

Union internationale des télécommunications

**UIT-R**

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R P.453-11**  
(07/2015)

**Indice de réfraction radioélectrique:  
formules et données de réfractivité**

**Série P**  
**Propagation des ondes radioélectriques**



Union  
internationale des  
télécommunications

## Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

## Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en 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

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

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

*Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique  
Genève, 2016

© UIT 2016

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.453-11

**Indice de réfraction radioélectrique: formules et données de réfractivité**

(Question UIT-R 201/3)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2012-2015)

**Domaine d'application**

La Recommandation UIT-R P.453 fournit des méthodes pour évaluer les valeurs de l'indice de réfraction radioélectrique pour les emplacements dans le monde. Elle décrit les caractéristiques du profil vertical, du profil à la surface de la Terre et donne des cartes mondiales de la distribution des paramètres de réfractivité et de leur variation statistique.

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, ainsi que les cartes numériques globales de 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;
- 4** que, en l'absence de données locales sur la température et sur l'humidité relative, l'on utilise la carte numérique globale du terme humide du coïndice de réfraction radioélectrique à la surface de la Terre dépassé pendant 50% de l'année, fournie au § 2.2 de l'Annexe 1 (Fig. 3).

## Annexe 1

### 1 Formule de l'indice de réfraction radioélectrique

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

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

où le coindice de réfraction  $N$  est:

$$N = 77,6 \frac{P_d}{T} + 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (\text{unités N}) \quad (2)$$

le terme sec du coindice de réfraction,  $N_{sec}$ , est:

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

et le terme humide du coindice de réfraction,  $N_{hum}$ , est:

$$N_{hum} = 72 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

où:

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

et

$$P = P_d + e \quad (5)$$

Etant donné que  $P_d = P - e$ , l'équation (2) peut être réécrite comme suit:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} - 5,6 \frac{e}{T} + 3,75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (6)$$

Une approximation de l'équation (6) avec une précision moindre s'écrit comme suit:

$$N = \frac{77,6}{T} \left( P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (7)$$

L'équation (7) donne les valeurs de  $N$  avec une précision de  $\pm 0,02\%$  par rapport à la valeur obtenue dans l'équation (2) pour des températures comprises entre  $-50^\circ\text{C}$  et  $+40^\circ\text{C}$ . 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:

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad \text{hPa} \quad (8)$$

avec:

$$e_s = EF \cdot a \cdot \exp \left[ \frac{\left( b - \frac{t}{d} \right) \cdot t}{t + c} \right] \quad (9)$$

et:

$$EF_{eau} = 1 + 10^{-4} \left[ 7,2 + P \cdot \left( 0,00320 + 5,9 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \right) \right]$$

$$EF_{glace} = 1 + 10^{-4} \left[ 2,2 + P \cdot \left( 0,00382 + 6,4 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \right) \right]$$

où:

$t$ : température (°C)

$P$ : pression (hPa)

$H$ : humidité relative (%)

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

*pour l'eau liquide*

$$a = 6,1121$$

$$b = 18,678$$

$$c = 257,14$$

$$d = 234,5$$

(applicable entre  $-40^\circ$  et  $+50^\circ$ )

*pour la glace*

$$a = 6,1115$$

$$b = 23,036$$

$$c = 279,82$$

$$d = 333,7$$

(applicable entre  $-80^\circ$  et  $0^\circ$ )

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

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad \text{hPa} \quad (10)$$

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 l'altitude

### 2.1 Variation du coïndice en fonction de l'altitude

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

$$n(h) = 1 + N_0 \times 10^{-6} \times \exp(-h/h_0) \quad (11)$$

où:

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

$h_0$ : altitude 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 d'altitude 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:

$$N_s = N_0 \exp(-h_s/h_0) \quad (12)$$

où:

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

Il convient de noter cependant que les courbes des Fig. 1 et 2 ont été tracées pour  $h_0 = 9,5$  km. Les Fig. 1 et 2 ont été établies à partir d'un ensemble de données sur 5 ans (1955-1959) provenant d'environ 1 000 stations de surface. (Les Fig. 1 et 2 ne sont pas disponibles sous forme numérique.)

Pour les trajets Terre-satellite, l'indice de réfraction à une altitude donnée s'obtient par les formules (1), (2) et (10) 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.

(Il convient de noter que le profil exponentiel utilisé dans la formule (12) peut aussi servir à effectuer des estimations rapides et approximatives du gradient du coïndice près de la surface de la Terre et de l'angle de visée apparent, données au § 4.3 de la Recommandation UIT-R P.834.)

## 2.2 Terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre

Pour plus de commodité, la Fig. 3 indique la valeur médiane (50%) du terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre dépassée pendant une année moyenne. Le fichier de données ESANWET.TXT contient les données numériques correspondantes.

Le terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre a été obtenu à partir de données d'initialisation sur deux ans (1992-1993) provenant des prévisions météorologiques numériques du Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT).

NOTE 1 – Les données du fichier ESANWET.TXT correspondent à une résolution de  $1,5^\circ$  tant en latitude qu'en longitude. Les fichiers de données associés ESALAT.TXT et ESALON.TXT contiennent respectivement les latitudes et les longitudes des entrées correspondantes (points de la grille) du fichier de données ESANWET.TXT.

Les données vont de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  en longitude et de  $+90^\circ$  à  $-90^\circ$  en latitude. Pour un point différent des points de la grille, le terme humide du coïndice peut se calculer en effectuant une interpolation bilinéaire des valeurs des quatre points de la grille les plus proches.

On peut obtenir ces fichiers de données auprès du Bureau des radiocommunications (BR).



FIGURE 1  
Moyenne mensuelle de N°: février

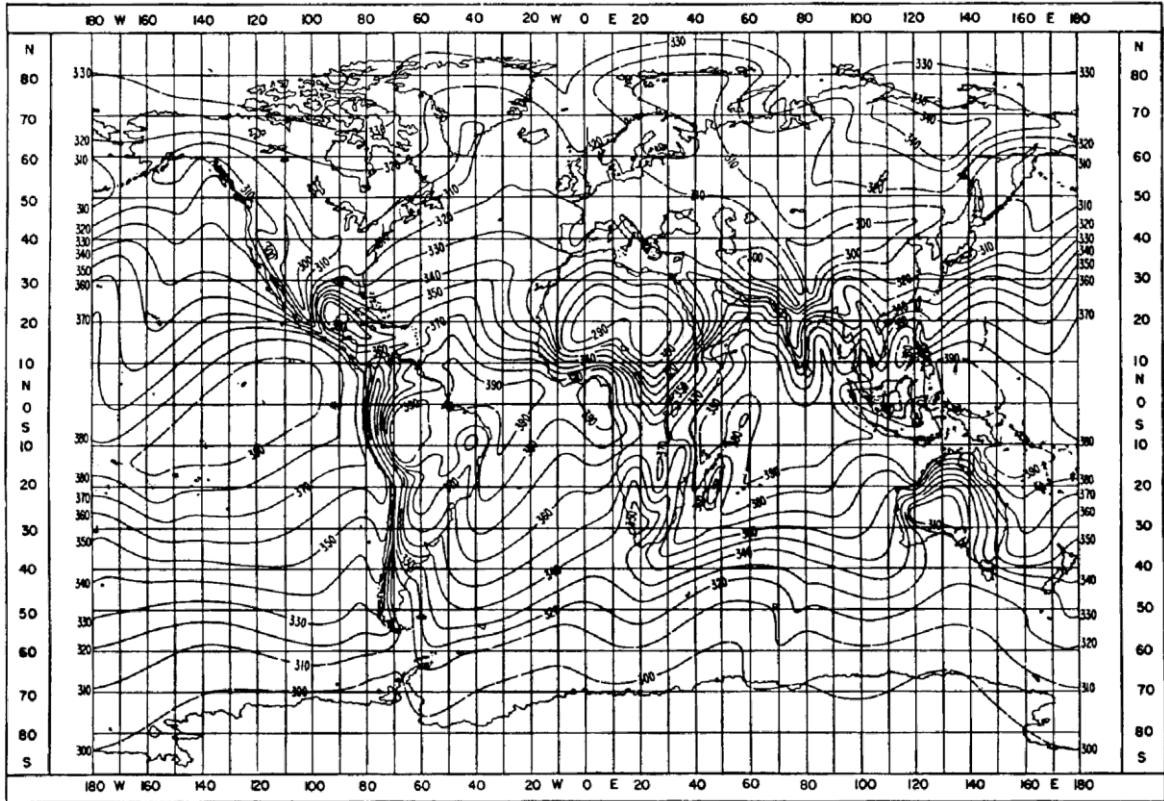


FIGURE 2  
Moyenne mensuelle de  $N_0$ : août

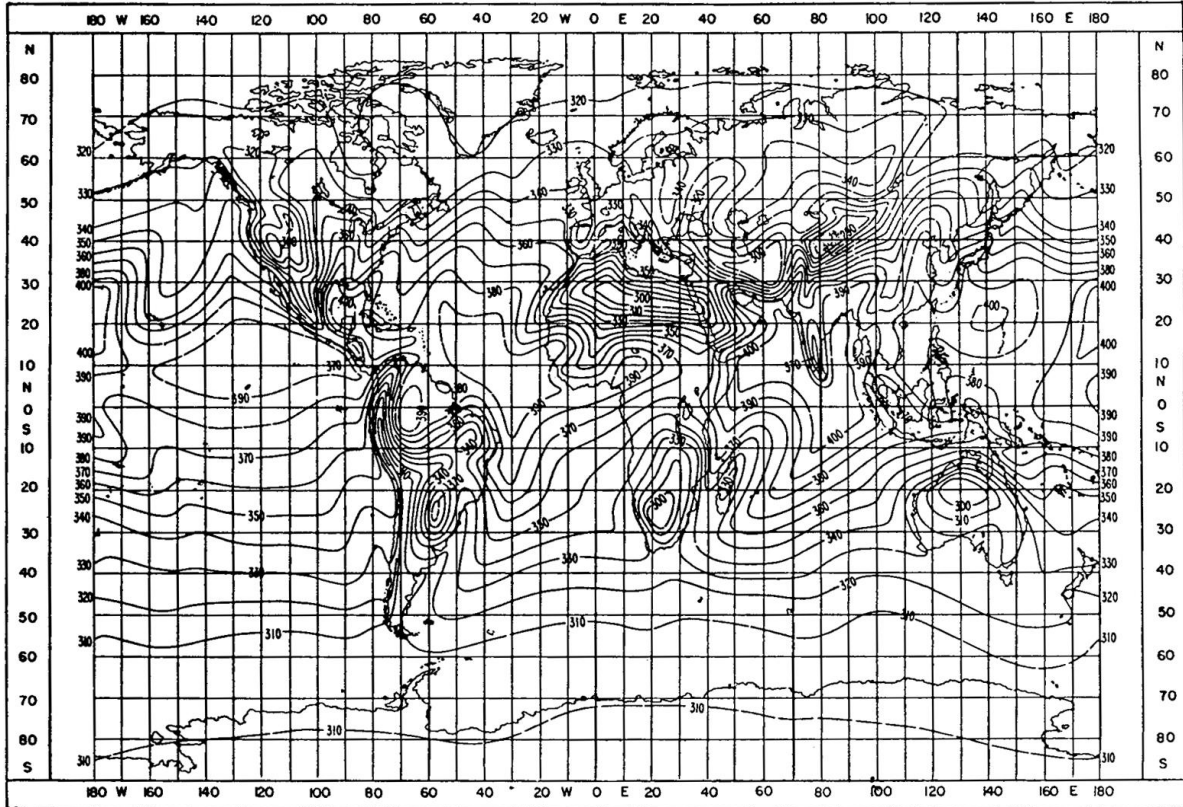
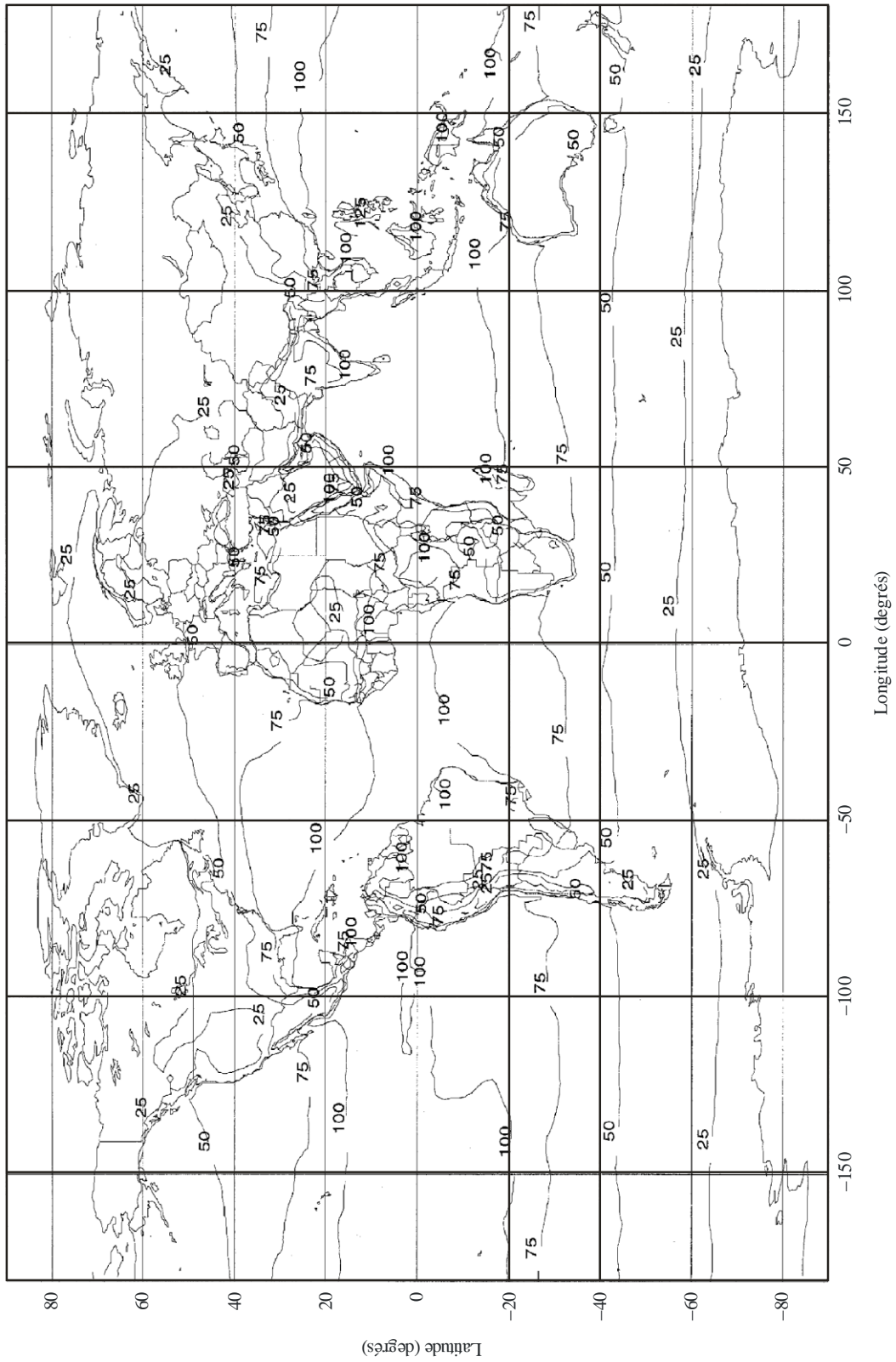




FIGURE 3

Terme humide du coïncide de réfraction (ppm) à la surface de la Terre dépassé pendant 50% de l'année



P.0453-03

### 3 Gradients verticaux du coïndice de réfraction

Les statistiques de gradient vertical du coïndice dans la couche la plus basse de l'atmosphère constituent des paramètres importants pour calculer le dégagement du trajet et les effets de propagation associés tels que la formation de conduits sur les trajets transhorizon, les réflexions sur la surface de la Terre ainsi que l'évanouissement et la distorsion par trajets multiples sur les liaisons de Terre en visibilité directe.

#### 3.1 Premier kilomètre de l'atmosphère

Les Fig. 4 à 7 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:

$$\Delta N = N_s - N_1 \quad (13)$$

où  $N_1$  est la valeur du coïndice à une altitude de 1 km au-dessus de la surface. Les valeurs de  $\Delta N$  n'ont pas été rapportées à une surface de référence. Les Fig. 4 à 7 ont été établies à partir d'un ensemble de données sur 5 ans (1955-1959) provenant de 99 sites de radiosonde. (Les Fig. 4 à 7 ne sont pas disponibles sous forme numérique.)

En outre, les valeurs annuelles de  $\Delta N$ , dépassées pendant 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 99,5, 99,8 et 99,9% d'une année en moyenne font partie intégrante de la présente Recommandation et sont disponibles sous forme de cartes numériques fournies dans le Supplément. Les valeurs mensuelles de  $\Delta N$ , dépassées pendant 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 99,5, 99,8 et 99,9% d'un mois en moyenne font partie intégrante de la présente Recommandation et sont disponibles sous forme de cartes numériques fournies dans le Supplément.

#### 3.2 Couche la plus basse de l'atmosphère

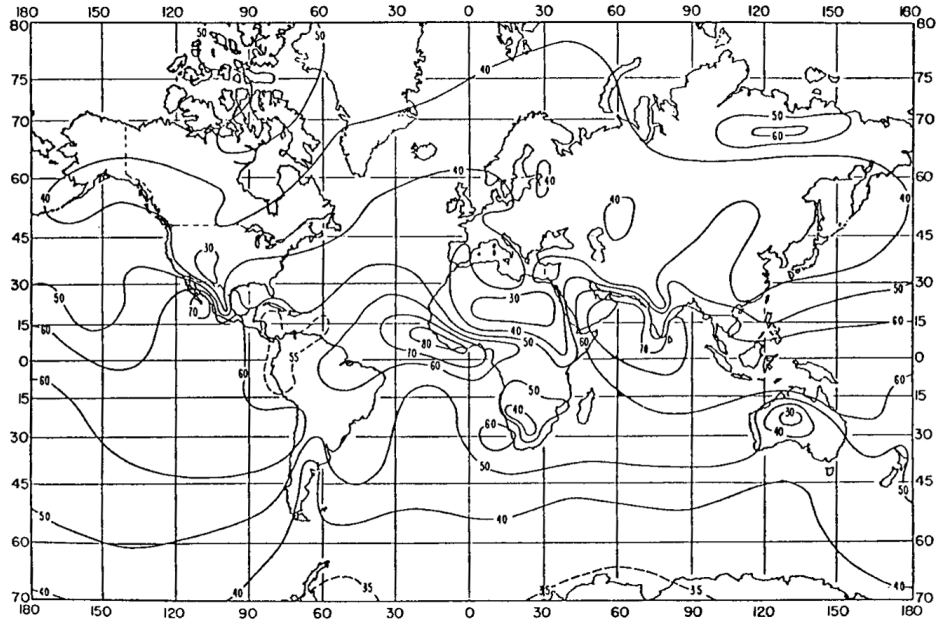
Les statistiques de gradients du coïndice pour les 100 premiers mètres à partir de la surface de la Terre servent à évaluer la probabilité de formation de conduits ou de trajets multiples. Lorsqu'on ne dispose pas de données locales plus fiables, on peut se référer aux cartes des Fig. 8 à 11 donnant des statistiques pour l'ensemble de la planète. Ces cartes ont été établies à partir d'un ensemble de données sur 5 ans (1955-1959) provenant de 99 sites de radiosonde. (Les Fig. 8 à 11 ne sont pas disponibles sous forme numérique.)

En outre, les paramètres suivants font partie intégrante de la présente Recommandation et sont disponibles sous forme de cartes numériques fournies dans le Supplément:

- Les valeurs annuelles du gradient du coïndice dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère depuis la surface de la Terre,  $\Delta N_{65m}$ , dépassées pendant 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 99,5, 99,8 et 99,9% d'une année en moyenne.
- Les valeurs mensuelles du gradient du coïndice dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère depuis la surface de la Terre,  $\Delta N_{65m}$ , dépassées pendant 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 98, 99, 99,5, 99,8 et 99,9% d'un mois en moyenne.
- Le pourcentage de temps pendant une année et pendant un mois durant laquelle/lequel le gradient du coïndice,  $\Delta N$  sur 100 m est inférieur à  $-100$  N-unité/km, (%).

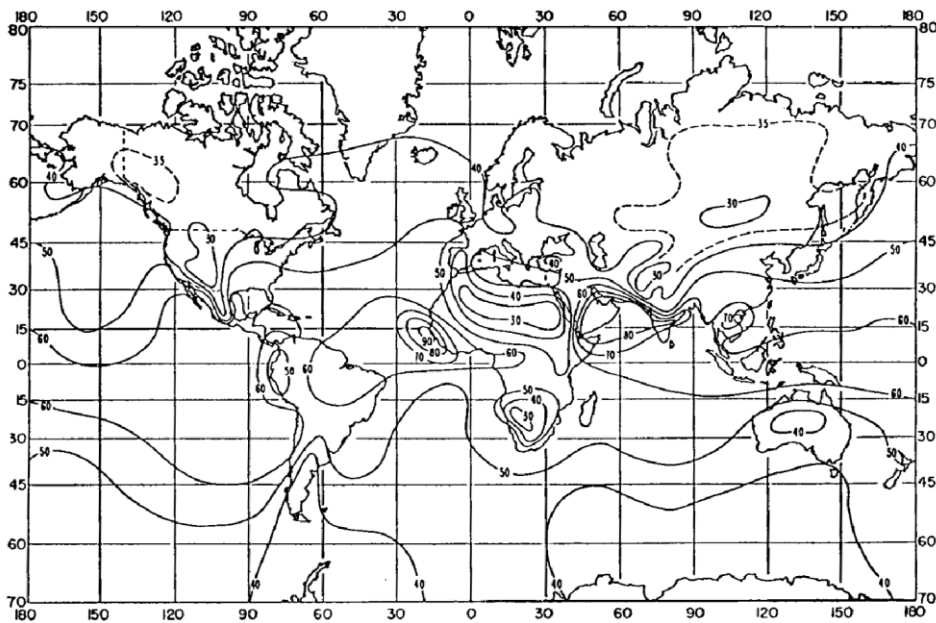
Les données vont de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  en longitude et de  $+90^\circ$  à  $-90^\circ$  en latitude. Pour un point différent des points de la grille, le gradient du coïndice peut se calculer en effectuant une interpolation bilinéaire des valeurs des quatre points de la grille les plus proches, comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.1144.

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



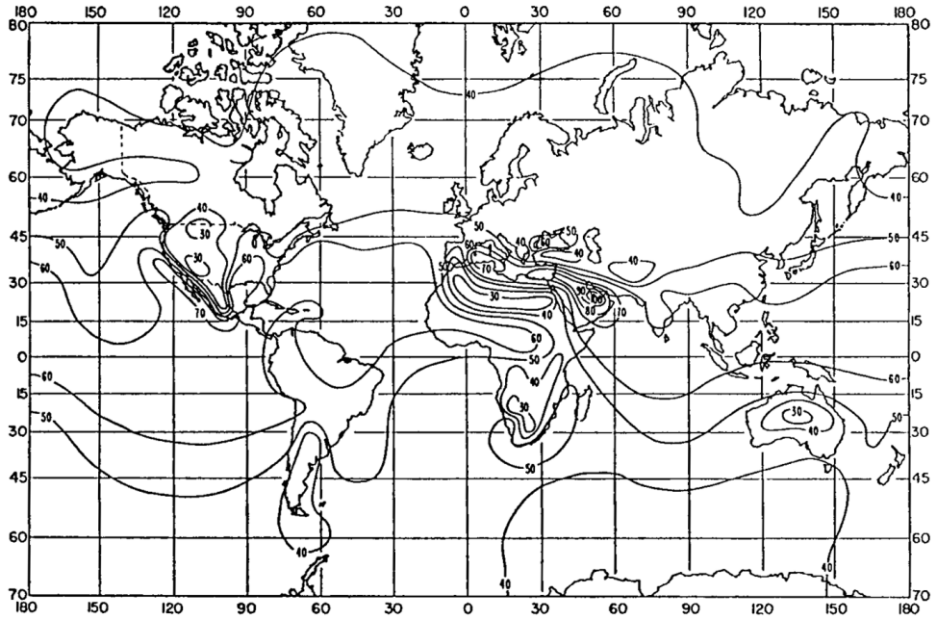
P0453-04

FIGURE 5  
Moyenne mensuelle de  $\Delta N$ : mai



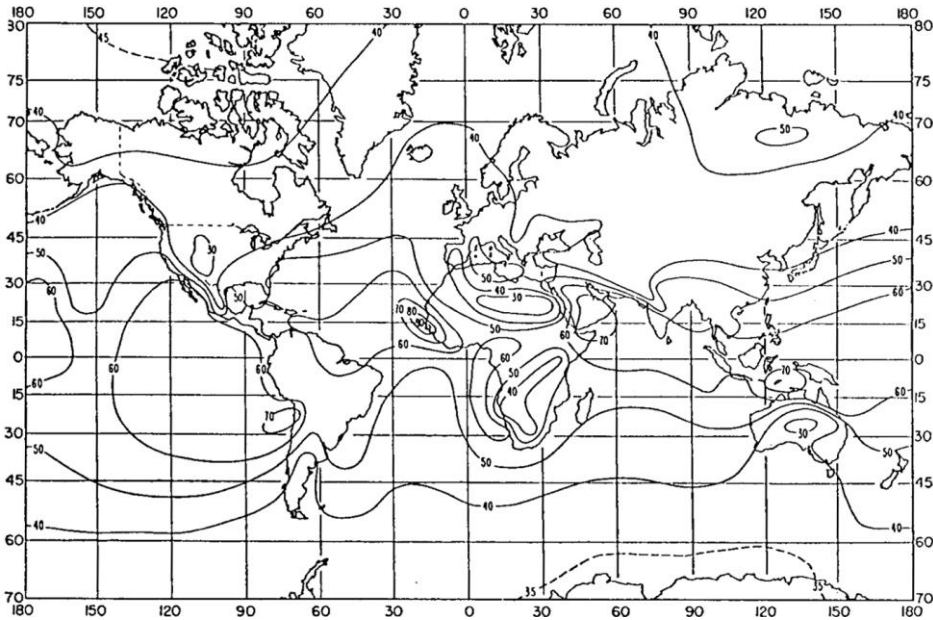
P0453-05

FIGURE 6  
Moyenne mensuelle de  $\Delta N$ : août



P.0453-06

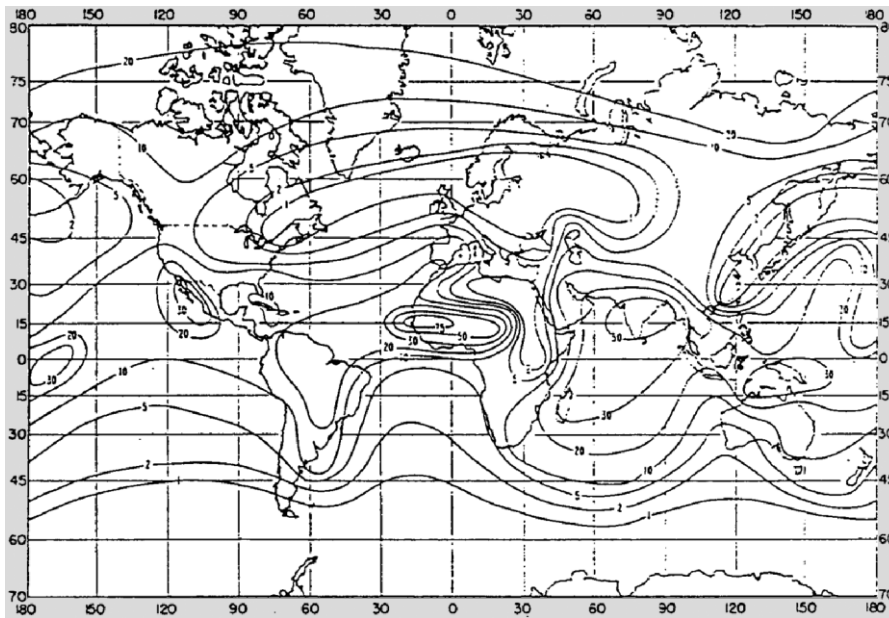
FIGURE 7  
Moyenne mensuelle de  $\Delta N$ : novembre



P.0453-07

FIGURE 8

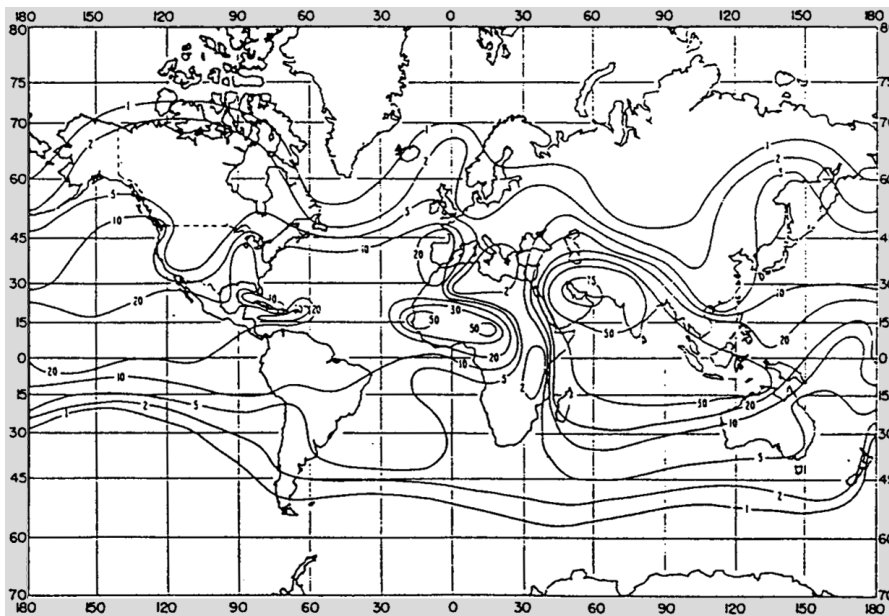
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient  $\leq -100$  unités N/km: février



P.0453-08

FIGURE 9

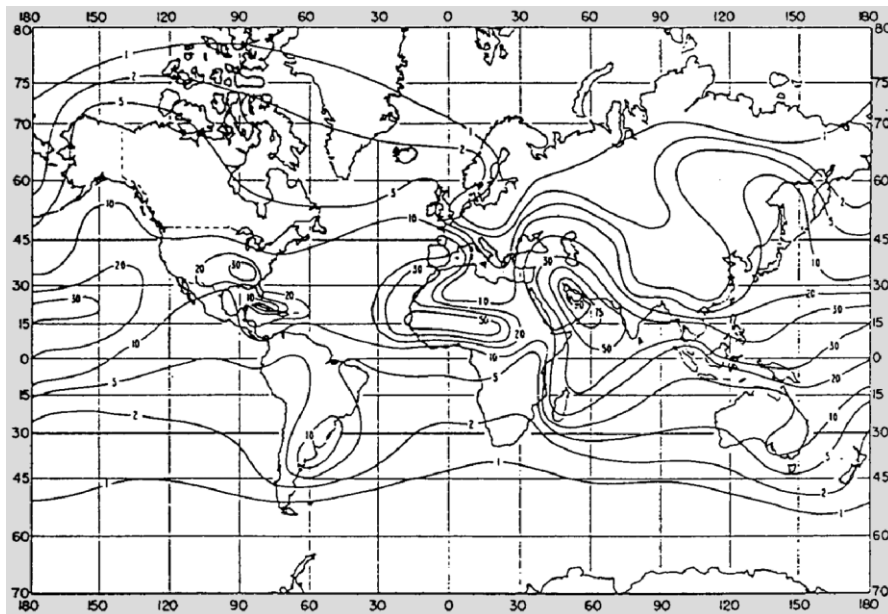
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient  $\leq -100$  unités N/km: mai



P.0453-09

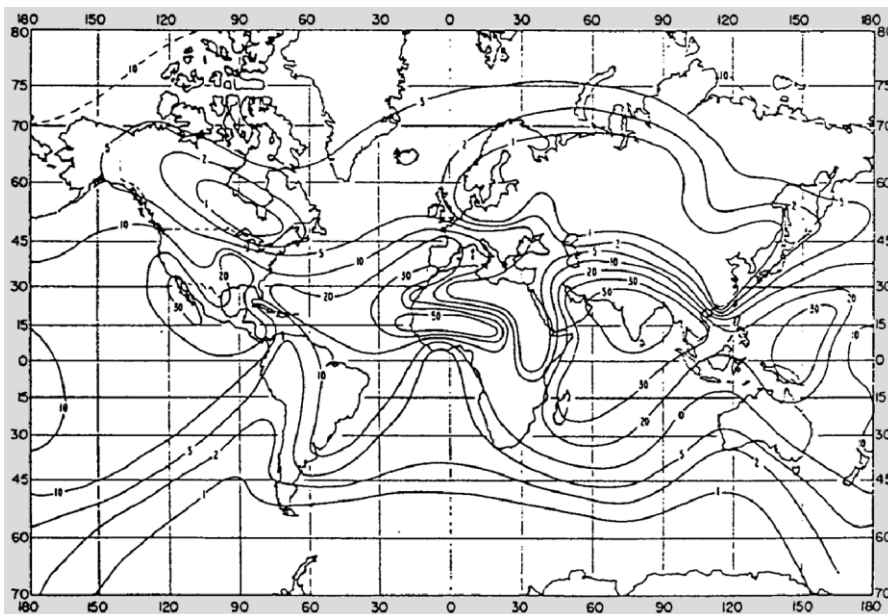


FIGURE 10

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

P0453-10

FIGURE 11

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

P0453-11

#### 4 Distribution statistique des gradients du coïndice

Il est possible d'estimer la distribution statistique complète des gradients du coïndice dans les 100 premiers mètres au-dessus de la surface de la Terre, à partir de la valeur médiane,  $Med$ , du gradient du coïndice et de la valeur,  $N_s$ , du coïndice au sol, au lieu considéré.

La valeur médiane,  $Med$ , de la distribution du gradient du coïndice peut être calculée à partir de la probabilité,  $P_0$ , que le gradient du coïndice soit inférieur ou égal à  $D_n$ , au moyen de l'expression suivante:

$$Med = \frac{D_n + k_1}{(1/P_0 - 1)^{1/E_0}} - k_1 \quad (14)$$

où:

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

$$k_1 = 30.$$

L'équation (14) est valable pour l'intervalle  $-300$  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 de déterminer  $P_0$  à partir des cartes mondiales des Fig. 8 à 11 de la présente 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.

Lorsque l'on ne dispose pas de données locales plus fiables, on peut calculer  $N_s$  à partir des cartes mondiales donnant le coïndice au niveau de la mer,  $N_0$ , (Fig. 1 et 2) et au moyen de l'équation (12).

Pour  $D_n \leq Med$ , on obtient la probabilité cumulative  $P_1$  de  $D_n$  à partir de l'équation suivante:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_3 \right]^{E_1}} \quad (15)$$

où:

$$B = \left| \frac{0,3 Med - N_s + 210}{2} \right|$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1)$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left( \frac{B}{67} \right)^{6,5} + 1}$$

$$k_2 = \frac{1,6B}{120}$$

$$k_3 = \frac{120}{B}$$

L'équation (15) est valable pour des valeurs de  $Med > -120$  unités N/km et pour l'intervalle  $-300$  unités N/km  $< D_n < 50$  unités N/km.

Pour  $D_n > Med$ , la probabilité cumulative  $P_2$  de  $D_n$  est calculée comme suit:

$$P_2 = 1 - \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{|D_n - Med|}{B} + k_2 \right) k_4 \right]^{E_1}} \quad (16)$$

où:

$$B = \left| \frac{0,3 Med - N_s + 210}{2} \right|$$

$$E_1 = \log_{10}(F + 1)$$

$$F = \frac{2 \times |D_n - Med|}{\left( \frac{B}{67} \right)^{6,5} + 1}$$

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

L'équation (16) est valable pour des valeurs de  $Med > -120$  unités N/km et pour l'intervalle  $-300$  unités N/km  $< D_n < 50$  unités N/km.

## 5 Conduits de surface et conduits élevés

Les conduits atmosphériques peuvent générer un évanouissement profond et lent, un renforcement important du niveau du signal et un évanouissement par trajets multiples sur les liaisons de Terre en visibilité directe. Ces conduits peuvent aussi être à l'origine de brouillages importants sur les trajets transhorizon. Il est donc intéressant de décrire la fréquence d'apparition des conduits ainsi que leur structure. On trouvera dans le présent paragraphe des statistiques établies à partir de 20 années (1977-1996) d'observations radiosonde provenant de 661 sites.

On décrit les conduits en termes de coïndice modifié que l'on définit par :

$$M(h) = N(h) + 157h \quad (\text{unités M}) \quad (17)$$

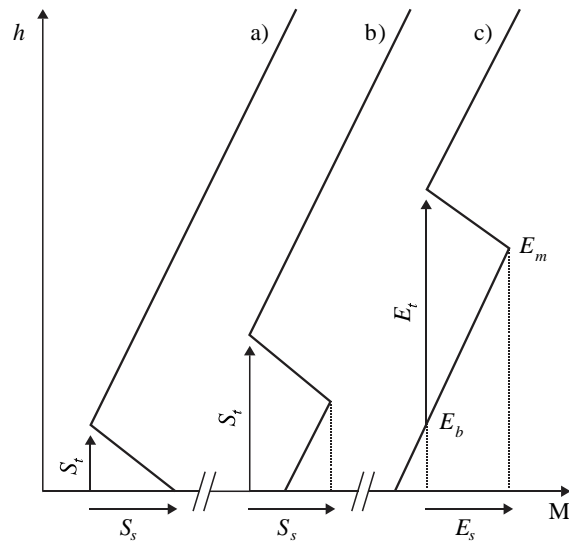
où

$h$  (km) désigne l'altitude.

La variation du coïndice modifié en fonction de l'altitude au-dessus du sol et les définitions de types de conduit sont illustrées sur la Fig. 12. Il peut y avoir trois types de conduit: des conduits de surface, des conduits de surface élevée et des conduits élevés. Du fait du faible nombre de conduits de surface élevée par rapport au nombre de conduits de surface, on a établi les statistiques en combinant ces deux types de conduits en un seul groupe appelé conduits de surface. Ces conduits de surface sont caractérisés par leur intensité  $S_s$  (unités M) ou  $E_s$  (unités M) et leur largeur  $S_t$  (m) ou  $E_t$  (m). On utilise deux paramètres supplémentaires pour caractériser les conduits élevés, à savoir: l'altitude de la partie inférieure du conduit  $E_b$  (m) et  $E_m$  (m), altitude pour laquelle le conduit présente une valeur maximale M.

FIGURE 12

Définition des paramètres décrivant: a) les conduits de surface, b) les conduits de surface élevée et c) les conduits élevés



P.0453-12

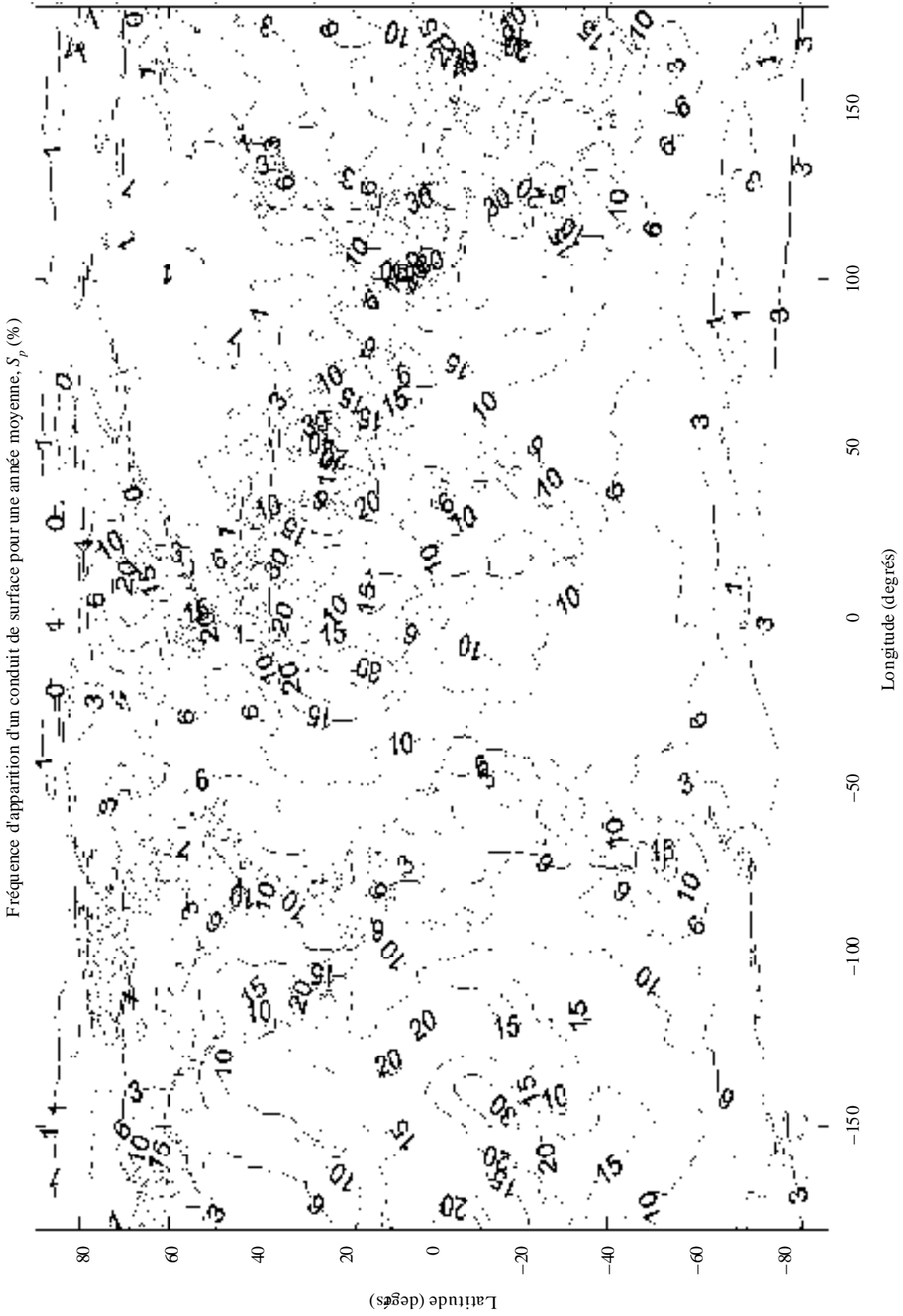
Pour plus de commodité, les Fig. 13 à 20 présentent les données des fichiers indiqués en légende. Les statistiques ont été établies en combinant les données relatives aux conduits de surface et aux conduits de surface élevée, du fait du nombre relativement faible de conduits de surface élevée.

Les données vont de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  en longitude et de  $+90^\circ$  à  $-90^\circ$  en latitude avec une résolution de  $1,5^\circ$ . Pour un point différent des points de la grille, la valeur du paramètre désiré peut se calculer en effectuant une interpolation bilinéaire des valeurs des quatre points de la grille les plus proches.

On peut obtenir ces fichiers de données auprès du BR.

FIGURE 13

Nom du fichier: S\_OCCURRENCE.TXT

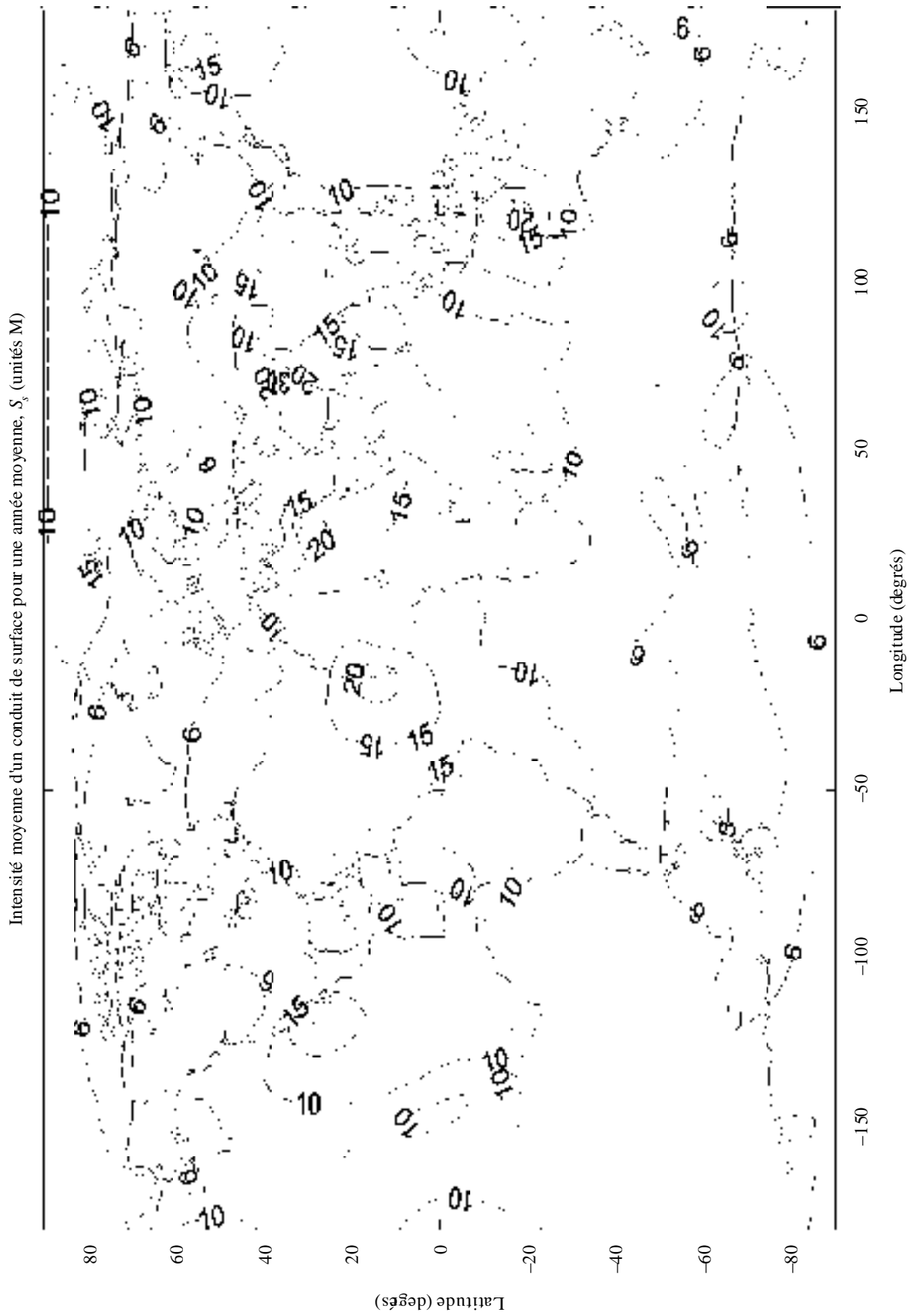


P:0453-13



FIGURE 14

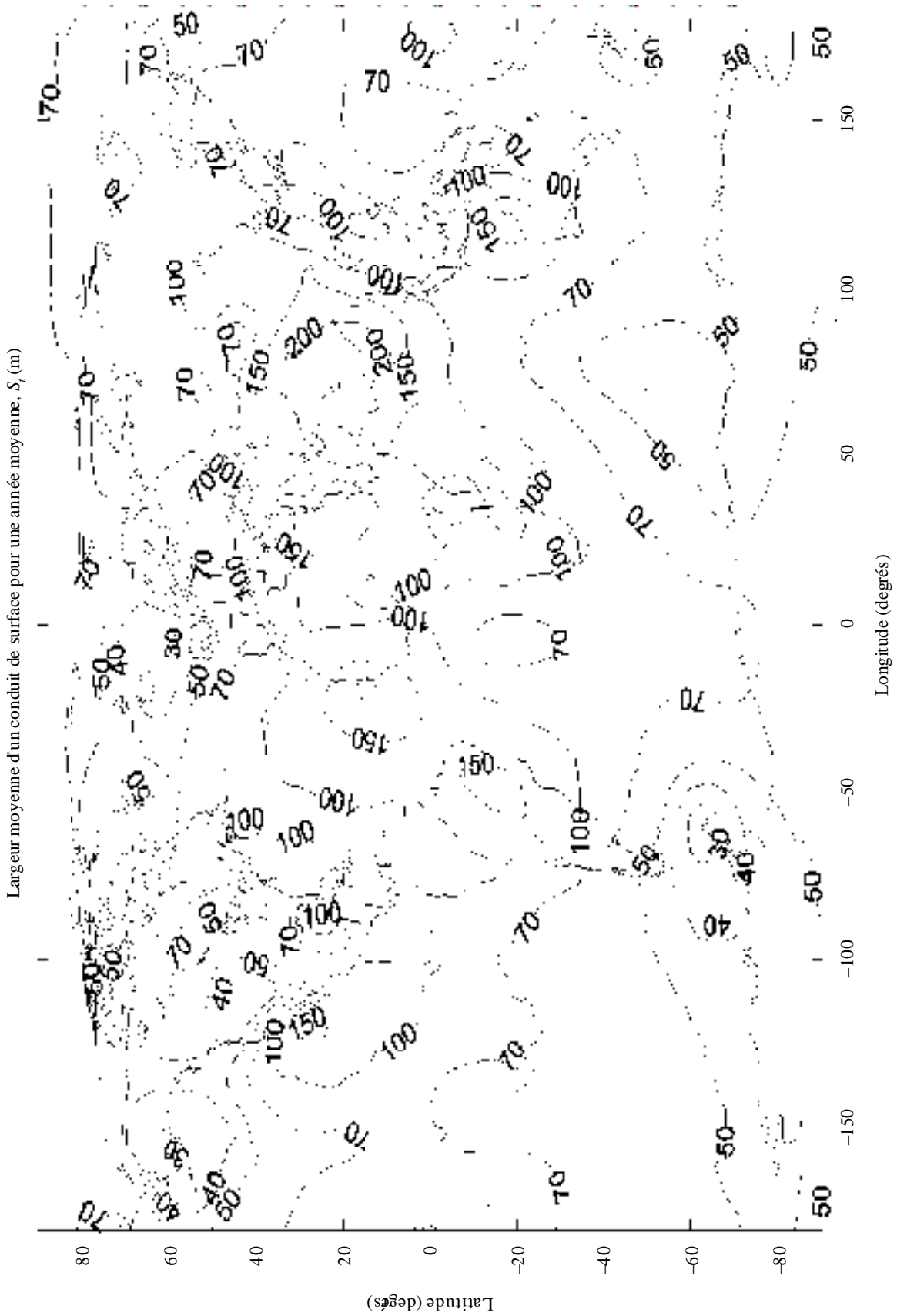
Nom du fichier: S\_STRENGTH.TXT



P0453-14

FIGURE 15

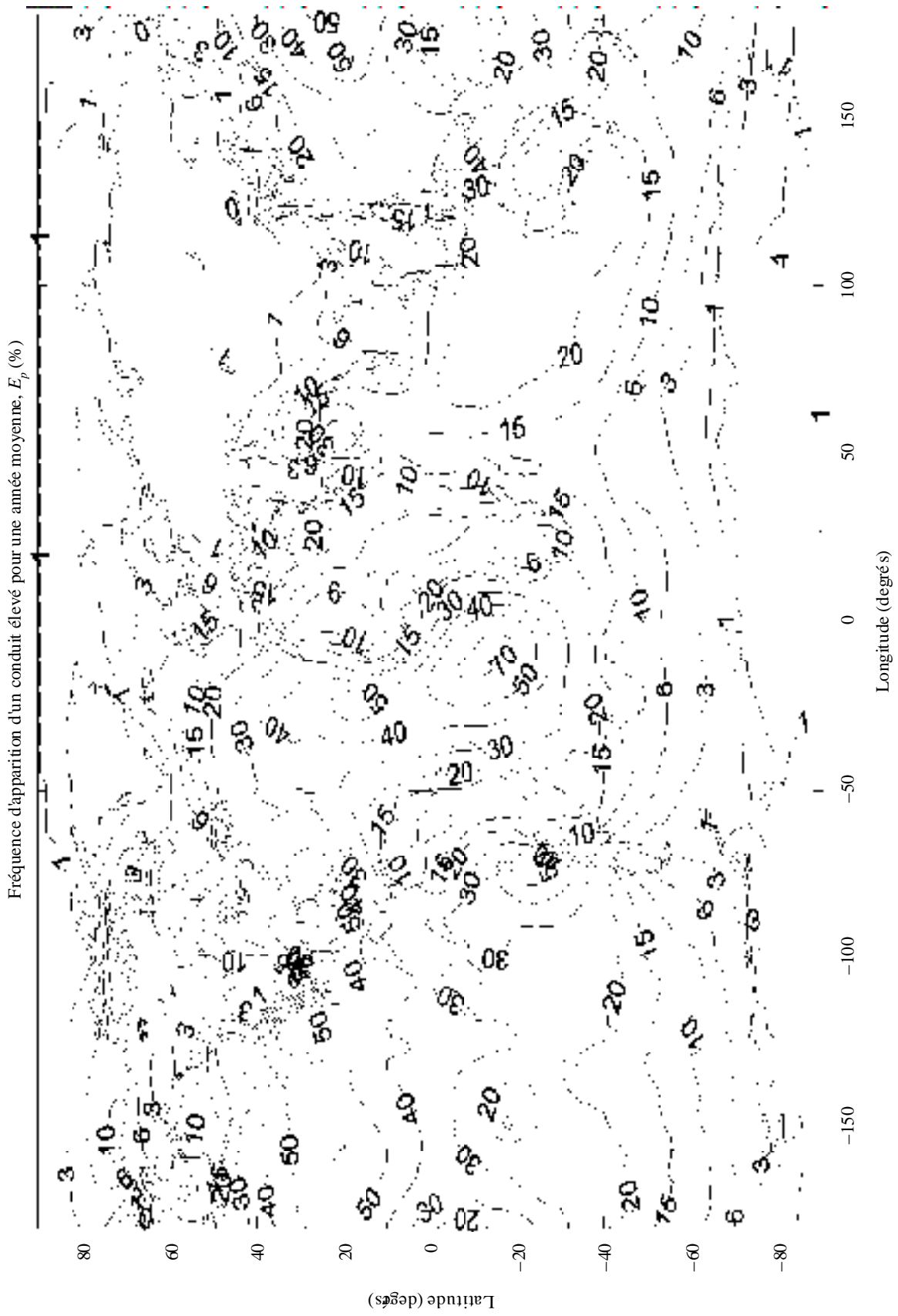
Nom du fichier: S\_THICKNESS.TXT



P0453-15

FIGURE 16

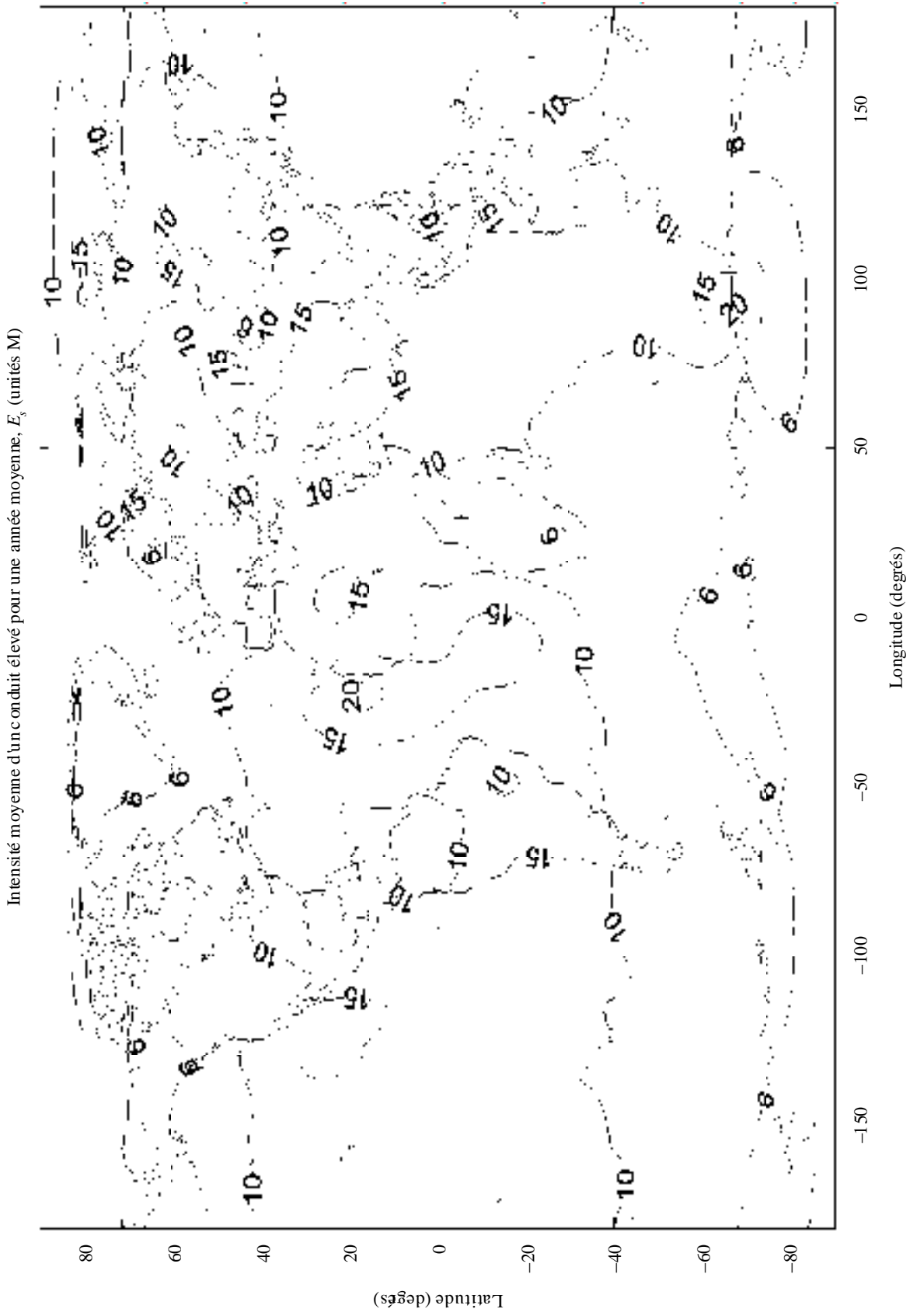
Nom du fichier: E\_OCCURRENCE.TXT



P0453-16

FIGURE 17

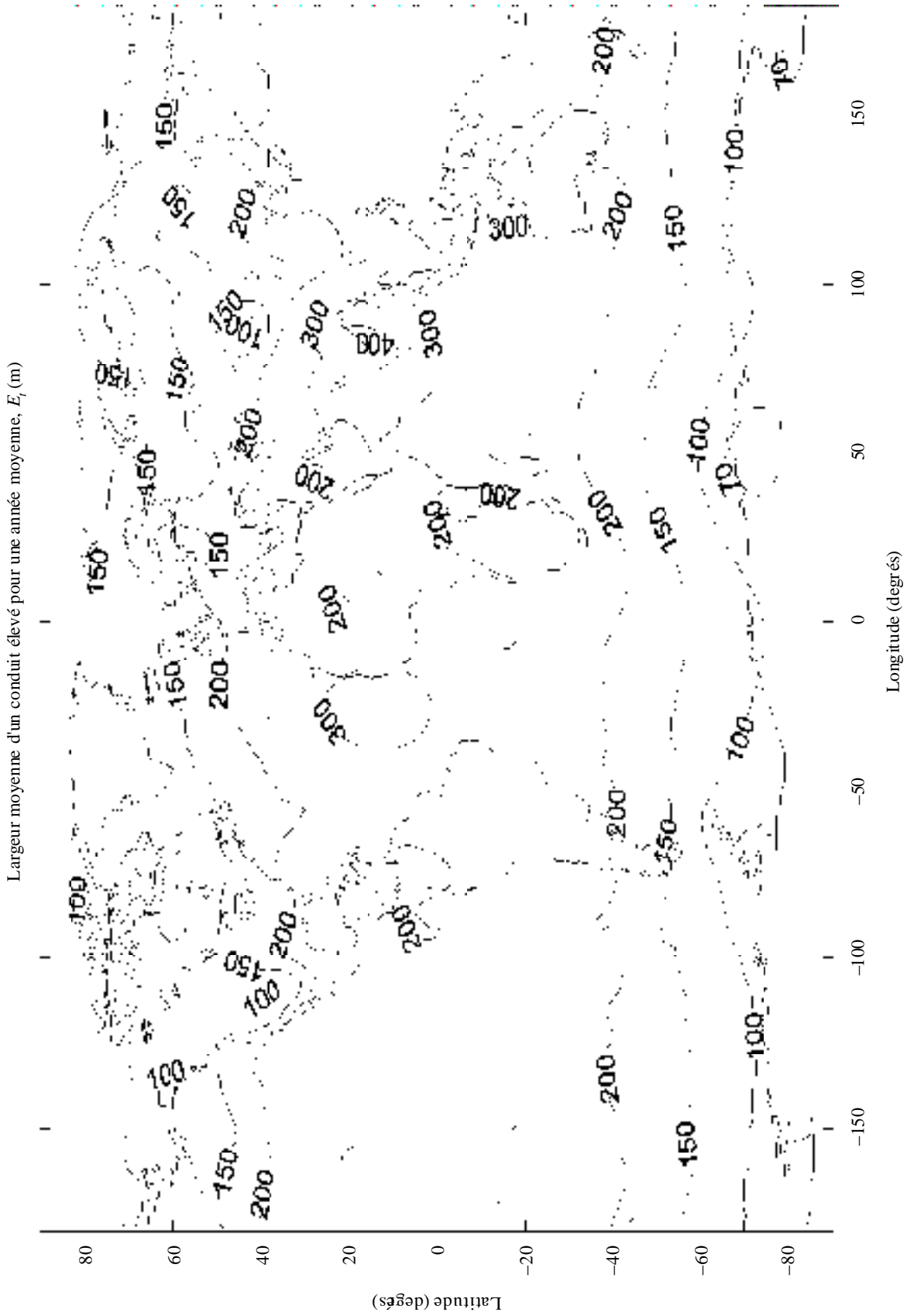
Nom du fichier: E\_STRENGTH.TXT



P.0453-17

FIGURE 18

Nom du fichier: E\_THICKNESS.TXT



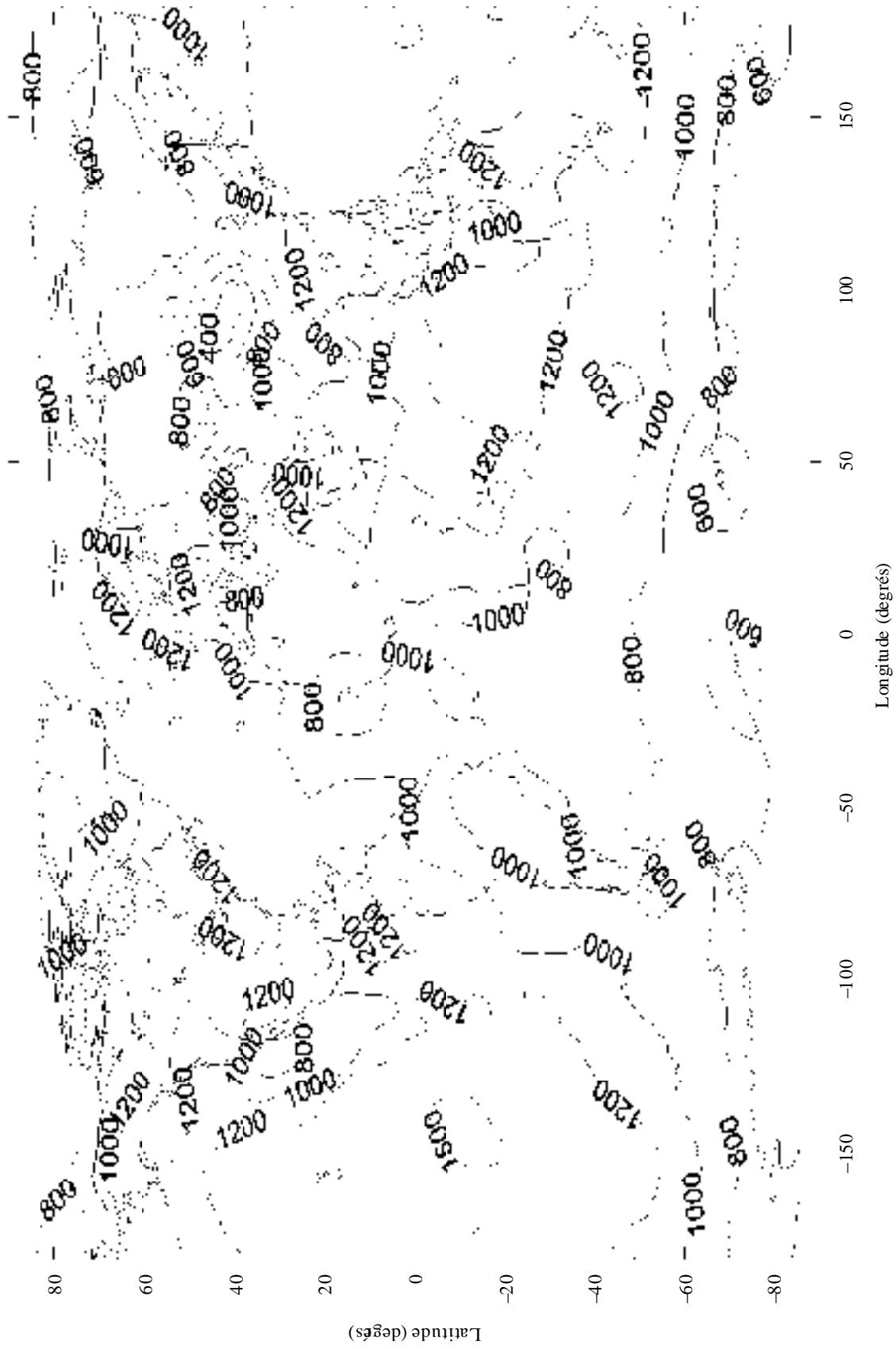
P.0453-18



FIGURE 19

Nom du fichier: E\_BASE.TXT

Hauteur moyenne de la partie inférieure d'un conduit élevé pour une année moyenne,  $E_b$  (m)



P0453-19

FIGURE 20  
Nom du fichier: E\_MAX\_M.TXT

