

RECOMMANDATION 534-3

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

(Question 41/6)

(1978-1982-1986-1990)

Le CCIR,

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 I à la présente Recommandation s'est révélée applicable et fiable;
- c) qu'il n'existe pas d'autre méthode pratique,

RECOMMANDE A L'UNANIMITÉ

1. qu'il convient d'adopter la méthode de calcul décrite dans l'Annexe I 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 I.

ANNEXE I

**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 533). Cette méthode est, pour l'essentiel, identique à celle qui a été décrite par Miya et Sasaki [1966] et par Miya et autres [1978]; elle a été perfectionnée sur la base de résultats de mesure obtenus par l'UER pendant 10 ans pour modifier la courbe de l'affaiblissement ionosphérique [UER, 1976]; on a utilisé également un certain nombre de graphiques de foEs fournis par des membres du GTI 6/8. Les données fournies par la présente Recommandation concernent les latitudes géomagnétiques comprises entre $\pm 60^\circ$; il faut, par conséquent, continuer à étudier dans quelle mesure la méthode s'applique dans les régions de haute latitude.

Les résultats obtenus lors d'expériences réalisées par l'URSS sur 9, 14, 24 et 44 MHz pour un trajet de 1050 km [CCIR, 1978-82] et par la République Argentine sur 47,620 MHz sur un trajet de 1070 km, témoignent d'une concordance satisfaisante avec cette méthode de prévision [Giraldez, 1984] pour, dans les deux cas, des régions de latitude magnétique moyenne.

Dans la région équatoriale, des résultats expérimentaux 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 (voir le Rapport 259). 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 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 en présence d'E sporadique

On peut exprimer le champ en présence de E_s par la formule suivante:

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

$$E_0 = 105 - 20 \log l \quad \text{dB} \quad (2)$$

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;

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

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

L_t : perte dans l'antenne d'émission (dB);

Γ : affaiblissement ionosphérique (dB) représenté par les courbes pleines de la Fig. 1;

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

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

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

et 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)

$$l = (d^2 + 4h^2)^{1/2} \quad (5)$$

où

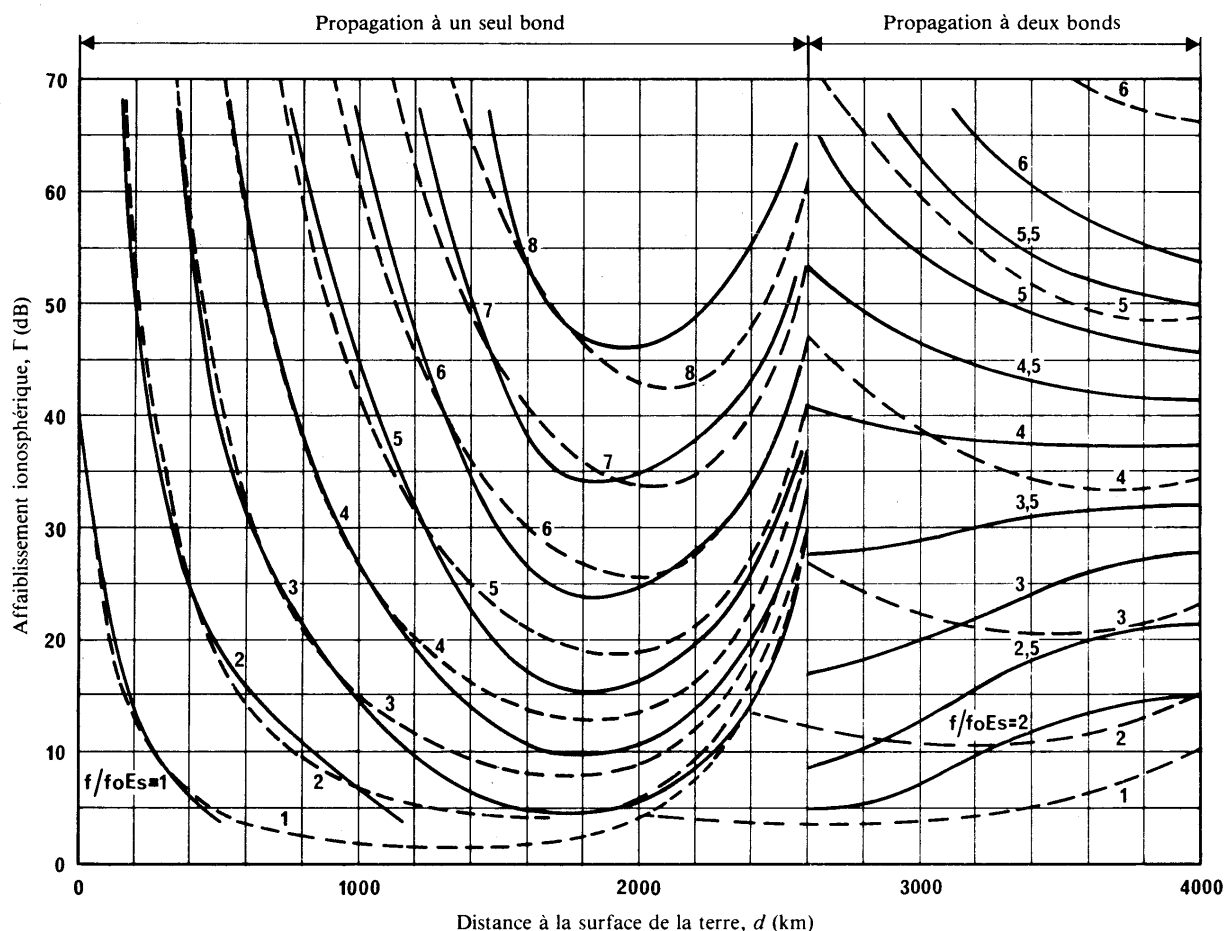
h : hauteur de la couche E_s (km);

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

f : fréquence du signal (MHz);

f_oE_s : fréquence critique de l'ionisation sporadique de la région E 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 pointillés). Il convient de limiter l'emploi de la formule (3) aux distances inférieures à 2600 km et à des valeurs de f/f_oE_s 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 2600 et 4000 km et à des valeurs de f/f_oE_s 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

D01-sc

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

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

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

- calculer la valeur de E_0 correspondant à une valeur indiquée de l en utilisant la formule (2);
- (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;
- (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;
- calculer $f/foEs$;
- en utilisant les courbes en trait plein 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);
- calculer la valeur estimée de E en appliquant la formule (1), en se servant des valeurs données de P , G_b , et L_b , 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 Partie 6 du Rapport 340. 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 en présence de 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 [Smith, 1976, 1978]). 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 probabilités 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:

$$\log p = a + b f \quad (6)$$

où

p : probabilité foEs $> f$,

f : fréquence en 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 heures 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 quatre 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 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.

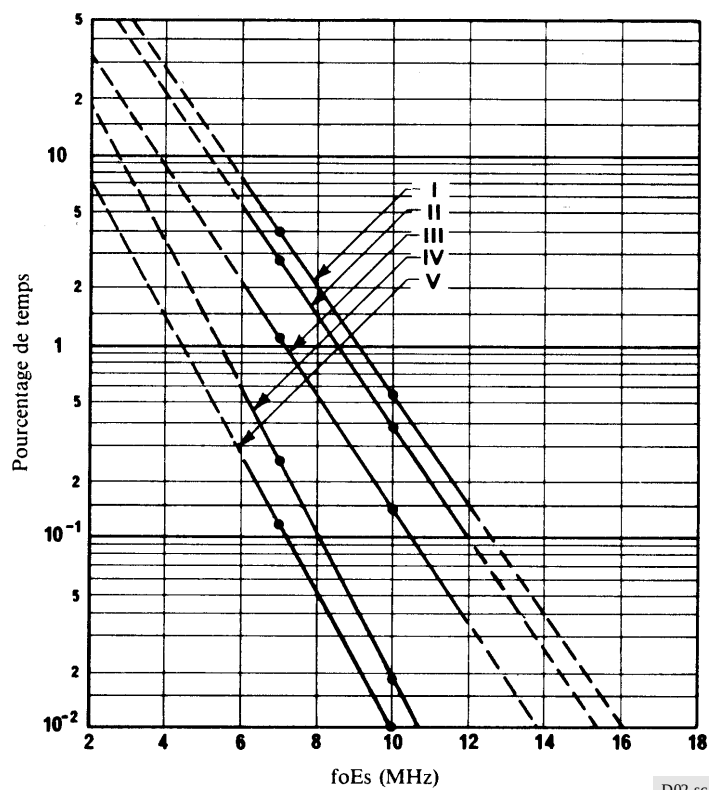


FIGURE 2 – Valeurs de $foEs$ égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région A

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

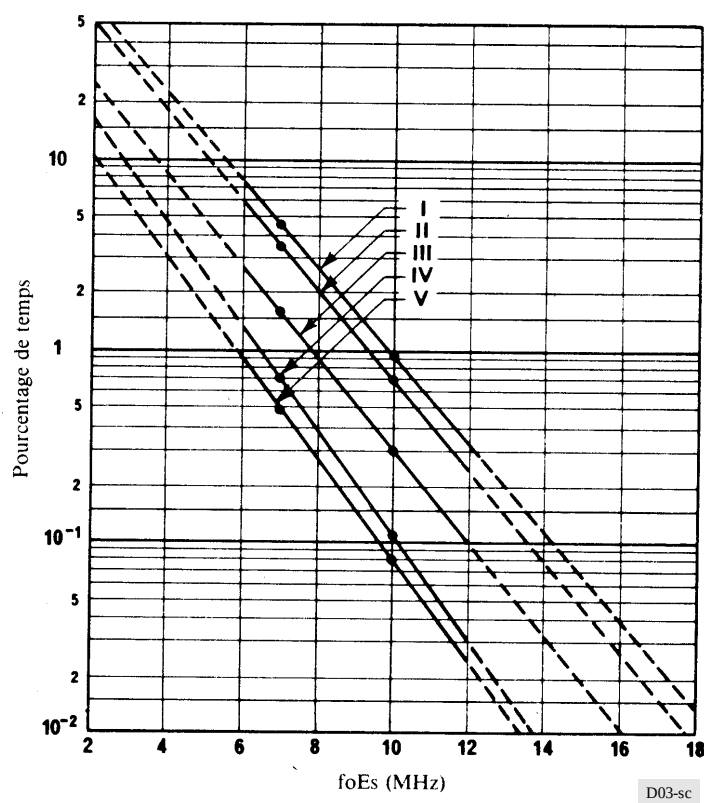


FIGURE 3 – Valeurs de f_oE_s égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région B

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

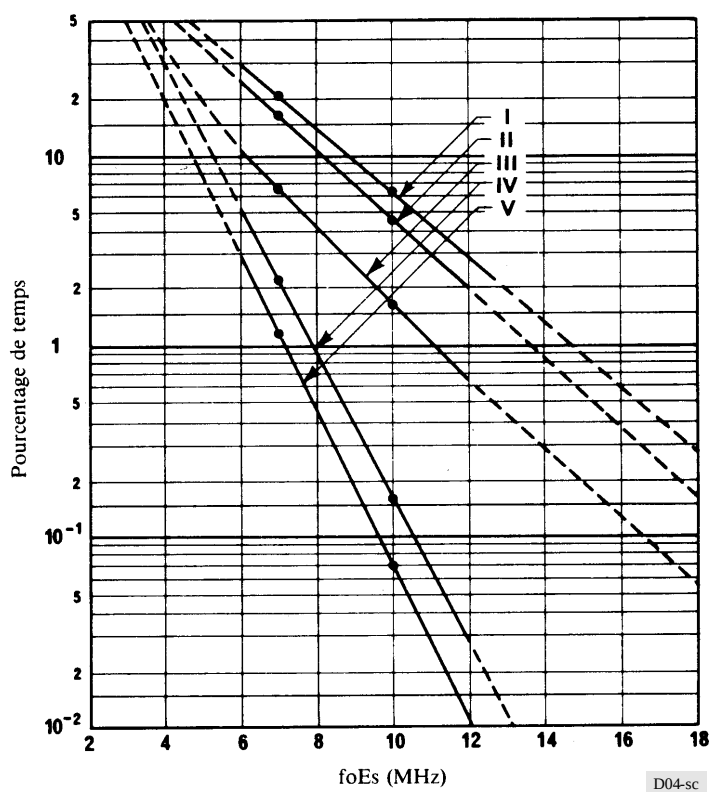


FIGURE 4 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région C

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

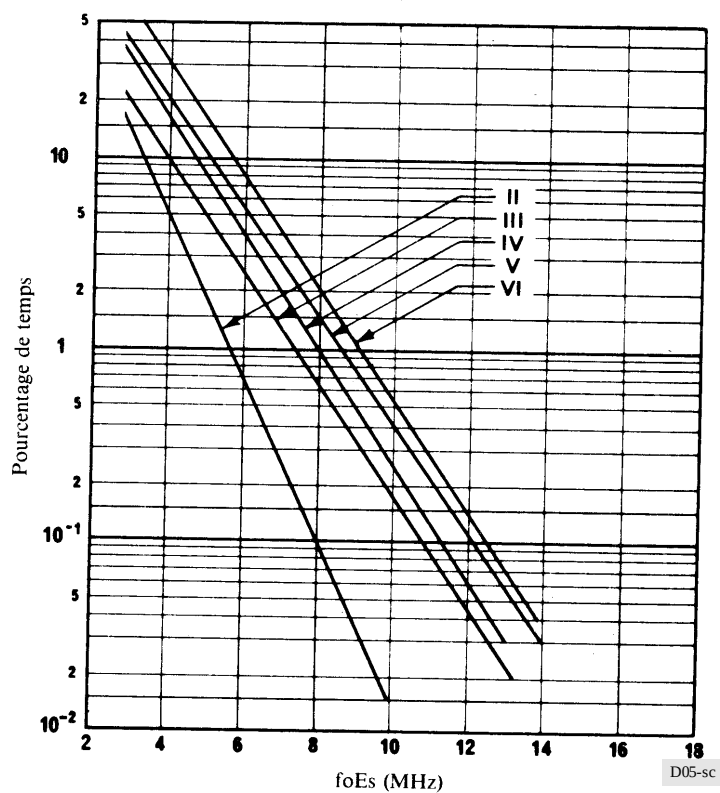


FIGURE 5 – Valeurs de f_oE_s égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, dans la région D

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)

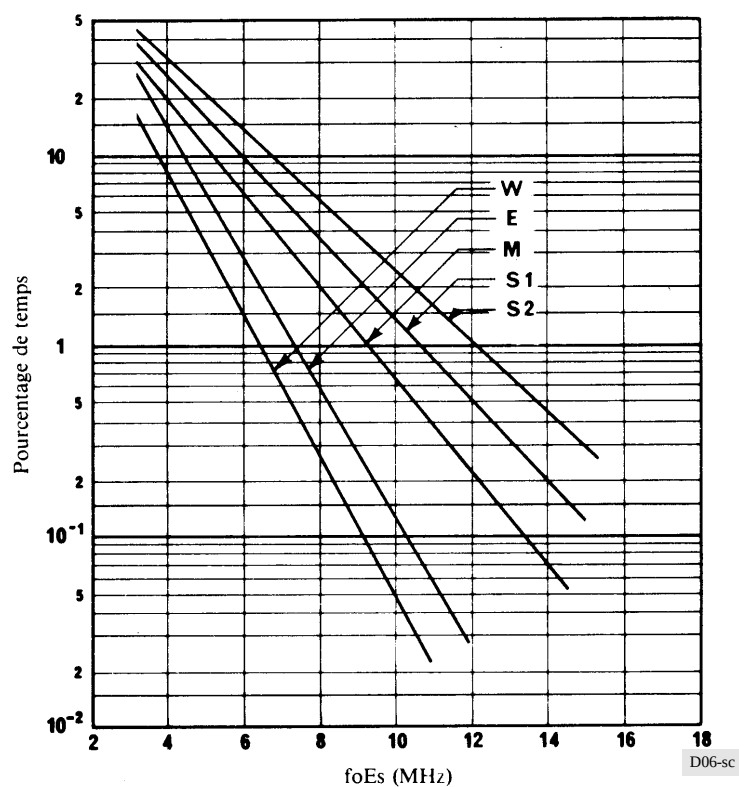


FIGURE 6 – Valeurs de f_oE_s égalées ou dépassées pour les pourcentages de temps indiqués

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

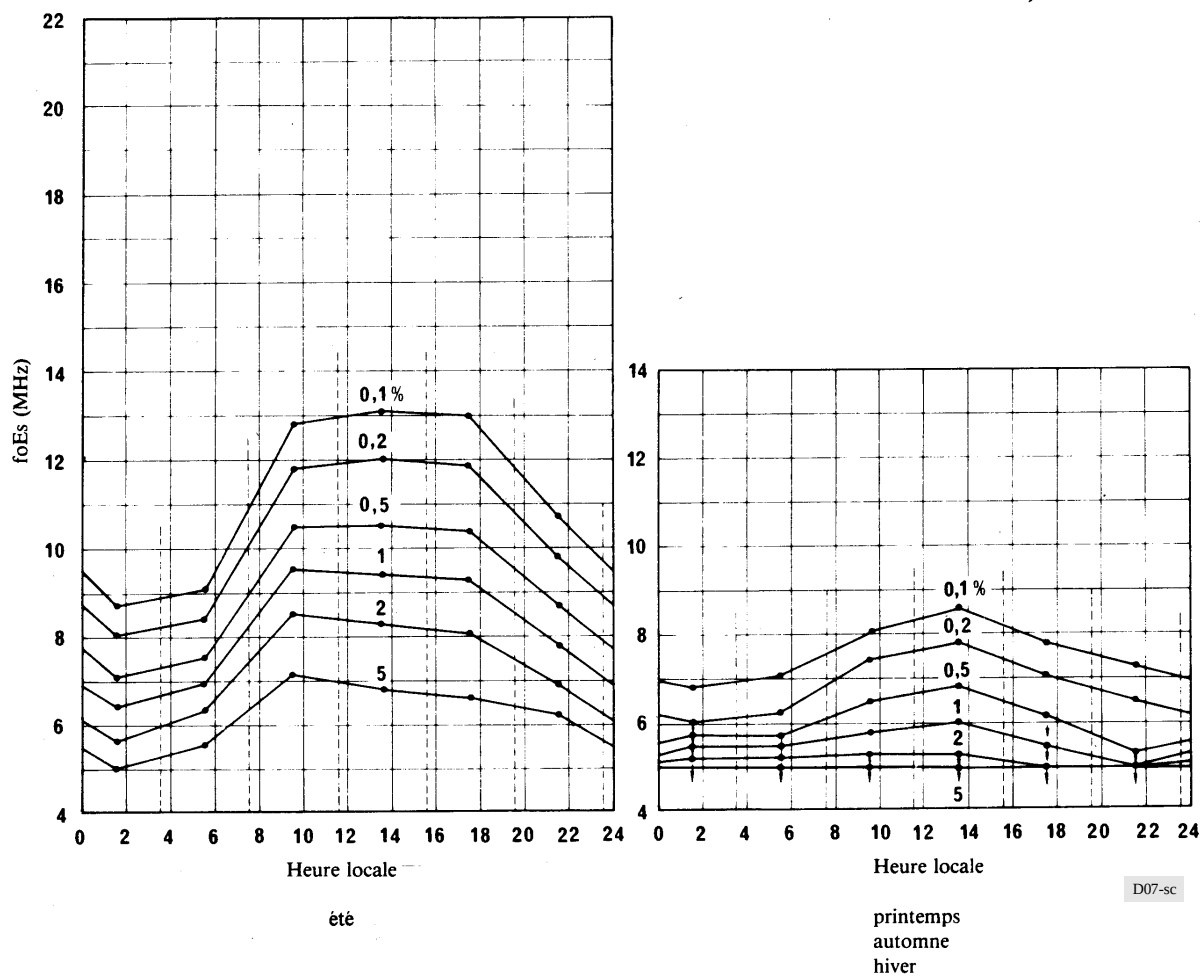


FIGURE 7 – Valeurs de f_oE_s égalées ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région A (Europe et Afrique du Nord)

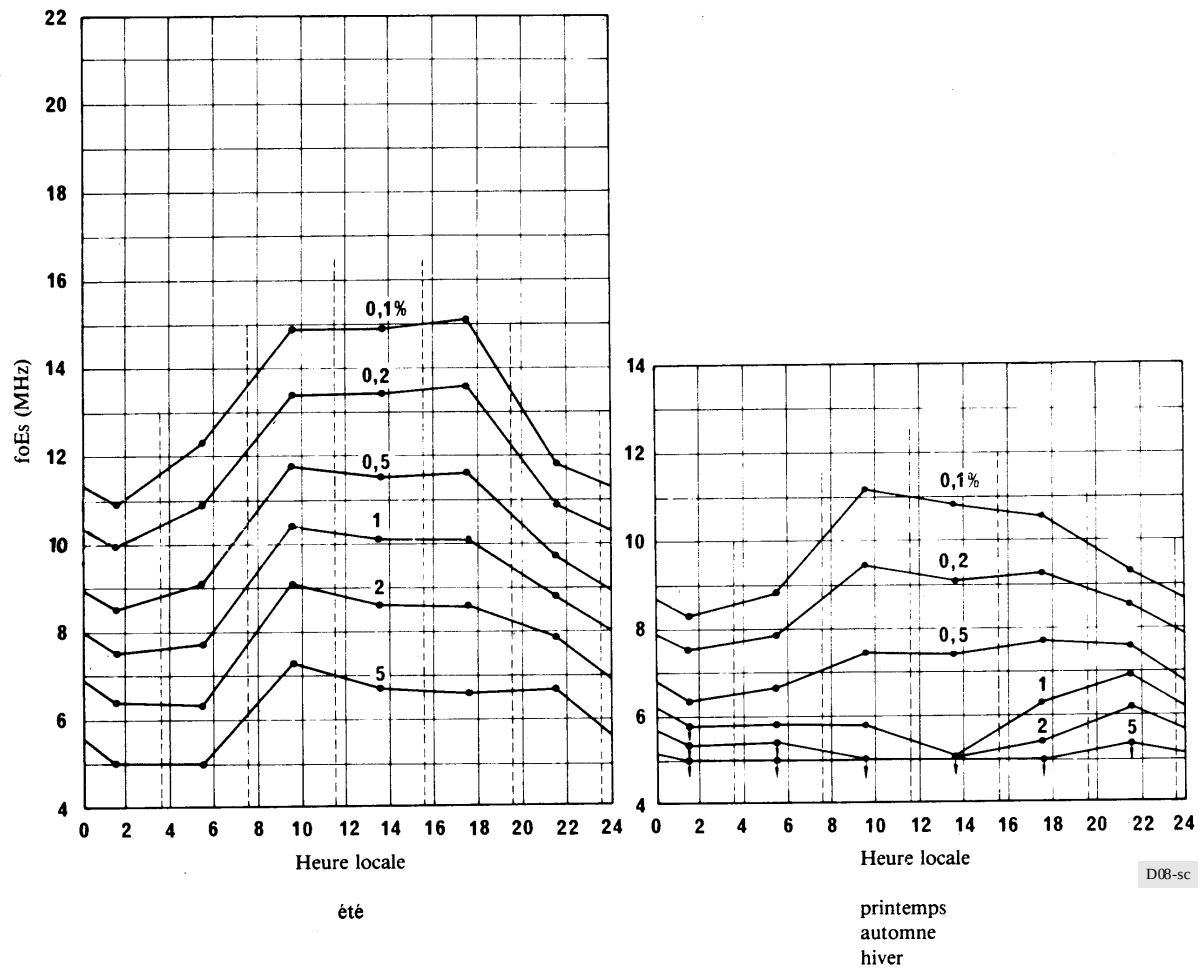


FIGURE 8 – Valeurs de f_oE_s égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région B (Amérique du Nord)

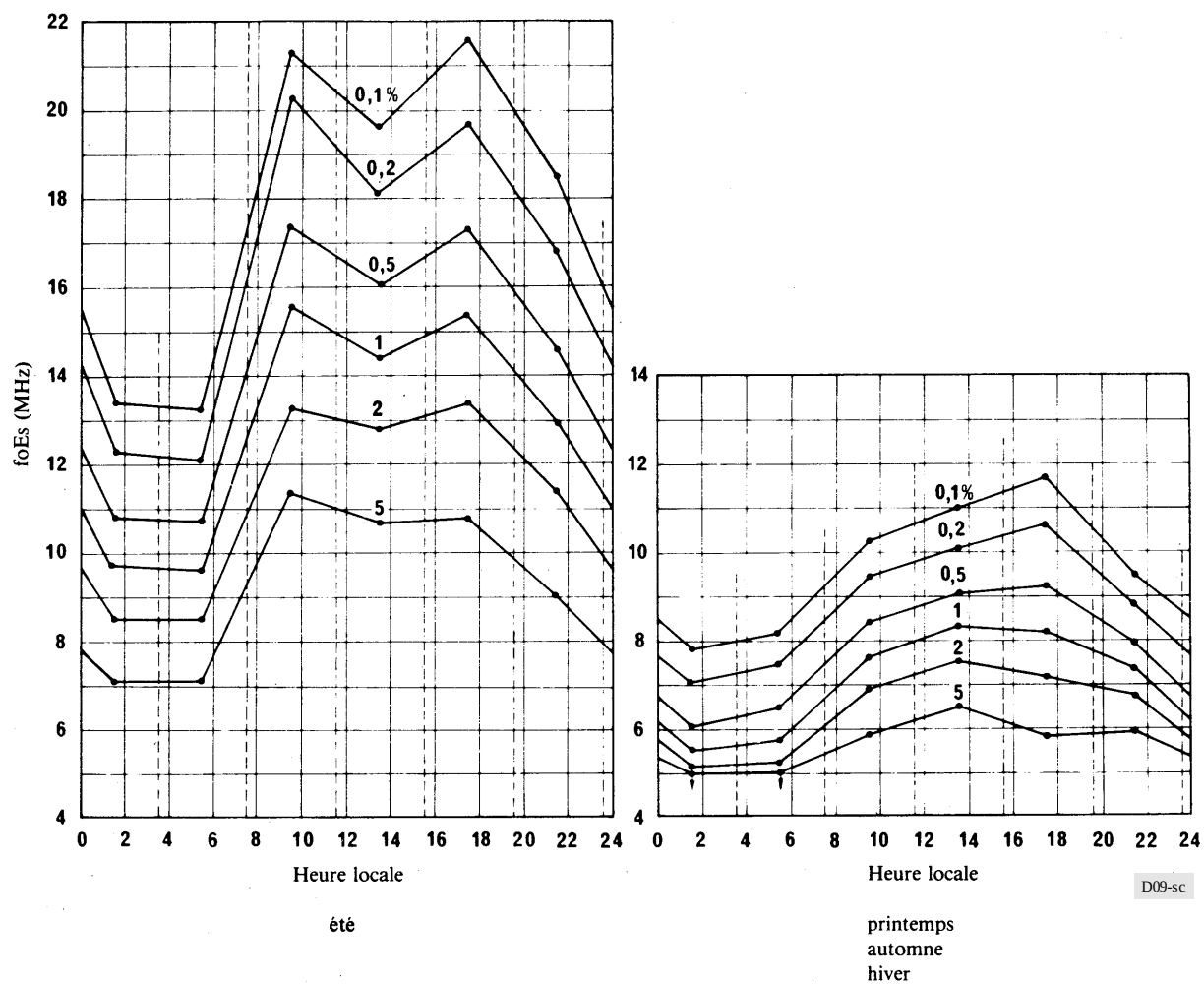


FIGURE 9 – Valeurs de $foEs$ égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués comme paramètre sur la courbe, à l'intérieur de tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région C (Asie (Extrême-Orient))

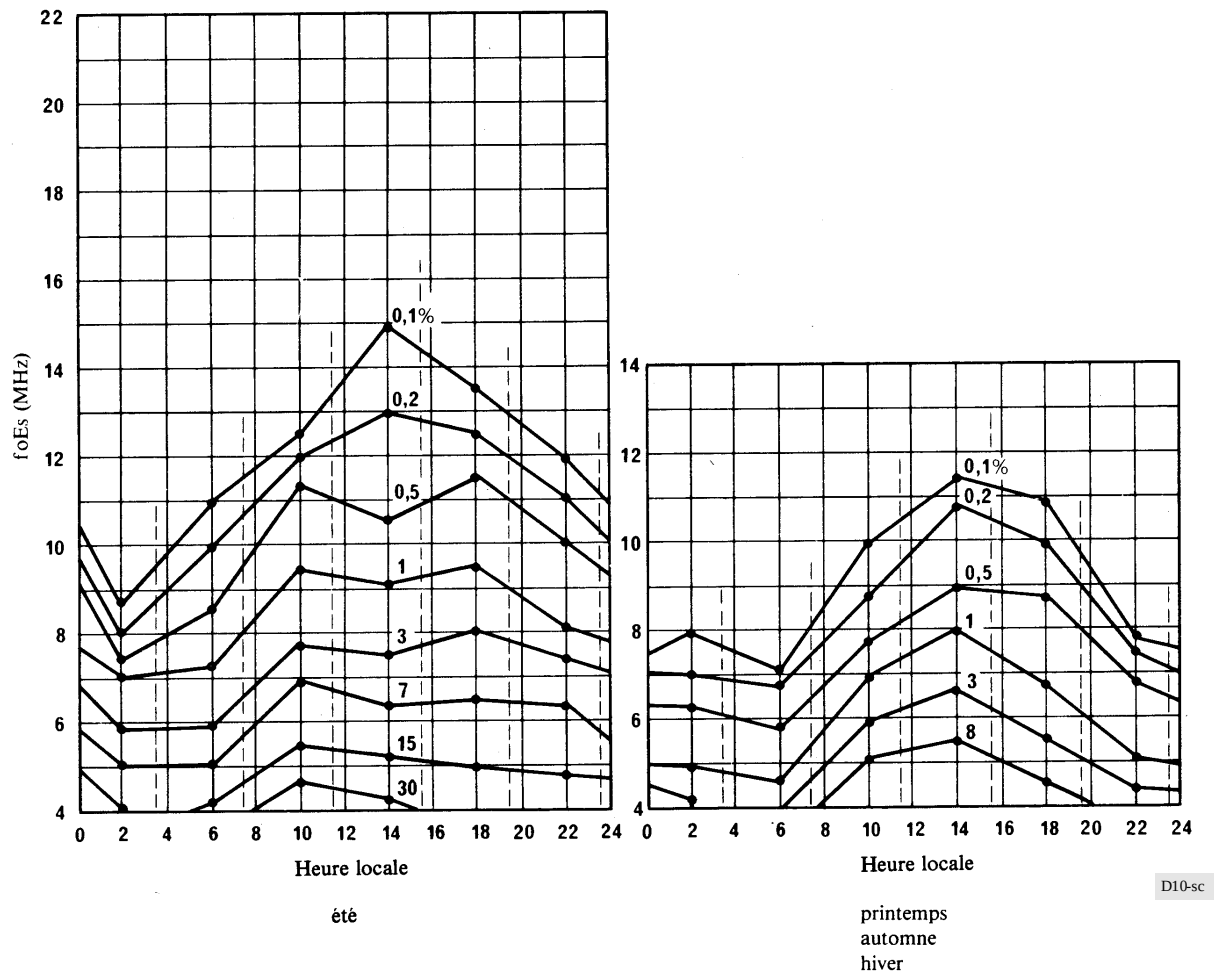


FIGURE 10 – Valeurs de f_oE_s égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) dans la région D (Amérique du Sud)

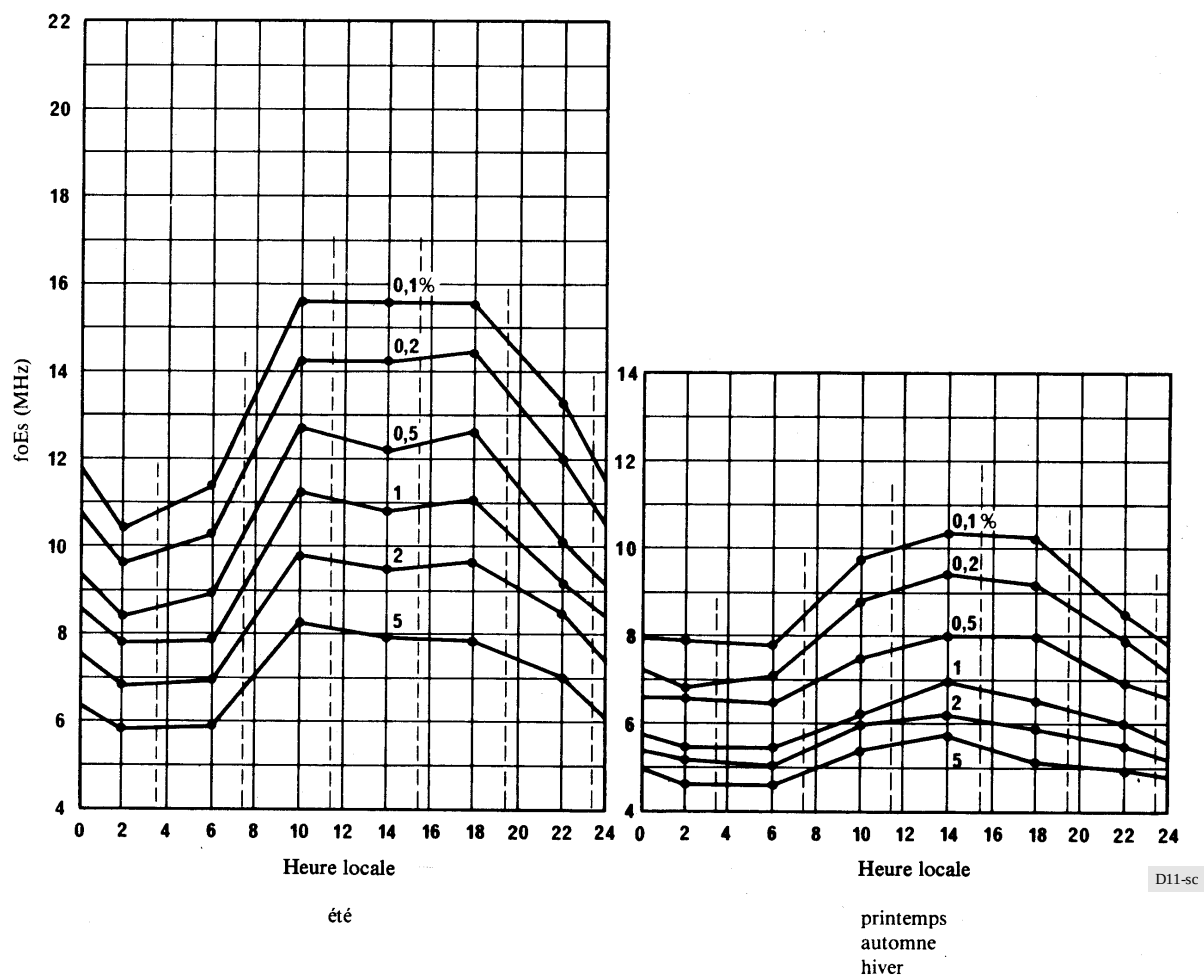


FIGURE 11 – Valeurs de f_oE_s égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, en tant que paramètre de la courbe par tranches horaires de 4 heures (indiquées par des lignes verticales en pointillé) pour les régions A, B, C et D

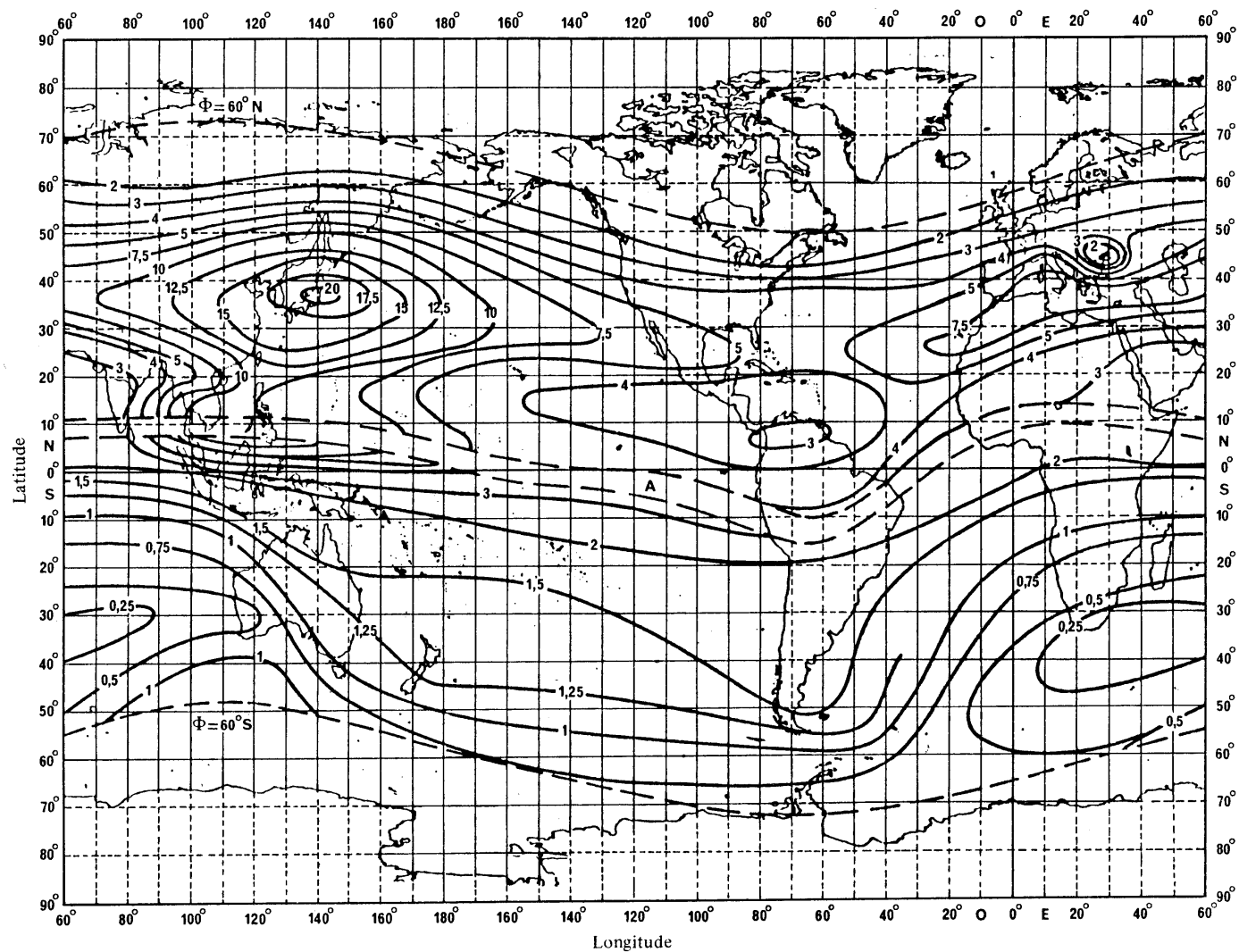


FIGURE 12 – Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de mai, juin, juillet et août

D12-sc

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

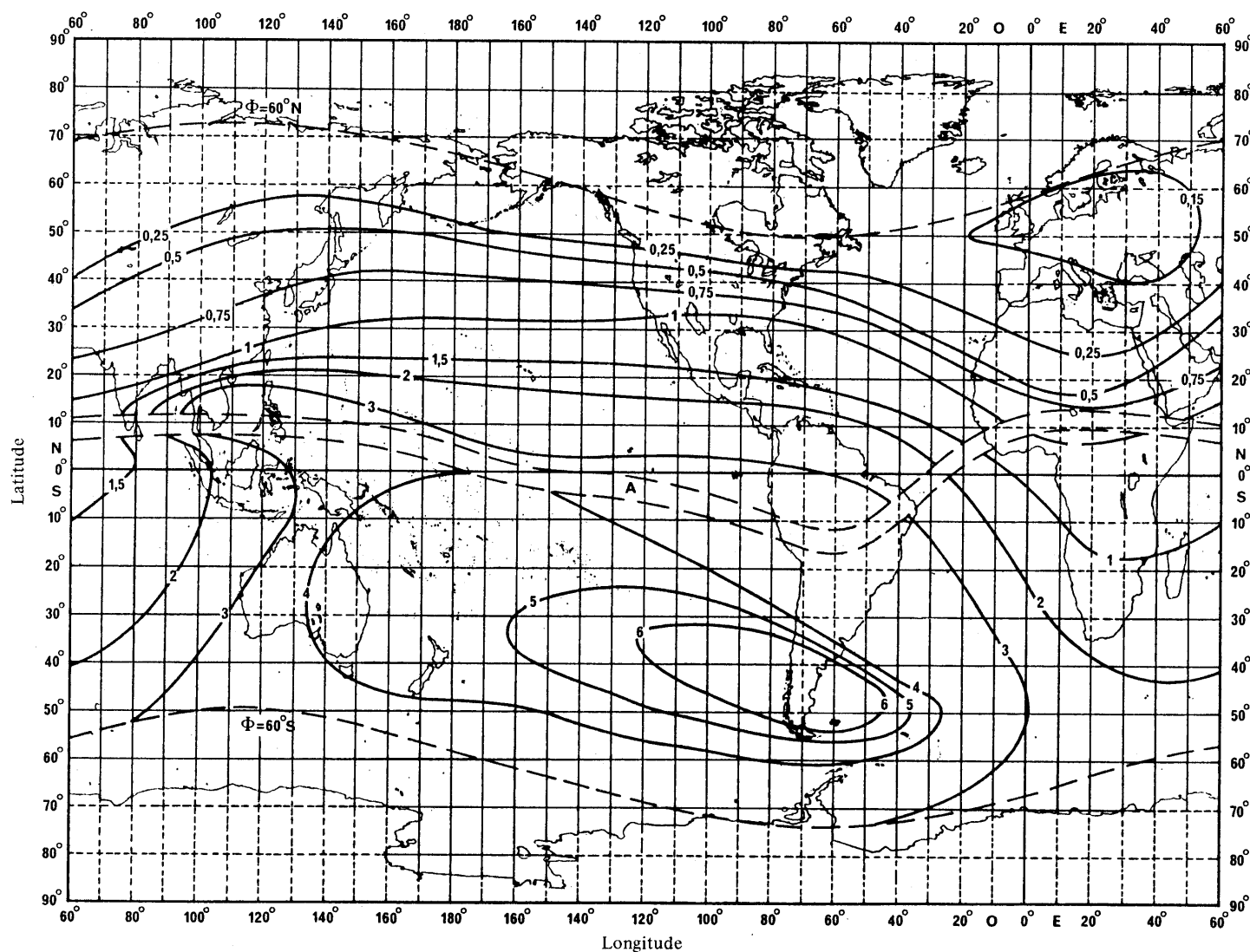


FIGURE 13 – Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (f_oE_s) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de novembre, décembre, janvier et février

D13-sc

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

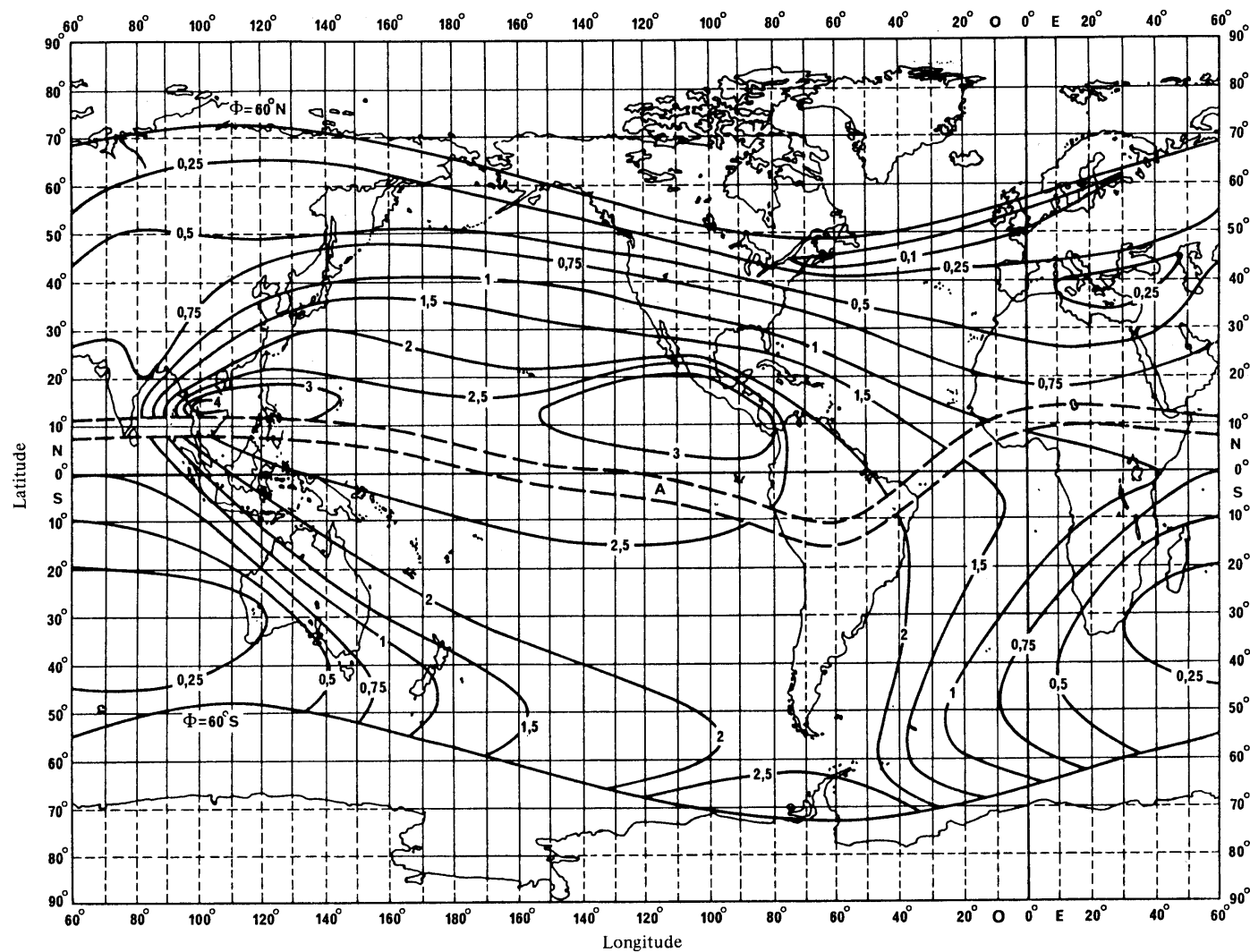


FIGURE 14 – Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de la couche E sporadique (foEs) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale dans les régions de moyenne latitude et pour les mois de mars, avril, septembre et octobre

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

D14-sc

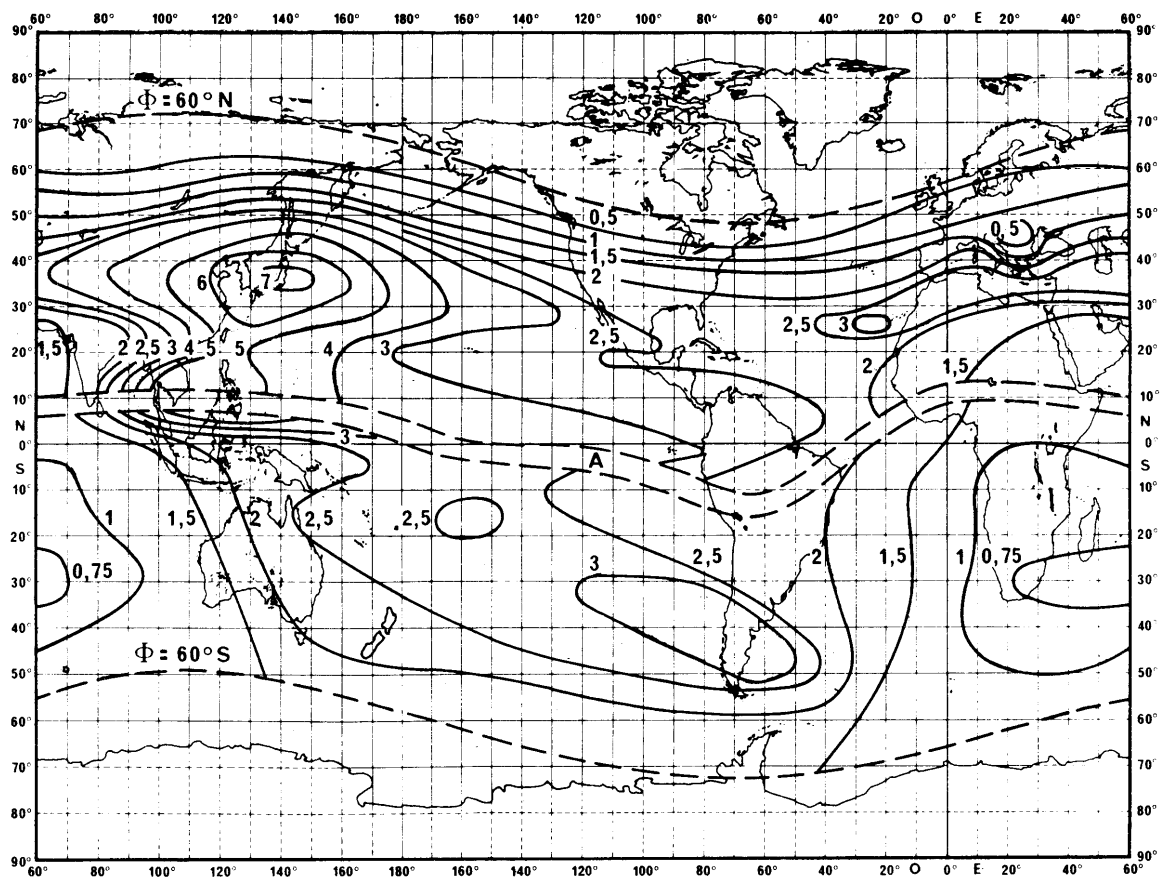


FIGURE 15 — Pourcentages de temps pendant lesquels la fréquence critique de l'ionisation sporadique (f_oE_s) égale ou dépasse 7 MHz sous incidence verticale, dans les régions de moyenne latitude pendant les 12 mois de l'année

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

D15-sc

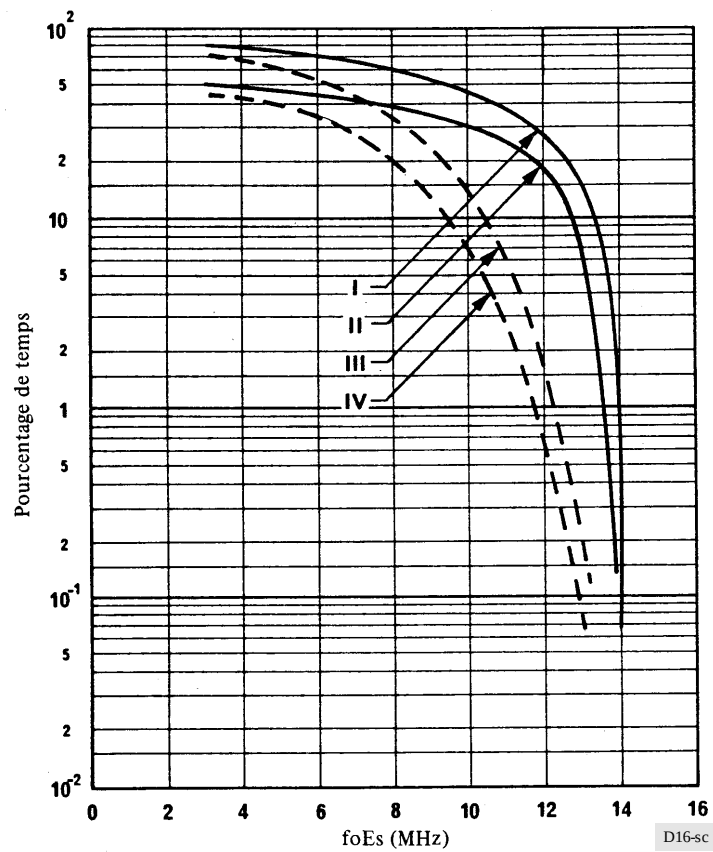


FIGURE 16 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

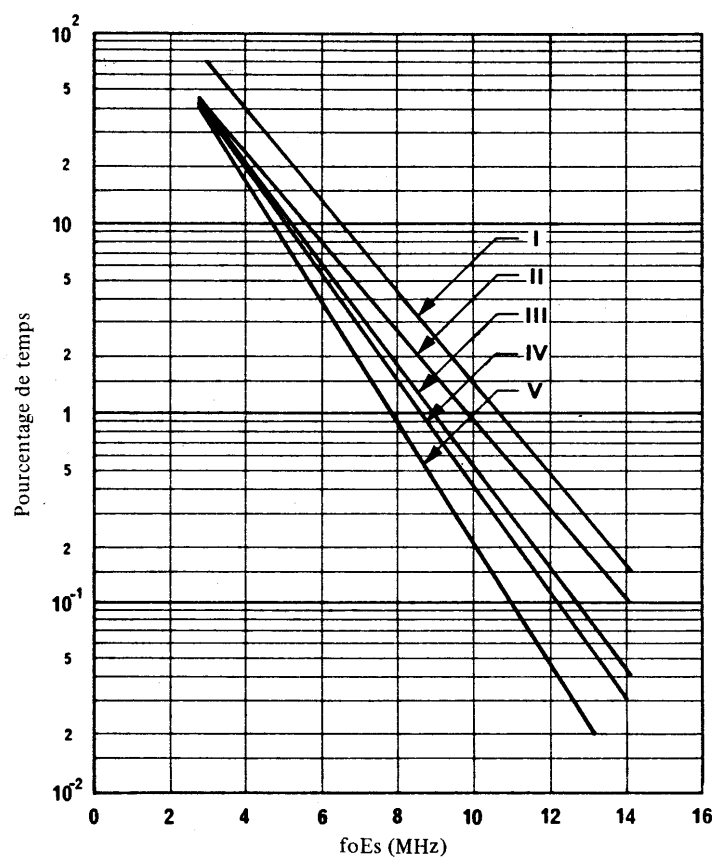
Région E: Asie équatoriale (latitude d'inclinaison $\pm 6^\circ$)

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



D17-sc

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)

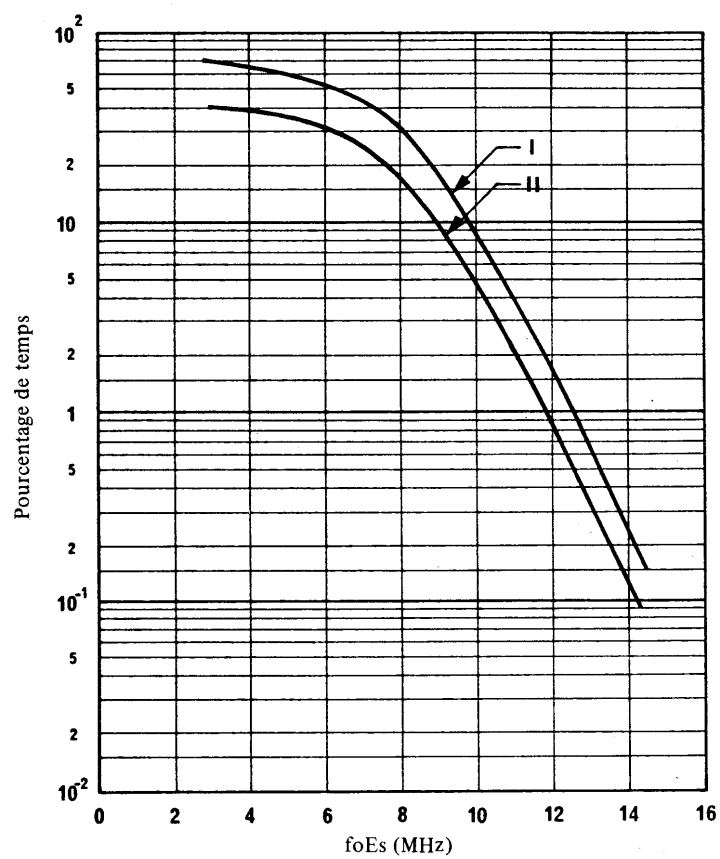
I: été (0600-1800 h)

II: été

III: moyenne annuelle

IV: équinoxe

V: hiver



D18-sc

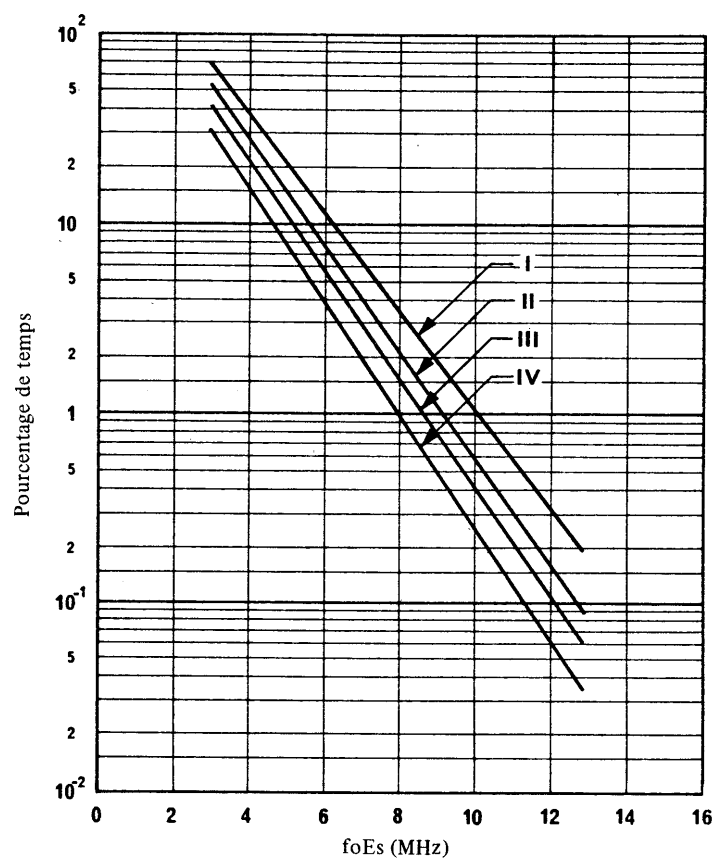
FIGURE 18 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

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.



D19-sc

FIGURE 19 – Valeurs de f_oE_s 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

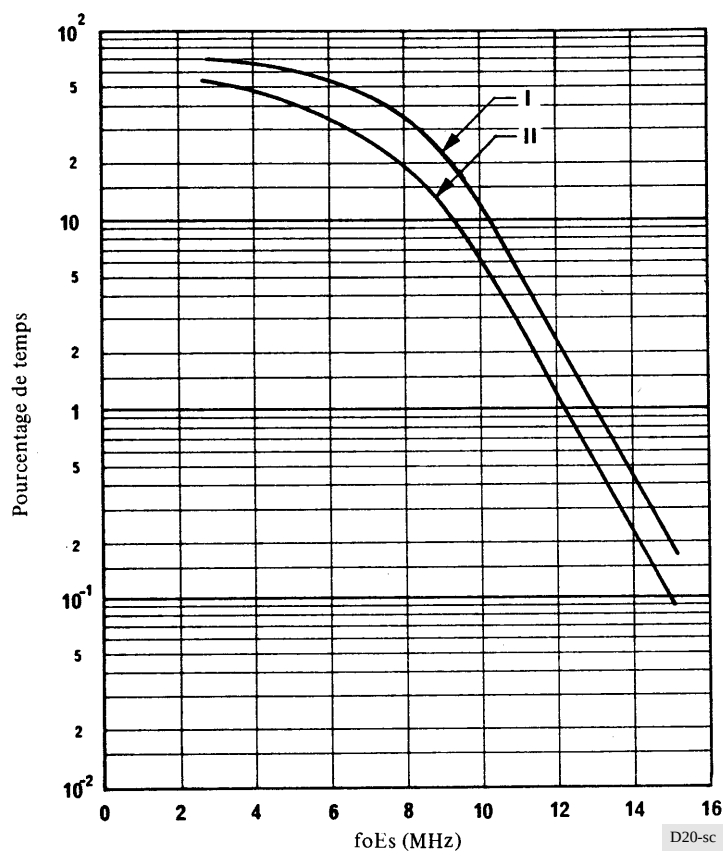


FIGURE 20 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

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.

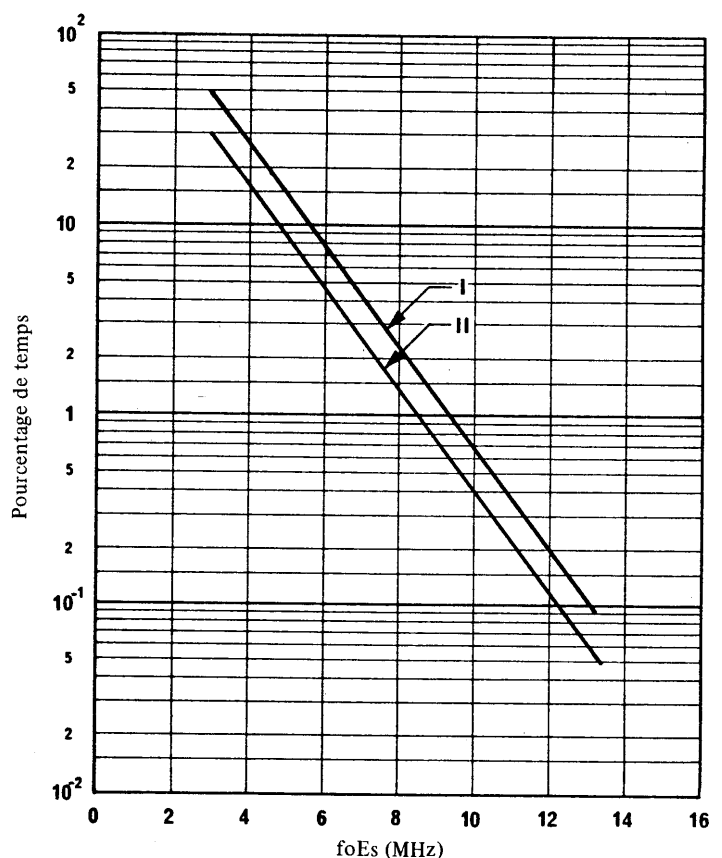


FIGURE 21 – Valeurs de foEs égales ou dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués

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.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GIRALDEZ, A. E. [1984] Long distance Abnormal VHF propagation. *Contributions on Radiopropagation and Electromagnetic Compatibility 1982-1984* - SECYT, Secretaría de Ciencia y Técnica, Buenos Aires, Argentine.
- MIYA, K. et SASAKI, T. [1966] Characteristics of ionospheric Es propagation and calculation of Es signal strength. *Radio Sci.*, Vol. 1, 99-108.
- MIYA, K., SHIMIZU, K. et KOJIMA, T. [1978] Oblique-incidence sporadic-E propagation and its ionospheric attenuation. *Radio Sci.*, Vol. 13, 3, 559-570.
- SMITH, E. K. [1976] World maps of sporadic E (foEs > 7 MHz) for use in prediction of VHF oblique-incidence propagation. OT Special Publication 76-10, National Technical Information Service (NTIS) Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- SMITH, E. K. [1978] Temperate zone sporadic E maps (foES > 7 MHz) *Radio Sci.*, Vol. 13, 3, 571-575.
- UER [1976] Propagation ionosphérique des ondes métriques en Europe (Télévision en bande I). Document technique de l'UER TECH 3214, Vol. I et II. Centre technique, 32, Avenue Albert Lancaster, 1180-Bruxelles, Belgique.
- Documents du CCIR
- [1978-82]: 6/63 (URSS).

BIBLIOGRAPHIE

- MORO, E. S. M. [1984] Anomalous VHF propagations. *Contributions on Radiopropagation and Electromagnetic Compatibility 1982-1984*. SECYT, Secretaría de Ciencia y Técnica, Buenos Aires, Argentine.