

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.453-13
(12/2017)

**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
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systemes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	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, 2018

© UIT 2018

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.453-13

Indice de réfraction radioélectrique: formules et données de réfractivité

(Question UIT-R 201/3)

(1970-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2012-2015-2016-2017)

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.

Mots clés

Indice de réfraction radioélectrique, surface, profil vertical, paramètres de réfractivité, 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 coïndice 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 coïndice de réfraction, N_{sec} , est:

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

et le terme humide du coïndice 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°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:

$$EF_{eau} = 1 + 10^{-4} \left[7.2 + P \cdot \left(0.0320 + 5.9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \right) \right]$$

$$EF_{glace} = 1 + 10^{-4} \left[2.2 + P \cdot \left(0.0383 + 6.4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 \right) \right]$$

où:

t : température (°C)

P : pression atmosphérique totale (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° et +50°)

pour la glace

$$a = 6,1115$$

$$b = 23,036$$

$$c = 279,82$$

$$d = 333,7$$

(applicable entre -80° et 0°)

P est défini comme étant la pression atmosphérique totale, mais la pression d'une atmosphère sèche peut-être utilisée sans perte significative en ce qui concerne la précision des prévisions. On obtient la pression partielle de vapeur d'eau e à partir de sa concentration ρ par l'équation:

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

où ρ est donné en g/m³. 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:

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

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 Figures 1 et 2 ont été tracées pour $h_0 = 9,5$ km. Les Figures 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 Figures 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

Les valeurs annuelles et mensuelles du terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre, N_{wet} (ppm), dépassées pendant 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 et 99% de l'année ou, respectivement, du mois, en moyenne, font partie intégrante de la présente Recommandation et sont disponibles sous forme de cartes numériques fournies dans le Supplément R-Rec P.453-13-201712-I!!ZIP-E.zip.

Les valeurs sont données entre -180° et 180° en longitude et entre -90° et 90° en latitude, avec une résolution de $0,75^\circ$ en latitude et en longitude. Le terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre à n'importe quel emplacement voulu à la surface de la Terre peut être obtenu à l'aide de la méthode d'interpolation suivante:

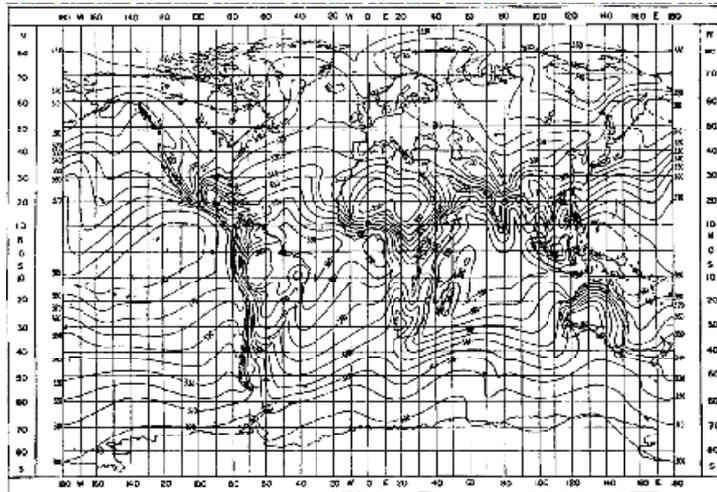
- a) déterminer les deux probabilités p_{above} et p_{below} supérieure et inférieure à la probabilité souhaitée p dans l'ensemble: 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 et 99%;
- b) pour les deux probabilités p_{above} et p_{below} , déterminer les termes humides du coïndice de réfraction à la surface de la Terre N_{wet1} , N_{wet2} , N_{wet3} , et N_{wet4} aux quatre points de la grille les plus proches;
- c) déterminer les termes humides du coïndice de réfraction à la surface de la Terre, $N_{wetabove}$ et $N_{wetbelow}$, pour les probabilités p_{above} et p_{below} par interpolation bilinéaire à partir des quatre valeurs du terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre N_{wet1} , N_{wet2} , N_{wet3} , et N_{wet4} aux quatre points de la grille, comme décrit dans la Recommandation UIT-R P.1144;
- d) déterminer le terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre, N_{wet} , pour la probabilité souhaitée p par interpolation entre $N_{wetabove}$ and $N_{wetbelow}$ en fonction de p_{above} et p_{below} sur une échelle linéaire de N_{wet} en fonction de $\log p$.

Le terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre annuel et mensuel a été obtenu à partir de données ERA Interim recueillies pendant 36 ans (1979-2014) par le Centre européen des prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT).

Pour plus de commodité, la Figure 3 indique la valeur médiane (50%) du terme humide du coïndice de réfraction à la surface de la Terre dépassée pendant l'année, en moyenne.

FIGURE 1

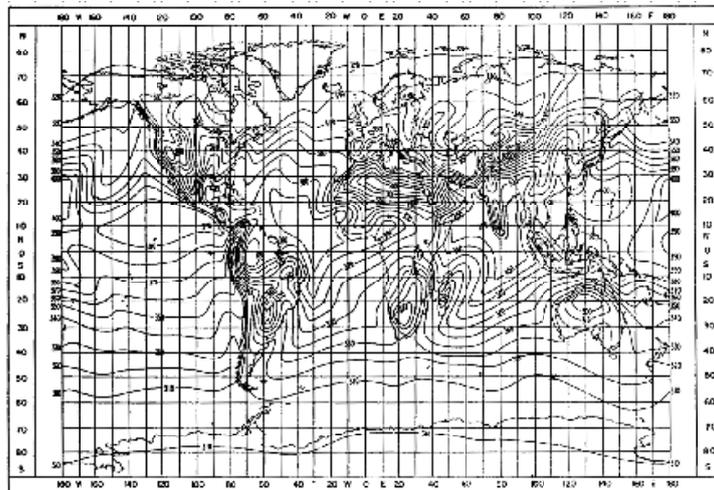
Moyenne mensuelle de N_0 : février



P0453.1

FIGURE 2

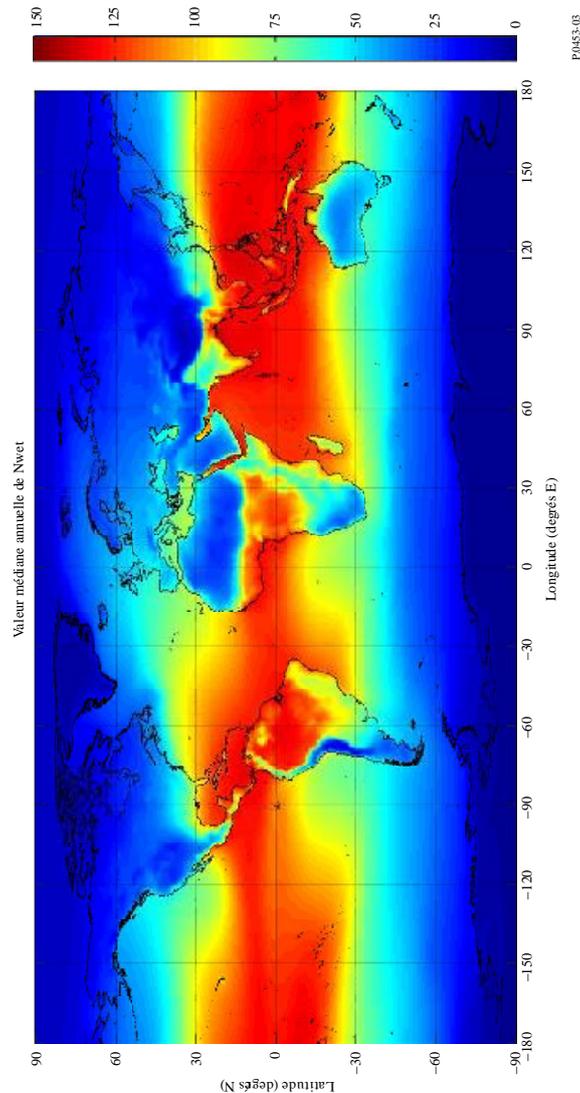
Moyenne mensuelle de N_0 : août



P0453.2

FIGURE 3

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



3 Gradients verticaux du coïncide de réfraction

Les statistiques de gradient vertical du coïncide 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 Figures 4 à 7 donnent des isoplèthes de la décroissance moyenne mensuelle du coïncide, 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:

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

où N_1 est la valeur du coïncide 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 Figures 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 Figures 4 à 7 ne sont pas disponibles sous forme numérique.)

En outre, les valeurs annuelles de ΔN , 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% de l'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 ΔN , 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% du 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 Figures 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 Figures 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, ΔN_{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% de l'année, en moyenne.
- Les valeurs mensuelles du gradient du coïndice dans les 65 premiers mètres de l'atmosphère depuis la surface de la Terre, ΔN_{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% du mois, en moyenne.
- Le pourcentage de temps pendant une année et pendant un mois durant laquelle/lequel le gradient du coïndice, ΔN sur 100 m est inférieur à -100 N-unité/km, (%).

Les données vont de 0° à 360° en longitude et de $+90^\circ$ 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, comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.1144.

FIGURE 4

Moyenne mensuelle de ΔN : février

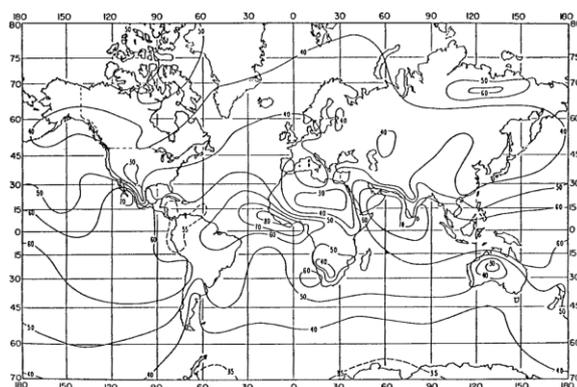
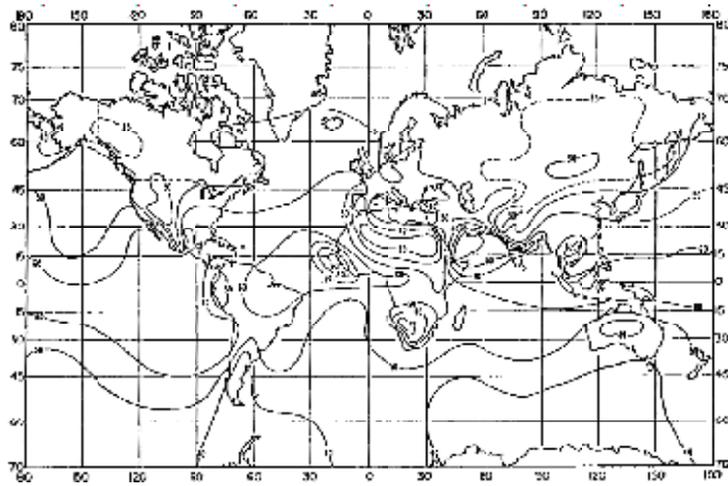
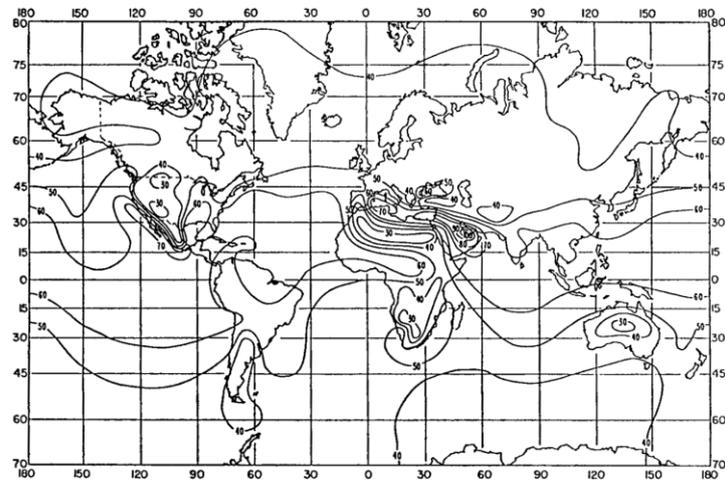


FIGURE 5

Moyenne mensuelle de ΔN : mai

P.0453-05

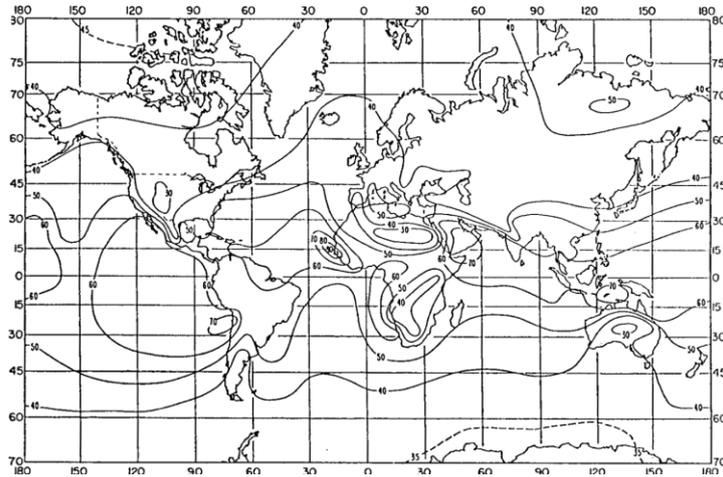
FIGURE 6

Moyenne mensuelle de ΔN : août

P.0453-06

FIGURE 7

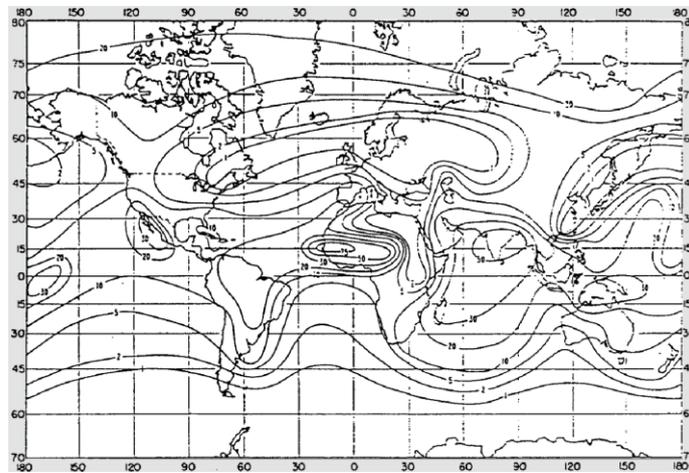
Moyenne mensuelle de ΔN : novembre



P.0453-07

FIGURE 8

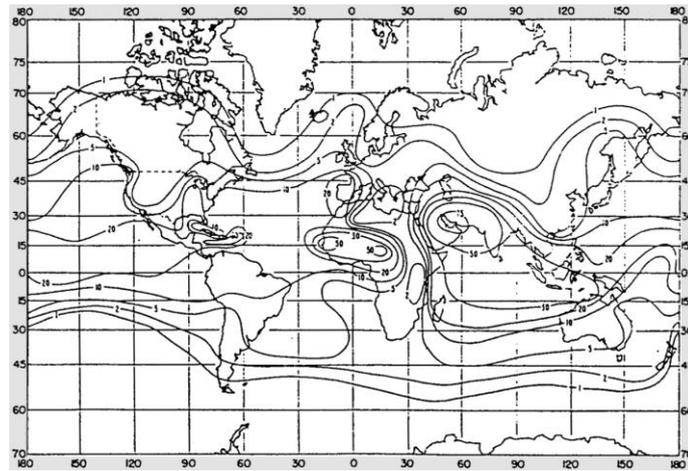
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient ≤ -100 unités N/km: février



P.0453-0

FIGURE 9

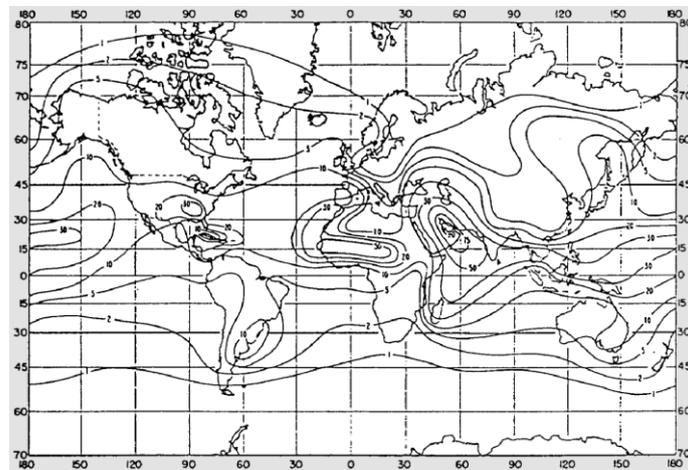
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient ≤ -100 unités N/km: mai



P.0453-03

FIGURE 10

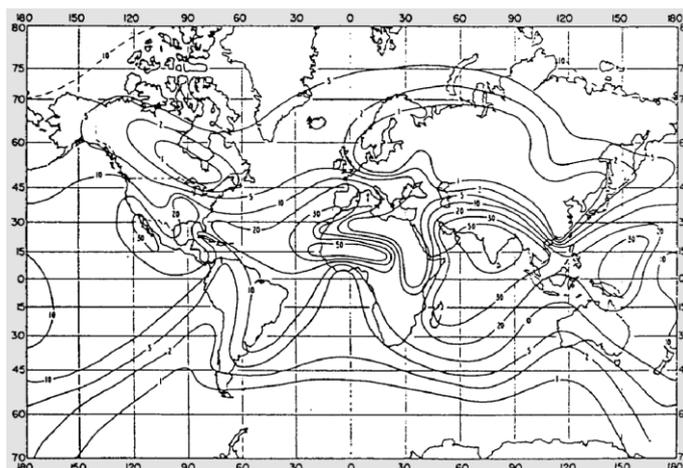
Pourcentage du temps pendant lequel le gradient ≤ -100 unités N/km: août



P.0453-04

FIGURE 11

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



P045311

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 Figures 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 , (Figures 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 :

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

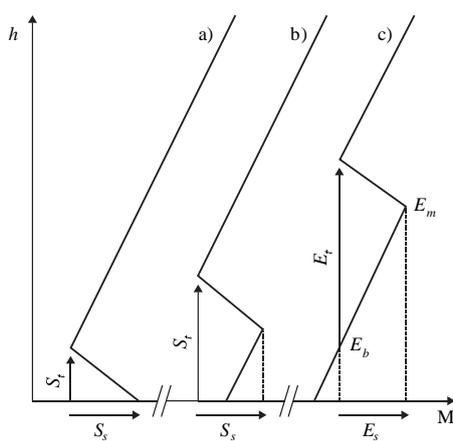
où

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 Figure 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 Figures 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° à 360° en longitude et de $+90^\circ$ à -90° 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

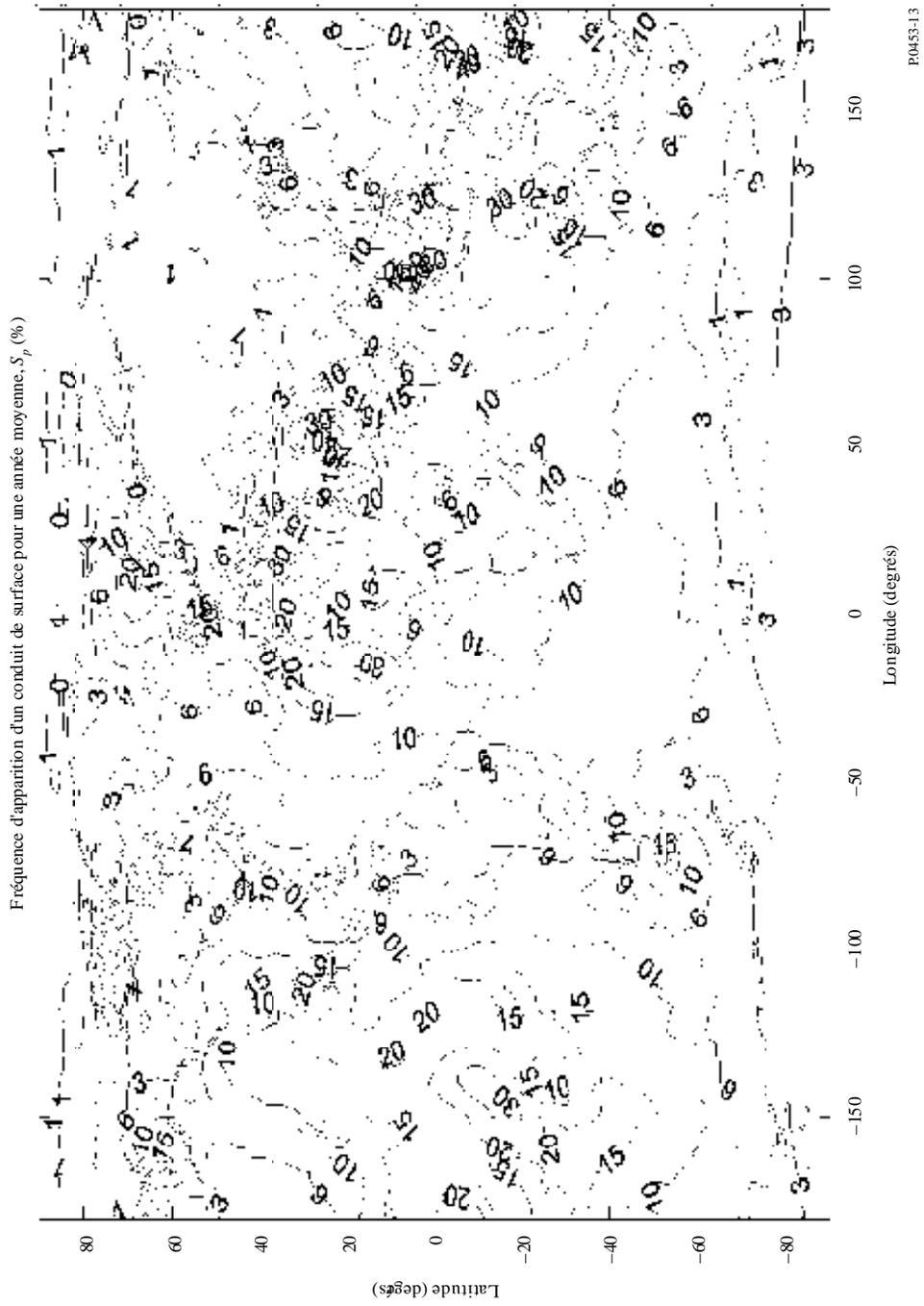


FIGURE 14
Nom du fichier: S_STRENGTH.TXT

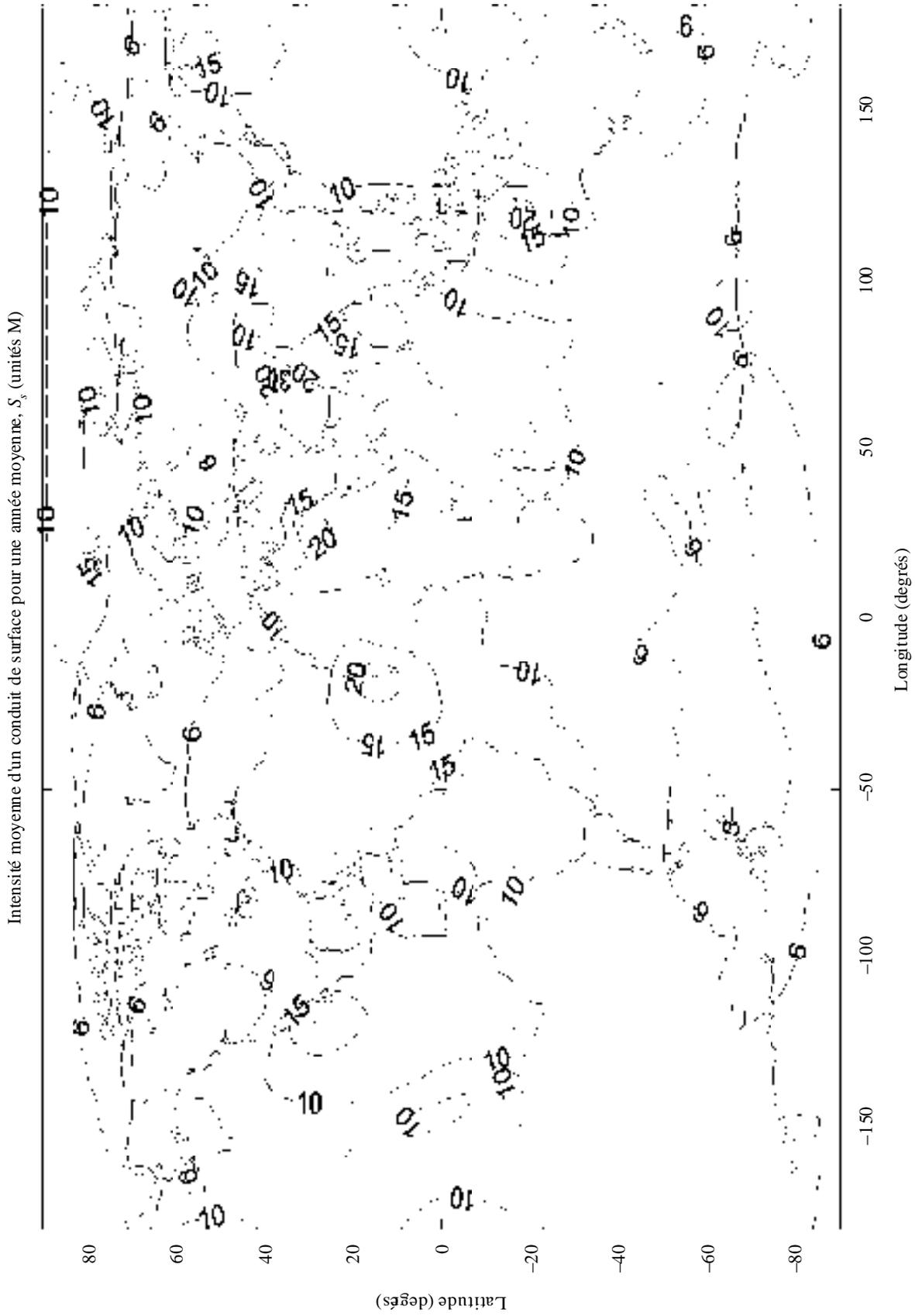
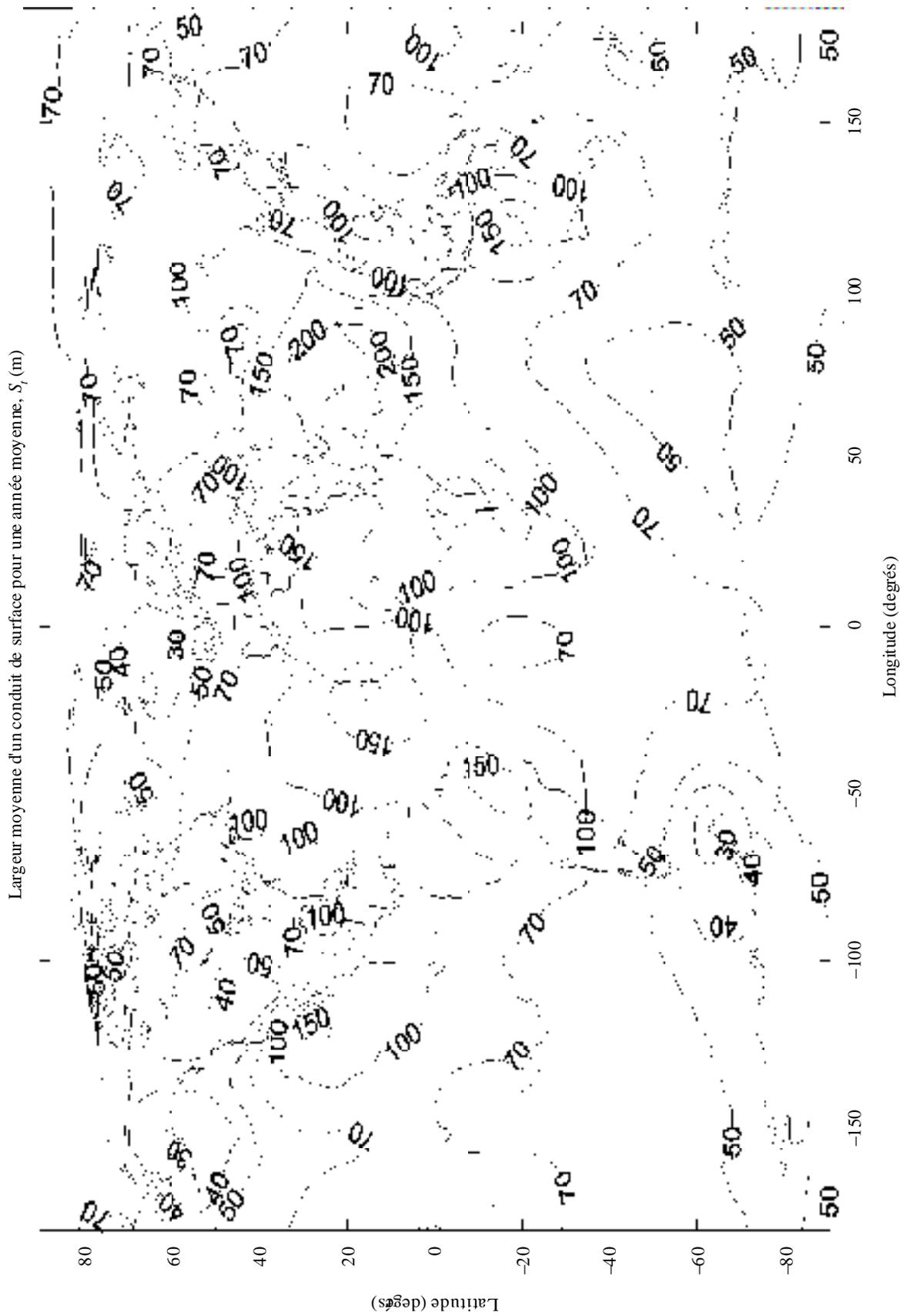


FIGURE 15

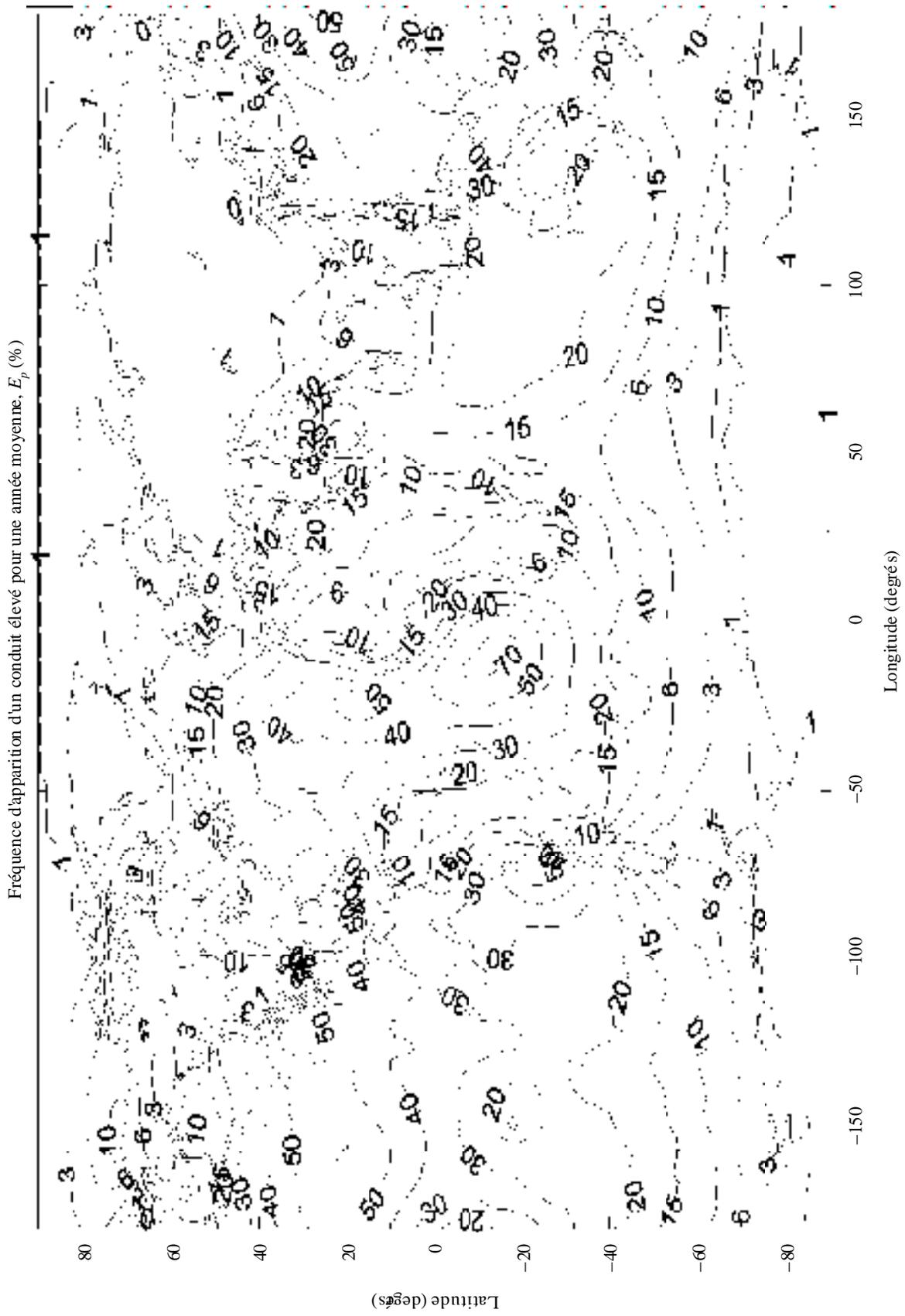
Nom du fichier: S_THICKNESS.TXT



P0453-15

FIGURE 16

Nom du fichier: E_OCCURRENCE.TXT



P0453-16

FIGURE 17

Nom du fichier: E_STRENGTH.TXT

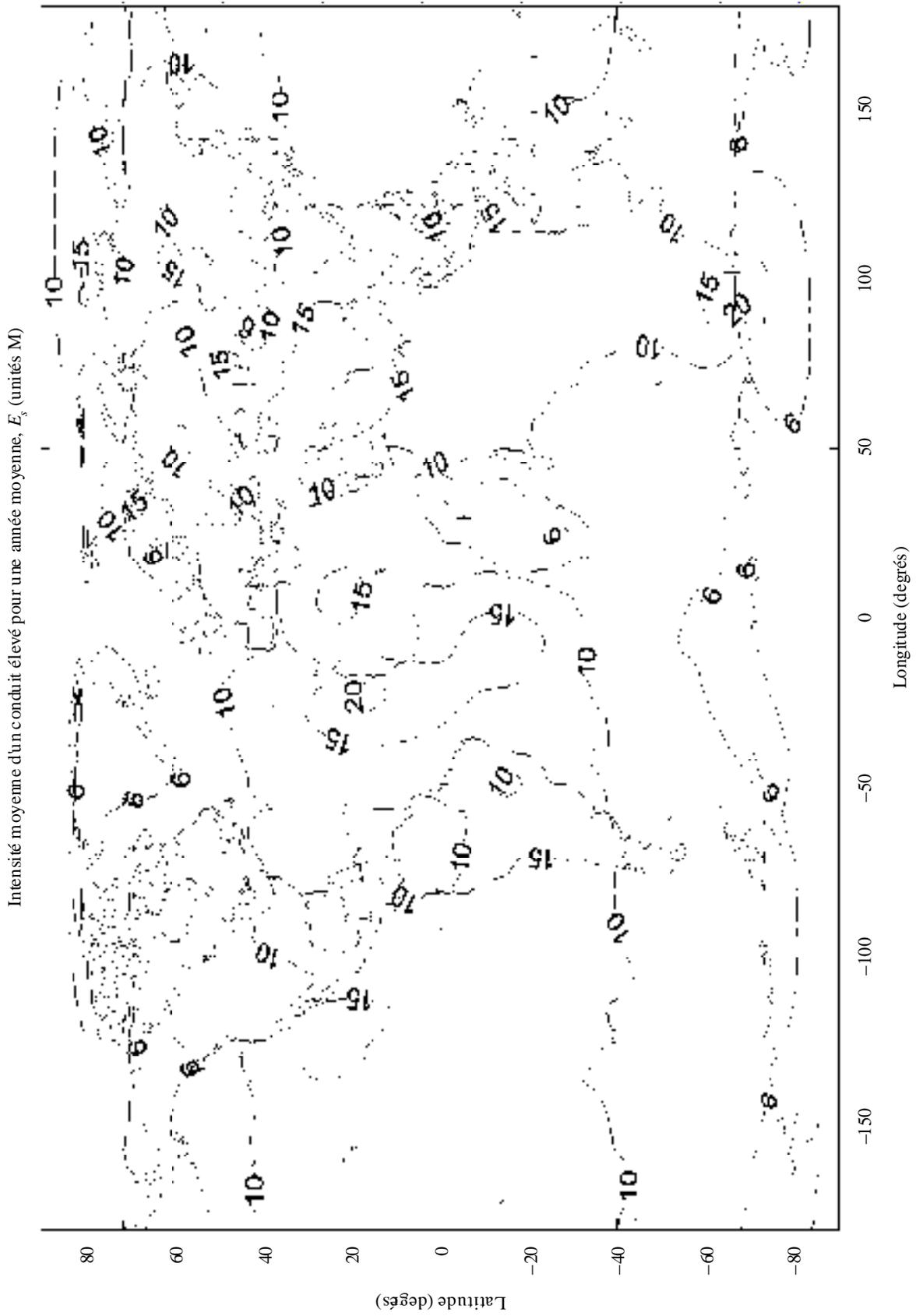
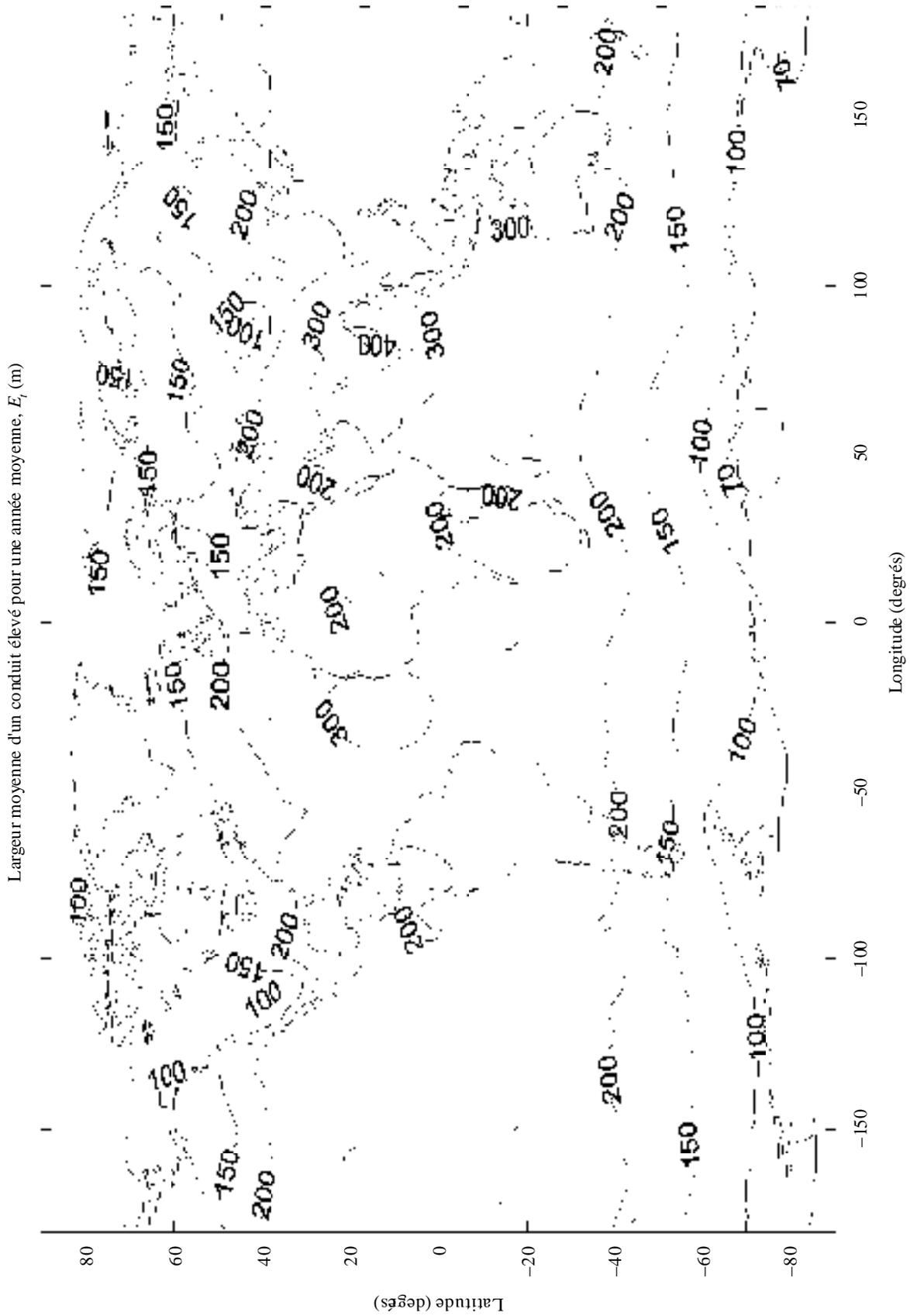


FIGURE 18
Nom du fichier: E_THICKNESS.TXT

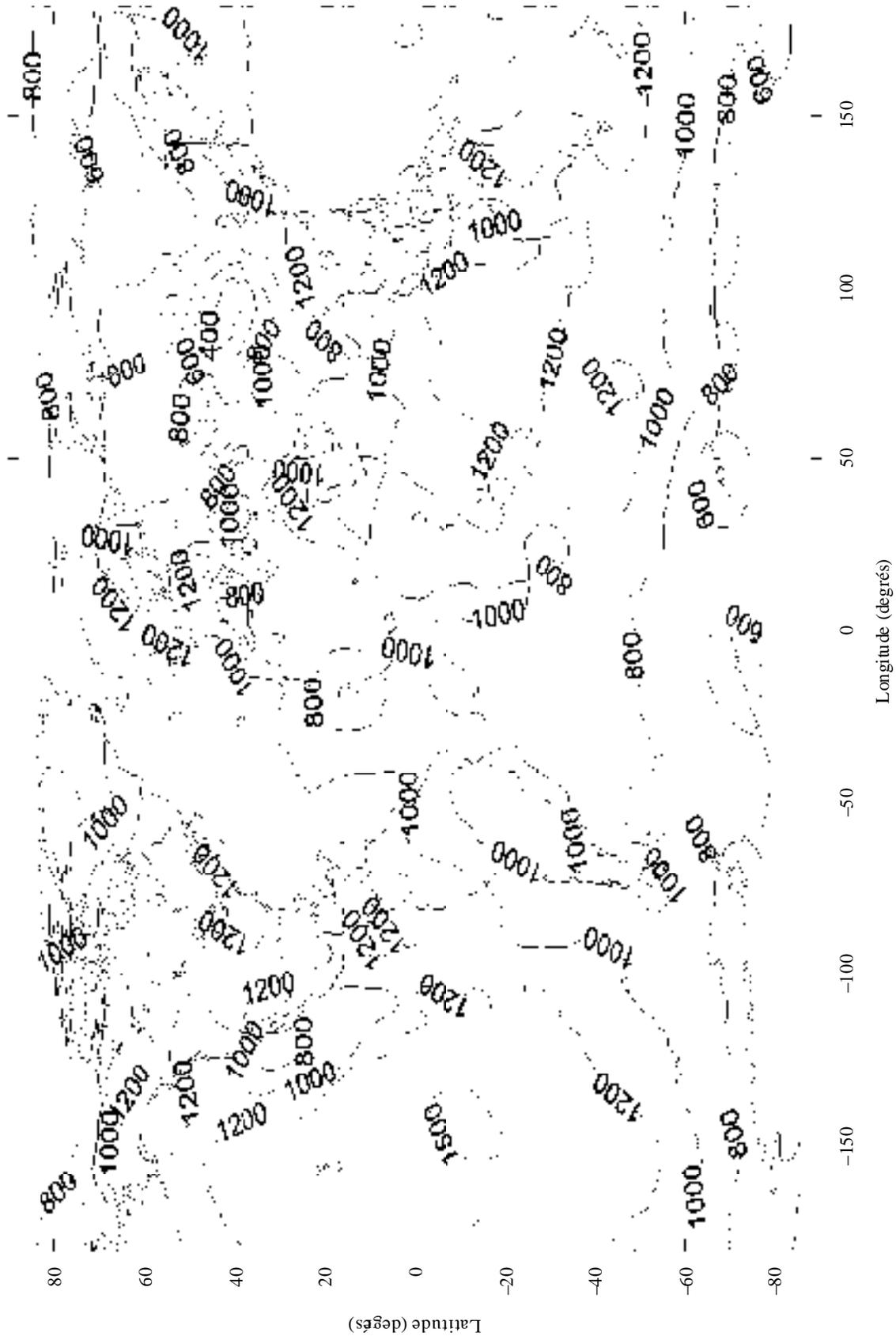


P0453-18

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

