

RECOMMANDATION UIT-R P.534-4

**MÉTHODE DE CALCUL DU CHAMP EN PRÉSENCE
D'IONISATION SPORADIQUE DE LA RÉGION E**

(Question UIT-R 221/3)

(1978-1982-1986-1990-1999)

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

Méthode de calcul du champ en présence d'ionisation sporadique de la région 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 décimétriques, jusqu'à une distance de 4000 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 décimétriques, 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 E_s en établissant une correspondance statistique entre une valeur de l'affaiblissement ionosphérique et la valeur de f_oE_s correspondant à un taux d'occurrence donné;
- l'affaiblissement ionosphérique du signal associé au champ E_s est représenté par une fonction du rapport de la fréquence du signal, f , à f_oE_s 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 f_oE_s pour accélérer et faciliter l'évaluation du champ E_s .

2 Formule pour le champ E_s

On peut exprimer le champ E_s 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(μ V/m))

E_0 : champ théorique en fonction inverse de la distance (dB(μ 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(μ 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 Ω 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)

Γ : 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 Γ d'un signal s'étant propagé par un seul bond, $\Gamma_{(1 \text{ bond})}(d)$, est donné approximativement par:

$$\Gamma_{(1 \text{ bond})}(d) = \left\{ \frac{40}{1 + \left(\frac{d}{130}\right) + \left(\frac{d}{250}\right)^2} + 0,2 \left(\frac{d}{2600}\right)^2 \right\} \left\{ \left(\frac{f}{f_oE_s}\right)^2 + \exp\left(\frac{d - 1660}{280}\right) \right\} \quad (3)$$

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

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

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)

f_oEs : 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 Γ 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/f_oEs 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/f_oEs comprises entre 2 et 5,5; l'erreur sera alors inférieure à 10 dB.

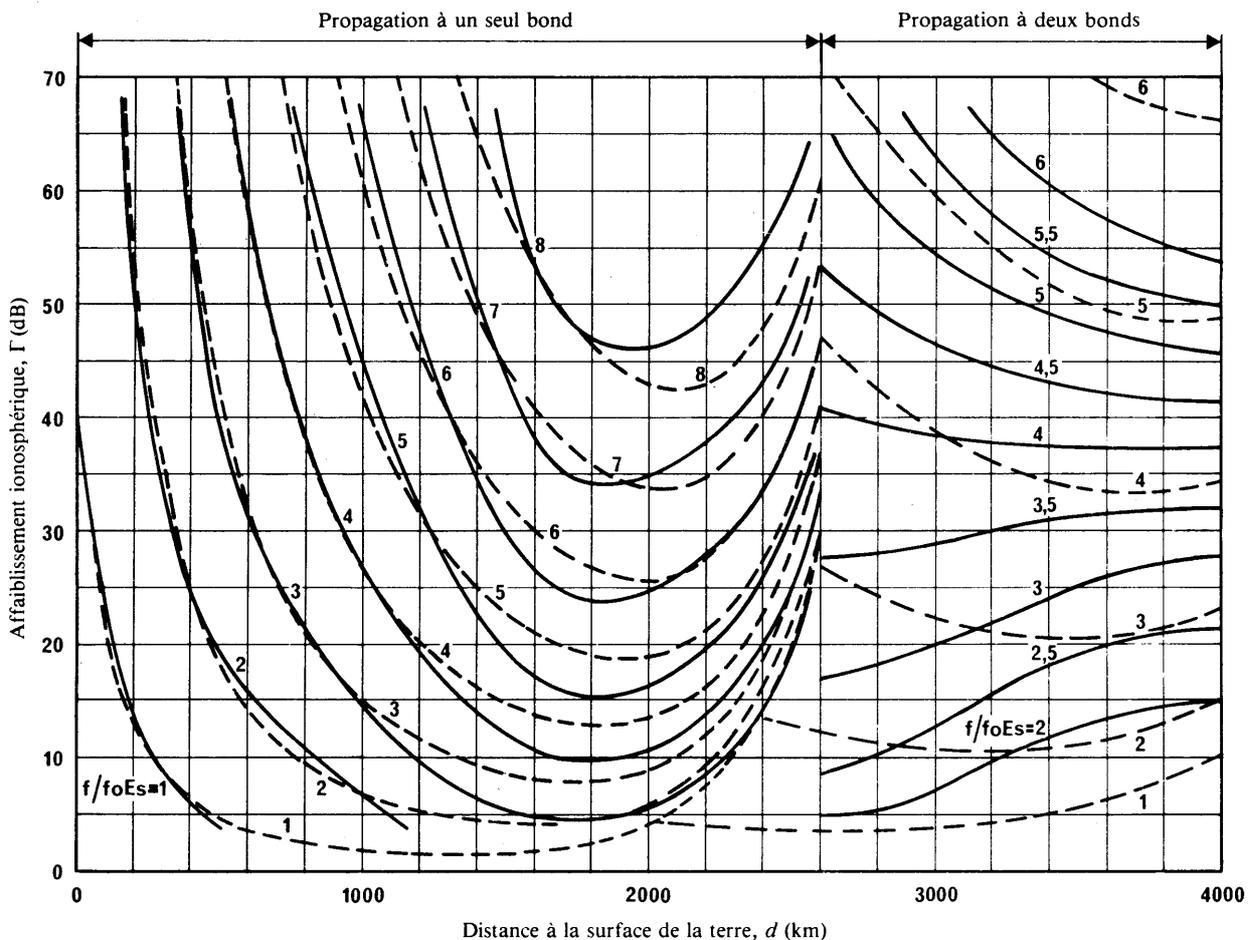


FIGURE 1 – Courbes de l'affaiblissement ionosphérique, Γ , pour la propagation par Es

0534-01sc

- d'après les valeurs observées,
- - - d'après les formules empiriques (3) et (4)

3 Méthode de calcul du champ Es

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

Etape 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)).

Etape 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.

Etape 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.

Etape 3 : calculer $f/foEs$.

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

Etape 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_r , G_t , L_t et L_r et de la valeur obtenue pour Γ .

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. A titre de comparaison, on a ajouté des courbes de probabilité relatives aux heures de jour (0800-2300 h) 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 h à l'intérieur des 4 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 h 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 sub-équatoriale. Comme on peut le constater en comparant les Fig. 2 à 6, seule la région sub-équatoriale (et non pas la région équatoriale) est sujette à la loi de probabilité de Phillips.

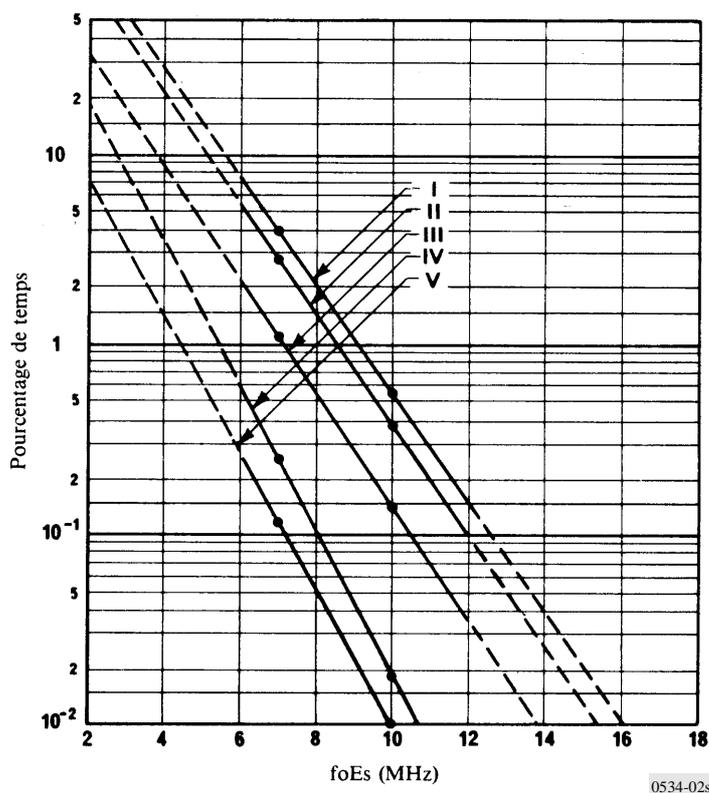


FIGURE 2 – Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région A

- Région A: Europe et Afrique du Nord
 I: de mai à août (08 h 00-23 h 00)
 II: de mai à août
 III: moyenne annuelle
 IV: mars, avril, septembre et octobre
 V: de novembre à février

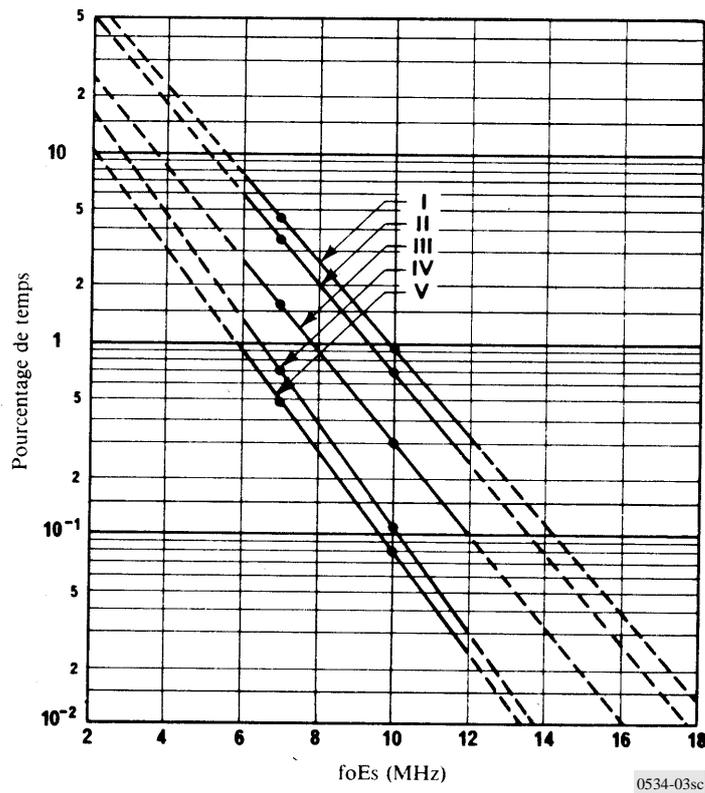


FIGURE 3 – Valeurs de f_oE_s égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région B

Région B: Amérique du Nord

I: de mai à août (08 h 00-23 h 00)

II: de mai à août

III: moyenne annuelle

IV: mars, avril, septembre et octobre

V: de novembre à février

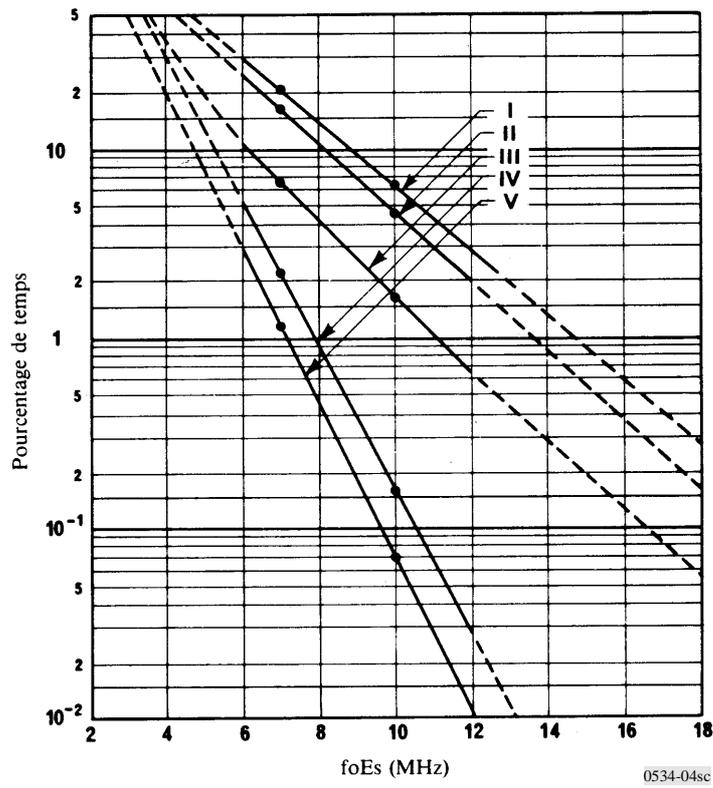


FIGURE 4 – Valeurs de $foEs$ égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région C

Région C: Asie (Extrême-Orient)

I: de mai à août (08 h 00-23 h 00)

II: de mai à août

III: moyenne annuelle

IV: mars, avril, septembre et octobre

V: de novembre à février

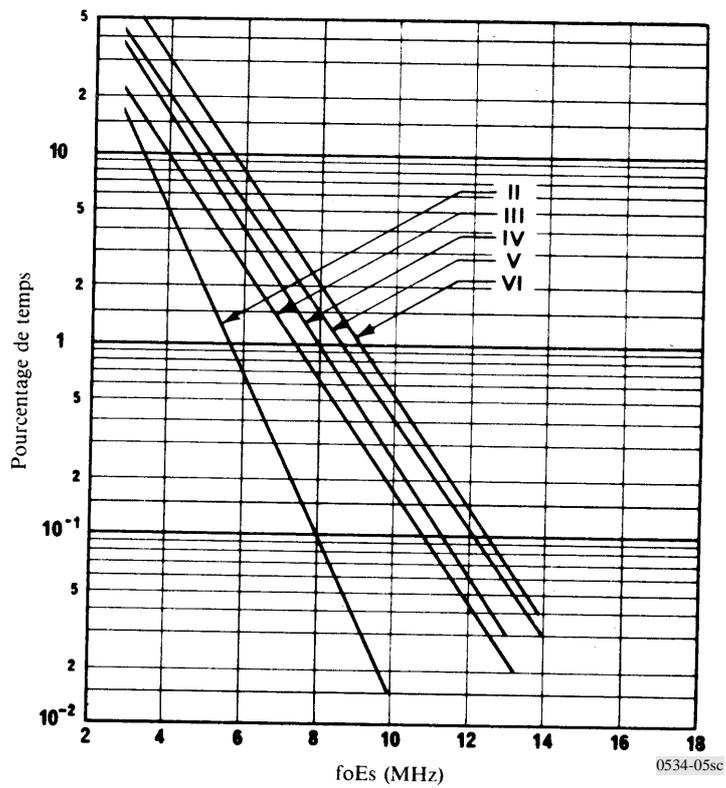


FIGURE 5 – Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région D

- 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 (08 h 00-23 h 00)

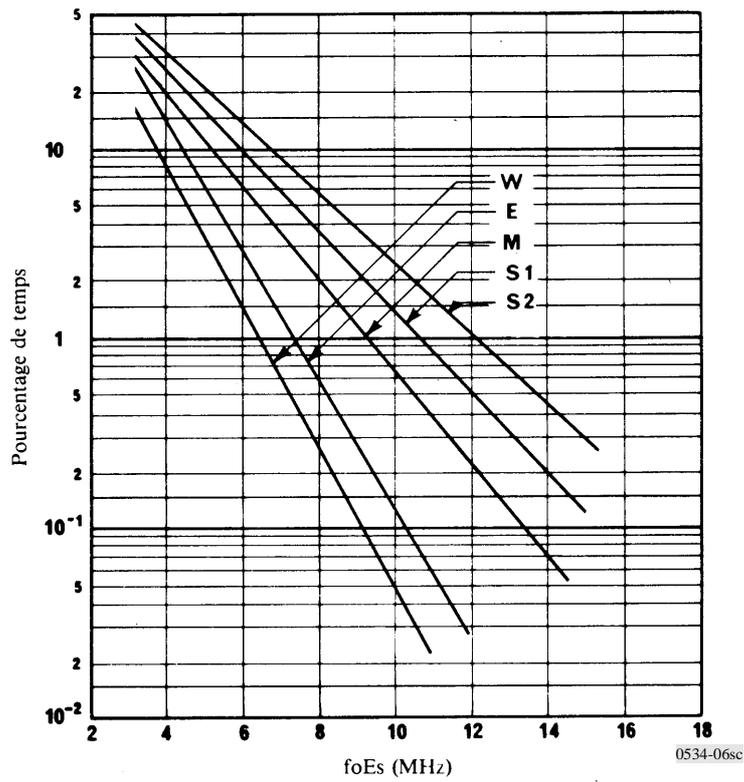


FIGURE 6 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pour les pourcentages de temps indiqués

Valeur moyenne: régions A, B, C et D
 S1: été
 S2: été (08 h 00-23 h 00)
 M: moyenne annuelle
 E: équinoxe
 W: hiver

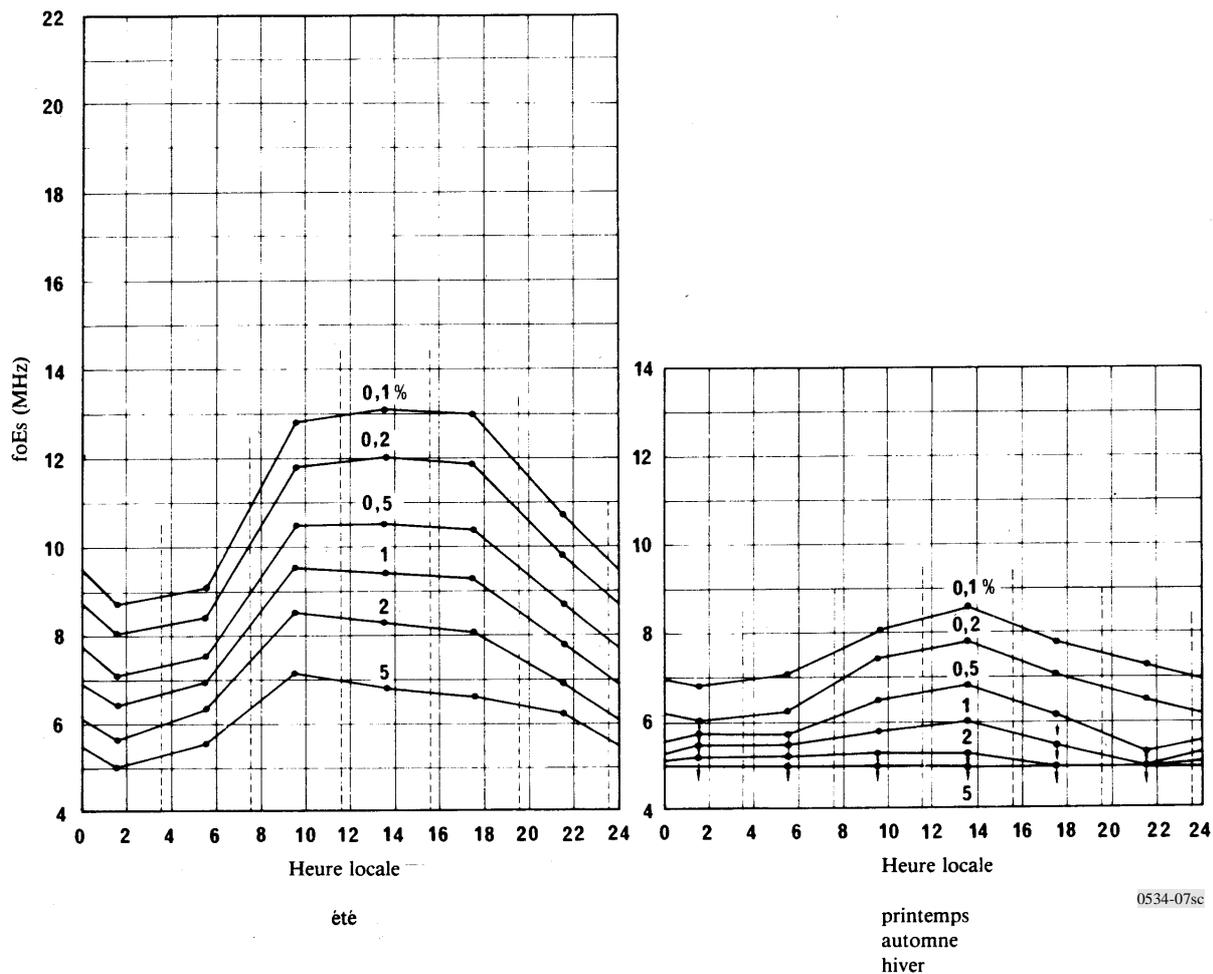


FIGURE 7 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région A (Europe et Afrique du Nord)

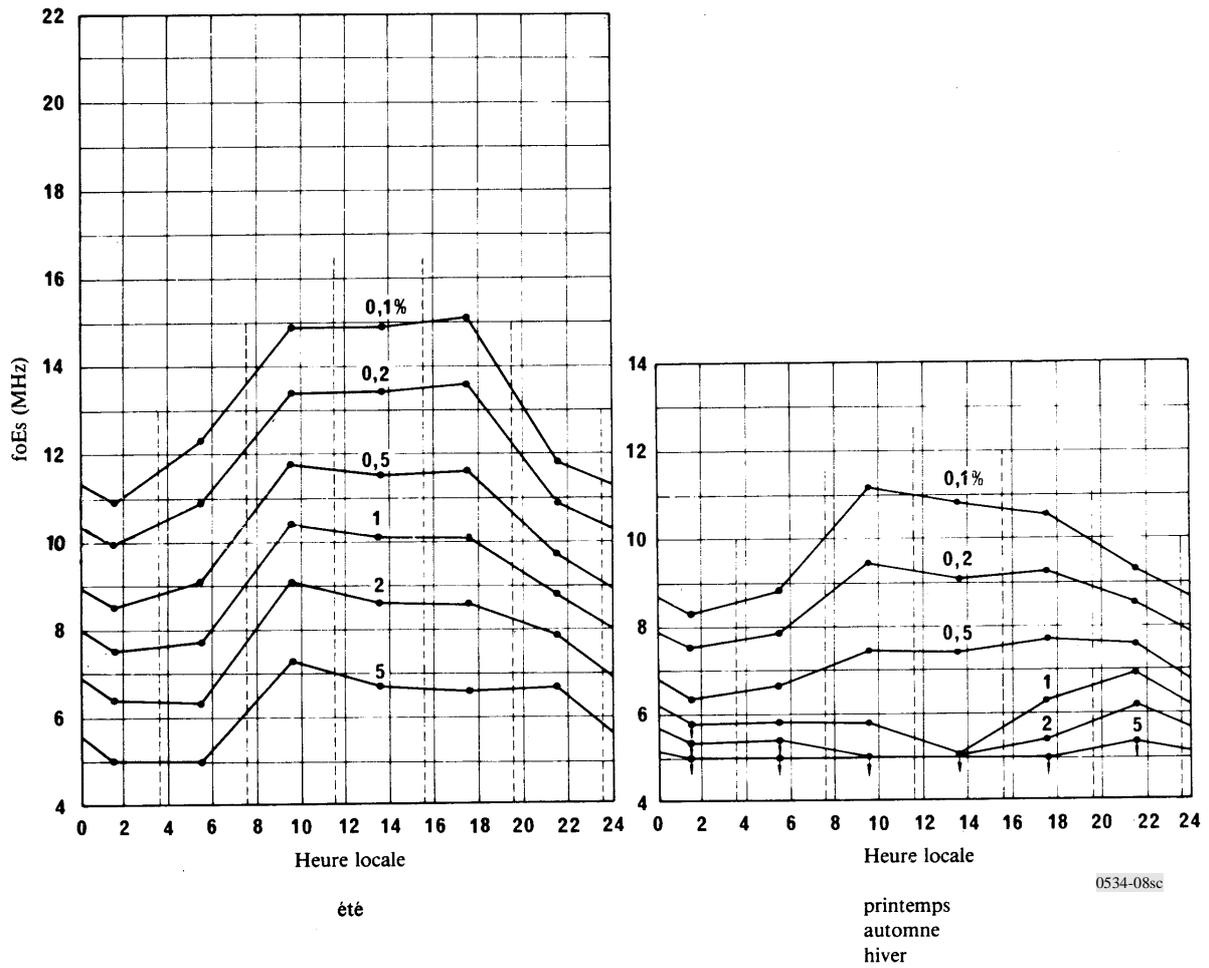


FIGURE 8 – Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région B (Amérique du Nord)

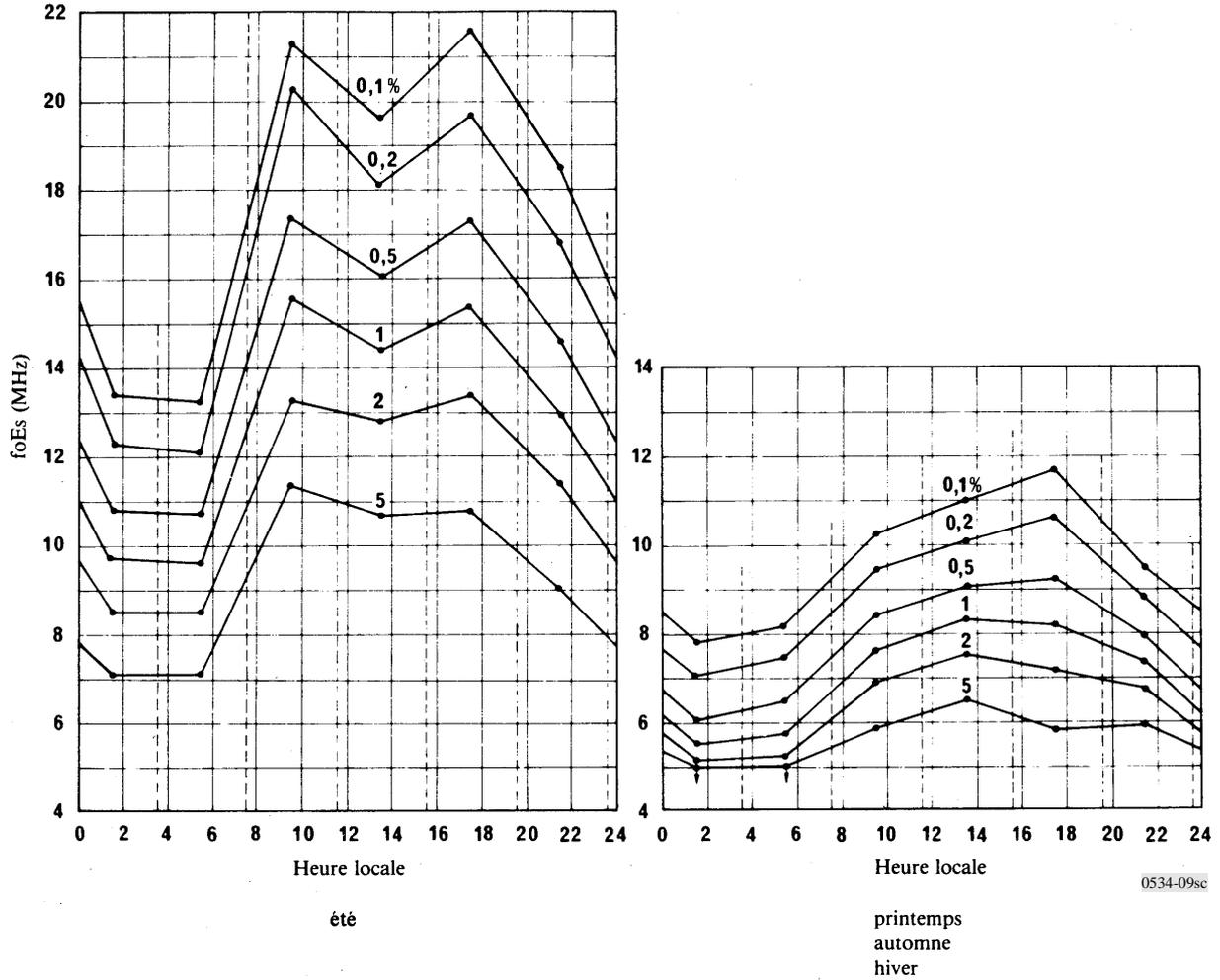


FIGURE 9 – Valeurs de foEs égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués comme paramètre sur la courbe, à l'intérieur de tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région C (Asie (Extrême-Orient))

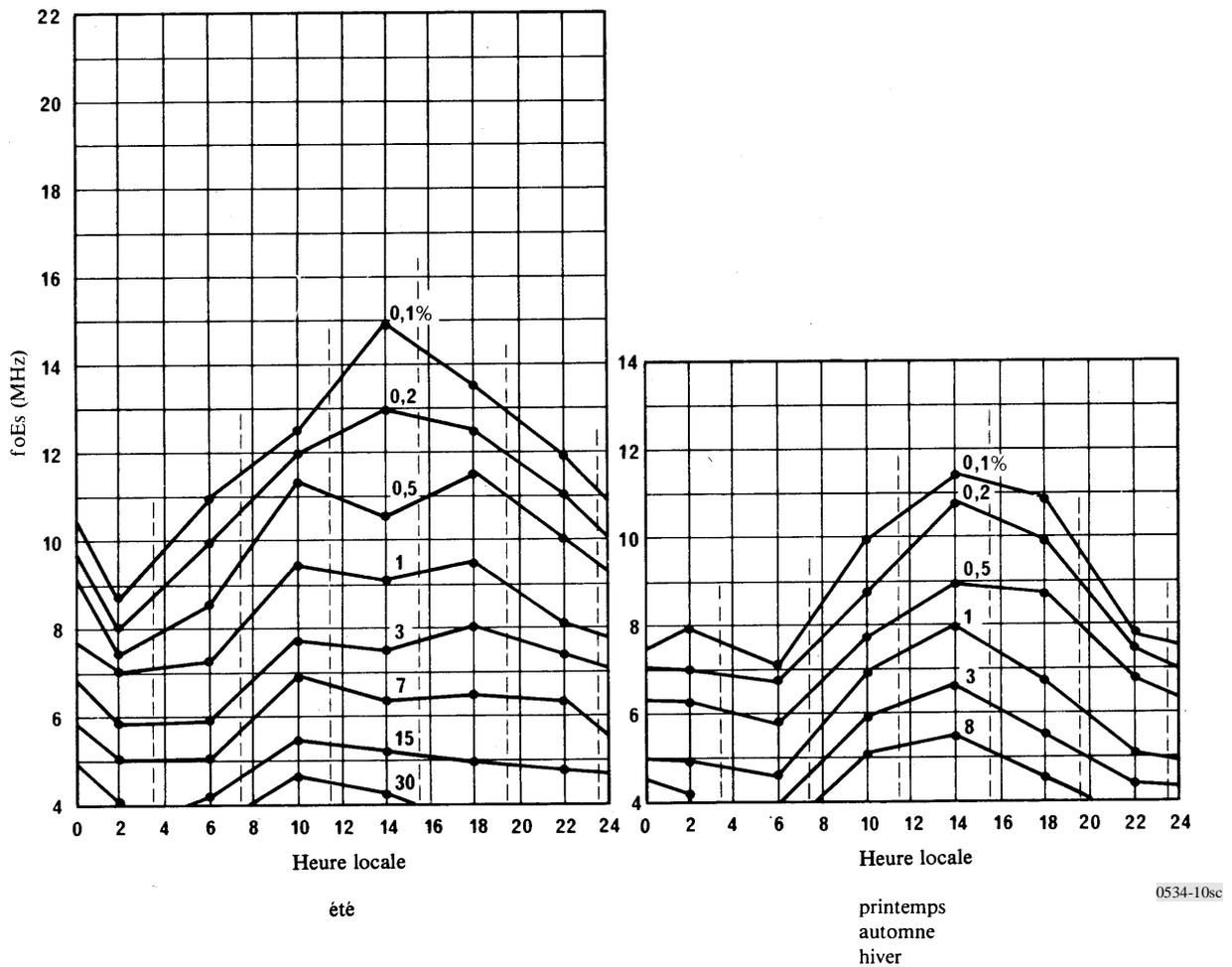
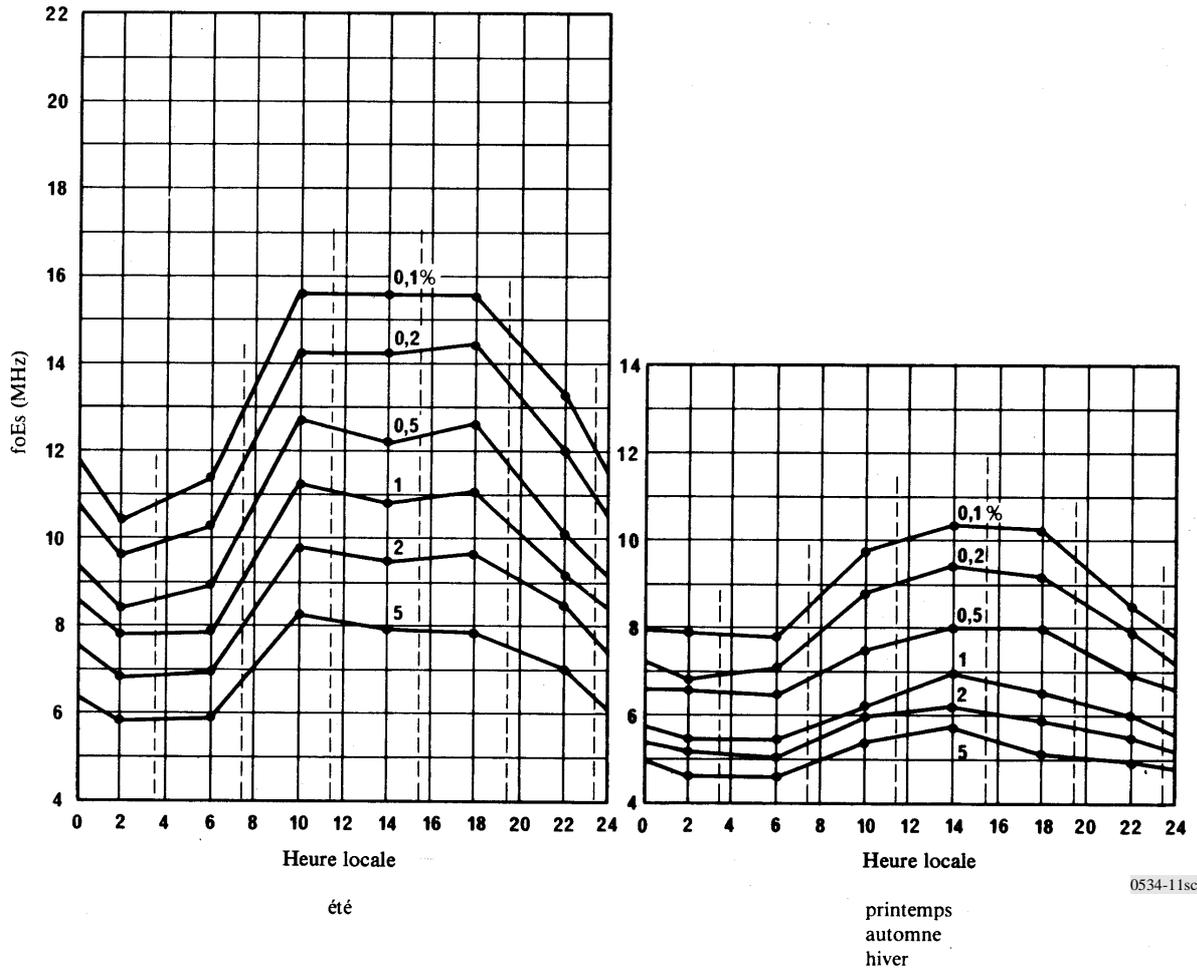


FIGURE 10 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région D (Amérique du Sud)



0534-11sc

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) pour les régions A, B, C et D

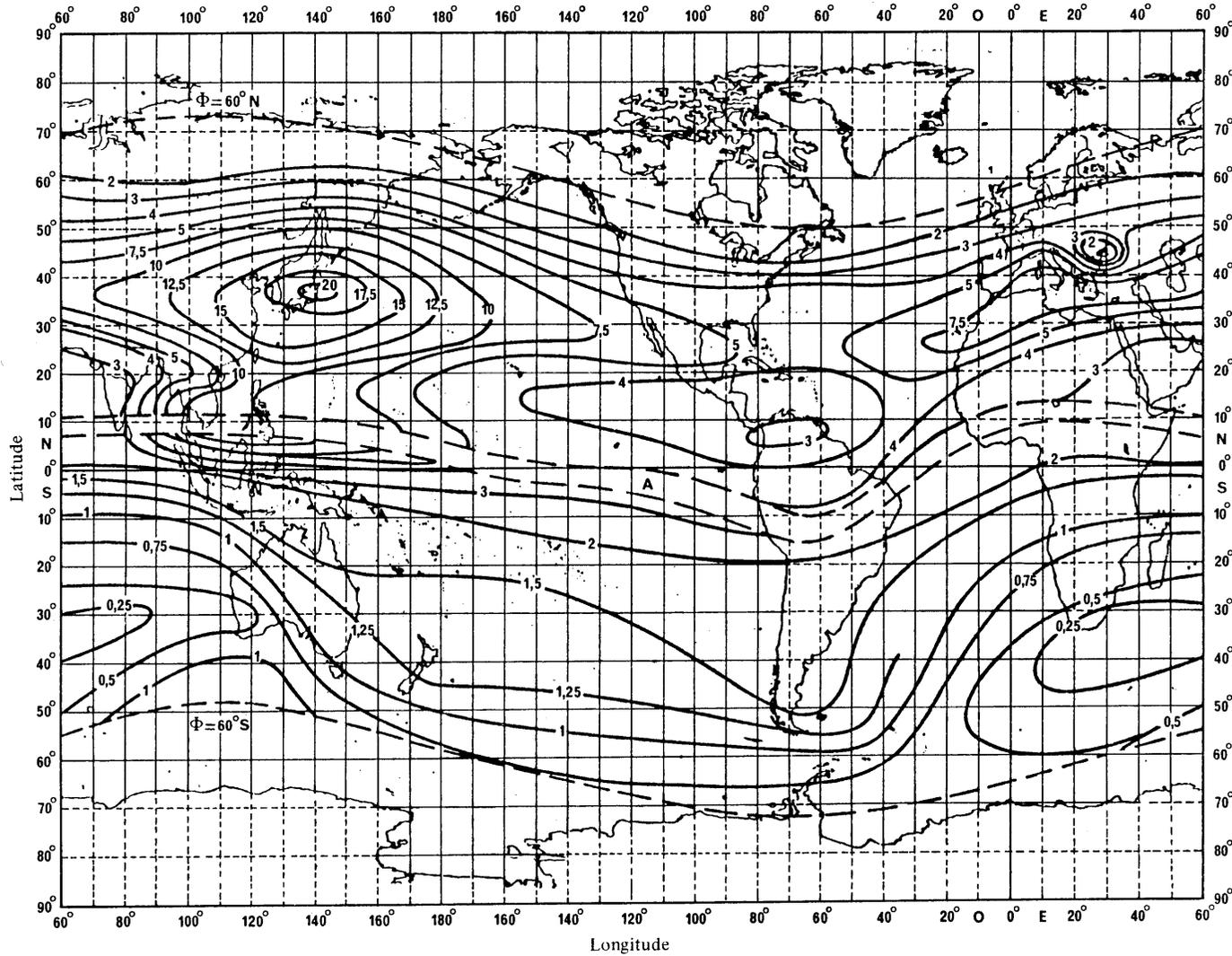


FIGURE 12 – Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de mai, juin, juillet et août

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

0534-12sc

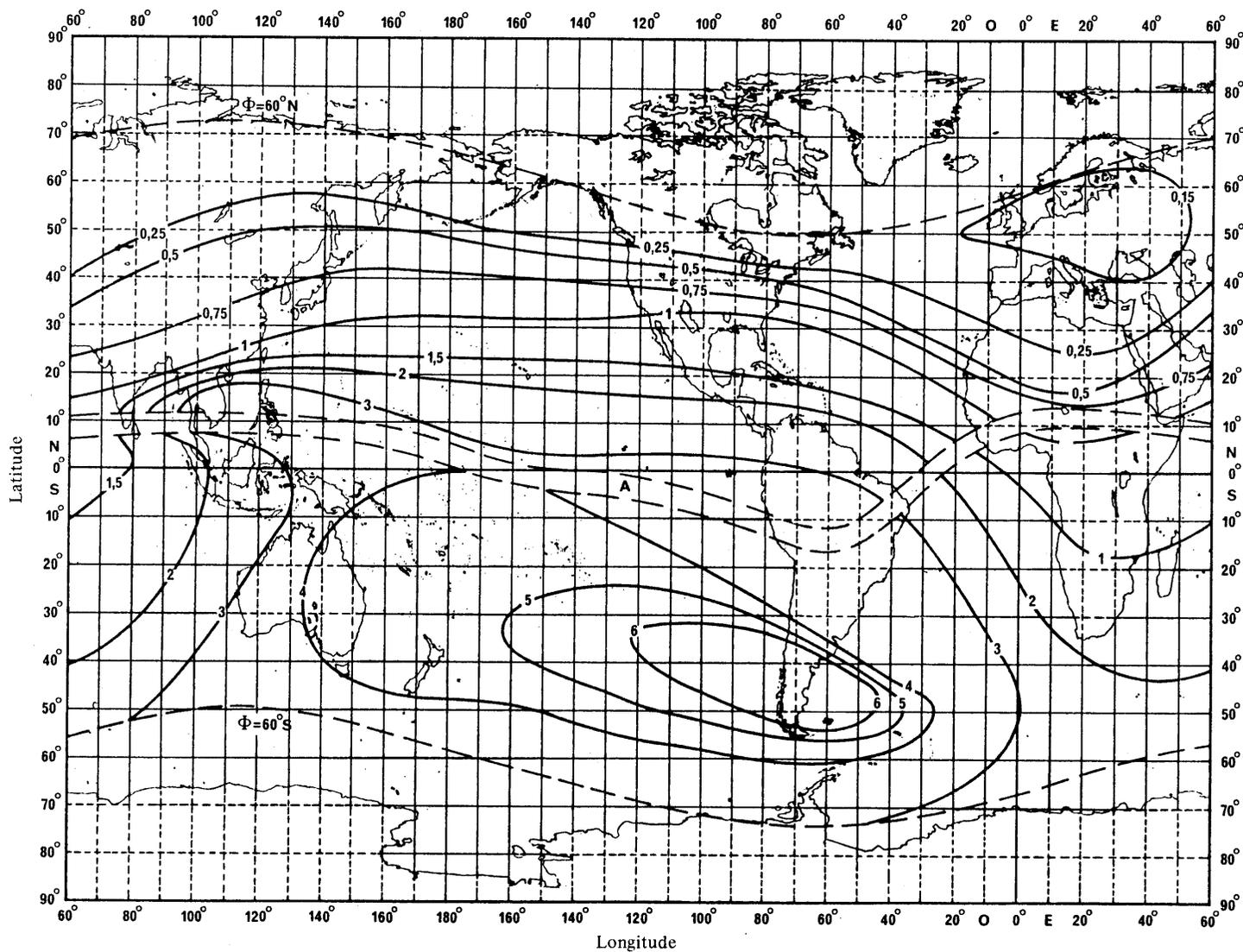


FIGURE 13 – Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de novembre, décembre, janvier et février

0534-13sc

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

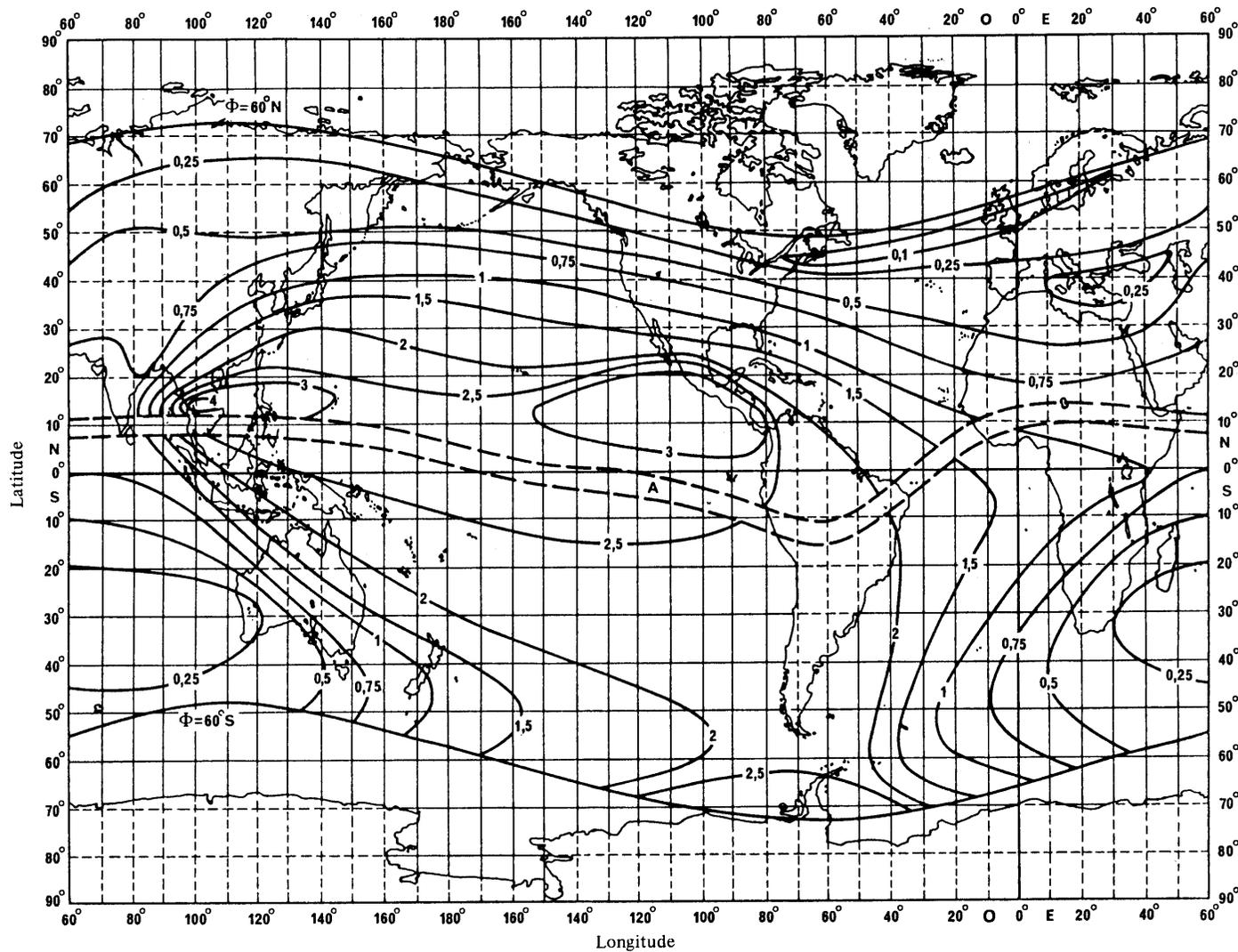


FIGURE 14 – Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de mars, avril, septembre et octobre

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

0534-14sc

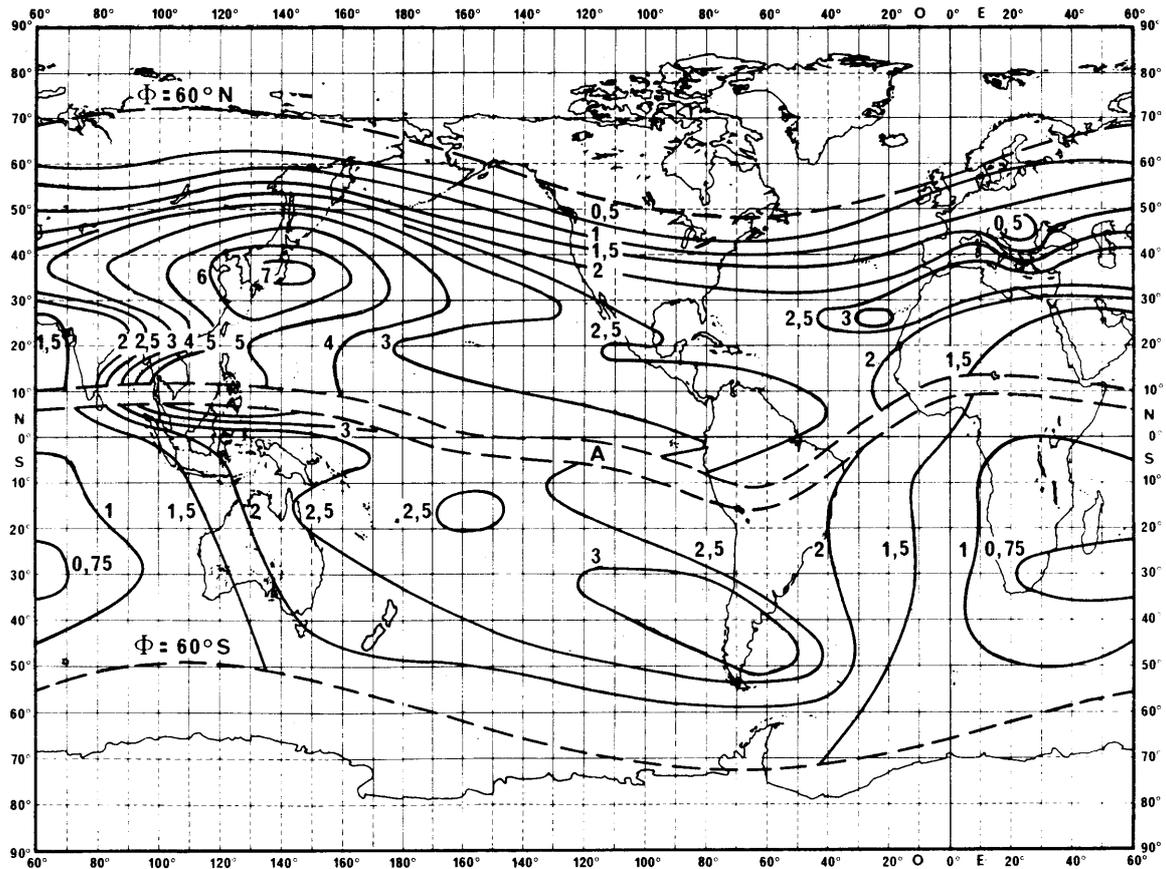


FIGURE 15 — Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de l'ionisation sporadique (f_oE_s) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale, dans les régions de moyenne latitude pendant les 12 mois de l'année

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

0534-15sc

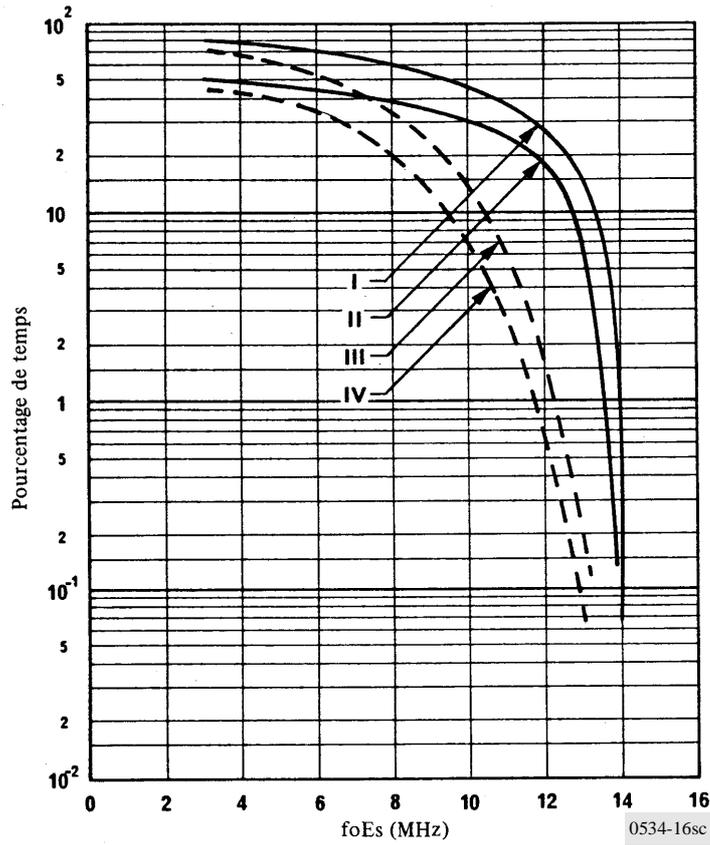


FIGURE 16 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

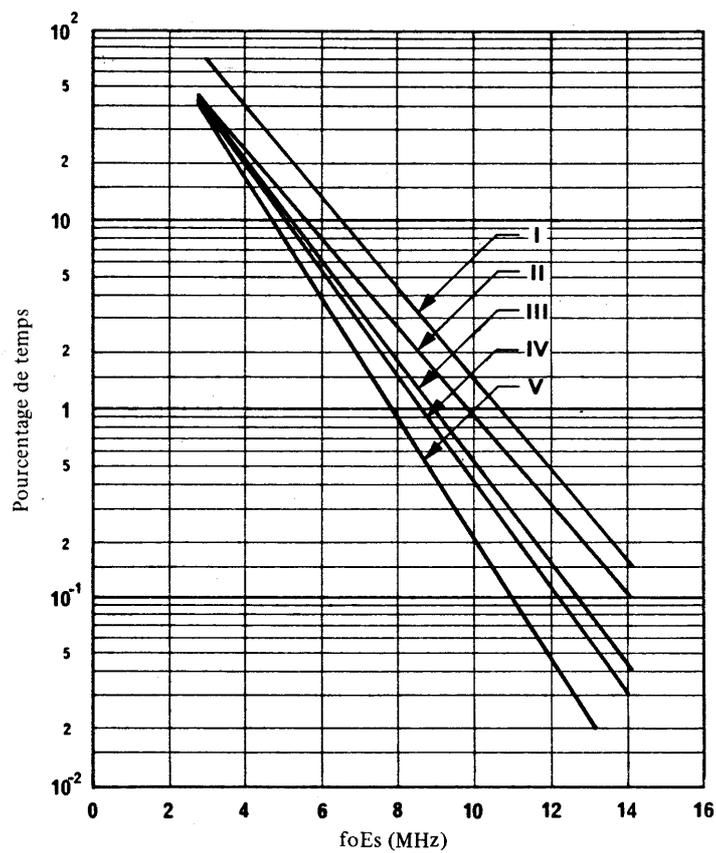
Région E: Asie équatoriale (latitude d'inclinaison $\pm 6^\circ$)

I: années d'activité solaire maximale (0600-1800 h).
Moyenne annuelle

II: années d'activité solaire maximale.
Moyenne annuelle

III: années d'activité solaire médiane et faible (0600-1800 h)
Moyenne annuelle

IV: années d'activité solaire médiane et faible.
Moyenne annuelle



0534-17sc

FIGURE 17 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

Région E: Asie subéquatoriale (entre $\pm 6^\circ$ et $\pm 20^\circ$ de latitude d'inclinaison)

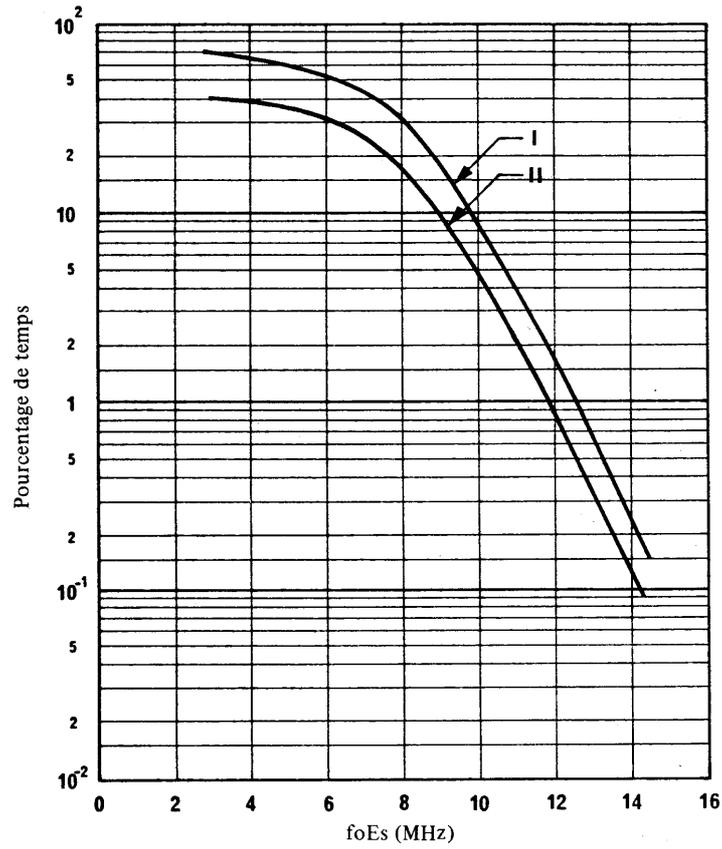
I: été (0600-1800 h)

II: été

III: moyenne annuelle

IV: équinoxe

V: hiver



0534-18sc

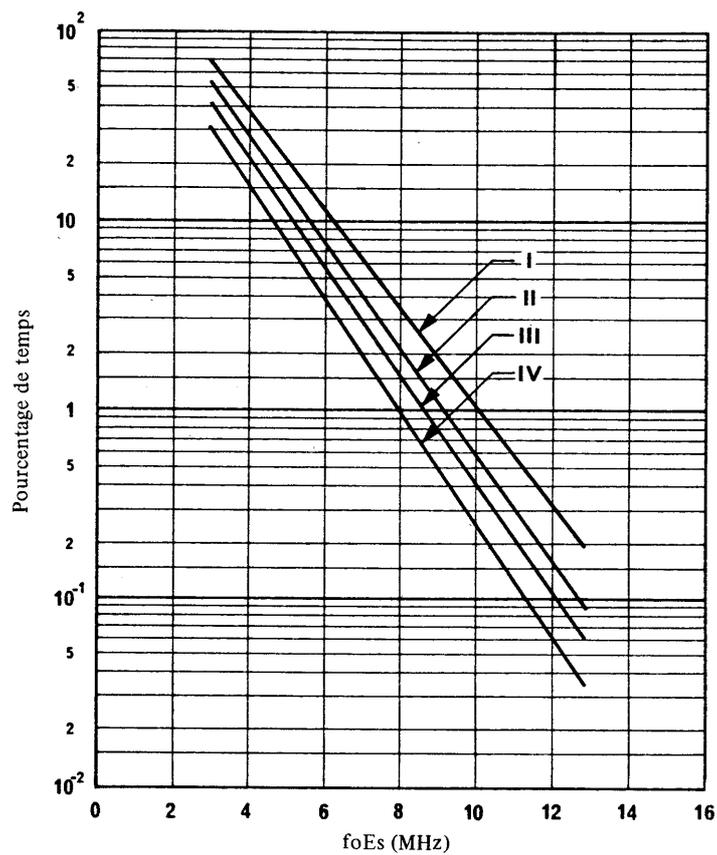
FIGURE 18 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

Région F: Afrique équatoriale (latitude d'inclinaison $\pm 6^\circ$)

I: moyenne annuelle (0600-1800 h)

II: moyenne annuelle

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.



0534-19sc

FIGURE 19 – Valeurs de $foEs$ égales 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 (0600-1800 h)

II: été

III: moyenne annuelle et équinoxe

IV: hiver

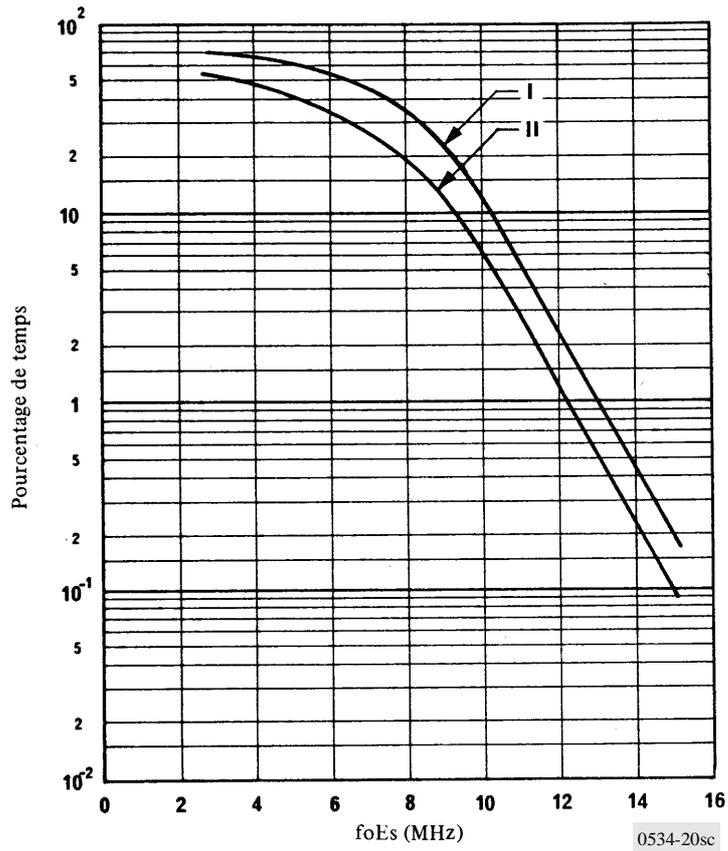


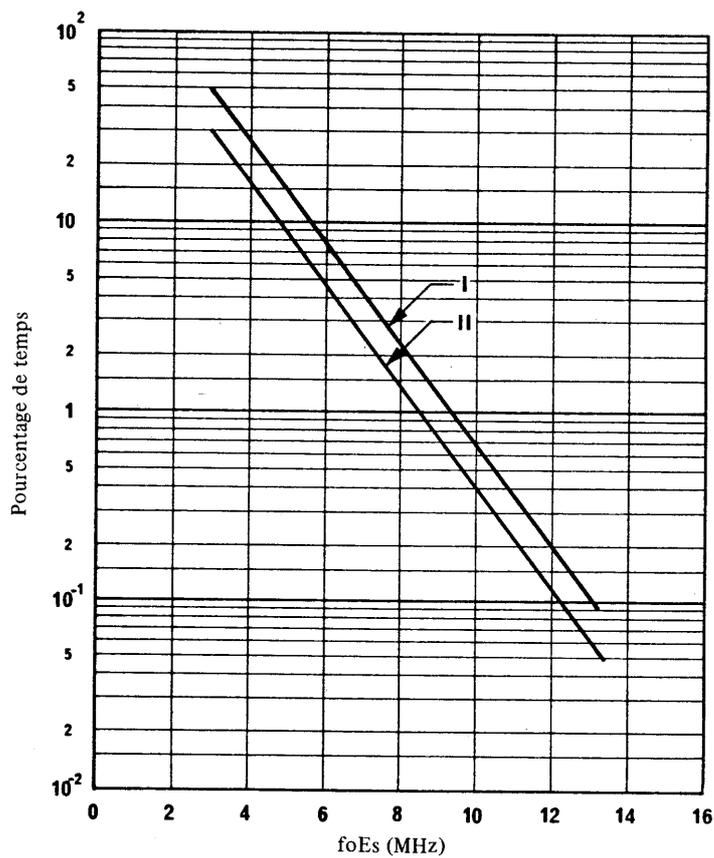
FIGURE 20 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

Région G: Amérique équatoriale (latitude d'inclinaison $\pm 6^\circ$)

I: moyenne annuelle (0600-1800 h)

II: moyenne annuelle

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



0534-21sc

FIGURE 21 – Valeurs de foEs égales 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

II: moyenne annuelle

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