RECOMMANDATION UIT-R P.453-9

Indice de réfraction radioélectrique: formules et données de réfractivité

(Question UIT-R 201/3)

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

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:

$$n = 1 + N \times 10^{-6} \tag{1}$$

où:

N: coïndice de réfraction exprimé par:

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

le terme sec, N_{sec}, du coïndice de réfraction étant donné par:

$$N_{sec} = 77{,}6\ \frac{P}{T} \tag{3}$$

et le terme humide, N_{hum}, par:

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

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:

$$e = \frac{H\, e_s}{100} \quad \text{hPa} \tag{5}$$

avec:

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

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	*pour la glace*
$a = 6{,}1121$	$a = 6{,}1115$
$b = 17{,}502$	$b = 22{,}452$
$c = 240{,}97$	$c = 272{,}55$
(applicable entre –20° et +50°, avec une précision de ±0,20%)	(applicable entre –50° et 0°, avec une précision de ±0,20%)

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

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

où ρ est donné en g/m^3. La Recommandation UIT-R P.836 donne des valeurs représentatives de ρ.

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:

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

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:

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

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 (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.

(Il convient de noter que le profil exponentiel utilisé dans la formule (9) 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).

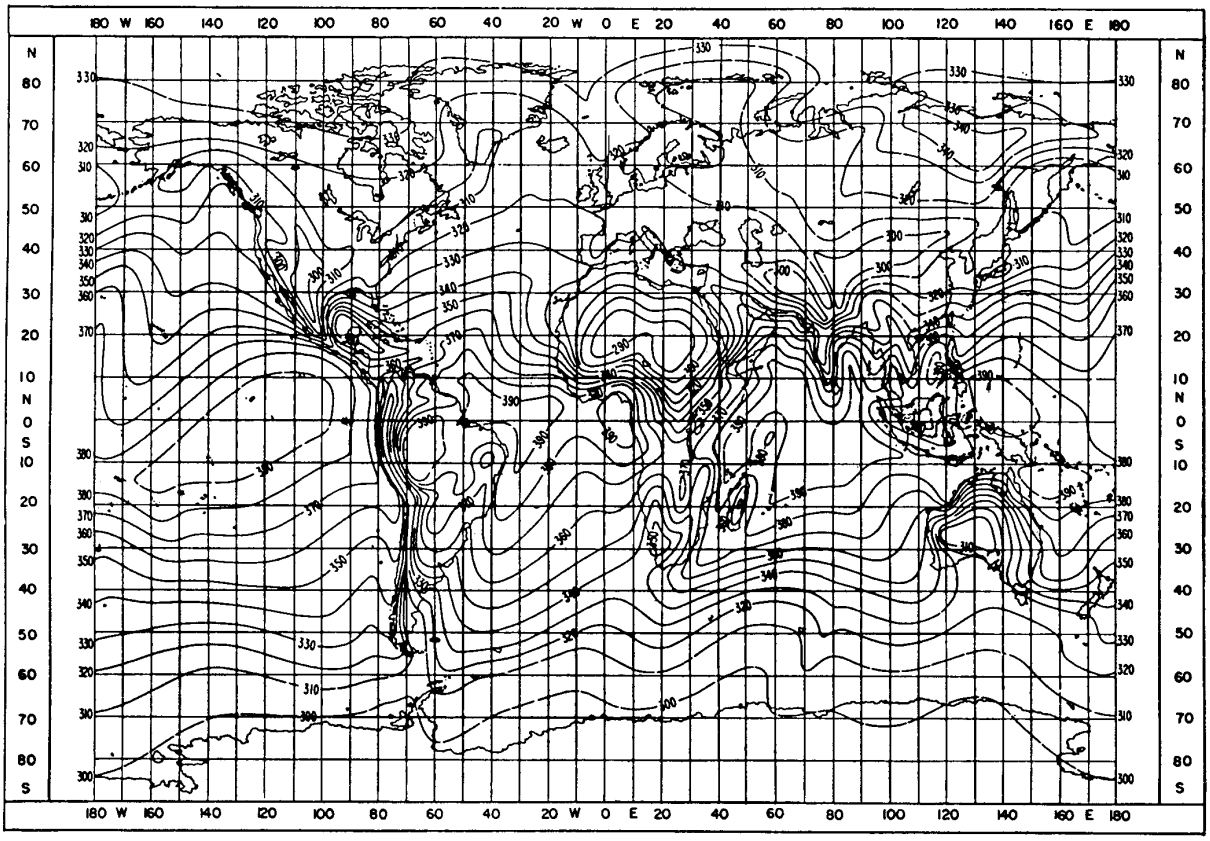
NOTE 1 – Les données du fichier ESANWET.TXT correspondent à une résolution de 1,5° tant en latitude qu'en longitude. Les fichiers de données associés ESALAT.TXT et ESALON.TXT contiennent respectivement les latitudes et les longitudes des entrées correspondantes (points de la grille) du fichier de données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

Les données vont de 0° à 360° en longitude et de +90° à –90° 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

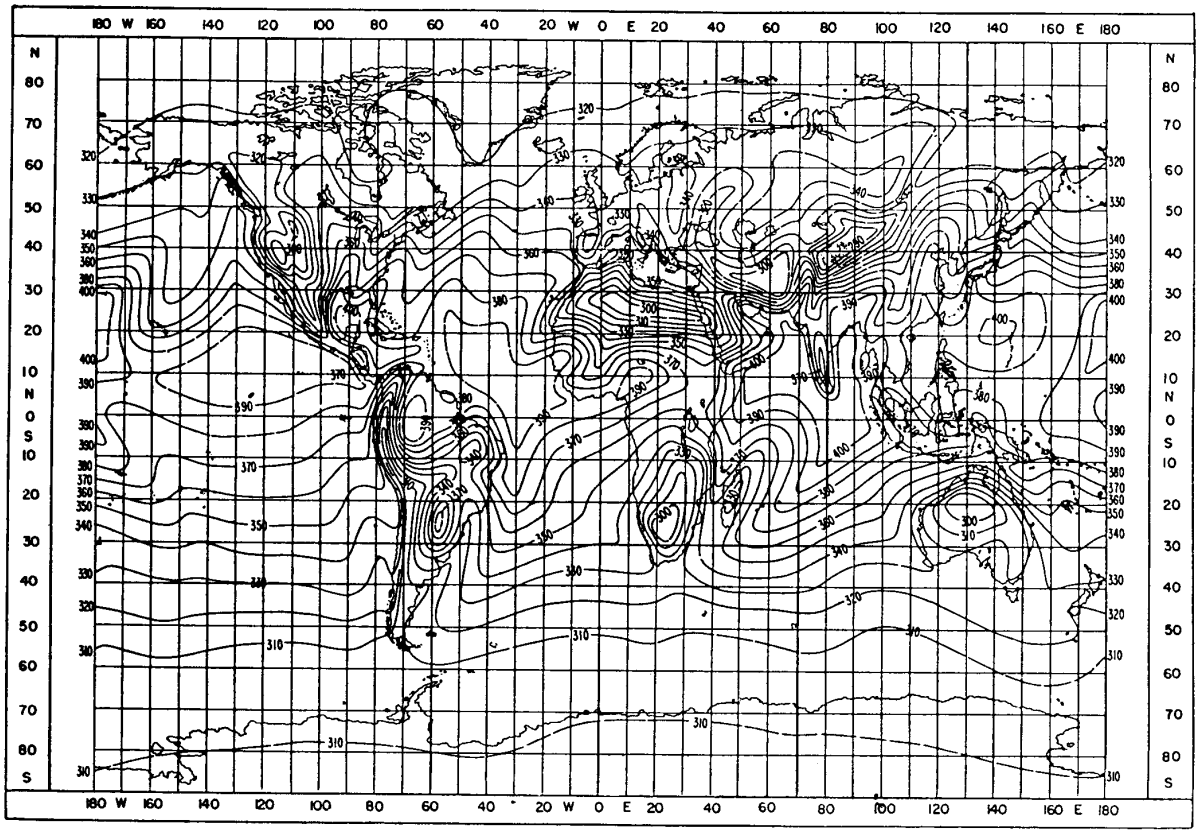
Moyenne mensuelle de N_0: février



0453-01

FIGURE 2

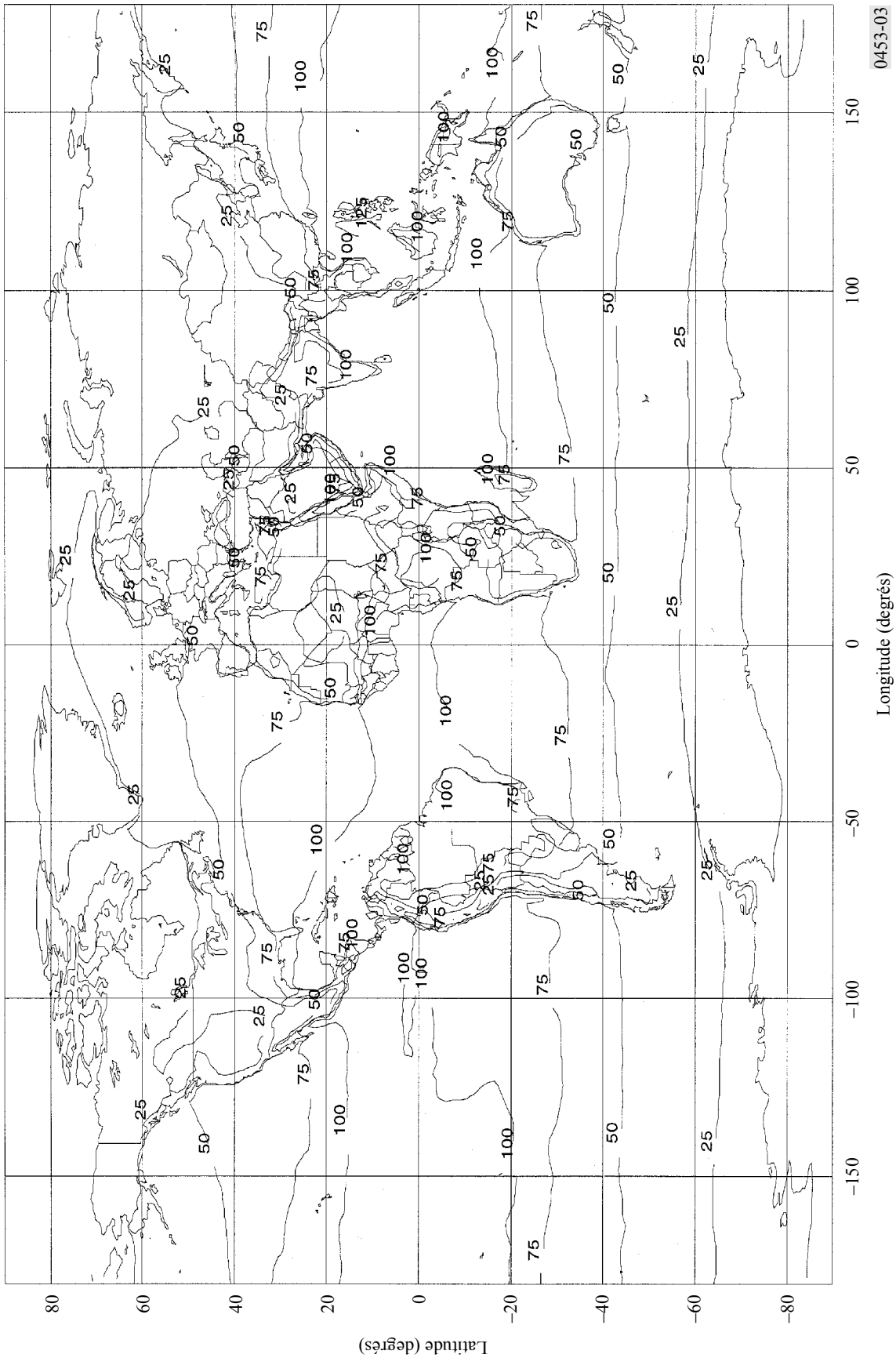
Moyenne mensuelle de N_0: août



0453-02

FIGURE 3

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



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 ΔN, a été calculée d'après la formule:

$$\Delta N = N_s - N_1 \tag{10}$$

où N_1 est la valeur du coïndice à une altitude de 1 km au-dessus de la surface. Les valeurs de ΔN 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.)

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.)

Pour plus de commodité, les Fig. 12 à 16 indiquent le gradient du coïndice dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère, dN_1. Les fichiers de données DNDZ_xx.TXT contiennent les données numériques indiquées sur ces figures.

Le gradient du coïndice a été établi à partir de données d'initialisation (4 fois par jour) sur deux ans (1992-1993) provenant des prévisions météorologiques numériques du CEPMMT.

NOTE 1 – Les données des fichiers DNDZ_xx.TXT correspondent à une résolution de 1,5° tant en latitude qu'en longitude. Les fichiers de données associés DNDZLAT.TXT et DNDZLON.TXT contiennent respectivement les latitudes et les longitudes des entrées correspondantes (points de la grille) des fichiers de données DNDZ_xx.TXT.

Les données vont de 0° à 360° en longitude et de +90° à –90° 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.

On peut obtenir ces fichiers de données auprès du BR.

FIGURE 4

Moyenne mensuelle de ΔN: février

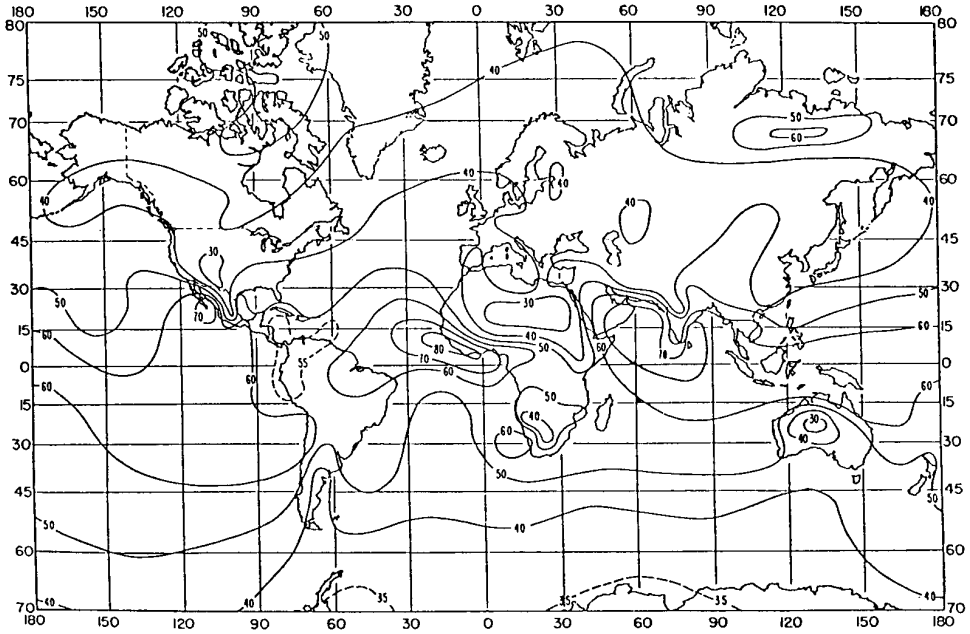
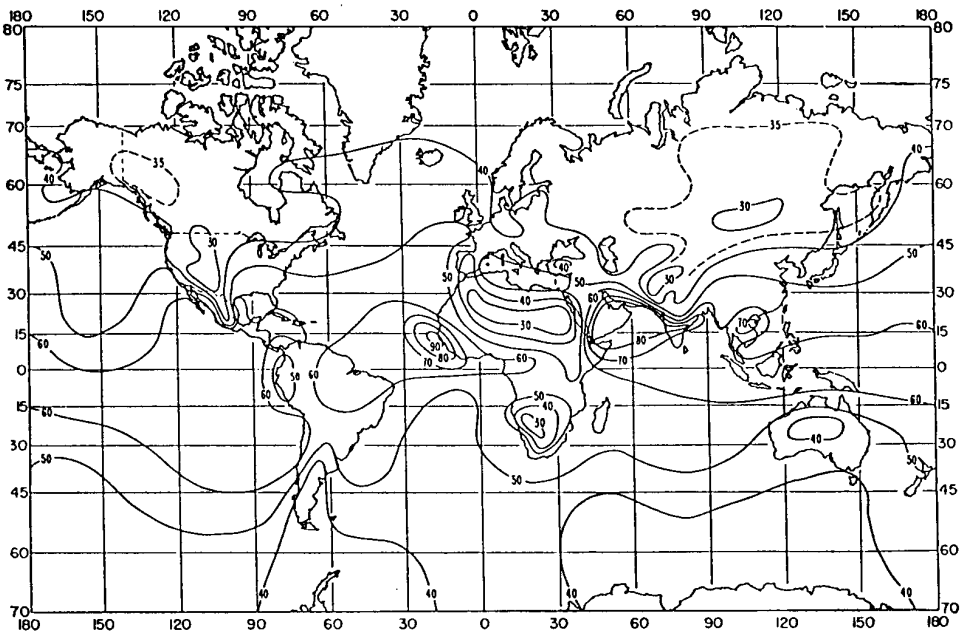


FIGURE 5

Moyenne mensuelle de ΔN: mai



0453-045

FIGURE 6

Moyenne mensuelle de ΔN: août

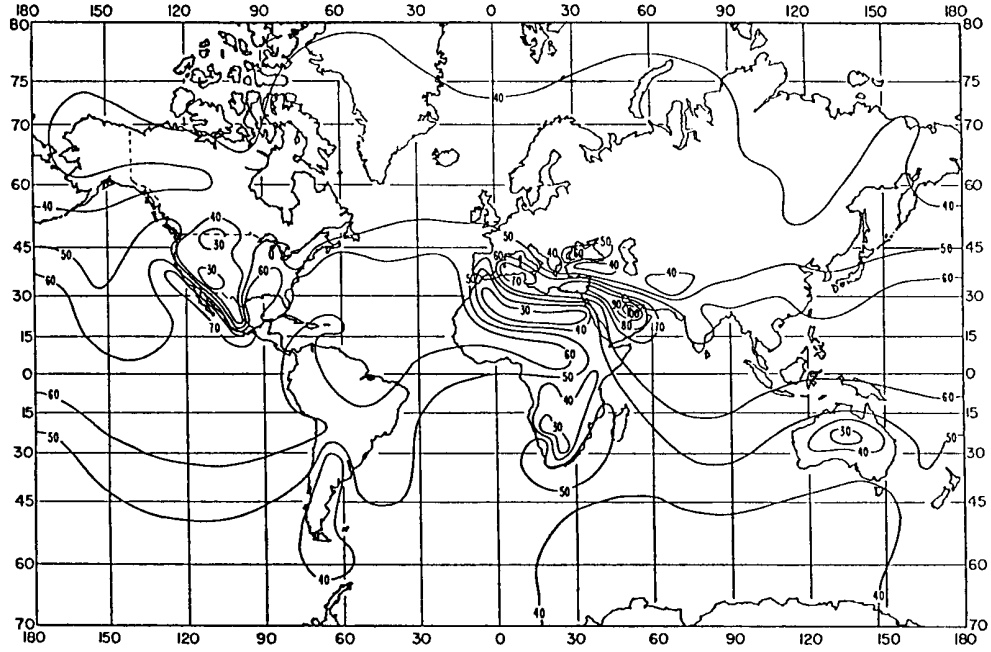
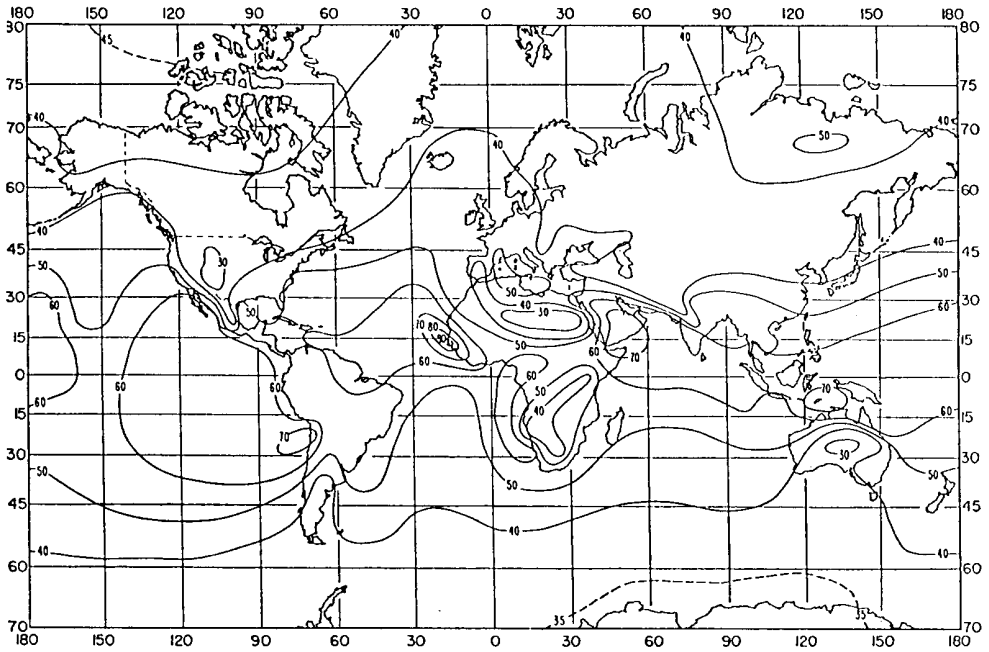


FIGURE 7

Moyenne mensuelle de ΔN: novembre



0453-067

FIGURE 8

Pourcentage du temps pendant lequel le gradient ≤ –100 unités N/km: février

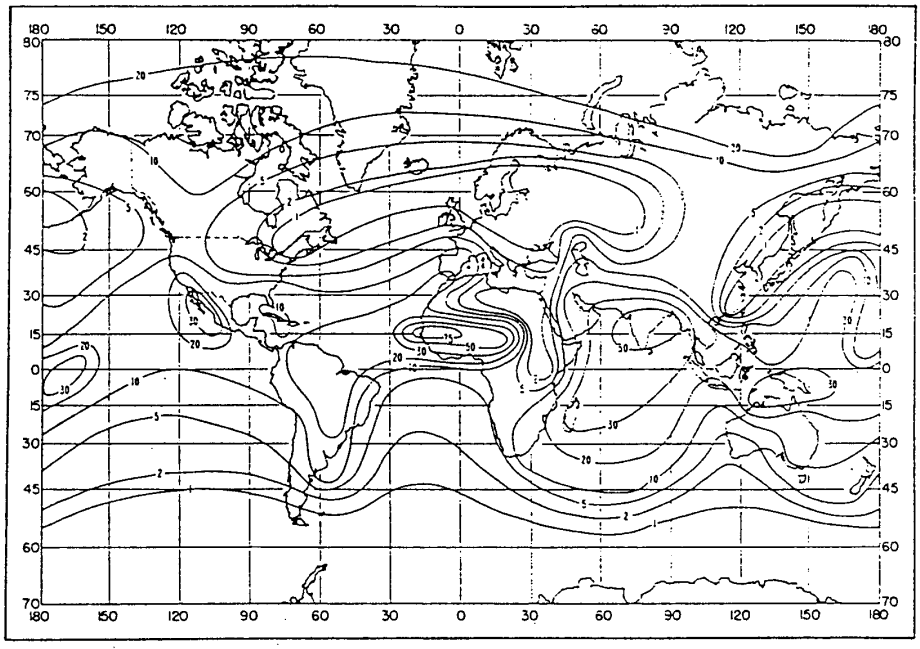
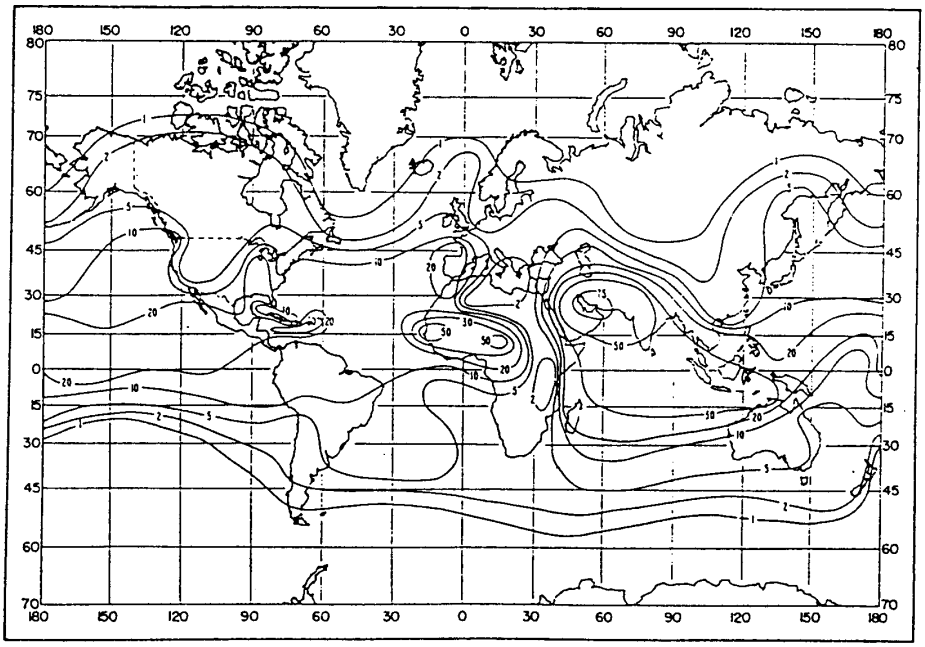


FIGURE 9

Pourcentage du temps pendant lequel le gradient ≤ –100 unités N/km: mai



0453-089

FIGURE 10

Pourcentage du temps pendant lequel le gradient ≤ –100 unités N/km: août

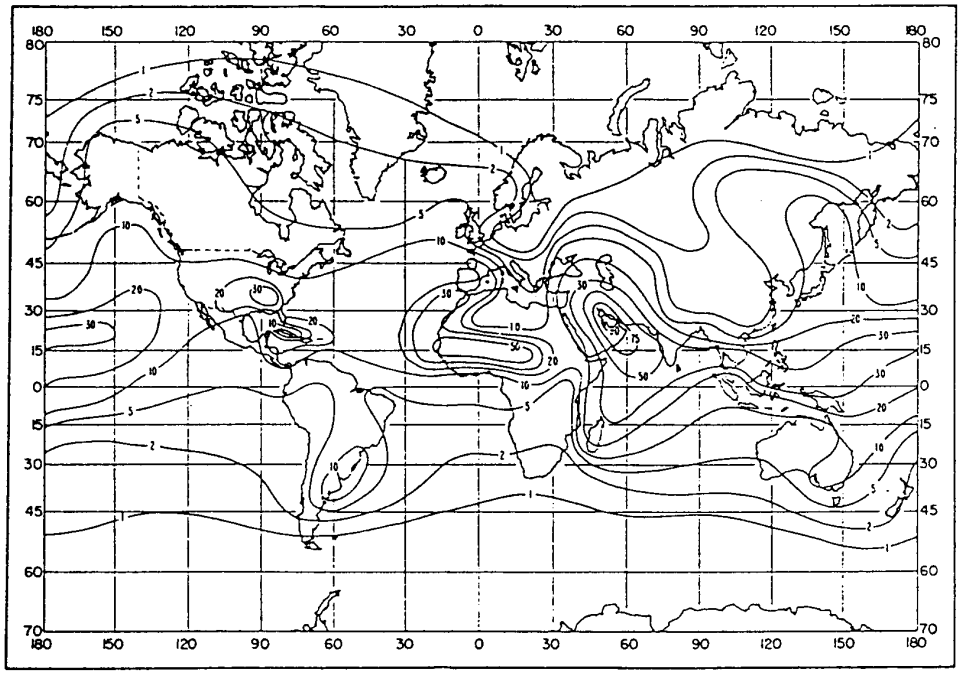
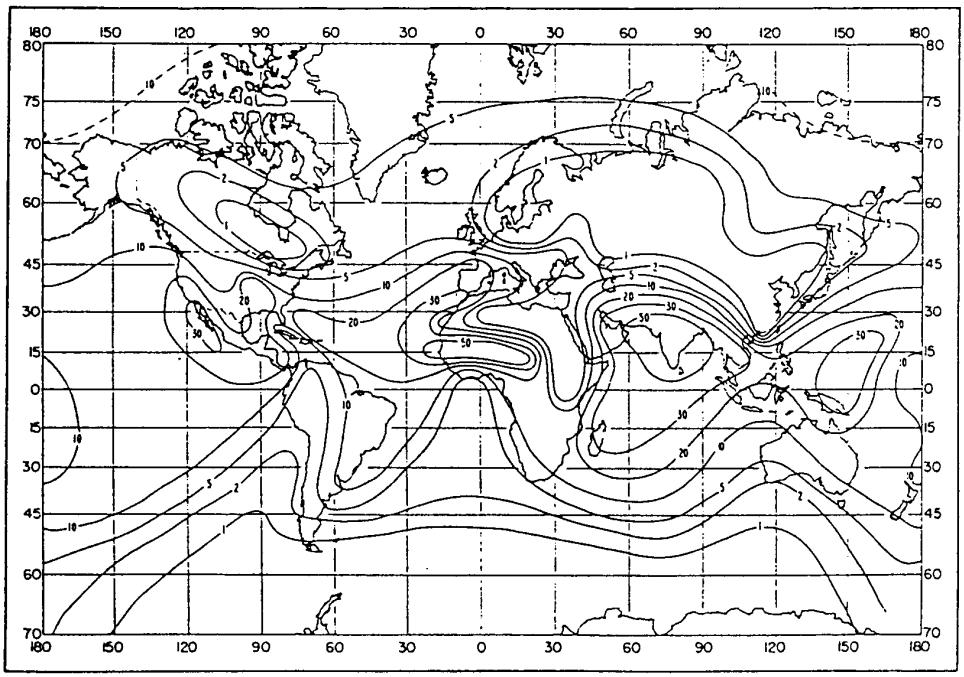


FIGURE 11

Pourcentage du temps pendant lequel le gradient ≤ –100 unités N/km: novembre



0453-1011

FIGURE 12

Gradient du coïndice non dépassé pendant 1% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère

(Il s'agit du paramètre désigné par dN_1 dans la Recommandation UIT-R P.530)

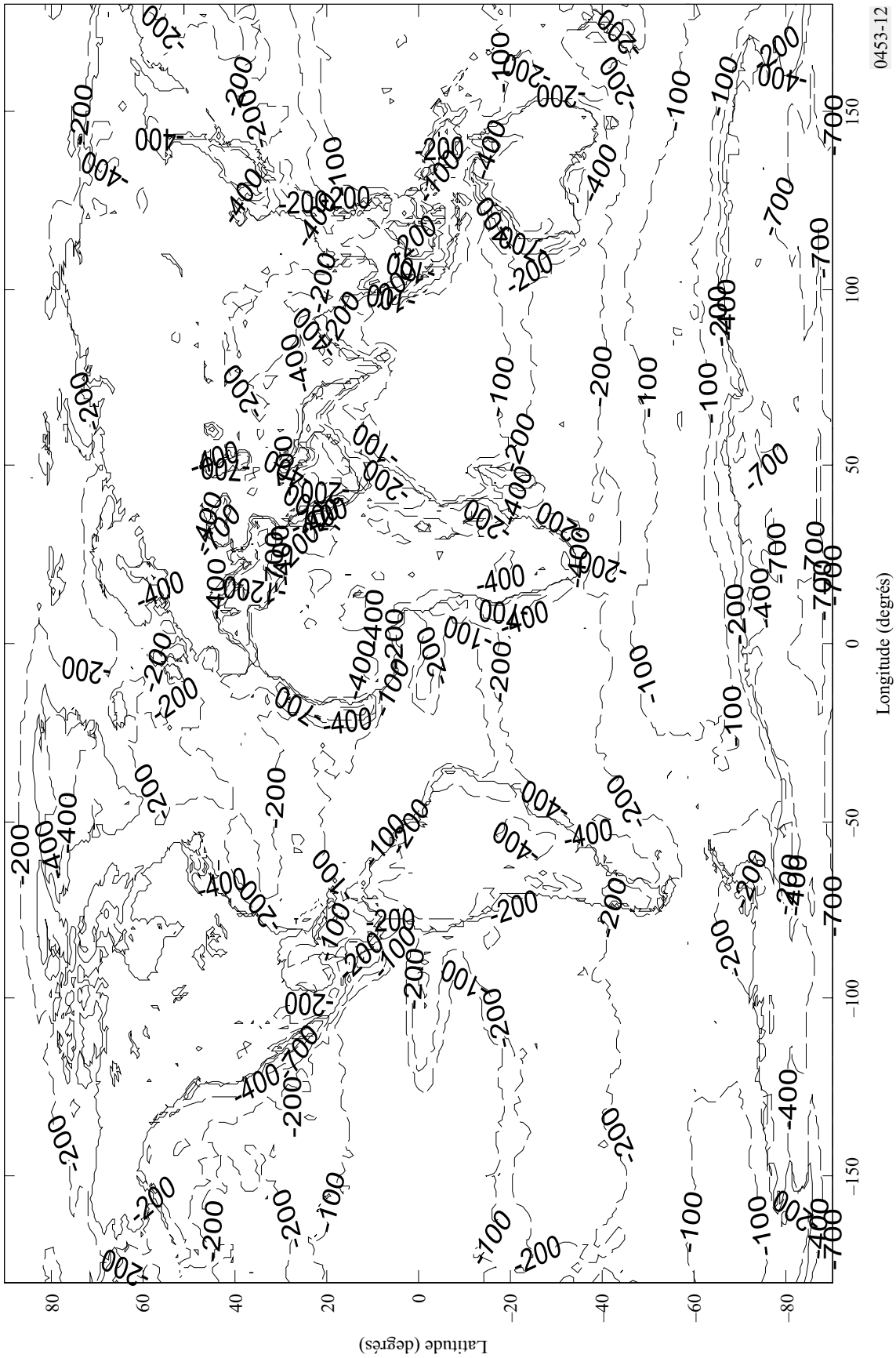


FIGURE 13

Gradient du coïndice non dépassé pendant 10% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère

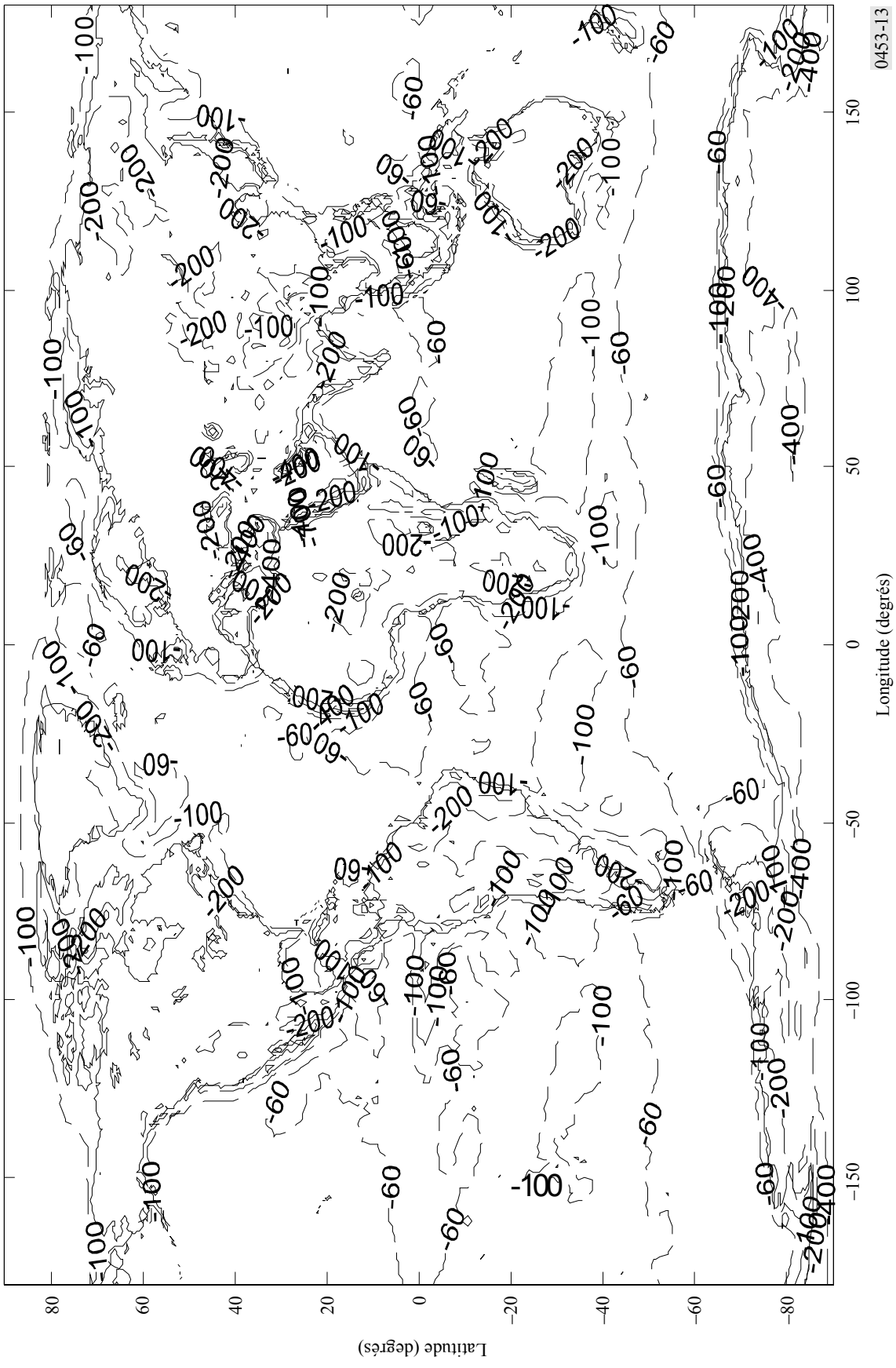


FIGURE 14

Gradient du coïndice non dépassé pendant 50% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère

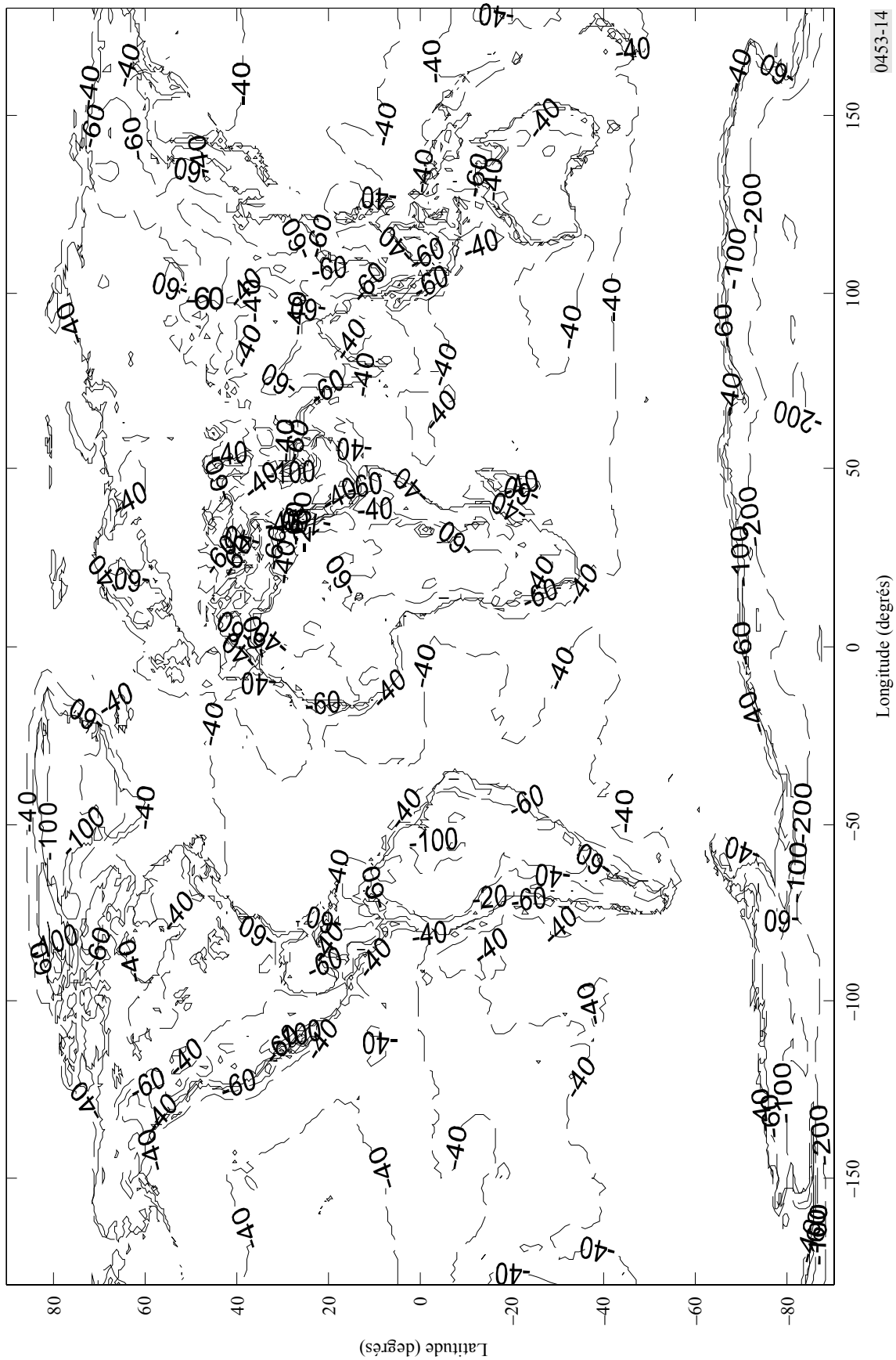


FIGURE 15

Gradient du coïndice non dépassé pendant 90% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère

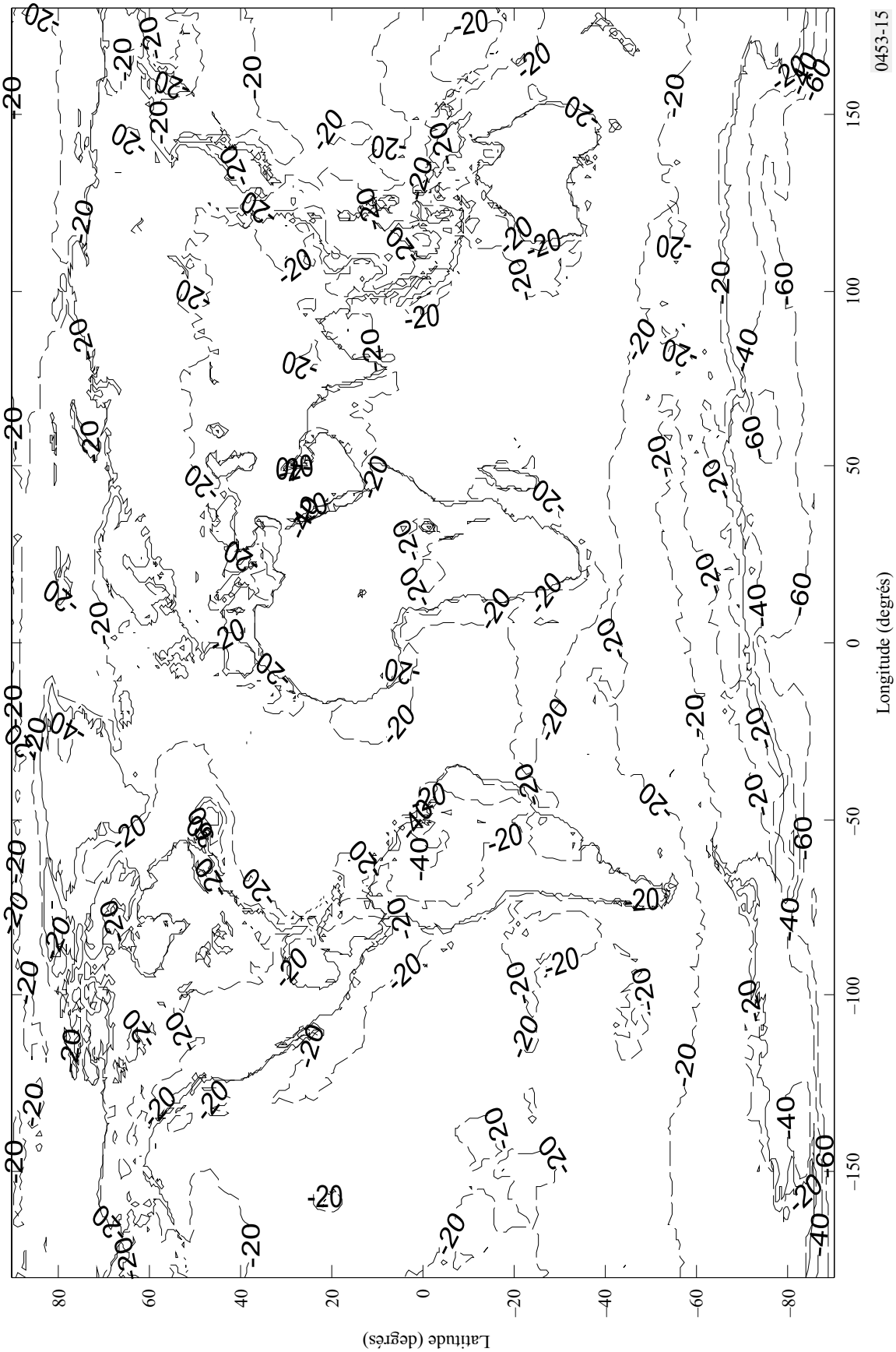
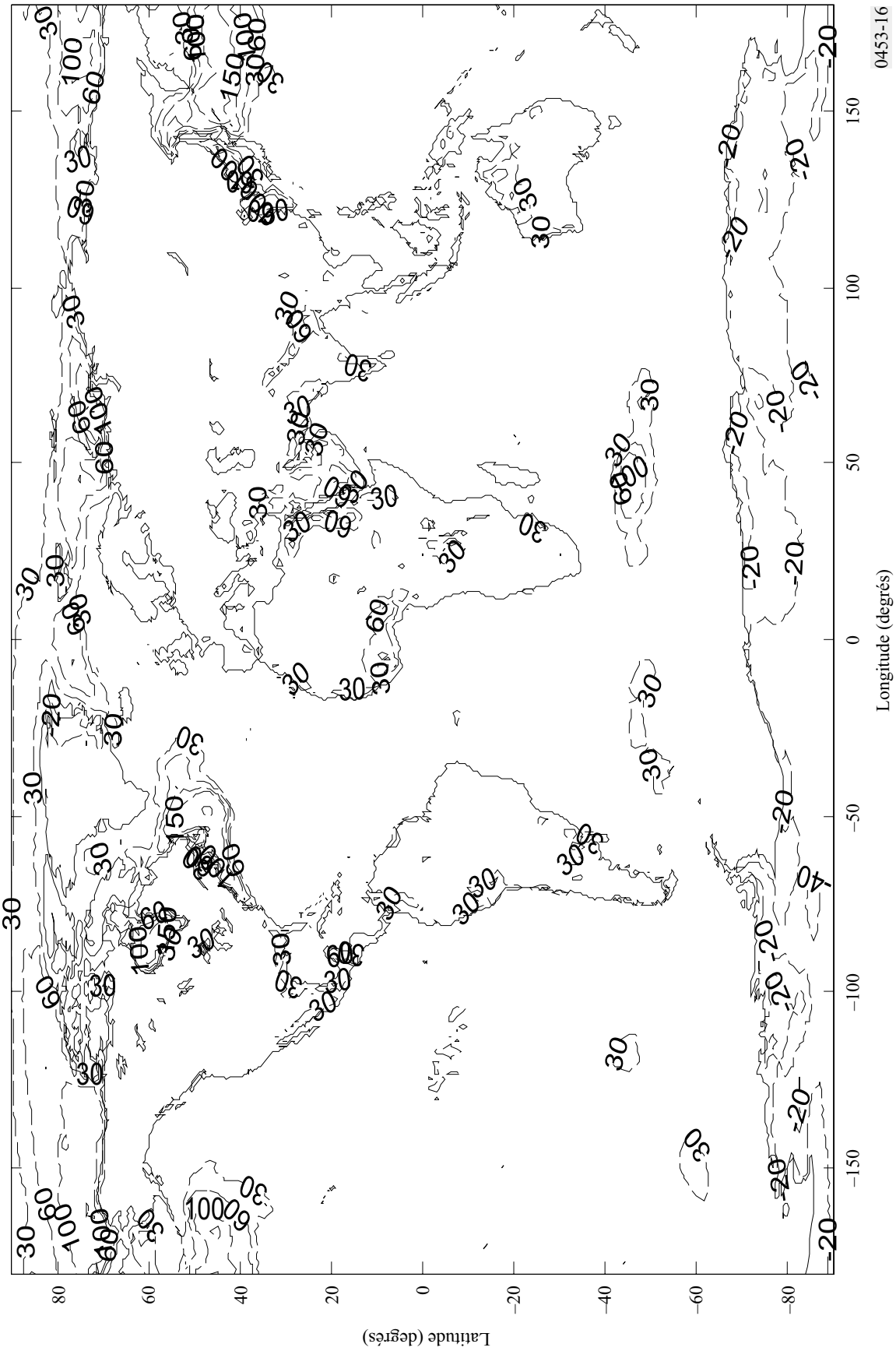


FIGURE 16

Gradient du coïndice non dépassé pendant 99% d'une année moyenne dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère



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:

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

où:

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

$$k_1 = 30.$$

L'équation (11) est valable pour l'intervalle –300 unités N/km ≤ D_n ≤ –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 (9).

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

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

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 (12) 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:

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

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 (13) 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 terme de coïndice modifié que l'on définit par :

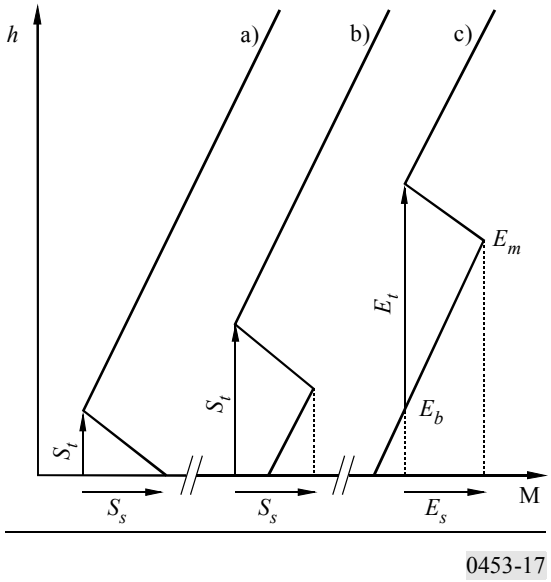
$$M(h) = N(h) + 157h \qquad \text{(unités M)} \tag{14}$$

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. 17. 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 17

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



Pour plus de commodité, les Fig. 18 à 25 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° à 360° en longitude et de +90° à −90° en latitude avec une résolution de 1,5°. 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 18

Nom du fichier: S_OCCURRENCE.TXT

Fréquence d'apparition d'un conduit de surface pour une année moyenne, S_p (%)

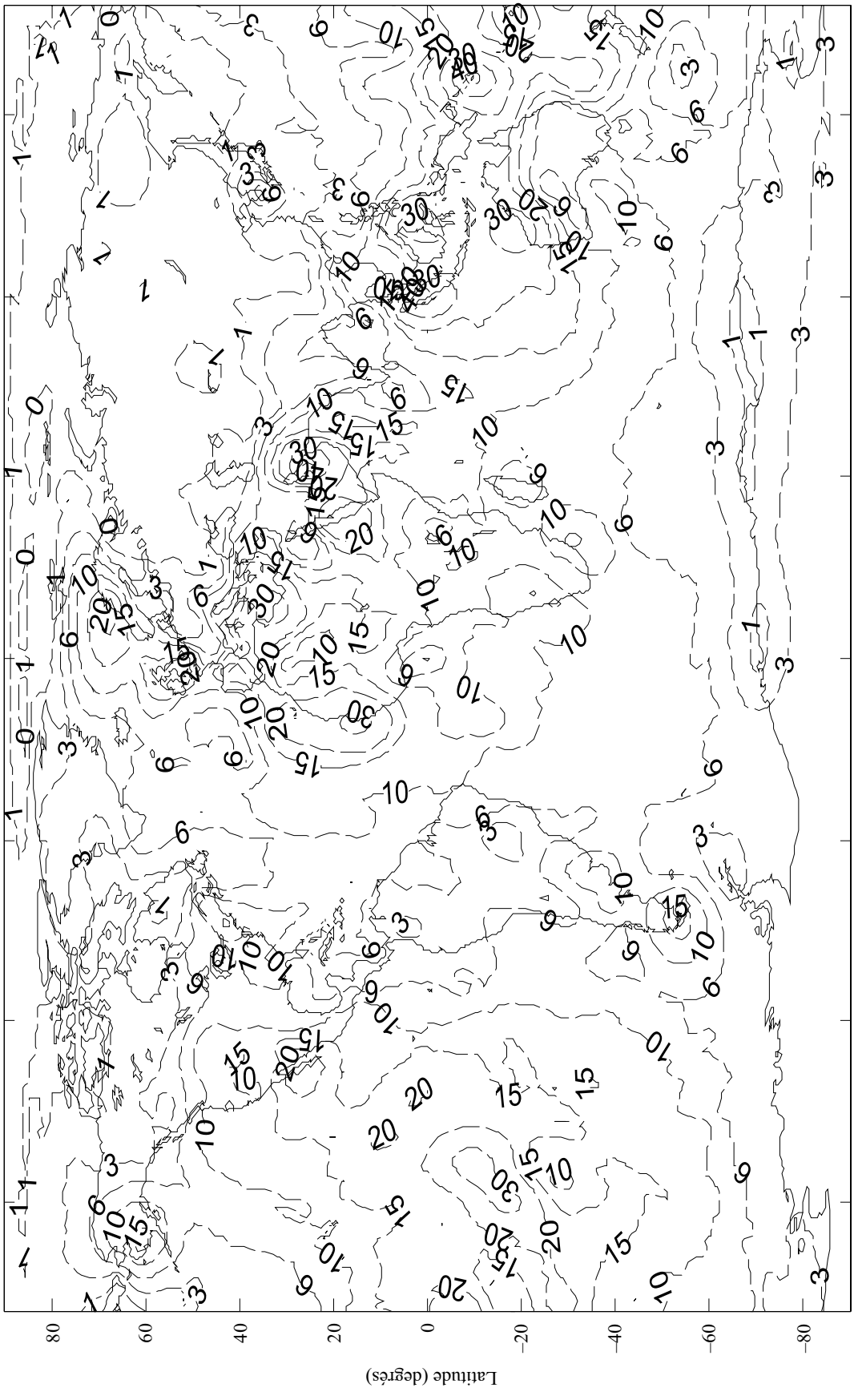
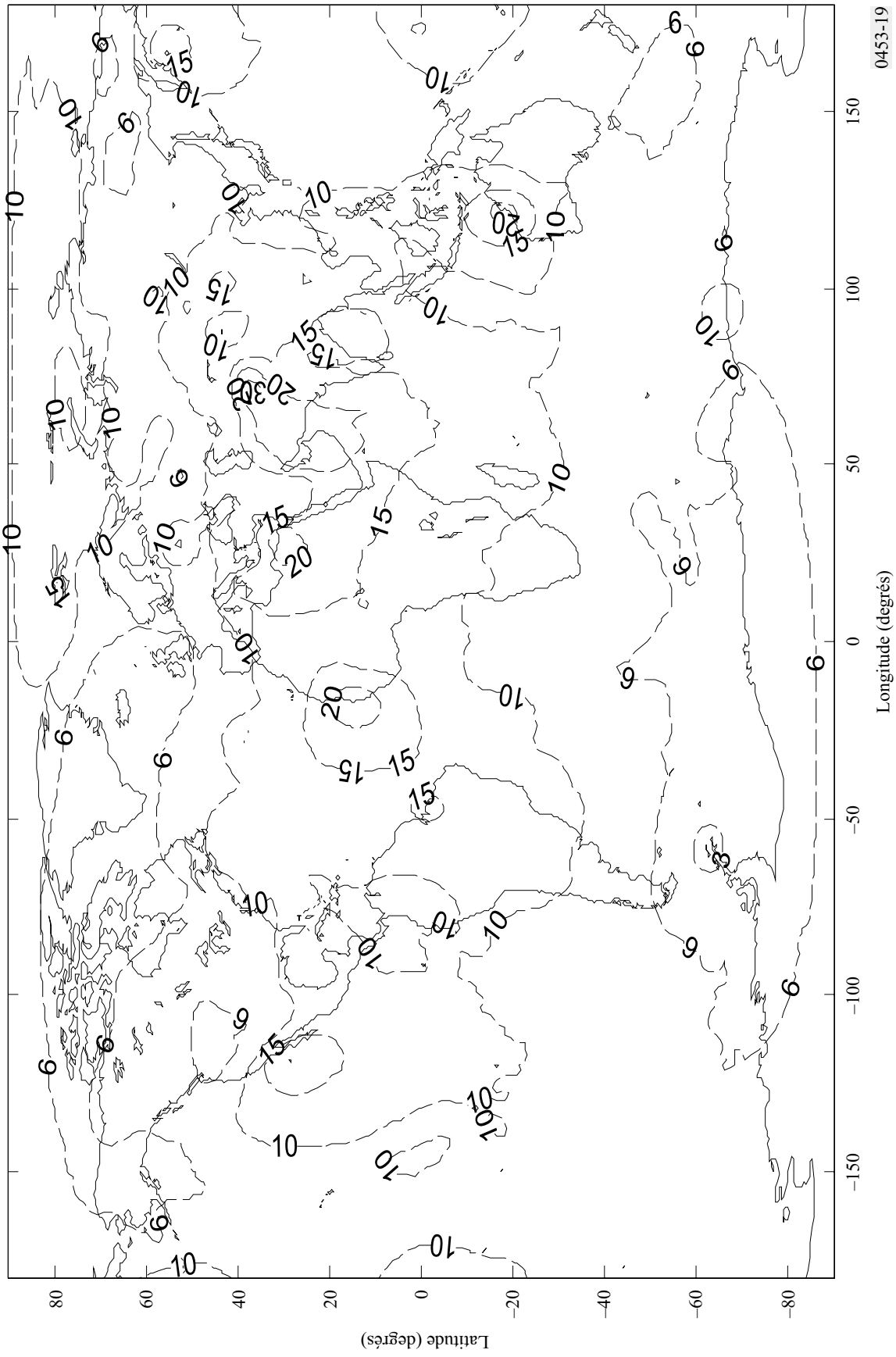


FIGURE 19

Nom du fichier: S_STRENGTH.TXT

Intensité moyenne d'un conduit de surface pour une année moyenne, S_s (unités M)



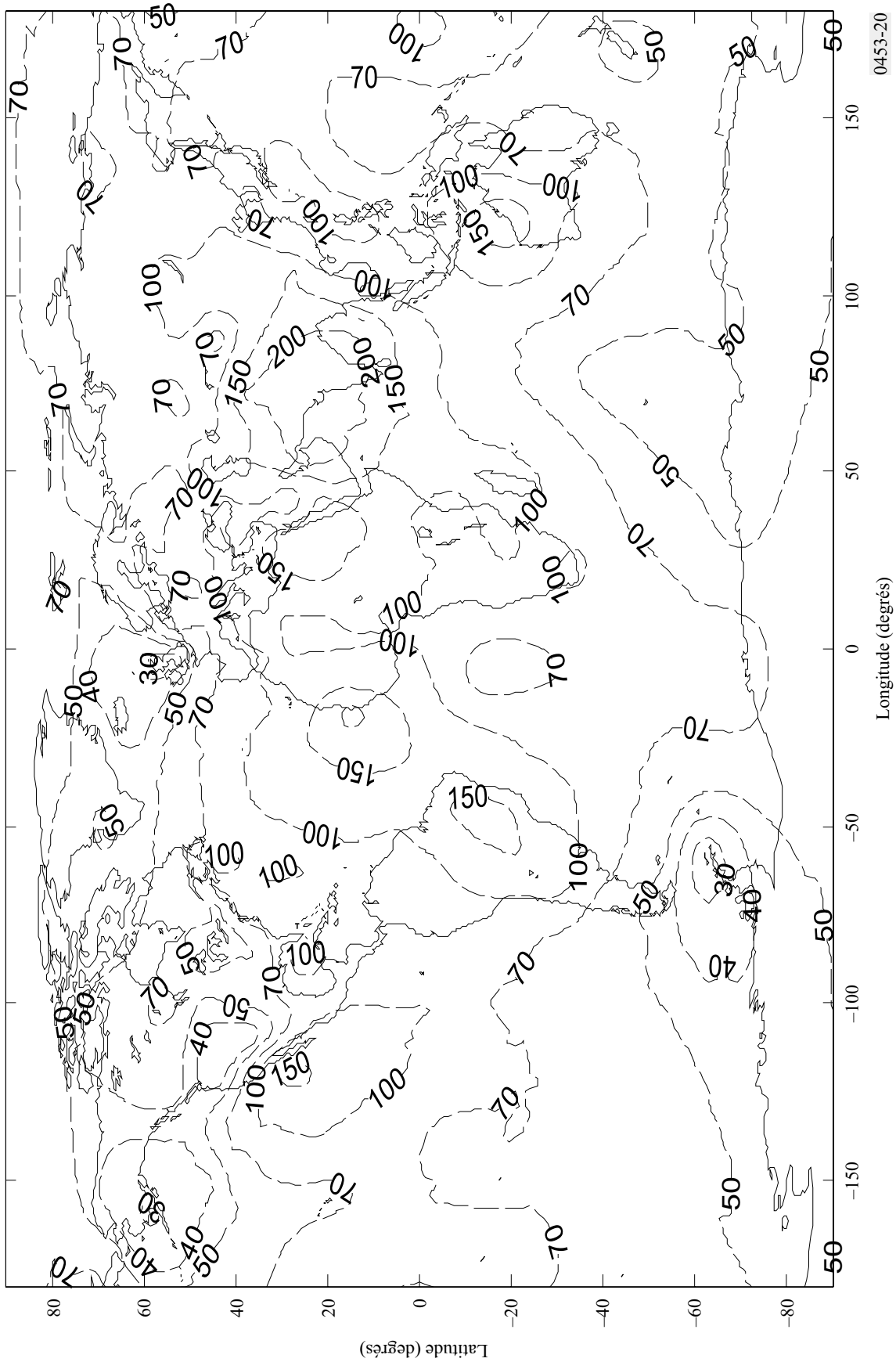
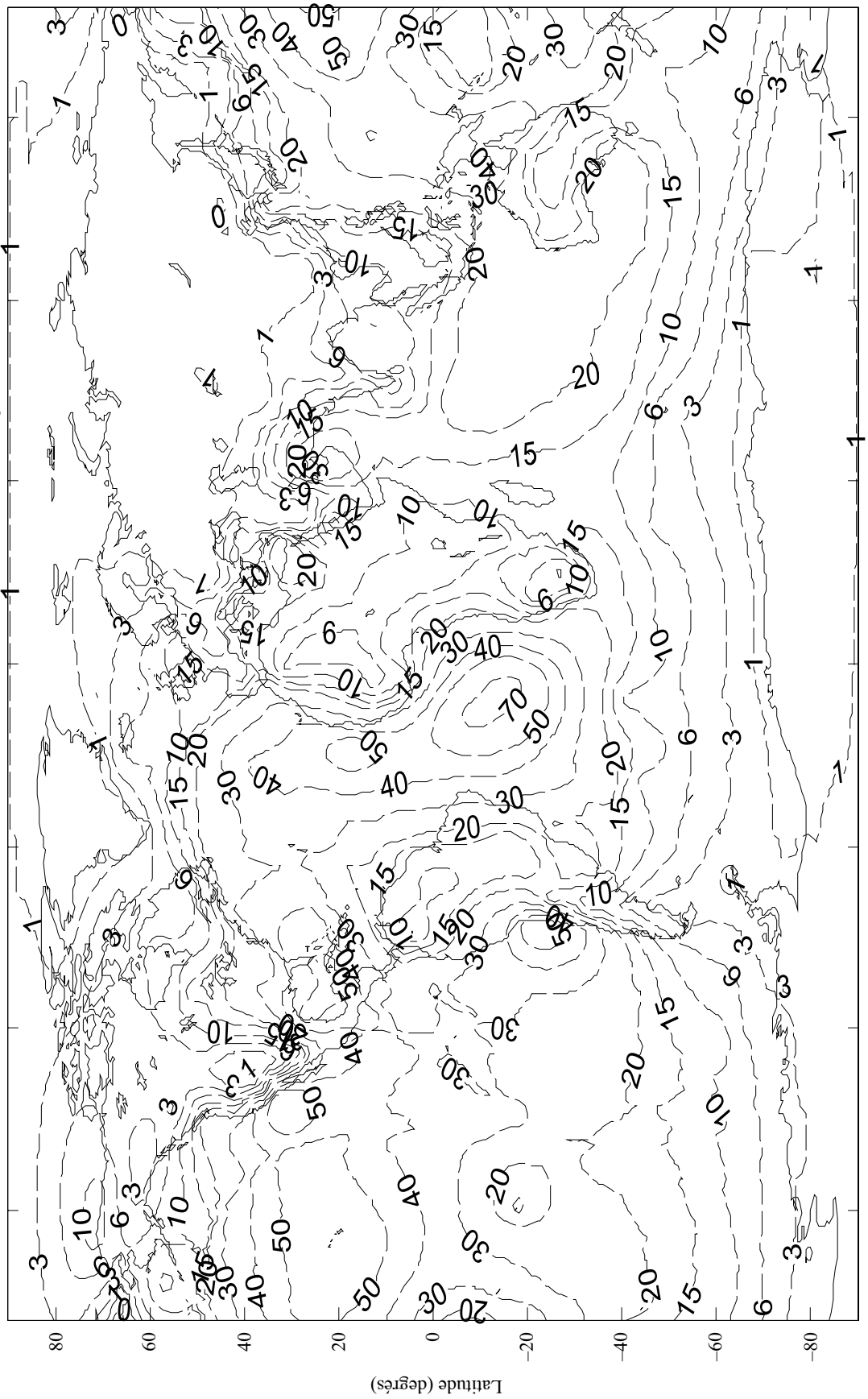

Largeur moyenne d'un conduit de surface pour une année moyenne, S_t (m)
Nom du fichier: S_THICKNESS.TXT
Latitude (degrés)
Longitude (degrés)
0453-20

FIGURE 20

FIGURE 21

Nom du fichier: E_OCCURRENCE.TXT

Fréquence d'apparition d'un conduit élevé pour une année moyenne, E_p (%)



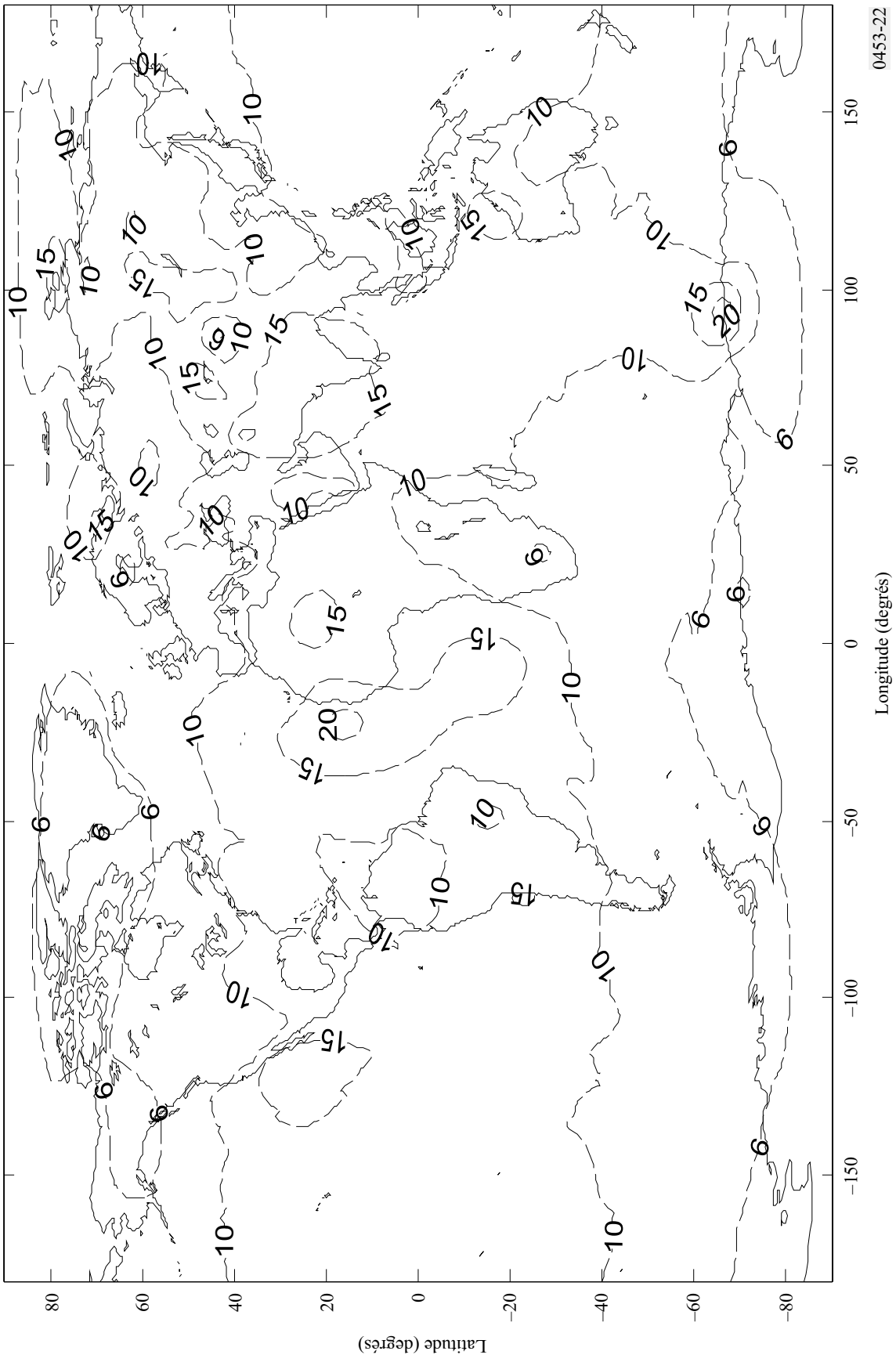


FIGURE 22

Nom du fichier: E_STRENGTH.TXT

Intensité moyenne d'un conduit élevé pour une année moyenne, E_s (unités M)

FIGURE 23

Nom du fichier: E_THICKNESS.TXT

Largeur moyenne d'un conduit élevé pour une année moyenne, E_t (m)

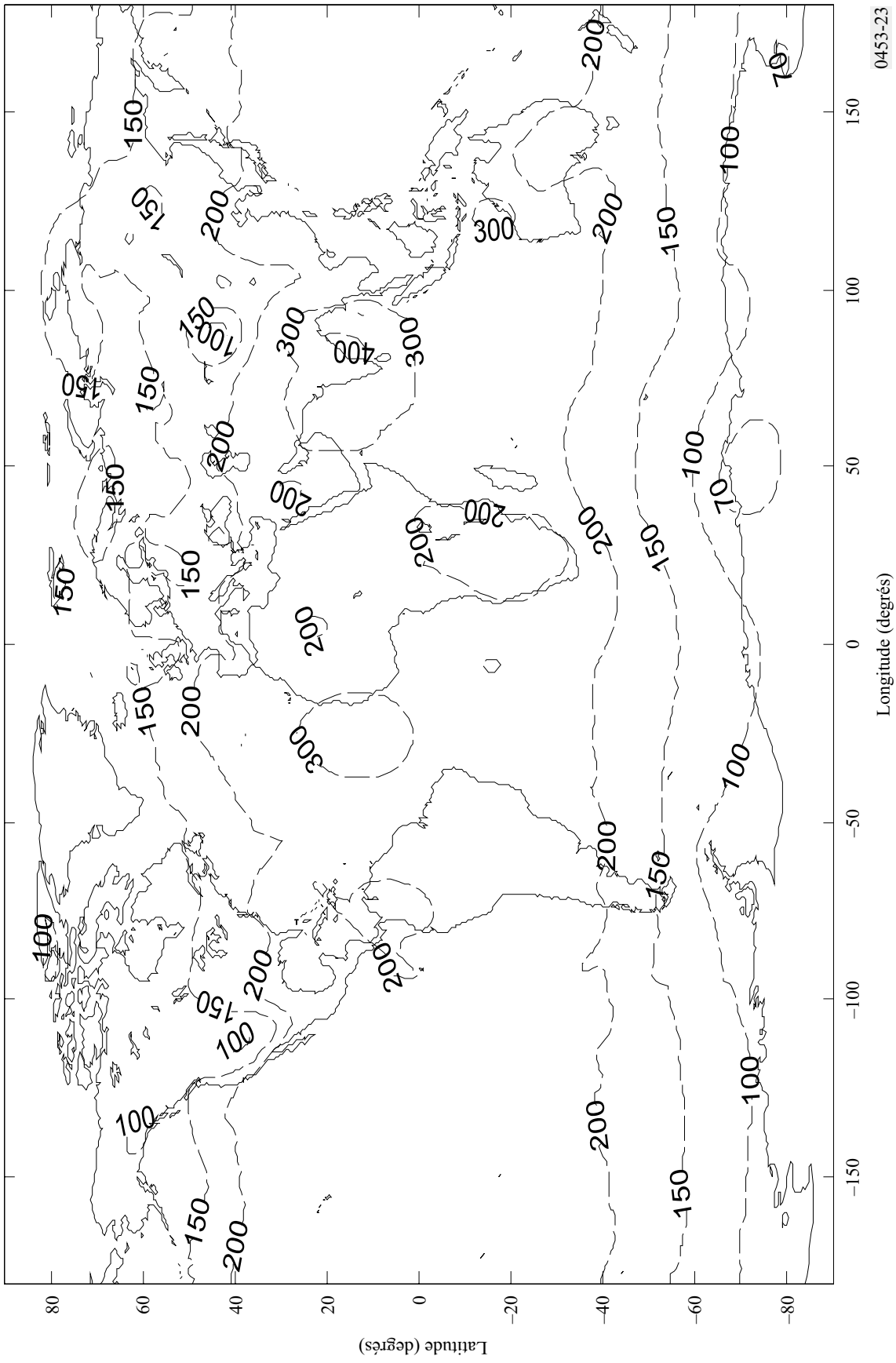
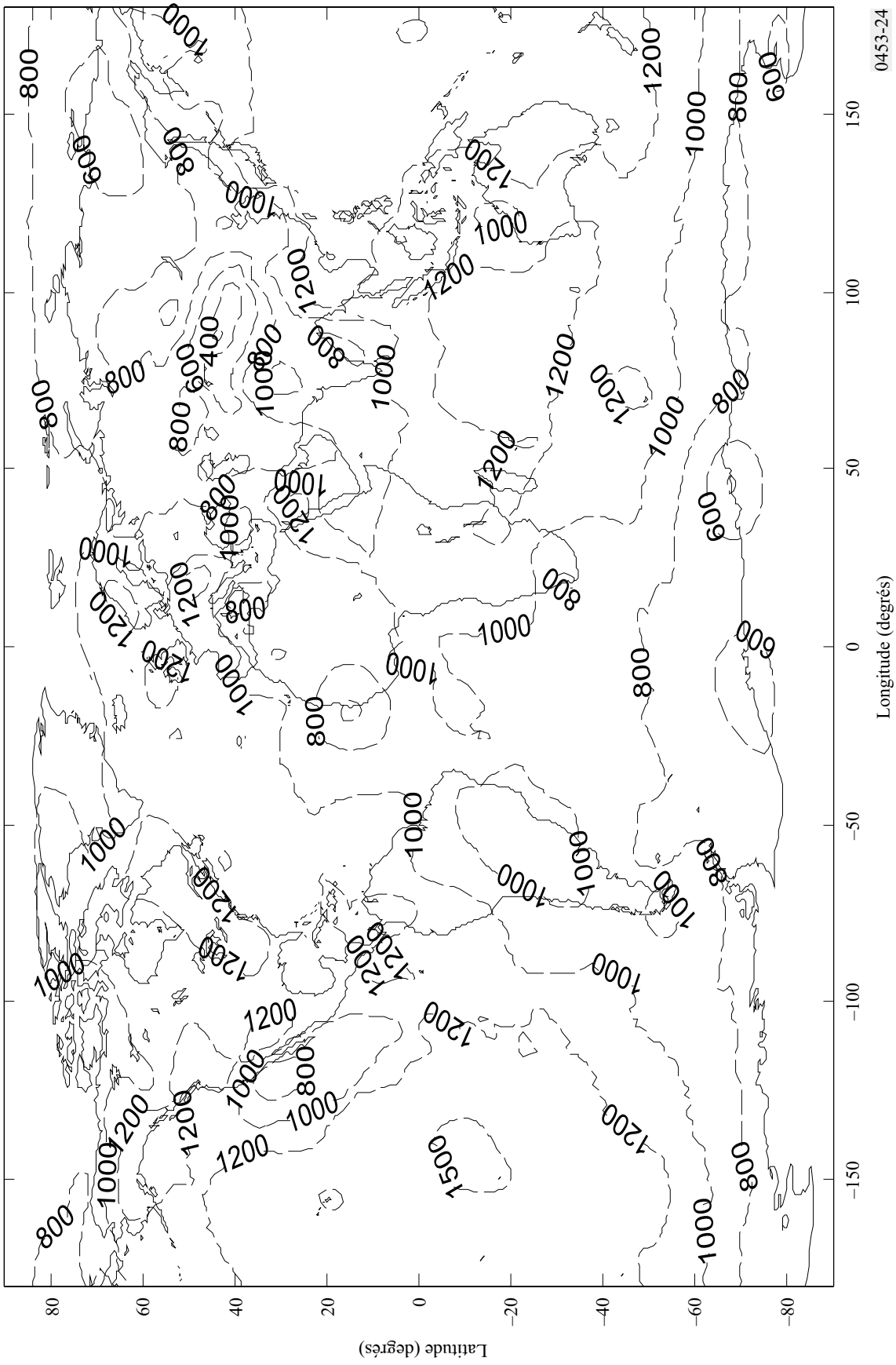


FIGURE 24
Nom du fichier: E_BASE.TXT

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



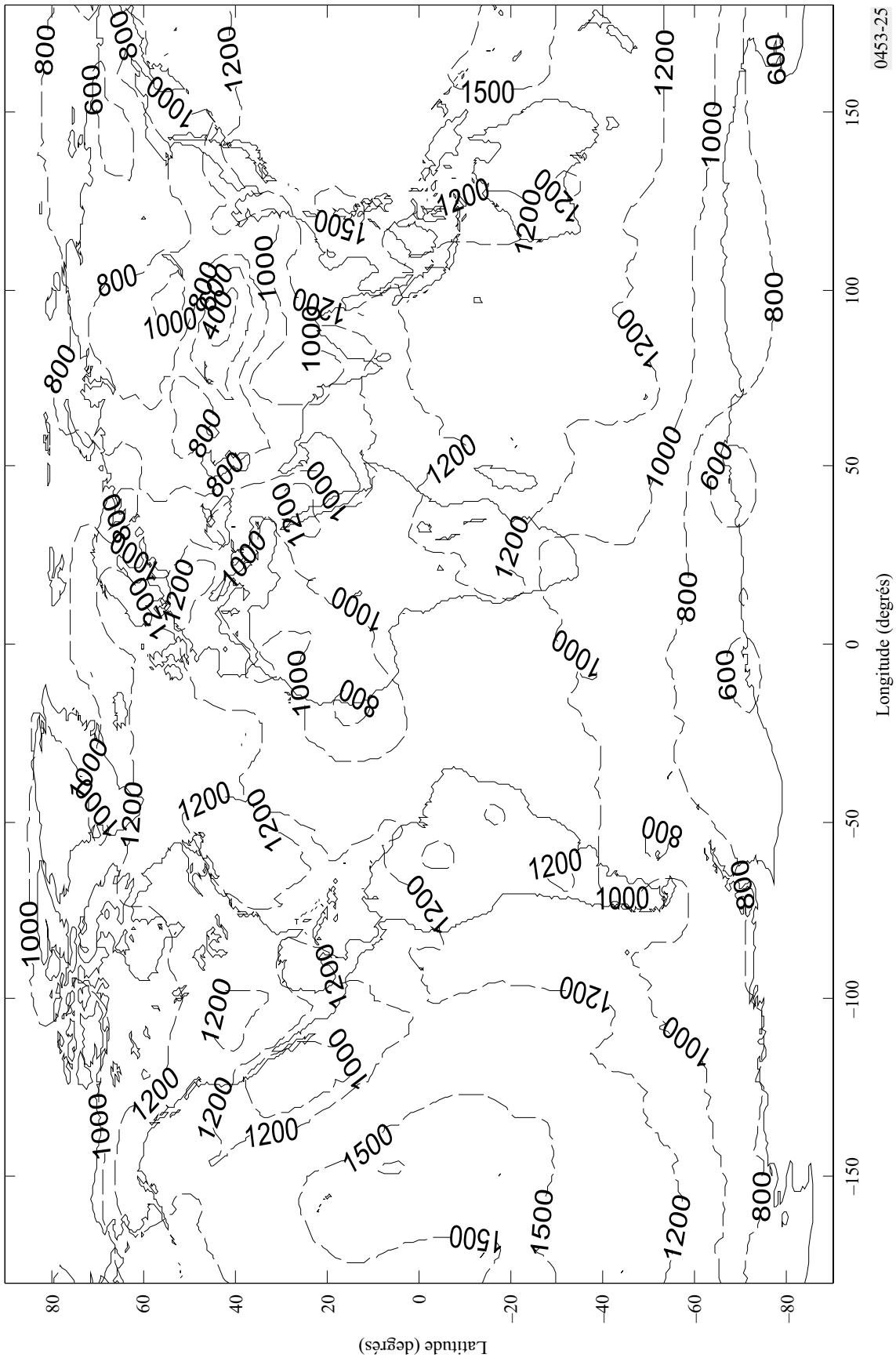


FIGURE 25
Nom du fichier: E_MAX_M.TXT
Hauteur couplée moyenne d'un conduit élevé pour une année moyenne, E_m (m)