

## RECOMMANDATION UIT-R P.453-6

**INDICE DE RÉFRACTION RADIOÉLECTRIQUE: FORMULES  
ET DONNÉES DE RÉFRACTIVITÉ**

(Question UIT-R 201/3)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) qu'il est nécessaire d'utiliser une formule unique pour calculer l'indice de réfraction radioélectrique de l'atmosphère;
- b) qu'il faut disposer de données de référence sur le coïndice de réfraction et son gradient dans le monde entier;
- c) qu'il est nécessaire d'avoir une méthode mathématique pour exprimer la répartition statistique des gradients du coïndice,

*recommande*

- 1 que l'on calcule l'indice  $n$  de réfraction radioélectrique de l'atmosphère au moyen de la formule donnée dans l'Annexe 1;
- 2 que l'on utilise les données de réfractivité qui se trouvent sur les cartes du monde à l'Annexe 1, sauf si des données locales plus fiables sont disponibles;
- 3 que la répartition statistique des gradients du coïndice soit calculée selon la méthode indiquée dans l'Annexe 1.

## ANNEXE 1

**1 Formule de l'indice de réfraction radioélectrique**L'indiced  $n$  de réfraction radioélectrique de l'atmosphère est donné par la formule suivante:

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \quad (1)$$

où:

 $N$ : coïndice de réfraction exprimé par:

$$N = N_{sec} + N_{hum} = \frac{77,6}{T} \left( P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (2)$$

le «terme sec» du coïndice de réfraction étant donné par:

$$N_{sec} = 77,6 \frac{P}{T} \quad (3)$$

et le «terme humide» par:

$$N_{hum} = 3,732 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

où:

 $P$ : pression atmosphérique (hPa) $e$ : pression partielle de vapeur d'eau (hPa) $T$ : température absolue (K).

Cette expression peut être utilisée pour toutes les fréquences radioélectriques; pour les fréquences jusqu'à 100 GHz, elle introduit une erreur inférieure à 0,5%. Les profils représentatifs de la température, de la pression et de la pression partielle de vapeur d'eau figurent dans la Recommandation UIT-R P.835.

A titre de référence, la relation entre la pression partielle de vapeur d'eau  $e$  et l'humidité relative est donnée par:

$$e = \frac{H e_s}{100} \quad (5)$$

avec:

$$e_s = a \exp\left(\frac{b t}{t + c}\right) \quad (6)$$

où:

$H$ : humidité relative (%)

$t$ : température (°C)

$e_s$ : pression de vapeur saturante de l'eau (hPa) à la température  $t$  (°C) et les coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  valent:

*pour l'eau liquide:*

$$a = 6,1121$$

$$b = 17,502$$

$$c = 240,97$$

(applicable entre  $-20^\circ$  et  $+50^\circ$ ,  
avec une précision de  $\pm 0,20\%$ )

*pour la glace:*

$$a = 6,1115$$

$$b = 22,452$$

$$c = 272,55$$

(applicable entre  $-50^\circ$  et  $0^\circ$ ,  
avec une précision de  $\pm 0,20\%$ )

On obtient la pression partielle de vapeur d'eau  $e$  à partir de sa concentration  $\rho$  par l'équation:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad \text{hPa} \quad (7)$$

où  $\rho$  est donné en  $\text{g/m}^3$ . La Recommandation UIT-R P.836 donne des valeurs représentatives de  $\rho$ .

## 2 Coïndice de réfraction à la surface de la Terre et variation en fonction de la hauteur

On a constaté que sur une longue période, la variation moyenne, de l'indice de réfraction  $n$  en fonction de la hauteur  $h$  s'exprime de manière satisfaisante par une loi exponentielle:

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0) \quad (8)$$

où:

$N_0$ : valeur moyenne du coïndice de l'atmosphère extrapolée au niveau de la mer

$h_0$ : hauteur de référence (km).

Les valeurs de  $N_0$  et  $h_0$  peuvent être déterminées pour différents climats par des ajustements statistiques. A titre de référence, on peut définir une moyenne globale du profil de hauteur du coïndice en posant:

$$N_0 = 315$$

$$h_0 = 7,35 \text{ km}$$

Ces valeurs numériques ne s'appliquent qu'aux trajets de Terre.

Ce profil de référence peut servir à calculer la valeur du coïndice  $N_s$  à la surface de la Terre à partir de  $N_0$ , soit:

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0) \quad (9)$$

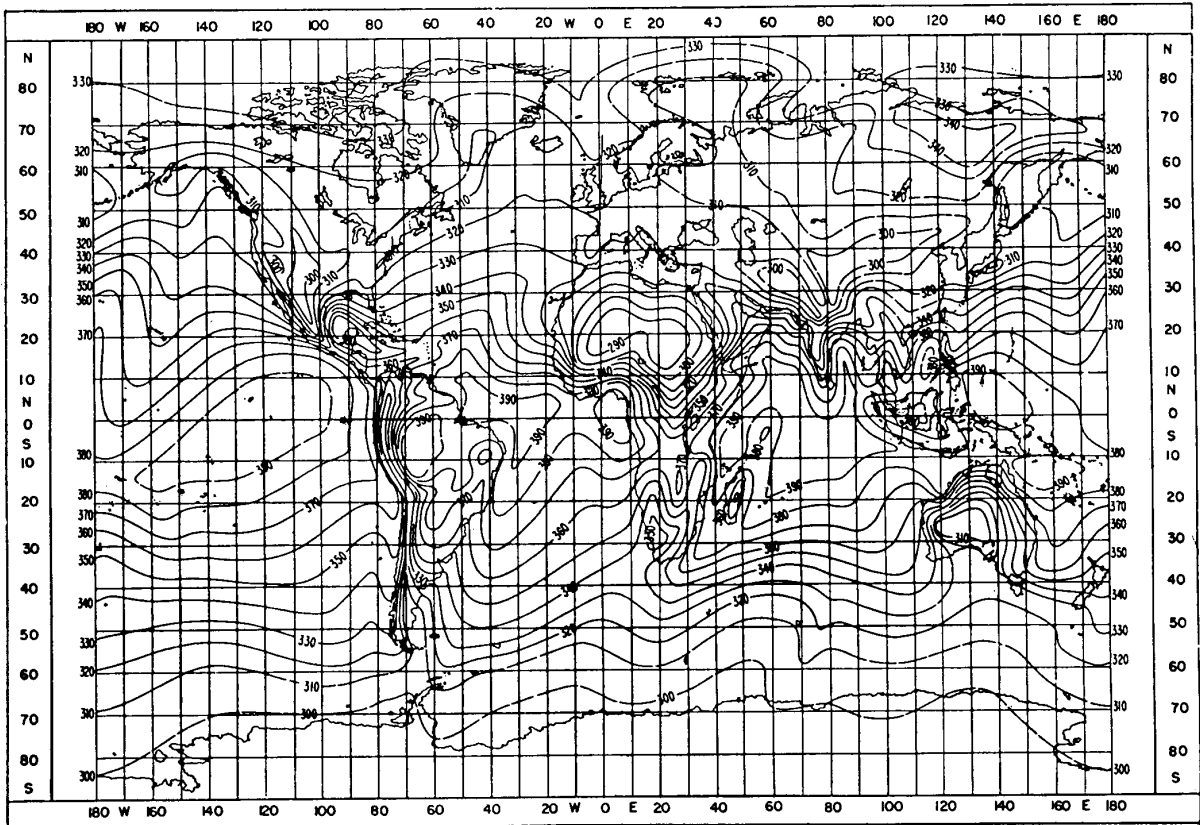
où:

$h_s$ : hauteur de la surface de la Terre au-dessus du niveau de la mer (km).

Il convient de noter cependant que les courbes des Figs. 1 et 2 ont été tracées pour  $h_0 = 9,5 \text{ km}$ .

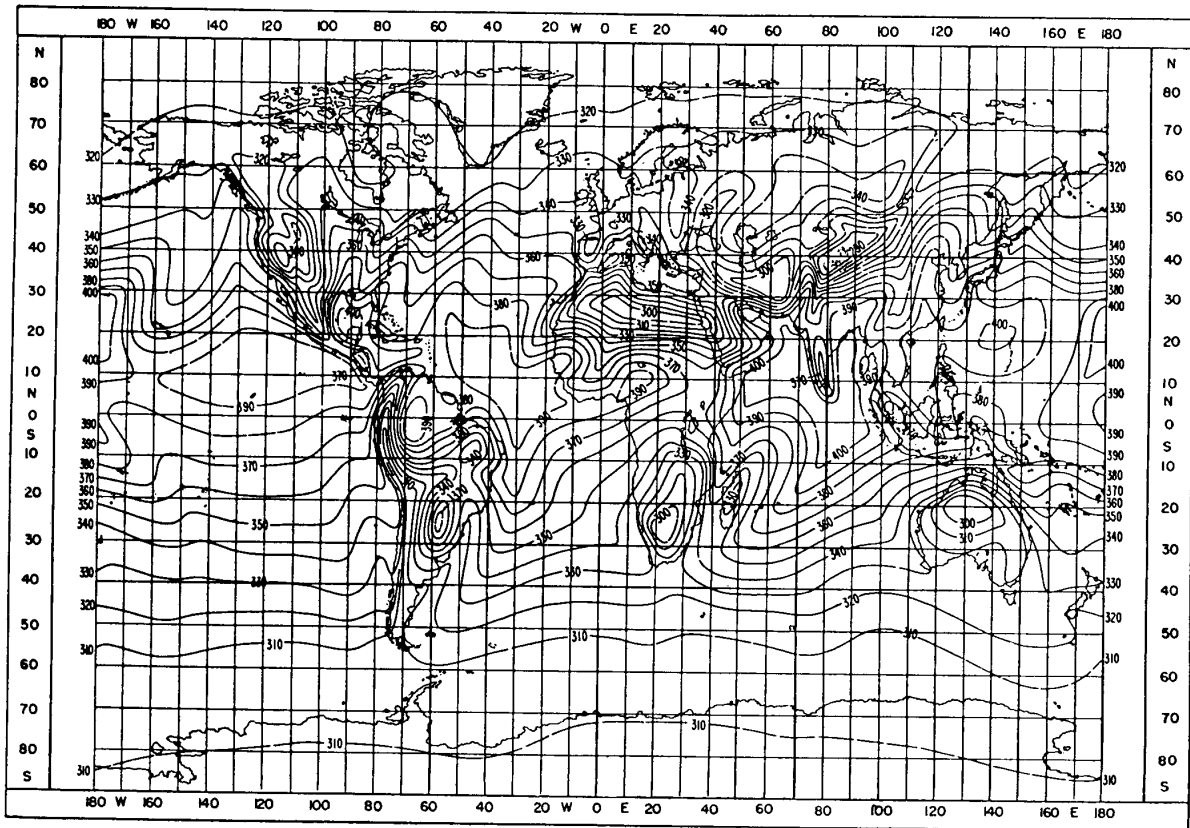
Pour les trajets Terre-satellite, l'indice de réfraction à une altitude donnée s'obtient par les formules (1), (2) et (7) ci-dessus ainsi qu'avec les valeurs appropriées des paramètres donnés dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R P.835. Les indices de réfraction ainsi obtenus peuvent alors être utilisés pour la modélisation numérique des trajets des rayons à travers l'atmosphère.

FIGURE 1  
Moyenne mensuelle de  $N_0$ : février



0453-01

FIGURE 2  
Moyenne mensuelle de  $N_0$ : août



0453-02

### 3 Gradients verticaux du coïndice

Le gradient vertical du coïndice dans la couche la plus basse de l'atmosphère est un paramètre important pour calculer le dégagement du trajet et les effets de propagation tels que la formation de conduits, les réflexions sur la surface de la Terre et la propagation par trajets multiples sur les liaisons de Terre en visibilité directe.

Les Figs. 3 à 6 donnent des isoplèthes de la décroissance moyenne mensuelle du coïndice, dans une couche de 1 km dont la limite inférieure se trouve à la surface de la Terre. La variation de  $N$ , soit  $\Delta N$ , a été calculée d'après la formule:

$$\Delta N = N_s - N_1 \quad (10)$$

où  $N_1$  est la valeur du coïndice à une hauteur de 1 km au-dessus de la surface. Les valeurs de  $\Delta N$  n'ont pas été rapportées à une surface de référence.

Les statistiques de gradients du coïndice pour les 100 premiers mètres à partir de la surface de la Terre servent à évaluer la probabilité de formation de conduits ou de trajets multiples. Lorsqu'on ne dispose pas de données locales plus fiables, on peut se référer aux cartes des Figs. 7 à 10 donnant des statistiques pour l'ensemble de la planète.

FIGURE 3  
Moyenne mensuelle de  $\Delta N$ : février

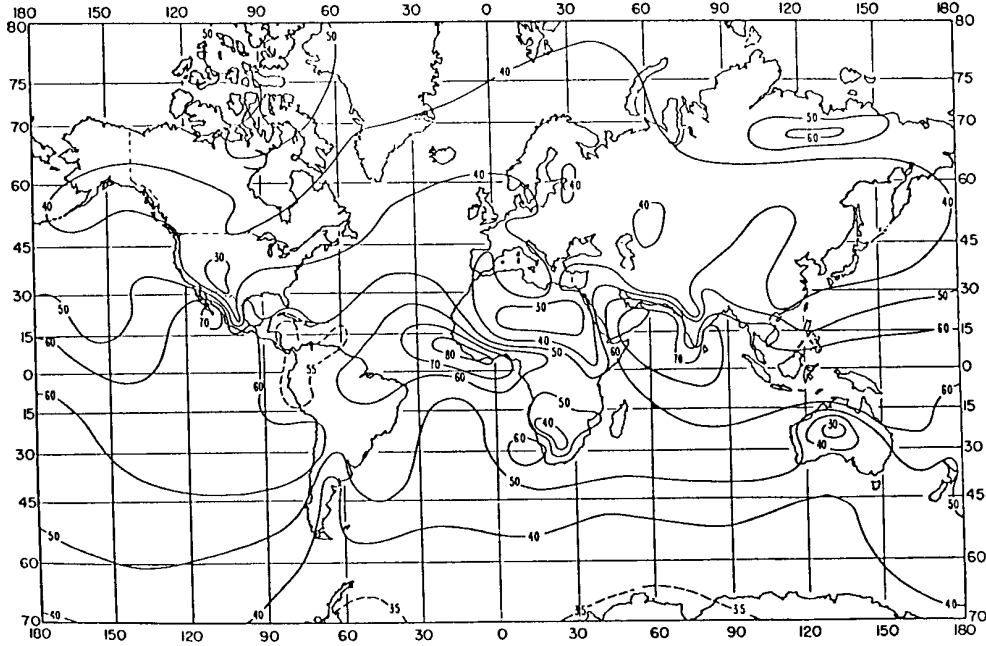
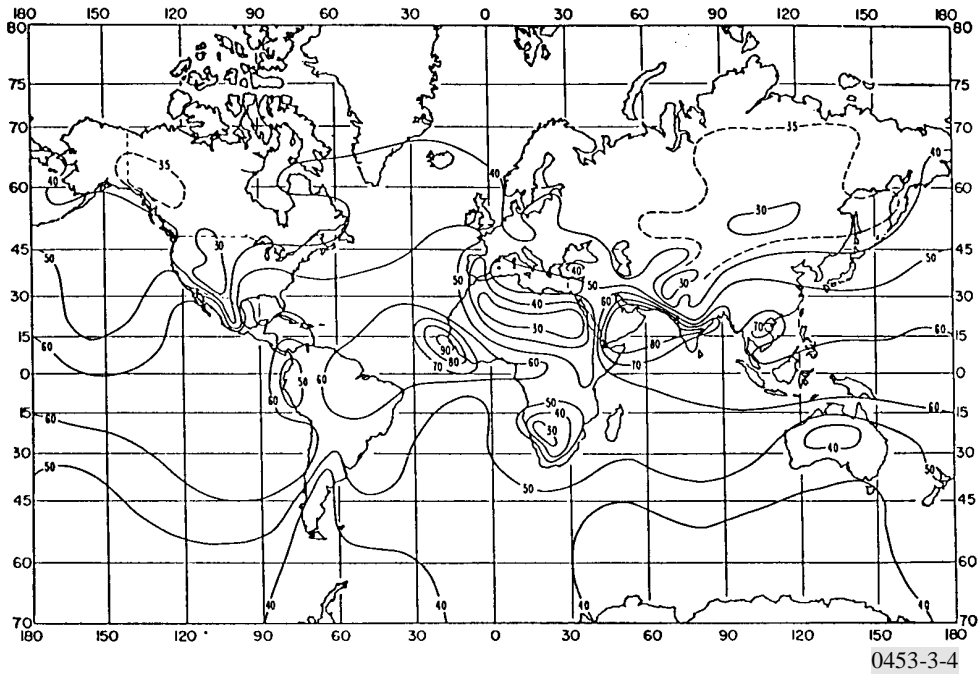


FIGURE 4  
Moyenne mensuelle de  $\Delta N$ : mai



0453-3-4

FIGURE 5

Moyenne mensuelle de  $\Delta N$ : août

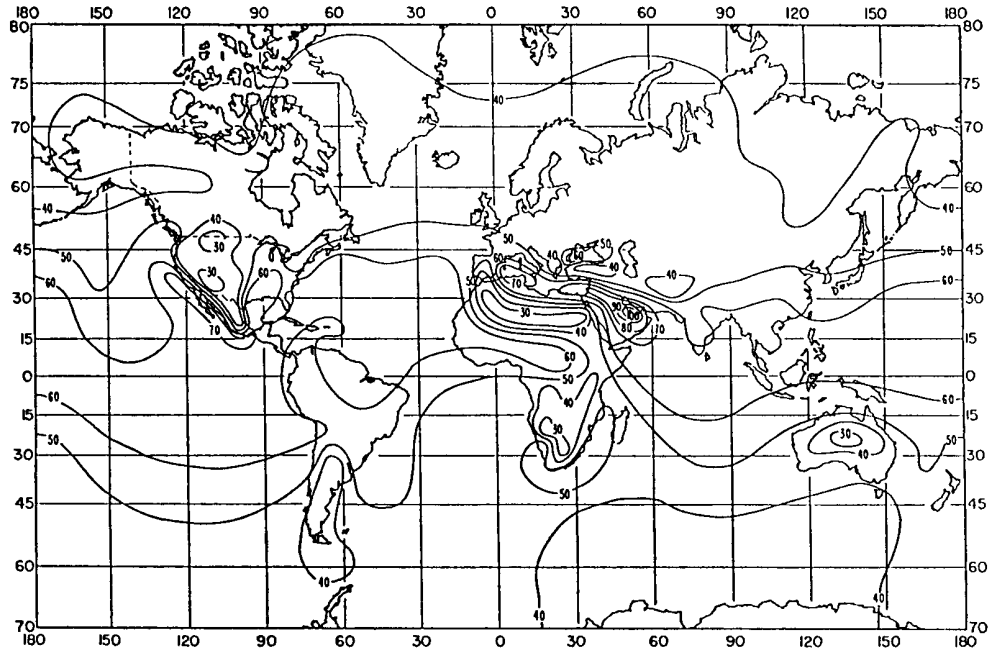
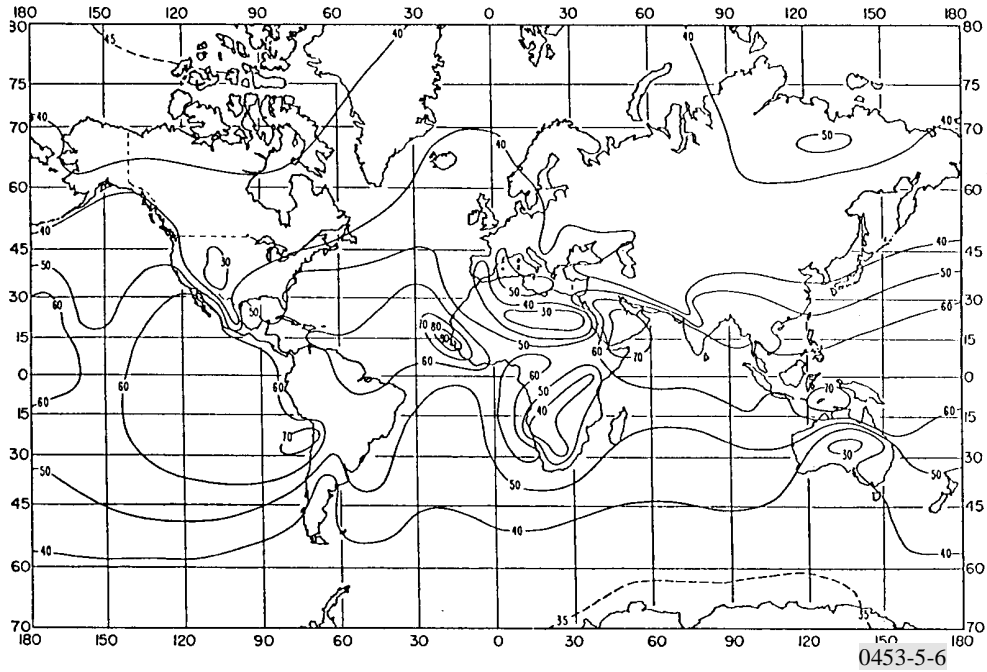


FIGURE 6

Moyenne mensuelle de  $\Delta N$ : novembre



0453-5-6

FIGURE 7  
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient  $\leq -100$  unités N/km: février

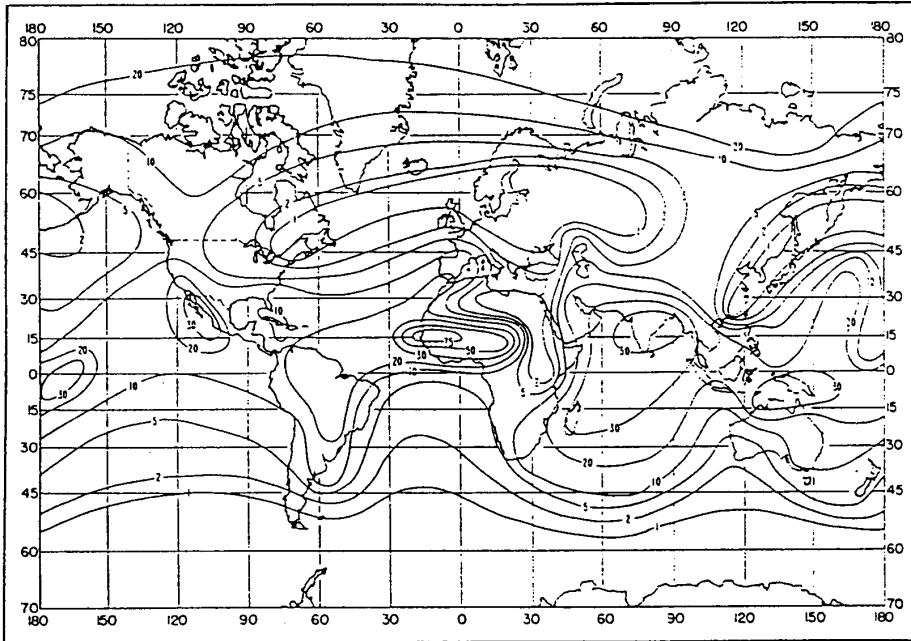


FIGURE 8  
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient  $\leq -100$  unités N/km: mai

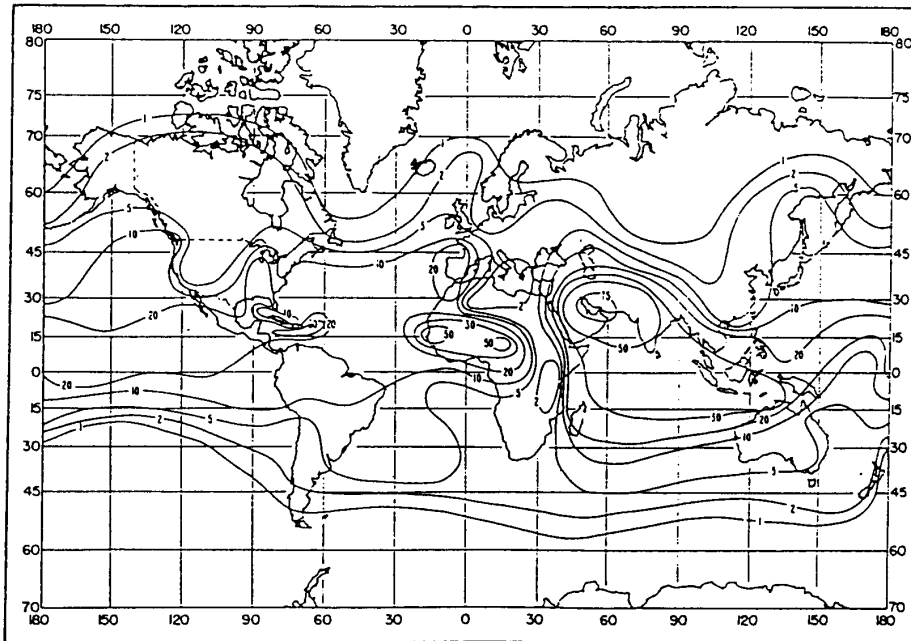


FIGURE 9  
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient  $\leq -100$  unités N/km: août

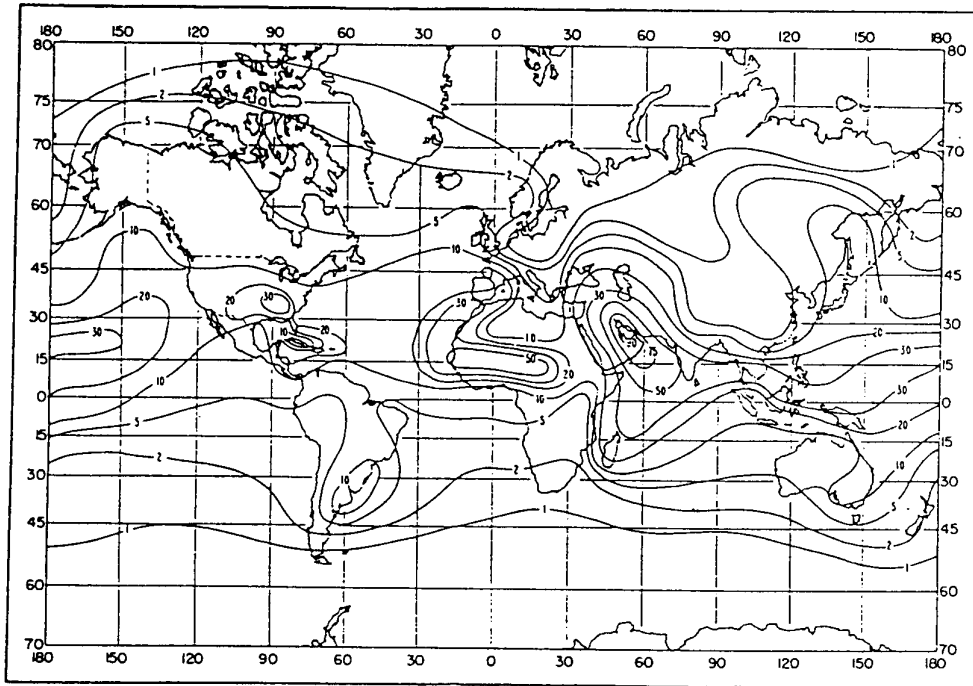
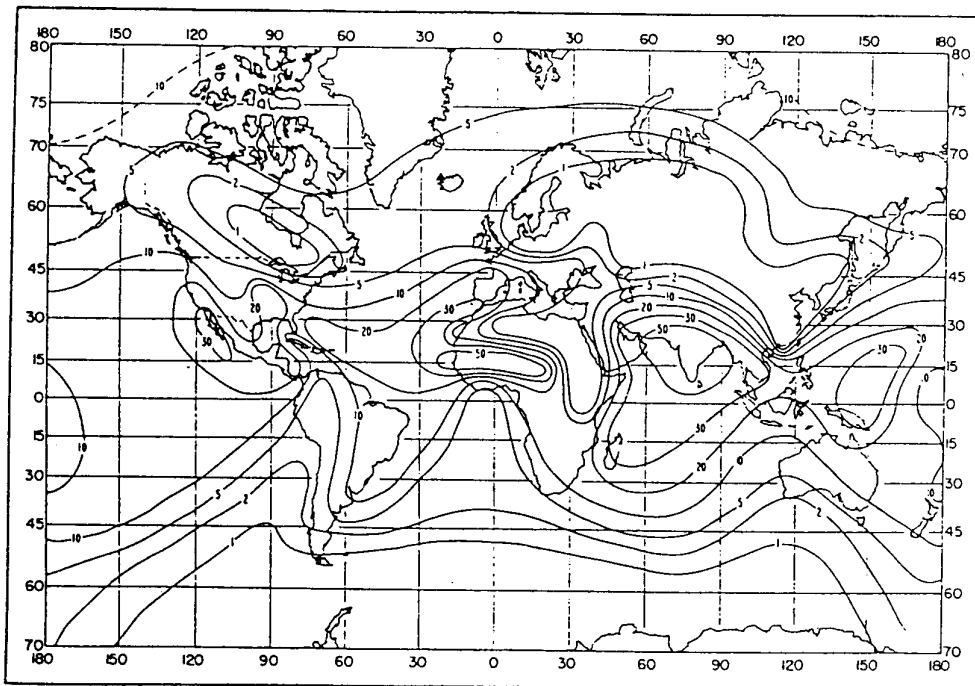


FIGURE 10  
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient  $\leq -100$  unités N/km: novembre



453-9-10



#### 4 Répartition statistique des gradients du coïndice

Pour estimer la répartition statistique des gradients du coïndice dans les 100 premiers mètres à partir de la surface de la Terre, il faut tout d'abord connaître la valeur médiane  $Méd$  de la distribution du gradient du coïndice au lieu considéré. On peut calculer cette valeur à partir de la probabilité,  $P_0$ , selon laquelle le gradient du coïndice est inférieur ou égal à  $D_n$  au moyen de l'expression suivante:

$$Méd = \frac{D_n + k_1}{(1/P_0 - 1)^{1/E_0}} - k_1 \quad (11)$$

où:

$$E_0 = \log_{10} ( | D_n | )$$

$$k_1 = 30$$

L'expression (11) est valable pour  $-300$  unités N/km  $\leq D_n \leq -40$  unités N/km.

Si cette probabilité  $P_0$  correspondant à n'importe quelle valeur  $D_n$  donnée du gradient du coïndice n'est pas connue pour le lieu considéré, il est possible d'extraire  $P_0$  à partir des cartes mondiales des Figs. 7 à 10 de cette Annexe qui indiquent le pourcentage de temps pendant lequel le gradient du coïndice dans les 100 premiers mètres de l'atmosphère est inférieur ou égal à  $-100$  unités N/km.

On obtient ensuite la probabilité cumulée de  $D_n$  pour les valeurs inférieures ou égales à  $Méd$  à partir de l'expression suivante:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{|D_n - Méd|}{|Méd|} + k_2 \right) k_3 \right]^{E_1}} \quad (12)$$

où:

$$E_1 = \log_{10} ( | D_n - Méd | + 1 )$$

$$k_2 = \frac{1,6 \times | Méd |}{120}$$

$$k_3 = \frac{120}{| Méd |}$$

L'expression (12) est valable pour des valeurs de  $Méd > -120$  unités N/km.

Pour  $D_n > Méd$ , la probabilité cumulée de  $D_n$  est calculée comme suit:

$$P_2 = 1 - \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{|D_n - Méd|}{|Méd|} + k_2 \right) k_4 \right]^{E_1}} \quad (13)$$

où:

$$E_1 = \log_{10} ( | D_n - Méd | + 1 )$$

$$k_2 = \frac{1,6 \times | Méd |}{120}$$

$$k_4 = \left[ \frac{100}{| Méd |} \right]^{2,4}$$

L'expression (13) est valable pour des valeurs de  $Méd > -120$  unités N/km.