

Union internationale des télécommunications

**UIT-R**

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R P.534-6**  
(09/2021)

**Méthode de calcul du champ en présence  
d'ionisation sporadique de la région E**

**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 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 œuvre 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

(Également 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>	Émissions 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, 2022

© UIT 2022

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.534-6

**Méthode de calcul du champ en présence d'ionisation sporadique de la région E**

(Question UIT-R 221/3)

(1978-1982-1986-1990-1999-2012-2021)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que la propagation par l'intermédiaire de l'ionisation sporadique de la région E constitue une source importante de brouillage dans la partie inférieure de la gamme des ondes métriques;
- b) que la méthode de calcul du champ en présence d'ionisation sporadique de la région E jointe en Annexe 1 à la présente Recommandation s'est révélée applicable et fiable;
- c) qu'il n'existe pas d'autre méthode pratique,

*recommande*

- 1 qu'il convient d'adopter la méthode de calcul décrite dans l'Annexe 1 pour évaluer aux latitudes géomagnétiques basses et moyennes le champ en présence d'ionisation sporadique de la région E;
- 2 qu'il convient de recueillir des données supplémentaires sur foEs et sur le champ en présence d'ionisation sporadique de la région E, notamment en ce qui concerne les régions de haute latitude. Entre temps, il convient d'être prudent si on utilise dans ces régions la méthode décrite à l'Annexe 1.

**Annexe 1****Propagation par la couche sporadique E****1 Introduction**

On trouvera ci-après la description d'une méthode de calcul statistique du champ en présence d'ionisation sporadique de la région E, Es, dans les bandes d'ondes métriques et éventuellement dans la partie supérieure des bandes décamétriques, jusqu'à une distance de 4 000 km. Cette méthode est fondée sur le fait que le champ présente une corrélation très étroite avec foEs, fréquence critique de la couche E sporadique sous incidence verticale, au point milieu du trajet. Il convient de noter que la méthode s'applique bien à un circuit radioélectrique ionosphérique dans le cas où le mode de propagation normal par la couche E ou F2 n'existe pas. Lorsqu'on emploie la méthode dans les bandes d'ondes décamétriques, il faut donc faire preuve de prudence s'il existe une possibilité de propagation par la couche normale (pour la propagation par la couche normale, voir la Recommandation UIT-R P.533). Les données fournies par la présente Recommandation concernent uniquement les latitudes géomagnétiques comprises entre  $\pm 60^\circ$ .

Dans la région équatoriale, certains trajets ionosphériques de propagation à moyenne distance (500 à 2000 km) indiquent très clairement une propagation par Es, que l'on doit distinguer des effets nettement plus importants de la propagation transéquatoriale dans la région. Le champ de propagation par Es à basse latitude est à peu près identique à celui fourni par les évaluations pour les latitudes moyennes figurant dans la présente Annexe. Toutefois, la différence la plus importante concerne le pourcentage de temps en fonction de la fréquence critique à incidence verticale (foEs) (voir les Fig. 2 à 6 pour les latitudes magnétiques moyennes). En conséquence, on utilisera les nouvelles Fig. 16 à 21 pour les régions de basse latitude magnétique.

La méthode présente les caractéristiques suivantes:

- On fait la prévision du champ Es en établissant une correspondance statistique entre une valeur de l'affaiblissement ionosphérique et la valeur de foEs correspondant à un taux d'occurrence donné.
- L'affaiblissement ionosphérique du signal associé au champ Es est représenté par une fonction du rapport de la fréquence du signal,  $f$ , à foEs et de la distance à la surface de la Terre entre les stations d'émission et de réception.
- On se sert de graphiques de probabilité et de cartes mondiales de foEs pour accélérer et faciliter l'évaluation du champ Es.

## 2 Formule pour le champ Es

On peut exprimer le champ Es ou la tension à l'entrée du récepteur par la formule suivante:

$$E = E_0 + P + G_t - L_t - \Gamma \quad \text{dB} \quad (1)$$

$$E_0 = 104,8 - 20 \log l \quad \text{dB} \quad (1a)$$

$$V = V_0 + P + G_t + G_r - L_t - L_r - \Gamma \quad (2)$$

$$V_0 = 133 - 20 \log l - 20 \log f \quad (2a)$$

où:

$E$ : champ prévu (dB( $\mu$ V/m))

$E_0$ : champ théorique en fonction inverse de la distance (dB( $\mu$ V/m)), pour une puissance rayonnée de 1 kW et pour une antenne d'émission isotrope

$V$ : tension médiane aux bornes d'entrée du récepteur (dB( $\mu$ V))

$V_0$ : tension théorique en fonction inverse de la distance à l'entrée du récepteur, pour une puissance rayonnée de 1 kW avec des antennes d'émission et de réception isotropes adaptées à une charge de 50  $\Omega$  pour un signal de fréquence  $f$  (MHz)

$P$ : puissance de l'émetteur (dB(1 kW))

$G_t$ : gain d'antenne d'émission par rapport à une antenne isotrope (dB)

$G_r$ : gain d'antenne de réception par rapport à une antenne isotrope (dB)

$L_t$ : affaiblissements, dont affaiblissement dans la ligne d'alimentation et affaiblissement par défaut d'adaptation de l'antenne d'émission (dB)

$L_r$ : affaiblissements, dont affaiblissement dans la ligne d'alimentation et affaiblissement par défaut d'adaptation de l'antenne de réception (dB)

$\Gamma$ : affaiblissement ionosphérique (dB) représenté par les courbes en tirets de la Fig. 1

$l$ : longueur du trajet de transmission (km) (voir la formule (5))

$f$ : fréquence du signal (MHz).

Pour le calcul par ordinateur, l'affaiblissement  $\Gamma$  d'un signal s'étant propagé par un seul bond,  $\Gamma_{(1\ bond)}(d)$ , est donné approximativement par:

$$\Gamma_{(1\ bond)}(d) = \left\{ \frac{40}{1 + \left(\frac{d}{130}\right) + \left(\frac{d}{250}\right)^2} + 0,2 \left(\frac{d}{2\ 600}\right)^2 \right\} \left(\frac{f}{foEs}\right)^2 + \exp\left(\frac{d - 1\ 660}{280}\right) \quad (3)$$

et l'affaiblissement  $\Gamma$  pour un signal s'étant propagé par deux bonds,  $\Gamma_{(2\ bonds)}(d)$ , approximativement par:

$$\Gamma_{(2\ bonds)}(d) = 2,6 \Gamma_{(1\ bond)}\left(\frac{d}{2}\right) \quad (4)$$

et

$l$ : longueur du trajet de transmission (km)

$$l = 2 \left\{ R_0^2 + (R_0 + h)^2 - 2R_0(R_0 + h) \cos(d/(2R_0)) \right\}^{1/2} \quad (5)$$

où:

$R_0$ : rayon effectif de la Terre, 8 500 km

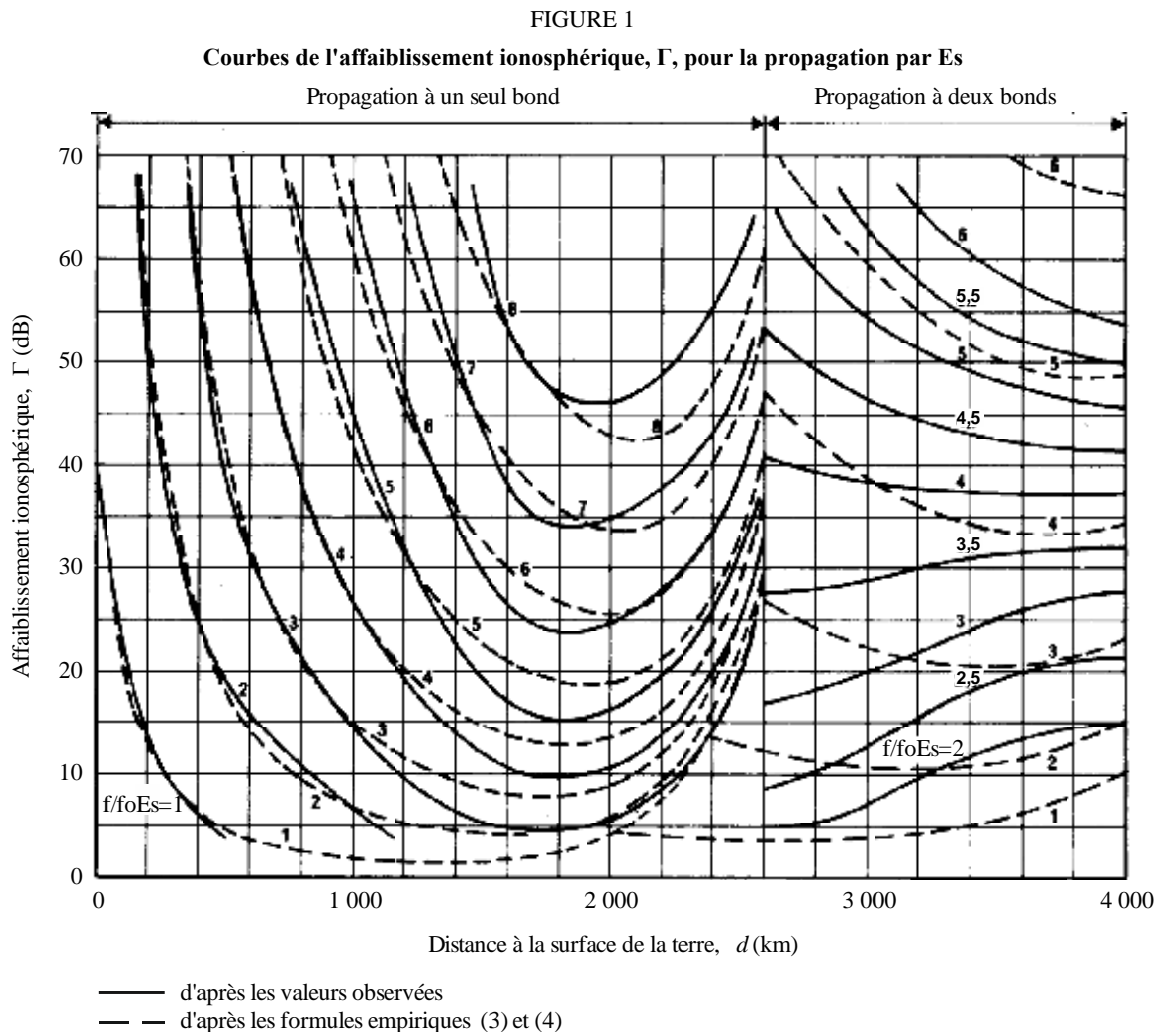
$h$ : hauteur de la couche Es, 120 km

$d$ : distance à la surface de la Terre entre les stations d'émission et de réception (km)

$f$ : fréquence du signal (MHz)

foEs: fréquence critique de Es sous incidence verticale, pour un taux d'occurrence donné (MHz).

La précision avec laquelle les formules (3) et (4) reproduisent les valeurs mesurées de  $\Gamma$  est indiquée à la Fig. 1 (courbes en tirets). Il convient de limiter l'emploi de la formule (3) aux distances inférieures à 2 600 km et à des valeurs de  $f/foEs$  comprises entre 1 et 8; l'erreur sera alors inférieure à 5 dB. Il convient de limiter l'emploi de la formule (4) aux distances comprises entre 2 600 et 4 000 km et à des valeurs de  $f/foEs$  comprises entre 2 et 5,5; l'erreur sera alors inférieure à 10 dB.



P.0534-01

### 3 Méthode de calcul du champ Es

Le champ Es est calculé en effectuant les opérations successives suivantes:

*Étape 1:* calculer la valeur de  $E_0$  (ou  $V_0$ ) correspondant à une valeur indiquée de  $l$  en utilisant la formule (1a) (ou la formule (2a)).

*Étape 2a:* (latitude d'inclinaison du point milieu en dehors de  $\pm 20^\circ$ ): lire la valeur de foEs pour un pourcentage donné de temps d'apparition dans la région et pour la saison désirées, en utilisant une des Fig. 2 à 6. Pour une prévision plus précise, lire la valeur du pourcentage de temps où foEs dépasse 7 MHz au point milieu du trajet, en utilisant la carte voulue parmi celle des Fig. 12 à 15, et déterminer la valeur de foEs en traçant une nouvelle droite sur celle des Fig. 2 à 6 qui convient, ainsi que cela est indiqué au § 4.1. Pour une prévision des variations diurnes, lire la valeur de foEs sur celle des Fig. 7 à 11 qui convient.

*Étape 2b:* (latitude d'inclinaison du point milieu comprise entre  $\pm 20^\circ$ ): déterminer l'inclinaison magnétique au point de réflexion ionosphérique et lire sur les Fig. 16 à 21, la valeur de foEs pour un pourcentage donné de temps d'apparition dans la région et pour la saison désirées.

*Étape 3:* calculer  $f/foEs$ .

*Étape 4:* en utilisant les courbes en tirets de la Fig. 1, lire la valeur de  $\Gamma$  correspondant à la valeur donnée de  $d$  et à la valeur calculée de  $f/foEs$  ou, si l'on cherche une valeur approchée, calculer  $\Gamma$  au moyen des formules (3) et (4).

Étape 5: calculer la valeur estimée de  $E$  (ou  $V$ ) en appliquant la formule (1) (ou la formule (2)), en se servant des valeurs données de  $P$ ,  $G_t$ ,  $G_r$ ,  $L_t$  et  $L_r$  et de la valeur obtenue pour  $\Gamma$ .

#### 4 Probabilité d'occurrence de foEs

Il faut spécifier les caractéristiques statistiques de foEs, étant donné que cette grandeur a un comportement sporadique en fonction des emplacements et du temps. Pour les prévisions très exactes, on peut se servir d'une carte mondiale de foEs comme celle qui figure dans la Recommandation UIT-R P.1240. En revanche, on peut se contenter de données statistiques simplifiées sur foEs si l'on se borne à rechercher la tendance générale de la variation temporelle.

Pour la prévision du champ moyen Es, on trace des courbes de probabilité de foEs pour cinq régions de latitude moyenne: Europe et Afrique du Nord, Amérique du Nord, Asie (Extrême-Orient), Amérique du Sud et une région intermédiaire entre ces régions (voir les Fig. 2 à 11). Aux basses latitudes, les Fig. 16 à 21 présentent les courbes de probabilité de foEs pour l'Amérique, l'Asie et l'Afrique. Les caractéristiques des régions de haute latitude devront être précisées ultérieurement.

##### 4.1 Latitudes moyennes

Pour obtenir des caractéristiques géographiques précises de foEs, on se sert de cartes mondiales du pourcentage de temps pour lequel foEs est égal ou supérieur à 7 MHz pendant les mois de mai à août (été dans l'hémisphère nord), novembre à février (été dans l'hémisphère sud), mars, avril, septembre et octobre (mois d'équinoxe, nord et sud) et pour douze mois (ces cartes sont données dans les Fig. 12 à 15). Sur ces cartes sont tracées les courbes du pourcentage de temps entre les latitudes géomagnétiques (ou dipolaires) de 60° N et 60° S. En outre, une région de basse latitude autour de l'équateur d'inclinaison magnétique est exclue.

Les Fig. 2 à 6 montrent la relation qui existe entre la valeur de foEs et le pourcentage de temps d'occurrence. Dans ces figures, les courbes relatives aux mois d'été, aux mois d'hiver et aux mois d'équinoxe sont toutes des lignes droites reliant deux points qui correspondent aux pourcentages de temps pendant lesquels foEs dépasse respectivement 7 MHz et 10 MHz. Ces courbes obéissent à la loi de probabilité de Phillips qui a un caractère rigoureusement empirique convenant parfaitement aux latitudes moyennes pour des pourcentages de temps inférieurs à 30% environ et pour des fréquences supérieures à foE, fréquence critique de la couche normale E. Il convient d'utiliser la loi de Phillips avec prudence pour les fréquences supérieures à 100 MHz environ et pour les latitudes équatoriales et élevées. Cette loi s'exprime par:

$$\log p = a + bf \quad (6)$$

où:

$p$ : probabilité foEs  $> f$

$f$ : fréquence (MHz)

$a$  et  $b$ : constantes ajustables, de telle sorte que  $b$  soit la pente dans une courbe  $\log p$  en fonction de  $f$ .

Une courbe indiquant la moyenne annuelle donne, pour les faibles pourcentages de temps, des pourcentages de temps approximativement égaux aux tiers des pourcentages correspondants pour les mois d'été. À titre de comparaison, on a ajouté des courbes de probabilité relatives aux heures de jour (8 h 00-23 h 00) pour les mois d'été, époque où l'on observe l'intensité maximale de l'ionisation E sporadique.

Supposons que, dans une certaine région, il y a une différence entre un pourcentage de temps pour 7 MHz obtenu avec les cartes mondiales des Fig. 12, 13, 14 ou 15 et le pourcentage fourni par la courbe de probabilité moyenne des Fig. 2 à 6. On peut obtenir une valeur de foEs pour un pourcentage de temps donné en traçant une nouvelle courbe de probabilité parallèle à la courbe initiale pour la région considérée, et déplacée par rapport à cette courbe initiale d'une quantité égale à la différence constatée.

Les Fig. 7 à 11 montrent les variations diurnes de l'occurrence de foEs pour des tranches de 4 heures à l'intérieur des quatre régions définies plus haut, pour les mois d'été et les autres mois conformément à leurs propres caractéristiques. On voit que foEs accuse un minimum très net après midi, dans les régions B et C, surtout en été. Pour la prévision exacte du comportement de l'intensité des signaux Es, il faudra peut-être utiliser des tranches horaires plus étroites que 4 heures pour représenter les variations diurnes de foEs.

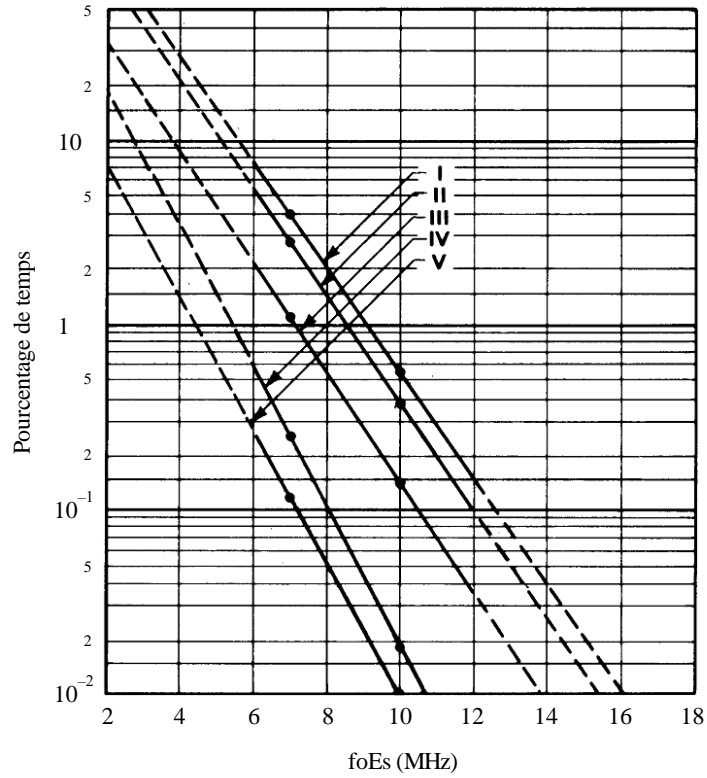
#### **4.2 Basses latitudes**

Les Fig. 16 à 21 montrent la relation entre la valeur de foEs et le pourcentage de temps d'apparition de foEs aux basses latitudes. Ces figures permettent de constater une différence très nette entre une ceinture très étroite autour de l'équateur d'inclinaison (angle d'inclinaison  $\pm 6^\circ$ ) et la région adjacente avec une inclinaison allant jusqu'à  $\pm 20^\circ$ , ces deux régions pouvant être appelées respectivement région équatoriale et région subéquatoriale. Comme on peut le constater en comparant les Fig. 2 à 6, seule la région subéquatoriale (et non pas la région équatoriale) est sujette à la loi de probabilité de Phillips.



FIGURE 2

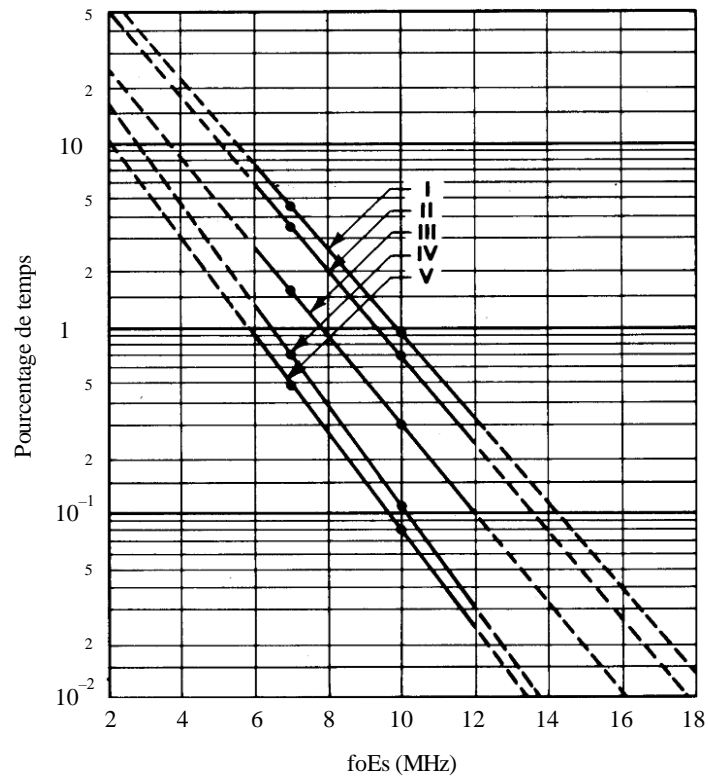
Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la Région A



- Région A: Europe et Afrique du Nord  
 I: de mai à août (8 h 00-23 h 00)  
 II: de mai à août  
 III: moyenne annuelle  
 IV: mars, avril, septembre et octobre  
 V: de novembre à février

FIGURE 3

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la Région B

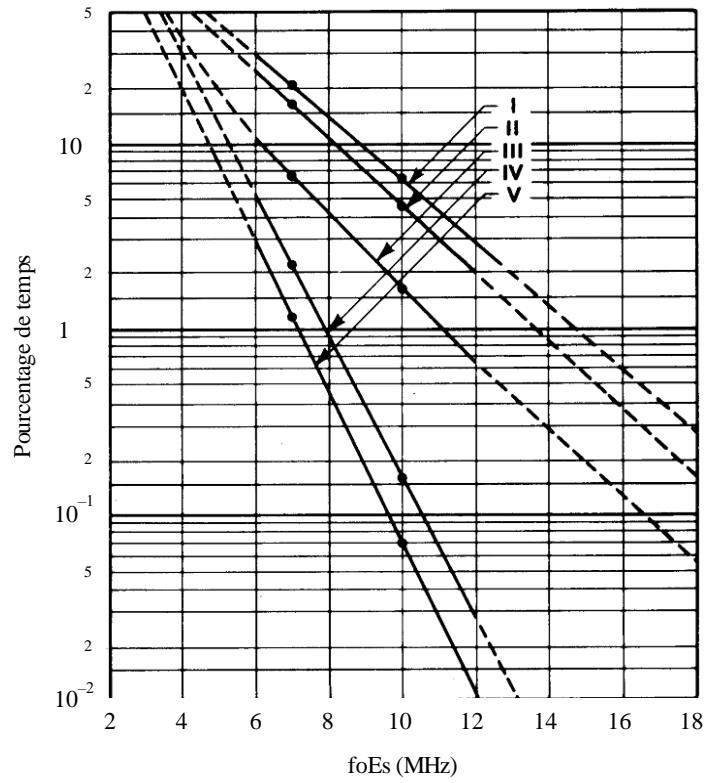


Région B: Amérique du Nord  
 I: de mai à août (8 h 00-23 h 00)  
 II: de mai à août  
 III: moyenne annuelle  
 IV: mars, avril, septembre et octobre  
 V: de novembre à février

P.0534-0 3

FIGURE 4

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la Région C

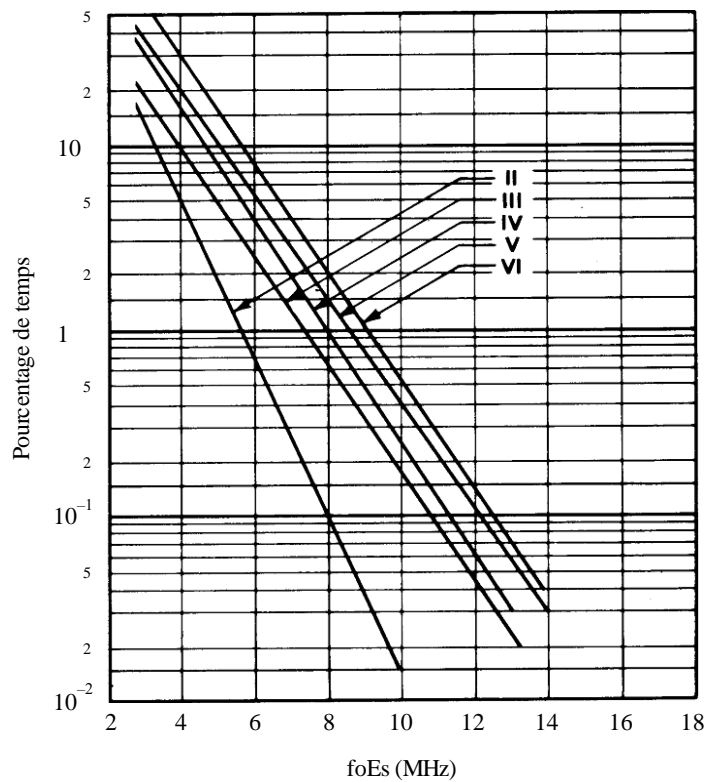


Région C: Asie (Extrême-Orient)  
 I: de mai à août (8 h 00-23 h 00)  
 II: de mai à août  
 III: moyenne annuelle  
 IV: mars, avril, septembre et octobre  
 V: de novembre à février

P0534-0 4

FIGURE 5

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la Région D

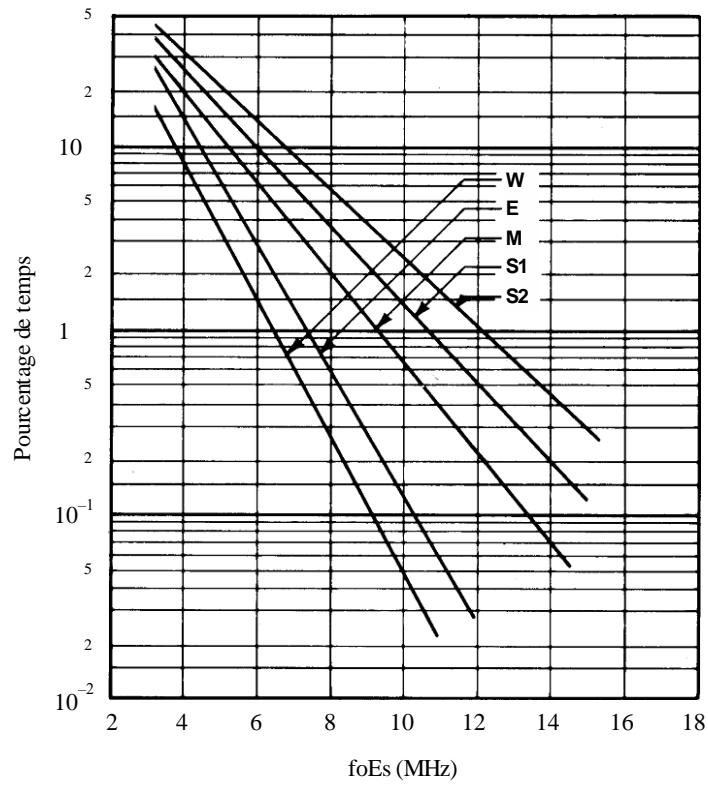


Région D: Amérique du Sud  
 II: de mai à août  
 III: moyenne annuelle  
 IV: mars, avril, septembre et octobre  
 V: de novembre à février  
 VI: de novembre à février (8 h 00-23 h 00)

P.0534-05

FIGURE 6

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués



Valeurs moyennes régions A, B, C et D

- S1: été
- S2: été (8 h 00-23h 00)
- M: moyenne annuelle
- E: équinoxe
- W: hiver

FIGURE 7

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région A (Europe et Afrique du Nord)

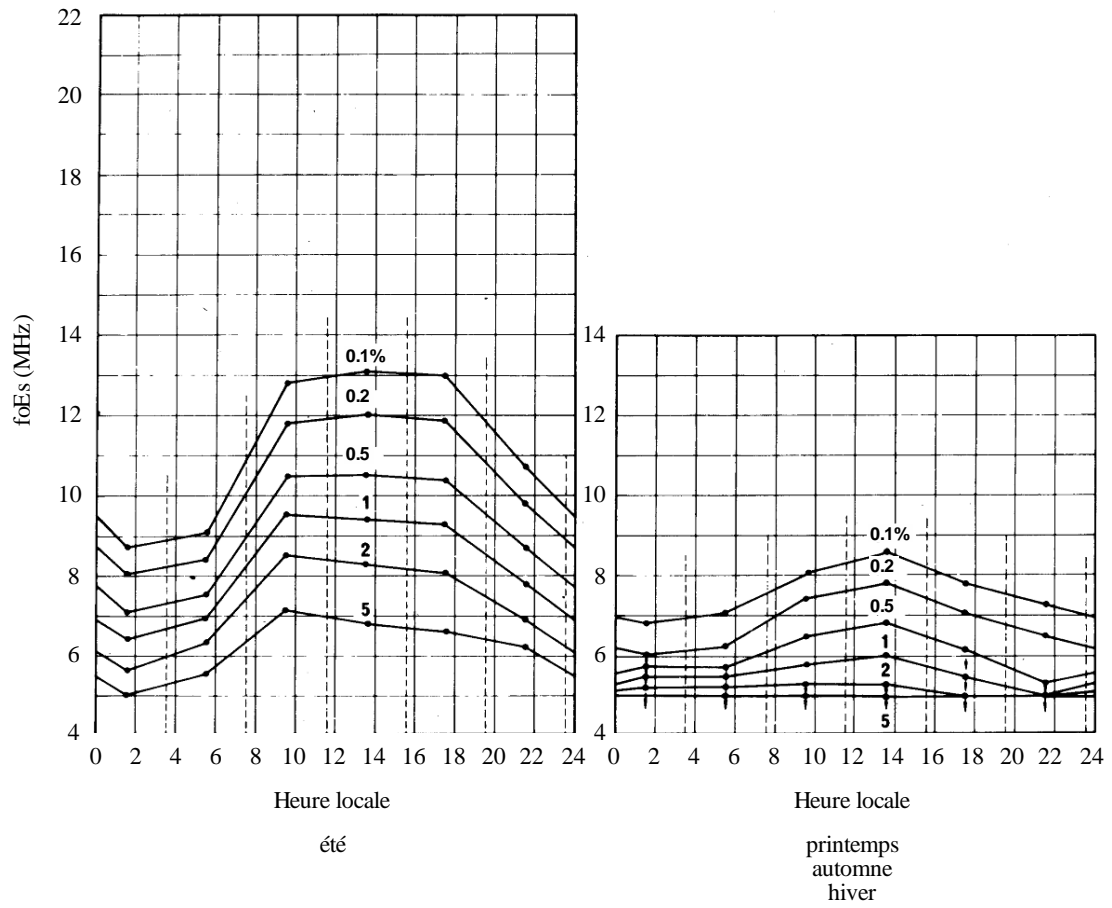


FIGURE 8

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région B (Amérique du Nord)

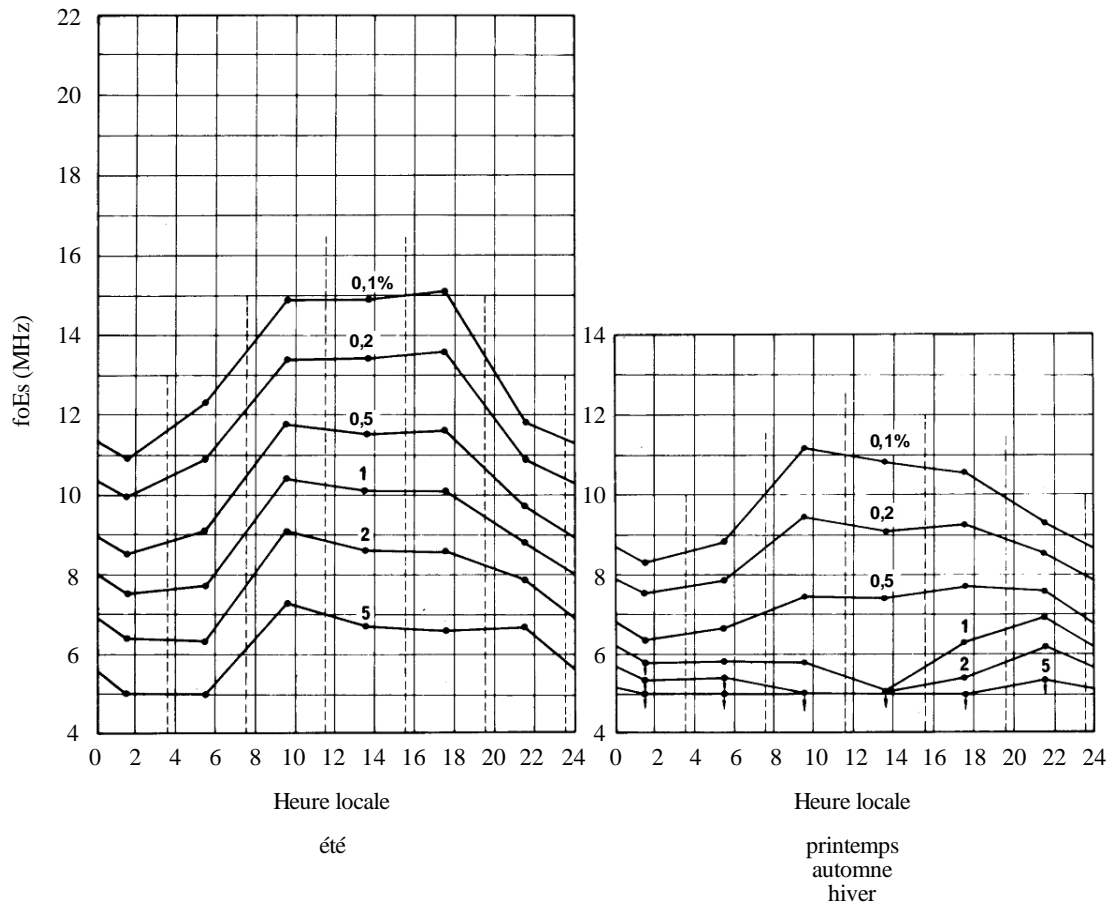


FIGURE 9

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, comme paramètre sur la courbe, à l'intérieur de tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région C (Asie (Extrême-Orient))

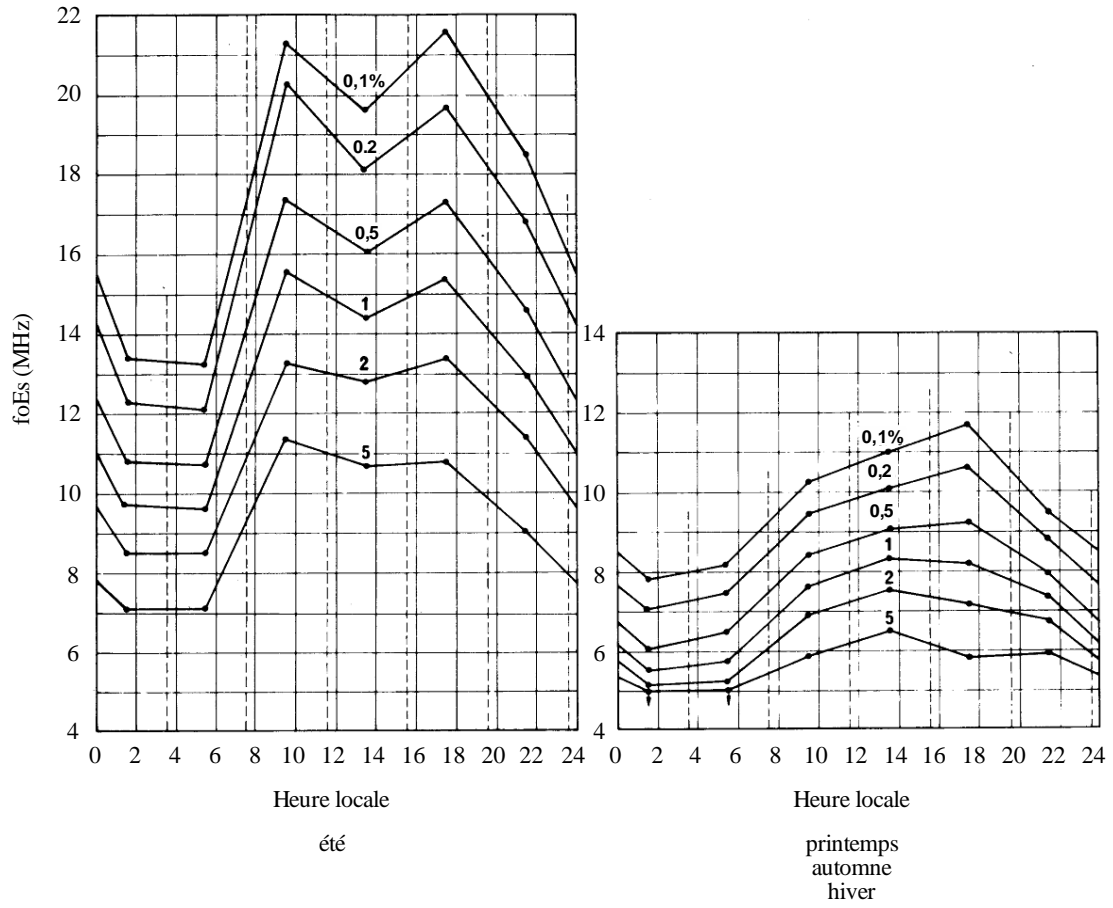




FIGURE 10

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région D (Amérique du Sud)

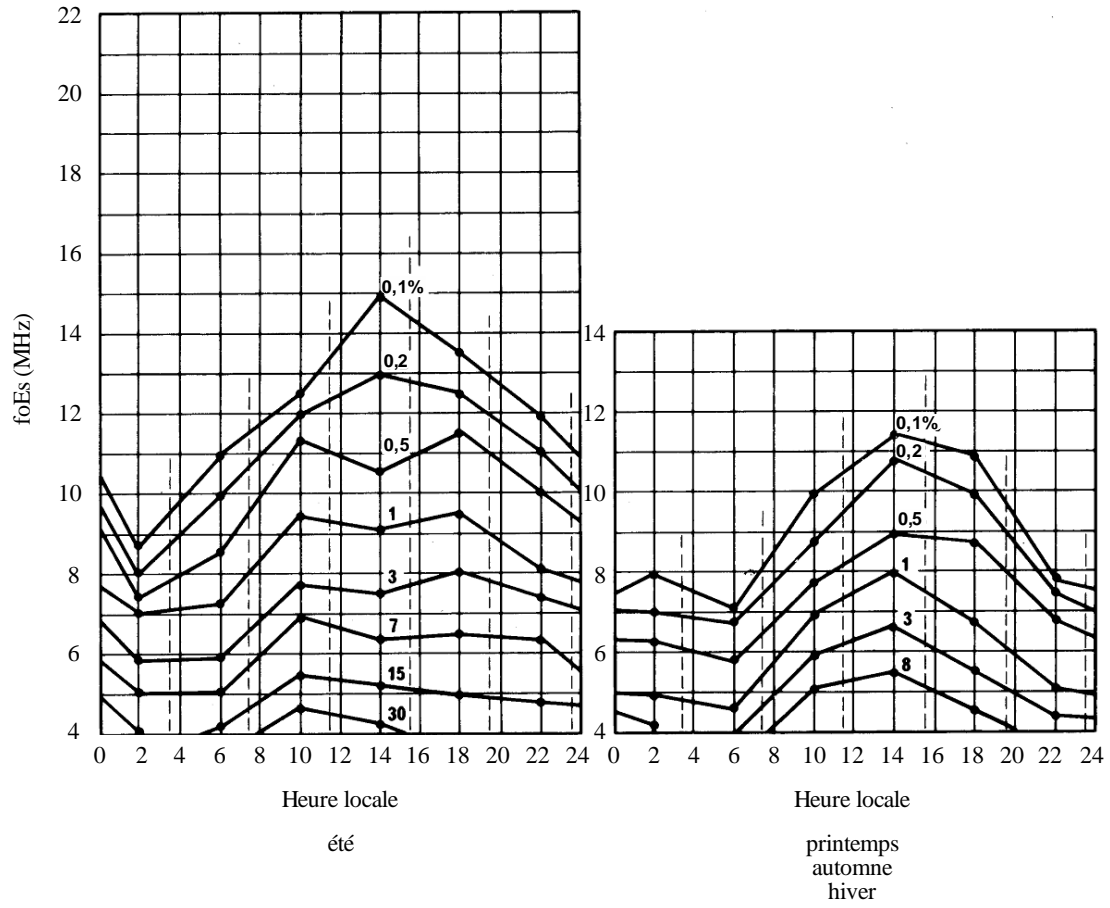


FIGURE 11

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans les régions A, B, C et D

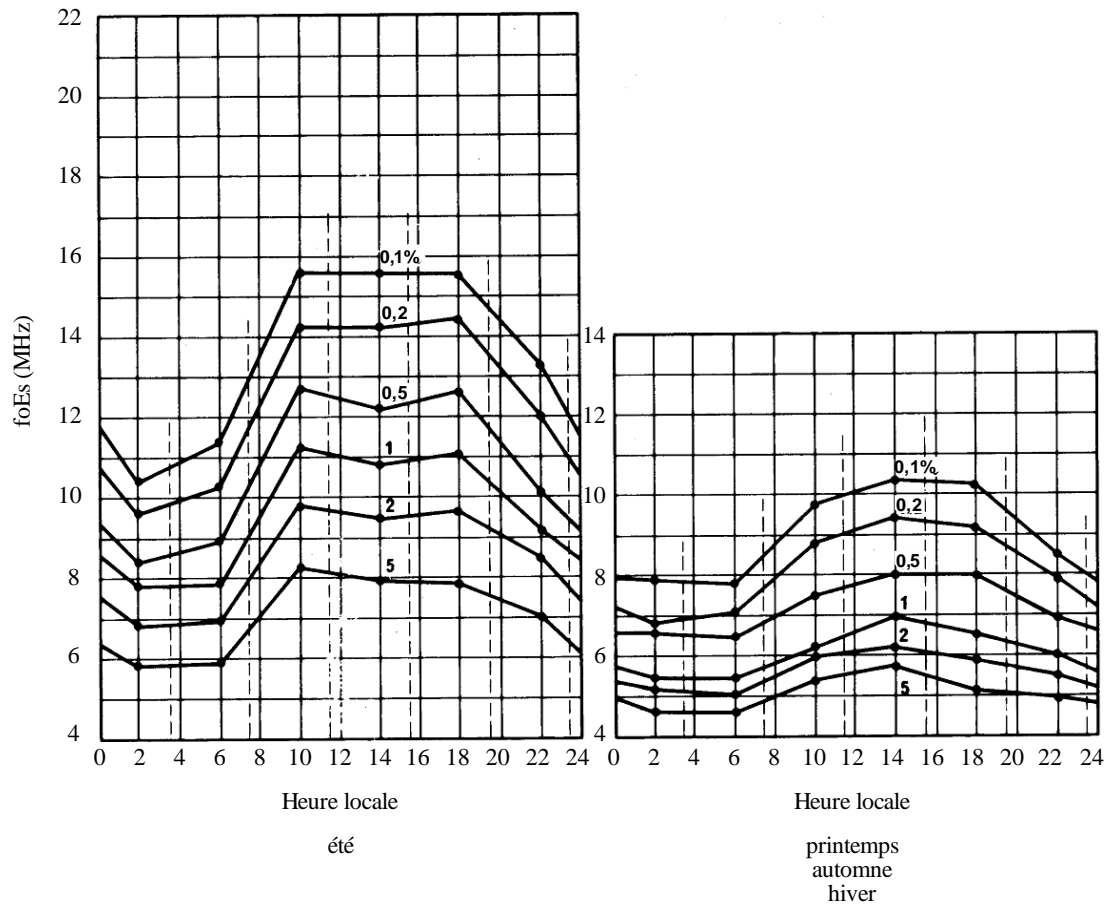
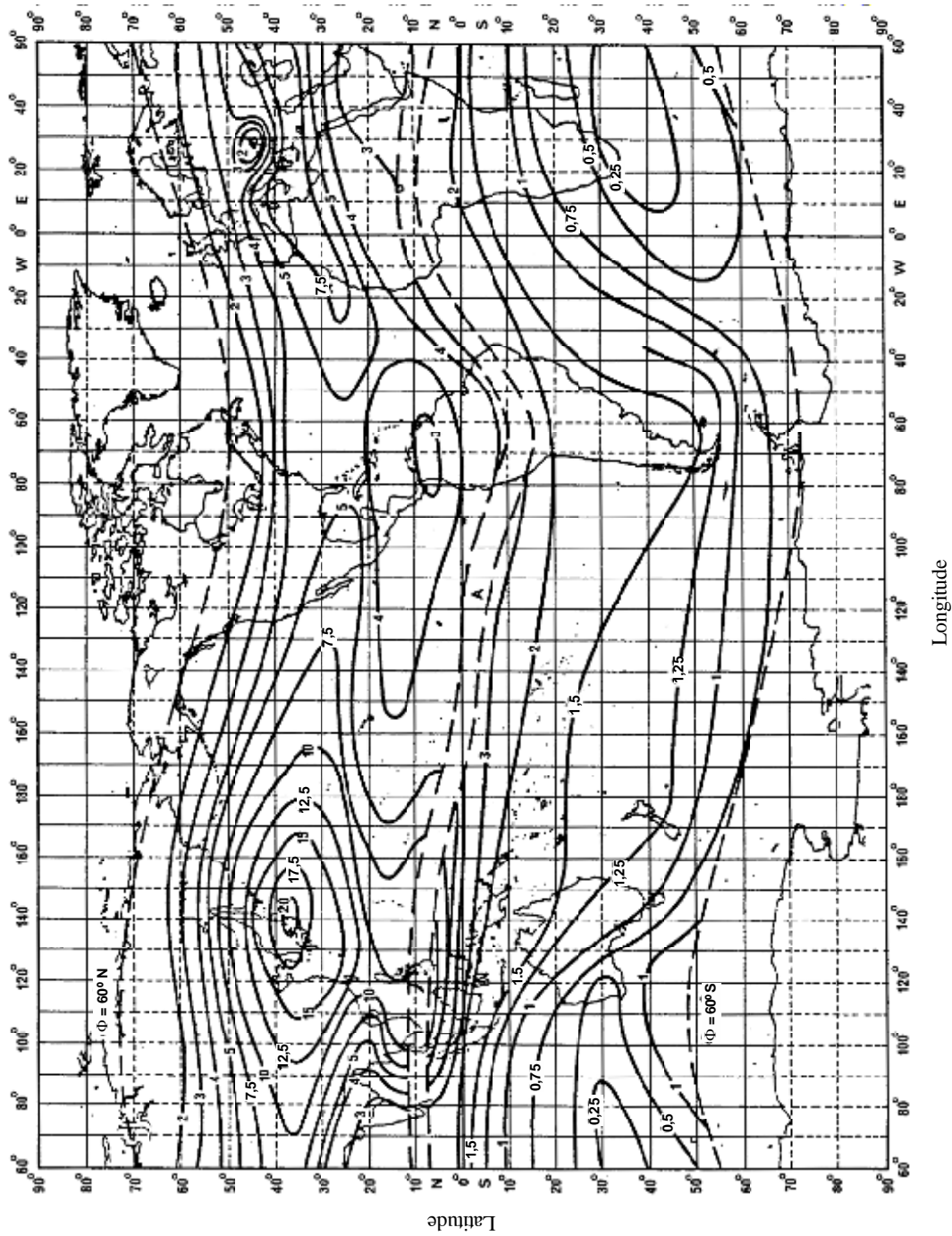


FIGURE 12

Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de mai, juin, juillet et août

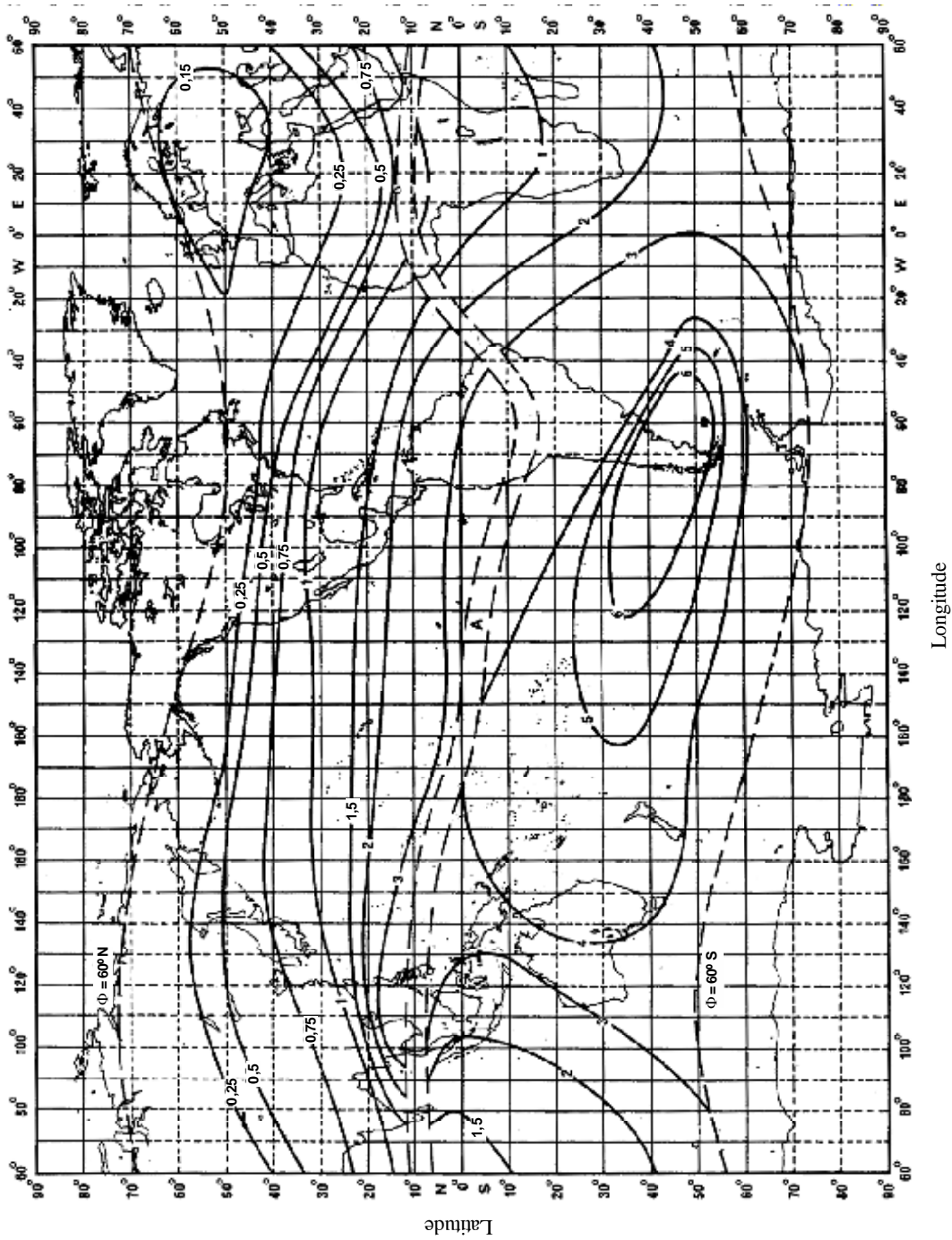


A: région de basse latitude (voir le § 4)

P.0534-12

FIGURE 13

Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de novembre, décembre, janvier et février

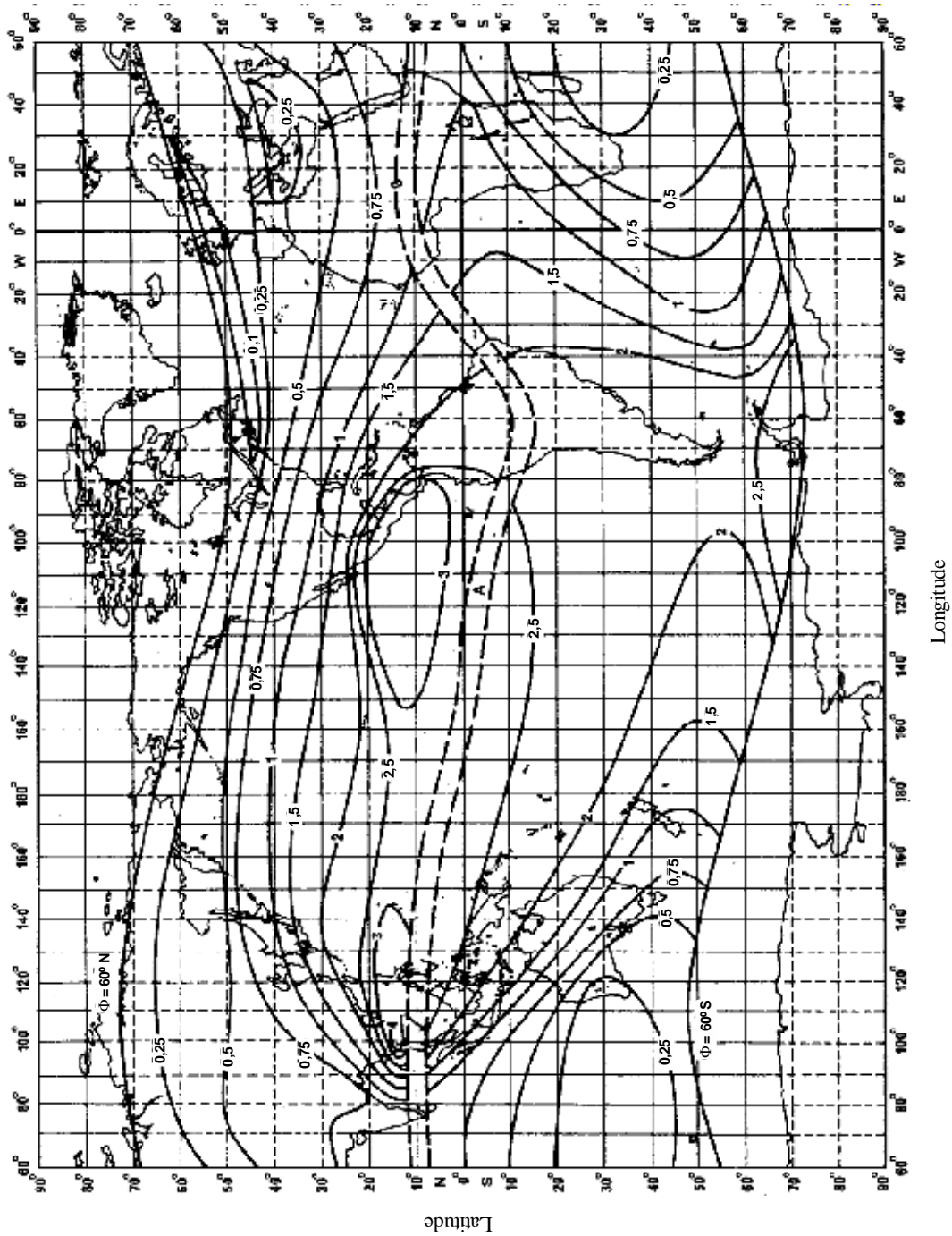


A: région de basse latitude (voir le § 4)

P.0534-13

FIGURE 14

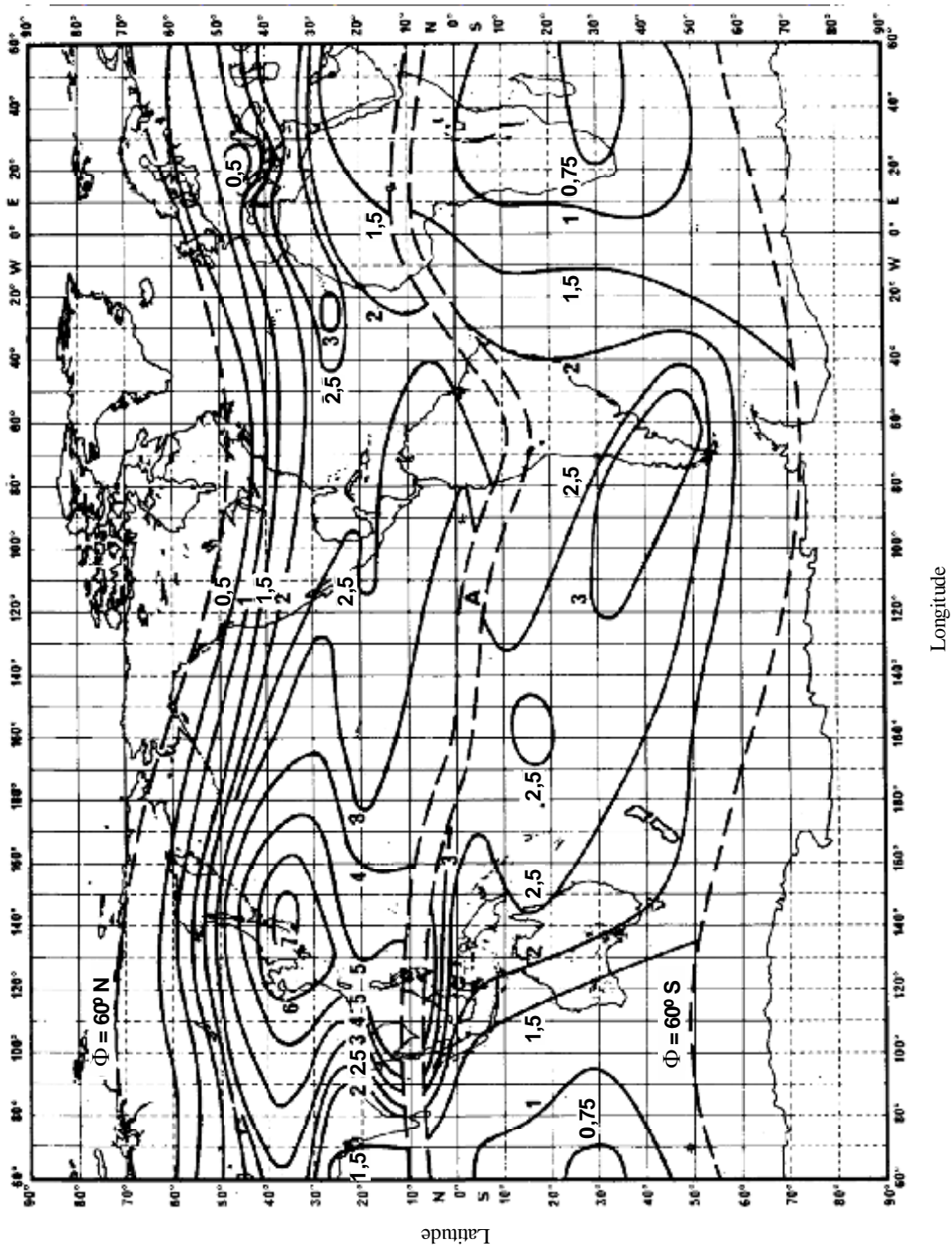
Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de mars, avril, septembre et octobre



A: région de basse latitude (voir le § 4)

FIGURE 15

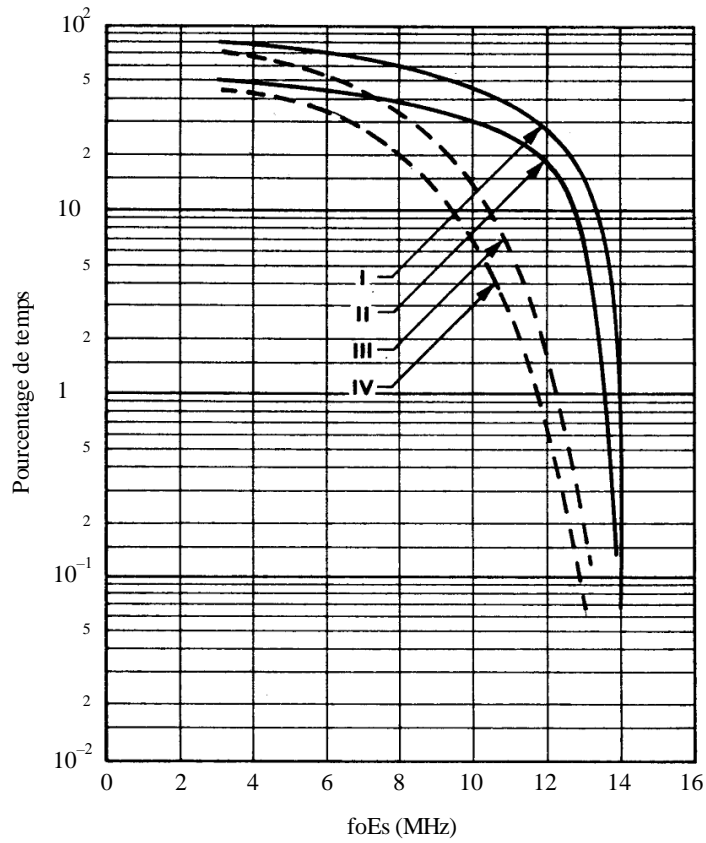
Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de l'ionisation sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude pendant 12 mois de l'année



A: région de basse latitude (voir le § 4)

FIGURE 16

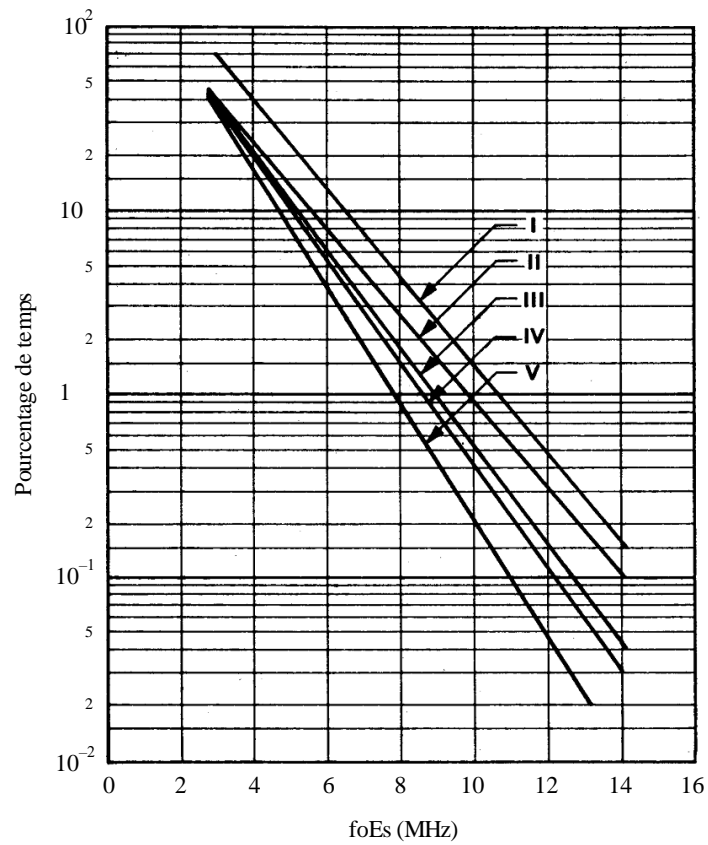
Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués



- Région E: Asie équatoriale (latitude d'inclinaison  $\pm 6^\circ$ )
- I: Années d'activité solaire maximale (6 h 00-18 h 00)  
Moyenne annuelle
  - II: Années d'activité solaire maximale  
Moyenne annuelle
  - III: Années d'activité solaire médiane et faible (6 h 00-18 h 00)  
Moyenne annuelle
  - IV: Années d'activité solaire médiane et faible  
Moyenne annuelle

FIGURE 17

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

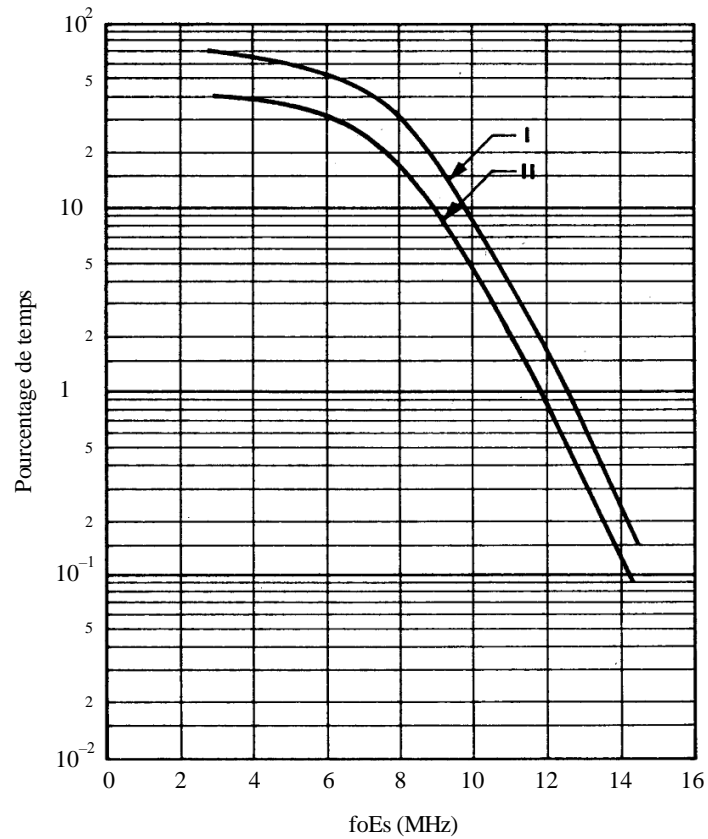


Région E: Asie subéquatoriale  
 (entre  $\pm 6^\circ$  et  $\pm 20^\circ$  de latitude d'inclinaison)  
 I: été (6 h 00-18 h 00)  
 II: été  
 III: moyenne annuelle  
 IV: équinoxe  
 V: hiver



FIGURE 18

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués



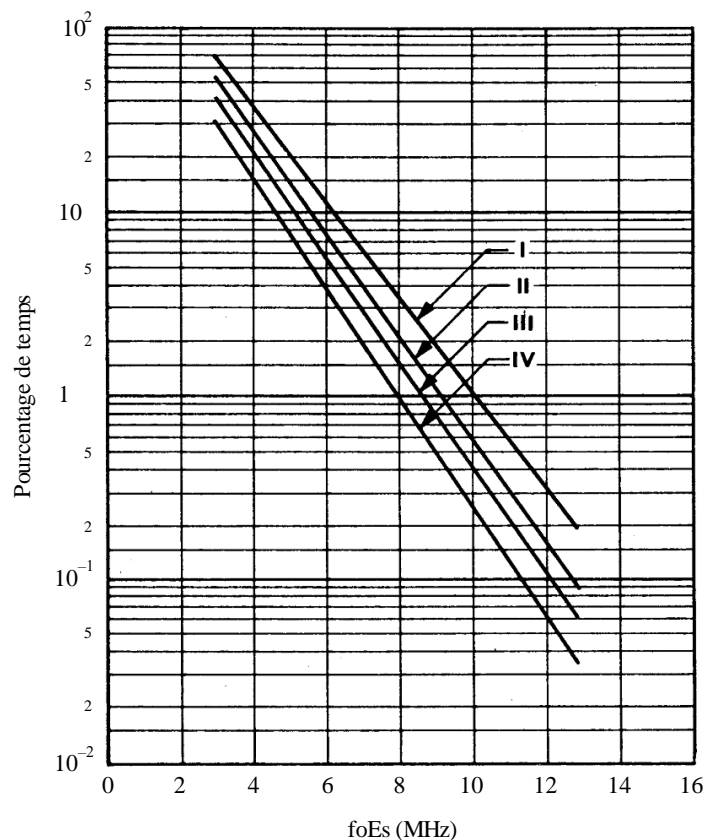
Région F: Afrique équatoriale (latitude d'inclinaison  $\pm 6^\circ$ )  
 I: moyenne annuelle (6 h 00-18 h 00)  
 II: moyenne annuelle

P.0534- 18

Note – Les différences entre les saisons sont inférieures à l'erreur annuelle moyenne. Par ailleurs, il n'y a pas de variation notable en fonction de l'activité solaire.

FIGURE 19

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

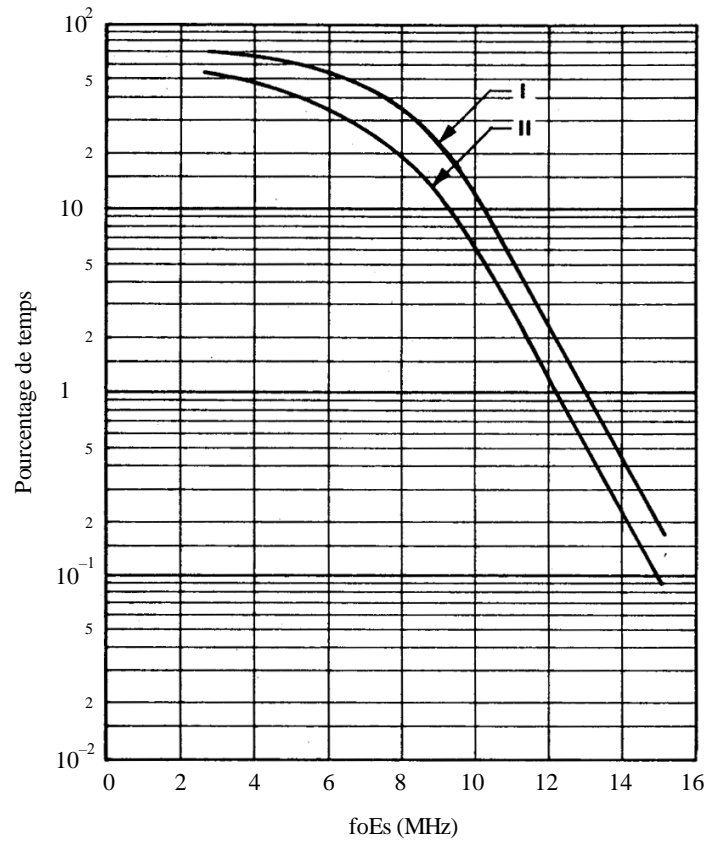


Région F: Afrique subéquatoriale (entre  
 $\pm 6^\circ$  et  $\pm 20^\circ$  de latitude d'inclinaison)  
 I: été (6 h 00-18 h 00)  
 II: été  
 III: moyenne annuelle et équinoxe  
 IV: hiver

P.0534- 19

FIGURE 20

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués



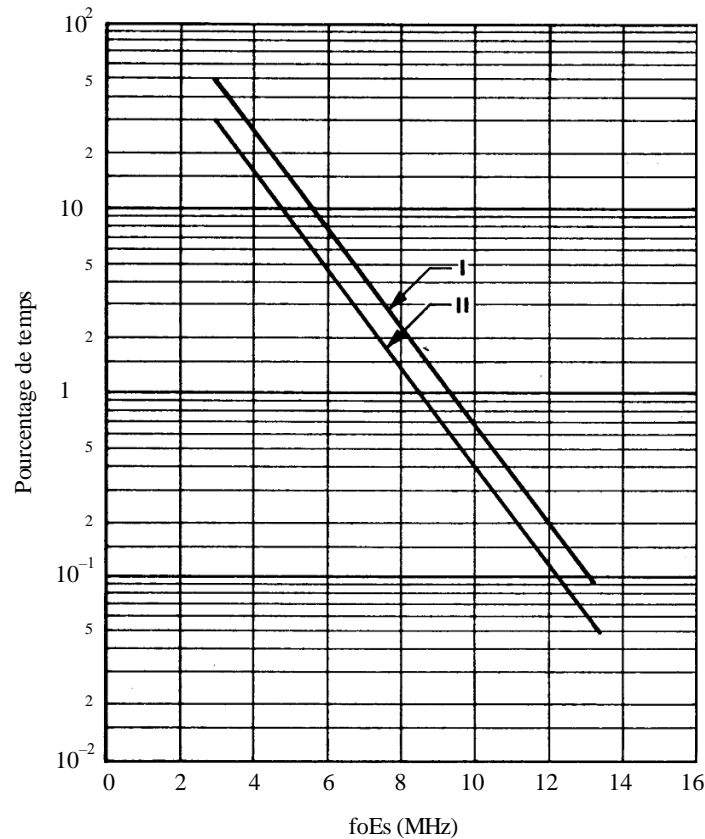
Région G: Amérique équatoriale (latitude d'inclinaison  $\pm 6^\circ$ )  
 I: moyenne annuelle (6 h 00-18 h 00)  
 II: moyenne annuelle

P.0534- 20

Note – Les différences entre les saisons sont inférieures à l'erreur annuelle moyenne.

FIGURE 21

Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués



Région G: Amérique subéquatoriale (entre  
 $\pm 6^\circ$  et  $\pm 20^\circ$  de latitude d'inclinaison)  
 I: moyenne annuelle (6 h 00-18 h 00)  
 II: moyenne annuelle

P.0534- 21

Note – Les différences entre les saisons sont inférieures à l'erreur annuelle moyenne.

### 4.3 Cartes mondiales: dépassement de la valeur foEs pendant certains pourcentages de temps annuels

Les cartes numériques du non-dépassement de la fréquence critique pour la couche sporadique E, foEs (MHz), pendant les pourcentages de temps annuels moyens de 50%, 10%, 1% et 0,1% font partie intégrante de cette Recommandation et sont disponibles dans le fichier supplémentaire [R-REC-P.534-6-202109-I!!ZIP-E.zip](#). Ces cartes ont été élaborées à partir d'une série de données mondiales correspondant à des mesures sur le long terme effectuées par 101 stations ionosondes. La grille des données va de  $+90^\circ$  N à  $-90^\circ$  S par pas de  $1,5^\circ$  pour la latitude et de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  par pas de  $1,5^\circ$  pour la longitude.

## 5 Prévision de l'affaiblissement de transmission de référence par la couche sporadique E sur la base de cartes statistiques annuelles

Cette méthode permet de calculer la valeur de l'affaiblissement de transmission de référence par la couche sporadique E qui n'est pas dépassée pendant un pourcentage de temps donné d'une année moyenne en se fondant sur des cartes de la valeur foEs dépassée pendant 0,1%, 1%, 10% et 50%

d'une année moyenne. Cette méthode est censée être utilisée essentiellement pour une mise en œuvre informatique lorsque l'on a besoin d'avoir une variation régulière de l'affaiblissement attendu en fonction de l'emplacement afin de prévoir les brouillages sur de longs trajets situés à des latitudes basses ou moyennes. La méthode ne doit pas être considérée comme fiable pour des latitudes géomagnétiques faibles ou élevées.

Les calculs intègrent l'effet d'écran dû au terminal, lequel varie en fonction de l'angle d'élévation. Par conséquent, pour toutes les longueurs de trajet, les calculs sont effectués pour une propagation à un bond ou à deux bonds. Ces deux résultats sont combinés à la fin de la procédure.

Lorsqu'on ne dispose d'aucune information sur l'angle d'élévation du terminal en direction de l'horizon et sur la distance, il convient d'utiliser une estimation. Si l'on sait que le terrain dans la zone considérée est régulier ou comprend de vastes étendues d'eau, il est possible que les réflexions par la surface contribuent à la propagation ionosphérique, ce qui entraîne une baisse de l'affaiblissement. On n'essaie pas dans le cadre de cette méthode d'estimer cet effet.

### 5.1 Calcul de la valeur foEs

Pour un pourcentage de temps  $p\%$  donné, fixer les valeurs du pourcentage de temps utilisées pour l'interpolation et l'extrapolation  $p_1$  et  $p_2$ , conformément au Tableau 1.

TABLEAU 1  
Conditions pour fixer les valeurs  $p_1$  et  $p_2$

pourcentage de temps $p\%$	$p_1$	$p_2$
$p < 1\%$	0,1%	1%
$1\% \leq p \leq 10\%$	1%	10%
$10\% < p$	10%	50%

Pour un emplacement donné, calculer les valeurs  $f_{oEs1}$  et  $f_{oEs2}$  à partir des cartes de la valeur  $f_{oEs}$  dépassée pendant les pourcentages de temps  $p_1$  et  $p_2\%$  respectivement. Calculer la valeur  $f_{oEs}$  dépassée pendant le pourcentage de temps  $p\%$  comme suit:

$$f_{oEs} = f_{oEs1} + (f_{oEs2} - f_{oEs1}) \cdot \log(p / p_1) / \log(p_2 / p_1) \quad (\text{MHz}) \quad (7)$$

### 5.2 Angles d'élévation en direction de l'horizon

Un affaiblissement supplémentaire peut être causé par l'obstruction par le terrain, au niveau de l'un ou l'autre terminal.

Pour chaque terminal, trouver le point sur le terrain le long du trajet du grand cercle depuis le terminal jusqu'à l'autre terminal où l'angle d'élévation au-dessus de l'horizon local, tel qu'il est vu depuis le terminal, est le plus grand. Cet angle d'élévation pour un point donné du terrain est donné par l'équation suivante:

$$\varepsilon_p = \arctan \left( \frac{h_p - h_a}{1000d_p} - \frac{d_p}{2R_0} \right) \quad (\text{radians}) \quad (8)$$

où:

$d_p$ : distance jusqu'au point du terrain considéré, en km

$h_p$ : hauteur du point du terrain considéré au-dessus du niveau de la mer, en m

$h_a$ : hauteur de l'antenne du terminal au-dessus du niveau de la mer, en m.

Effectuer ce calcul deux fois, une fois pour chaque terminal, pour obtenir les valeurs suivantes:

$\varepsilon_{ha,b}$ : angle d'élévation en direction de l'horizon, au niveau du premier et du second terminal, en radians

$d_{ha,b}$ : distance jusqu'à l'horizon, premier et second terminal, en km.

### 5.3 Calcul pour une propagation à un bond

Calculer  $f_{oEs}$  selon l'équation (7) pour le point à mi-trajet pour obtenir l'affaiblissement ionosphérique pour un bond,  $\Gamma_1$ , en appliquant l'équation (3).

Calculer la longueur du trajet en pente:

$$l_1 = 2 \left\{ R_0^2 + (R_0 + h)^2 - 2R_0(R_0 + h)\cos(d/(2R_0)) \right\}^{0,5} \quad (\text{km}) \quad (9)$$

L'affaiblissement en espace libre peut maintenant être calculé pour la distance le long de la pente:

$$L_{bfs1} = 32,4 + 20\log(l_1 \cdot f) \quad (\text{dB}) \quad (10)$$

L'angle d'élévation du rayon au-dessus de l'horizon local pour les deux terminaux, pour une propagation à un bond est donné par l'équation suivante:

$$\varepsilon_{r1} = 0,5\pi - \arctan \left\{ \frac{R_0 \sin(\alpha_1)}{h + R_0[1 - \cos(\alpha_1)]} \right\} - \alpha_1 \quad (\text{radians}) \quad (11)$$

où:

$$\alpha_1 = d/(2R_0) \quad (\text{radians}) \quad (11a)$$

Les angles de diffraction, en radians, pour les deux terminaux, sont donnés par l'équation suivante:

$$\delta_{1a,b} = \varepsilon_{ha,b} - \varepsilon_{r1} \quad (\text{radians}) \quad (12)$$

Les paramètres de diffraction correspondants sont donnés par l'équation suivante:

$$v_{1a,b} = 3,651 \sqrt{f d_{ha,b} [1 - \cos(\delta_{1a,b})] / \cos(\varepsilon_{ha,b})} \quad \text{si } \delta_{1a,b} \geq 0 \quad (13a)$$

$$= -3,651 \sqrt{f d_{ha,b} [1 - \cos(\delta_{1a,b})] / \cos(\varepsilon_{ha,b})} \quad \text{sinon} \quad (13b)$$

Les valeurs de l'affaiblissement par diffraction, en dB, au niveau des deux terminaux sont données par l'équation suivante:

$$L_{p1a,b} = 6,9 + 20\log \left[ \sqrt{(v_{1a,b} - 0,1)^2 + 1} + v_{1a,b} - 0,1 \right] \quad \text{si } v_{1a,b} > -0,78 \quad (14a)$$

$$= 0,0 \quad \text{sinon} \quad (14b)$$

L'affaiblissement de transmission de référence par la couche sporadique E, pour une propagation à un bond, est alors calculé comme suit:

$$L_{bEs1} = L_{bfs1} + \Gamma_1 + L_{p1a} + L_{p1b} \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

### 5.4 Calcul pour une propagation à deux bonds

Calculer la valeur  $f_{oEs}$  comme étant la valeur la plus basse des deux valeurs calculées selon l'équation (7) pour un point situé à un quart et un point situé à trois quarts du trajet afin de calculer à

nouveau  $\Gamma_1$  selon l'équation (3) et d'obtenir ainsi l'affaiblissement ionosphérique pour une propagation à deux bonds  $\Gamma_2$ , à l'aide de l'équation (4).

Calculer la longueur du trajet en pente:

$$l_2 = 4 \left\{ R_0^2 + (R_0 + h)^2 - 2R_0(R_0 + h)\cos(d/(4R_0)) \right\}^{0.5} \quad (\text{km}) \quad (16)$$

L'affaiblissement en espace libre peut maintenant être calculé pour la distance le long de la pente:

$$L_{bfs2} = 32,4 + 20\log(l_2 \cdot f) \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

L'angle d'élévation du rayon au-dessus de l'horizon local pour les deux terminaux, pour une propagation à un bond, est donné par l'équation suivante:

$$\varepsilon_{r2} = 0,5\pi - \arctan \left\{ \frac{R_0 \sin(\alpha_1)}{h + R_0 [1 - \cos(\alpha_1)]} \right\} - \alpha_2 \quad (\text{radians}) \quad (18)$$

où:

$$\alpha_2 = d / (4R_0) \quad (\text{radians}) \quad (18a)$$

Les angles de diffraction, en radians, pour les deux terminaux, sont donnés par l'équation suivante:

$$\delta_{2a,b} = \varepsilon_{p2a,b} - \varepsilon_{r2} \quad (\text{radians}) \quad (19)$$

Les paramètres de diffraction correspondants sont donnés par l'équation suivante:

$$v_{2a,b} = 3,651 \sqrt{f d_{ha,b} [1 - \cos(\delta_{2a,b})] / \cos(\varepsilon_{ha,b})} \quad \text{si } \delta_{2a,b} \geq 0 \quad (20a)$$

$$= -3,651 \sqrt{f d_{ha,b} [1 - \cos(\delta_{2a,b})] / \cos(\varepsilon_{ha,b})} \quad \text{sinon} \quad (20b)$$

Les valeurs de l'affaiblissement par diffraction, en dB, au niveau des deux terminaux sont données par l'équation suivante:

$$L_{p2a,b} = 6,9 + 20\log \left[ \sqrt{(v_{2a,b} - 0,1)^2 + 1} + v_{2a,b} - 0,1 \right] \quad \text{si } v_{2a,b} > -0,78 \quad (21a)$$

$$= 0,0 \quad \text{sinon} \quad (21b)$$

L'affaiblissement de transmission de référence par la couche sporadique E, pour une propagation à deux bonds, est alors calculé comme suit:

$$L_{bEs2} = L_{bfs2} + \Gamma_2 + L_{p2a} + L_{p2b} \quad (\text{dB}) \quad (22)$$

### 5.5 Affaiblissement de transmission de référence

L'affaiblissement de transmission de référence par la couche sporadique E  $L_b$  (dB) est alors donné par:

$$L_{bEs} = L_{bEs1} \quad L_{bEs1} < L_{bEs2} - 20 \quad (23a)$$

$$= L_{bEs2} \quad L_{bEs2} < L_{bEs1} - 20 \quad (23b)$$

$$= -10 \cdot \log \left( 10^{-0,1 \cdot L_{bEs1}} + 10^{-0,1 \cdot L_{bEs2}} \right) \quad \text{sinon} \quad (23c)$$