur médiane sur chaque liaison.

## 5 Conclusions

La Recommandation UIT-R P.1407 identifie un ensemble de paramètres à utiliser pour décrire les effets liés à la propagation par trajets multiples. La «fenêtre de retard» où se trouve environ 98% de l'énergie totale, peut être déterminée à partir de la Fig. 2 comme étant inférieure à 3 ms. Il convient de noter que dans certaines circonstances la première composante des trajets multiples ne sera pas celle qui présentera l'amplitude la plus élevée.

## Appendice 1 à l'Annexe 1

L'amplitude composite du signal,  $e$ , correspondant à une combinaison du signal constant de l'onde de sol et d'un signal de l'onde ionosphérique à distribution log-normale est obtenue par addition des puissances:

$$e = \sqrt{e_e^2 + e_i^2}$$

dans laquelle  $e_e$  et  $e_i$  sont respectivement les niveaux des composantes relative à l'onde de sol et relative à l'onde ionosphérique généralement exprimés en  $\mu\text{V/m}$ .

La composante onde ionosphérique,  $e_i$ , a une distribution log-normale (voir l'équation (6) de la Recommandation UIT-R P.1057). Pour des raisons de commodité, on suppose que la composante de l'onde de sol présente également une distribution log-normale et que le résultat final est obtenu en fixant son écart type comme étant égal à 0 dB.

La combinaison des deux distributions log-normales donne lieu également à une distribution log-normale dans laquelle le niveau moyen est la somme de chacun des niveaux moyens (c'est-à-dire en amplitude et non en décibels) et sa variance est la somme des deux variances.

Pour une distribution log-normale (voir la Recommandation UIT-R P.1057) la moyenne et l'écart type des niveaux des signaux ( $\mu\text{V/m}$ ) sont donnés par:

$$\text{Moyenne} = e^m \cdot e^{\sigma^2/2}$$

$$\text{Ecart type} = \sqrt{e^{2m} \cdot e^{\sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)}$$

dans laquelle  $m$  est la moyenne et  $\sigma$  l'écart type de la distribution log-normale.

A partir de ces considérations il est possible d'évaluer les paramètres pour la distribution combinée. Le Tableau 2 contient des exemples de résultats dans lesquels l'écart type de la composante de l'onde ionosphérique log-normale est de 3 dB.

TABLEAU 2

$e_i/e_e$	Niveau moyen par rapport à la moyenne de la composante de l'onde de sol	Ecart type
0,5 (-6 dB)	+1,3 dB	0,72 dB
1 (0 dB)	+4,4	1,35
2 (+6 dB)	+5,7	2,0

## Appendice 2 à l'Annexe 1

TABLEAU 3

**Nombre de dépassements et d'évanouissements par heure  
sur une liaison dans la bande d'ondes kilométriques**

	Heure									
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	
Niveau seuil	18	19	20	21	22	23	24	01	02	
Valeur médiane (dépassement)	2,3	2,7	3,1	3,7	4,1	4,6	4,4	3,9	3,5	
Décile inférieur (évanouissement)	1,5	1,75	2	2,3	2,6	2,6	2,3	2	1,7	
Décile supérieur (dépassement)	1,6	1,8	1,9	2,1	2,25	2,4	2,4	2,3	2,2	

TABLEAU 4

**Nombre de dépassements et d'évanouissements par heure  
sur une liaison dans la bande d'ondes hectométriques**

	Heure										
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03	
Niveau seuil	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03	
Valeur médiane (dépassement)	1,8	2	2,3	2,7	2,9	3,2	3,5	3,5	3	2,7	
Décile inférieur (évanouissement)	1,5	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5	2,4	2,3	2,1	
Décile supérieur (dépassement)	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,1	2	1,8	

### Distribution de la durée des dépassements pour la valeur médiane dans les bandes d'ondes kilométriques et hectométriques

On peut utiliser la distribution suivante pour donner une approximation des caractéristiques statistiques des durées des dépassements pour la valeur médiane dans les bandes d'ondes kilométriques et hectométriques:

$$P_k = 0,38 \cdot e^{-d t^2/r^2} + 0,62 \cdot e^{-0,5 t^2/q^2} + 0,62 \cdot e^{-b t/r} \cdot \left(1 - e^{-0,5 t^2/q^2}\right) \quad (1)$$

où  $t$  (min) est supérieur ou égal à 0 et  $d$ ,  $b$ ,  $q$  et  $r$  sont des paramètres choisis.

### Distribution de la durée des dépassements pour le décile supérieur et de la durée des évanouissements pour le décile inférieur dans les bandes d'ondes kilométriques et hectométriques

La distribution de probabilité de la durée des évanouissements pour les seuils correspondant au décile supérieur et au décile inférieur est bien décrite par une distribution Gamma:

$$p_G = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t}, \quad P_G = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot \int t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t} dt \quad (2)$$

où:

$p_G$ : distribution de probabilité

$P_G$ : distribution cumulative

$t$ : durée (min)

$\lambda$  et  $\alpha$ : paramètres choisis.

Le Tableau 5 ci-dessous indique la distribution et les valeurs des paramètres pour plusieurs niveaux seuils.

TABLEAU 5  
Distribution et paramètres pour plusieurs seuils

Bande	Niveau seuil	Dépassement ou évanouissement	Distribution	Paramètres
Ondes kilométriques	valeur médiane	dépassement	Equation (1)	$b = 0,32, d = 3,0, q = 4,0, r = 3,8$
Ondes kilométriques	décile inférieur	évanouissement	Equation (2)	$\alpha = 2,00, \lambda = 0,67$
Ondes kilométriques	décile supérieur	dépassement	Equation (2)	$\alpha = 2,20, \lambda = 0,67$
Ondes hectométriques	valeur médiane	dépassement	Equation (1)	$b = 0,3, d = 0,8, q = 1,8, r = 2,2$
Ondes hectométriques	décile inférieur	évanouissement	Equation (2)	$\alpha = 3,30, \lambda = 1,13$
Ondes hectométriques	décile supérieur	dépassement	Equation (2)	$\alpha = 2,95, \lambda = 0,7$

Il ressort des données expérimentales que la différence entre les valeurs médianes de la durée des dépassements pour les bandes d'ondes kilométriques et hectométriques est peu importante: environ 1 min (5 min pour la bande d'ondes kilométriques et 4 min pour la bande d'ondes hectométriques).

FIGURE 6

Nombre de durées des dépassements (%) par heure pour le seuil correspondant à la valeur médiane sur une liaison dans la bande d'ondes kilométriques et distribution intégrale

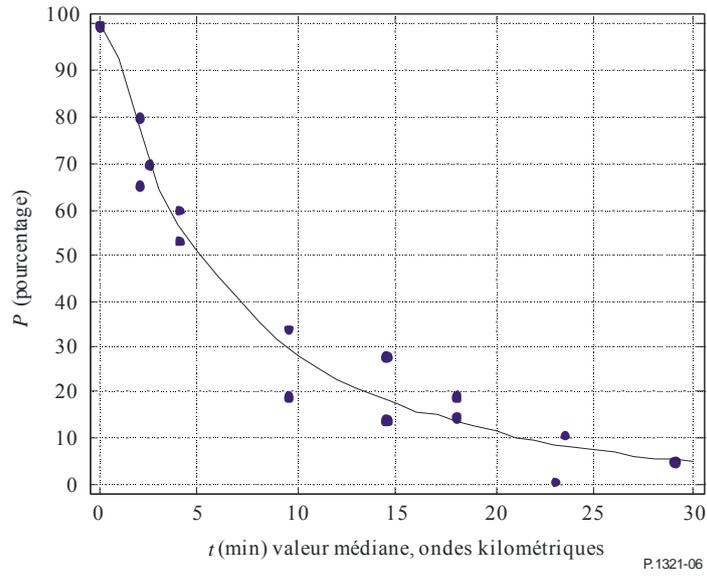


FIGURE 7

Nombre de durées des dépassements (%) par heure pour le seuil correspondant à la valeur médiane sur une liaison dans la bande d'ondes hectométriques et distribution intégrale

