

RECOMMANDATION UIT-R P.1239*

CARACTÉRISTIQUES IONOSPHERIQUES DE RÉFÉRENCE DE L'UIT-R**

(Questions UIT-R 212/3 et UIT-R 223/3)

(1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

a) qu'il est nécessaire de disposer de données ionosphériques de référence à long terme et de méthodes de prévision pour la conception des circuits de radiocommunication, la planification des services et le choix des bandes de fréquences,

recommande

1 d'utiliser les éléments contenus dans l'Annexe 1 pour la prévision des caractéristiques ionosphériques.

ANNEXE 1

Caractéristiques ionosphériques

1 Introduction

La présente Annexe propose des expressions destinées à l'évaluation des valeurs médianes mensuelles de foF2, M(3000)F2, foE, foF1, h'F et h'F,F2, et des valeurs mensuelles de la médiane et des déciles inférieur et supérieur de foEs et fbEs. Elle contient aussi des représentations du pourcentage d'apparition de F-diffus. Ces expressions fournissent des valeurs pour tout emplacement, mois ou heure de la journée, pour différentes époques du cycle solaire. Dans le cas de foE et de foF1, des formules empiriques sont données en fonction de l'angle zénithal du Soleil. Pour les autres caractéristiques ionosphériques, on applique une technique de cartographie numérique fondée sur les fonctions orthogonales de Fourier.

2 Fonctions de représentation cartographique

La forme générale de la fonction numérique $\Omega(\lambda, \theta, T)$ est la série temporelle de Fourier:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = a_0(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H [a_j(\lambda, \theta) \cos jT + b_j(\lambda, \theta) \sin jT] \quad (1)$$

dans laquelle:

Ω : caractéristique ionosphérique à représenter graphiquement

λ : latitude géographique ($-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$)

θ : longitude géographique est ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)
(θ est en degrés est à partir du méridien de Greenwich)

T : temps universel (UTC) exprimé en degrés d'angle ($-180^\circ \leq T \leq 180^\circ$)

H : nombre maximal d'harmoniques utilisés pour représenter la variation diurne.

* La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2000 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

** Des programmes informatiques relatifs aux procédures de prévision et aux données décrites dans la présente Recommandation sont disponibles dans les pages du site web de l'UIT-R traitant de la Commission d'études 3 des radiocommunications.

Les coefficients de Fourier $a_j(\lambda, \theta)$ et $b_j(\lambda, \theta)$ varient avec les coordonnées géographiques et sont représentés par des séries de la forme:

$$a_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta), \quad j = 0, 1, 2, \dots, H \quad (2a)$$

$$b_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta), \quad j = 1, 2, \dots, H \quad (2b)$$

Le choix des fonctions $G_k(\lambda, \theta)$ est déterminé en fixant les entiers k ($k_0, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m; k_m = K$), i étant l'ordre en longitude. Une carte numérique peut donc se représenter plus explicitement par la fonction:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = \sum_{k=0}^K U_{0k} G_k(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H \left[\cos j T \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \sin j T \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right] \quad (3)$$

Dans les équations (2a), (2b) et (3), $U_{2j,k}$ et $U_{2j-1,k}$ peuvent être exprimés sous la forme $U_{s,k}$, où s correspond à $2j$ ou à $2j-1$.

Dans la méthode d'établissement des cartes numériques, on a utilisé l'inclinaison magnétique modifiée:

$$X = \arctg \left(\frac{I}{\sqrt{\cos \lambda}} \right) \quad (4)$$

où I est l'inclinaison magnétique et λ la latitude géographique. X étant fonction à la fois de la latitude et de la longitude géographiques, l'expression formelle de $\Omega(\lambda, \theta, T)$ d'après l'équation (3) reste inchangée. Le Tableau 1 donne les fonctions géographiques $G_k(\lambda, \theta)$.

TABLEAU 1

Fonctions géographiques $G_k(\lambda, \theta)$

(X est fonction de λ et de θ , m est l'ordre maximal en longitude)

$$q_0 = k_0; \quad q_i (i = 1, m) = \frac{k_i - k_{i-1} - 2}{2}$$

k	Var. princ. en fonction de la latitude	k	Premier ordre en longitude	k	Deuxième ordre en longitude	...	k	m -ième ordre en longitude
0	1	$k_0 + 1$	$\cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 1$	$\cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 1$	$\cos^m \lambda \cos m \theta$
1	$\sin X$	$k_0 + 2$	$\cos \lambda \sin \theta$	$k_1 + 2$	$\cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 2$	$\cos^m \lambda \sin m \theta$
2	$\sin^2 X$	$k_0 + 3$	$\sin X \cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 3$	$\sin X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 3$	$\sin X \cos^m \lambda \cos m \theta$
.		$k_0 + 4$	$\sin X \cos \lambda \sin \theta$	$k_1 + 4$	$\sin X \cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 4$	$\sin X \cos^m \lambda \sin m \theta$
.		.		.			.	
.		.		.			.	
.		.		.			.	
k_0	$\sin^{q_0} X$	$k_1 - 1$	$\sin^{q_1} X \cos \lambda \cos \theta$	$k_2 - 1$	$\sin^{q_2} X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_m - 1$	$\sin^{q_m} X \cos^m \lambda \cos m \theta$
		k_1	$\sin^{q_1} X \cos \lambda \sin \theta$	k_2	$\sin^{q_2} X \cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	k_m	$\sin^{q_m} X \cos^m \lambda \sin m \theta$

On utilise un modèle de champ magnétique terrestre pour l'époque 1960, fondé sur une analyse sphérique harmonique d'ordre six, pour déterminer l'inclinaison magnétique modifiée et la gyrofréquence dont on a besoin pour l'évaluation des cartes numériques. On doit utiliser l'époque 1960 plutôt qu'une autre, car c'est l'époque pour laquelle ont été établies les valeurs des coefficients numériques.

L'induction magnétique F_x , F_y et F_z (gauss) respectivement dans les directions géographiques nord et est, et dans la direction verticale descendante, est donnée par les expressions:

$$F_x = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n x_n^m \left[g_n^m \cos m \theta + h_n^m \sin m \theta \right] R^{n+2} \quad (5a)$$

$$F_y = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n y_n^m \left[g_n^m \sin m \theta - h_n^m \cos m \theta \right] R^{n+2} \quad (5b)$$

$$F_z = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n z_n^m \left[g_n^m \cos m \theta + h_n^m \sin m \theta \right] R^{n+2} \quad (5c)$$

où:

$$x_n^m = \frac{d}{d\varphi} (P_{n,m}(\cos \varphi)) \quad (6a)$$

$$y_n^m = m \cdot \frac{P_{n,m}(\cos \varphi)}{\sin \varphi} \quad (6b)$$

$$z_n^m = - (n + 1) P_{n,m}(\cos \varphi) \quad (6c)$$

avec:

φ : colatitude nord ($= 90^\circ - \lambda$), où λ désigne la latitude géographique (degrés) (nord positif, $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$)

$P_{n,m}(\cos \varphi)$: fonction de Legendre associée, définie comme suit:

$$P_{n,m}(\cos \varphi) = \sin^m \varphi \left[\cos^{n-m} \varphi - \frac{(n-m)(n-m-1)}{2(2n-1)} \cos^{n-m-2} \varphi + \frac{(n-m)(n-m-1)(n-m-2)(n-m-3)}{(2)(4)(2n-1)(2n-3)} \cos^{n-m-4} \varphi + \dots \right] \quad (7)$$

$g^{m,n}$ et $h^{m,n}$: coefficients numériques se rapportant au modèle du champ (gauss)

R : facteur de proportionnalité fonction de la hauteur, donné par:

$$R = \frac{6371,2}{6371,2 + h_r} \quad (8)$$

où:

h_r : hauteur à laquelle le champ est évalué (prise égale à 300 km).

Le champ magnétique total, F , a pour expression:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (9)$$

L'inclinaison magnétique, I et la gyrofréquence, f_H (MHz), ont pour expression:

$$I = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (10)$$

et:

$$f_H = 2,8 F \quad (11)$$

3 Prévision de foF2 et de M(3000)F2

Les cartes numériques de la couche F2 sont fondées sur les données de sondages ionosphériques verticaux effectués en un grand nombre de stations au sol réparties dans le monde entier. Les jeux de coefficients numériques définissant les variations diurnes et géographiques des valeurs médianes mensuelles de foF2 et de M(3000)F2 sont fondés sur une relation linéaire avec l'activité solaire. Les coefficients sont les valeurs des $U_{s,k}$ (voir les équations (2) et (3)) qui définissent la fonction $\Omega(\lambda, \theta, T)$ de la carte numérique de la caractéristique donnée pour le mois et le niveau d'activité solaire considérés. Ces coefficients sont disponibles pour chaque mois de l'année, et pour les deux niveaux d'activité solaire $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 100$. R_{12} est la moyenne glissante sur douze mois des nombres mensuels de taches solaires et est utilisé comme indice du niveau de l'activité solaire.

Pour la plupart des applications, il suffit d'admettre que les variations de foF2 et de M(3000)F2 en fonction de R_{12} sont linéaires. Toutefois la relation entre foF2 et R_{12} cesse d'être linéaire pour un niveau d'activité solaire qui est fonction de l'emplacement géographique, de l'heure et de la saison. L'écart le plus sensible par rapport à la linéarité se manifeste pour les valeurs de R_{12} supérieures à 150 environ. Si les valeurs de R_{12} sont supérieures à 150, on peut réduire l'erreur en considérant qu'elles sont égales à 150. La relation entre M(3000)F2 et R_{12} est également linéaire pour les valeurs de l'activité solaire jusqu'à $R_{12} = 150$. Pour des valeurs supérieures de R_{12} , la valeur de M(3000)F2 est celle obtenue pour $R_{12} = 150$.

4 Prévision de foE

La méthode de prévision de la médiane mensuelle de foE est fondée sur toutes les données publiées pour les années 1944-1973 pour 55 stations ionosphériques.

L'expression de foE (MHz) est:

$$(\text{foE})^4 = A B C D \quad (12)$$

où:

A: facteur d'activité solaire:

$$A = 1 + 0,0094 (\Phi - 66) \quad (13)$$

Φ : moyenne mensuelle du flux radioélectrique solaire sur 10,7 cm, exprimé en unités $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.
Pour les besoins des prévisions, on peut utiliser une approximation de Φ fondée sur une estimation de Φ_{12} , valeur moyenne glissante de Φ sur douze mois (voir la Recommandation UIT-R P.371)

B: facteur de variation saisonnière, donné par:

$$B = \cos^m N \quad (14)$$

où:

$$\begin{aligned} N &= \lambda - \delta && \text{pour } |\lambda - \delta| < 80^\circ \\ &= 80^\circ && \text{pour } |\lambda - \delta| \geq 80^\circ \end{aligned}$$

λ : latitude géographique (positive dans l'hémisphère Nord)

δ : déclinaison du Soleil (déclinaison nord positive).

L'exposant m est une fonction de la latitude géographique, λ :

$$m = -1,93 + 1,92 \cos \lambda \quad \text{pour } |\lambda| < 32^\circ \quad (15a)$$

ou:

$$m = 0,11 - 0,49 \cos \lambda \quad \text{pour } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (15b)$$

C: facteur principal de latitude:

$$C = X + Y \cos \lambda \quad (16a)$$

où:

$$X = 23, \quad Y = 116 \quad \text{pour } |\lambda| < 32^\circ \quad (16b)$$

ou:

$$X = 92, \quad Y = 35 \quad \text{pour } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (16c)$$

D : facteur qui tient compte de l'heure du jour:

1^{er} cas: $\chi \leq 73^\circ$

$$D = \cos^p \chi \quad (17a)$$

où χ est la distance zénithale du Soleil (degrés). Pour $|\lambda| \leq 12^\circ$, $p = 1,31$; pour $|\lambda| > 12^\circ$, $p = 1,20$.

2^e cas: $73^\circ < \chi < 90^\circ$

$$D = \cos^p (\chi - \delta\chi) \quad (17b)$$

où:

$$\delta\chi = 6,27 \times 10^{-13} (\chi - 50)^8 \quad \text{degrés} \quad (17c)$$

p étant défini comme dans le 1^{er} cas.

3^e cas: $\chi \geq 90^\circ$

Lorsque χ est égal ou supérieur à 90° , on prend pour valeur de D , pour les heures de nuit, la plus grande des valeurs données par les expressions suivantes:

$$D = (0,072)^p \exp(-1,4 h) \quad (17d)$$

ou:

$$D = (0,072)^p \exp(25,2 - 0,28 \chi) \quad (17e)$$

h étant le nombre d'heures écoulées depuis le coucher du Soleil ($\chi = 90^\circ$). Dans les conditions d'hiver polaire, où le Soleil ne se lève pas, il y a lieu d'utiliser la formule (17e). La valeur de p est la même que dans le 1^{er} cas.

La valeur minimale de foE est donnée par:

$$(\text{foE})_{\text{minimum}}^4 = 0,004 (1 + 0,021 \Phi)^2 \quad (18)$$

où l'on prend, comme approximation de Φ , l'estimation de Φ_{12} .

De nuit, si la valeur de foE calculée selon les formules (12) à (17e) est inférieure à celle que donne la formule (18), c'est cette dernière qu'il faut prendre.

Des tests de précision de cette méthode ont fait apparaître un écart type moyen de 0,11 MHz, pour une base de données correspondant à plus de 80 000 comparaisons horaires pour les 55 stations considérées.

5 Prévision de foF1

Les expressions permettant de prévoir la valeur médiane mensuelle de foF1 sont fondées sur les données enregistrées de 1954 à 1966 en 39 stations ionosphériques situées dans les deux hémisphères.

L'expression de foF1 (MHz) est:

$$\text{foF1} = f_s \cos^n \chi \quad (19)$$

où:

$$\begin{aligned} f_s &= f_{s_0} + 0,01 (f_{s_{100}} - f_{s_0}) R_{12} \\ f_{s_0} &= 4,35 + 0,0058 \lambda - 0,000120 \lambda^2 \\ f_{s_{100}} &= 5,35 + 0,0110 \lambda - 0,000230 \lambda^2 \\ n &= 0,093 + 0,00461 \lambda - 0,0000540 \lambda^2 + 0,00031 R_{12} \end{aligned}$$

où la latitude géomagnétique λ , exprimée en degrés, et considérée comme positive dans les deux hémisphères est donnée par:

$$\lambda = \left| \arcsin [\sin g_0 \cdot \sin g + \cos g_0 \cdot \cos g \cdot \cos (\theta_0 - \theta)] \right|$$

où:

g : latitude géographique de l'emplacement considéré

g_0 : latitude géographique du pôle géomagnétique Nord ($78,3^\circ$ N)

θ : longitude géographique de l'emplacement considéré

θ_0 : longitude géographique du pôle géomagnétique Nord ($69,0^\circ$ O).

La distance zénithale maximale du Soleil pour laquelle la couche F1 est présente (voir aussi les Fig. 1 et 2) est donnée par les expressions suivantes:

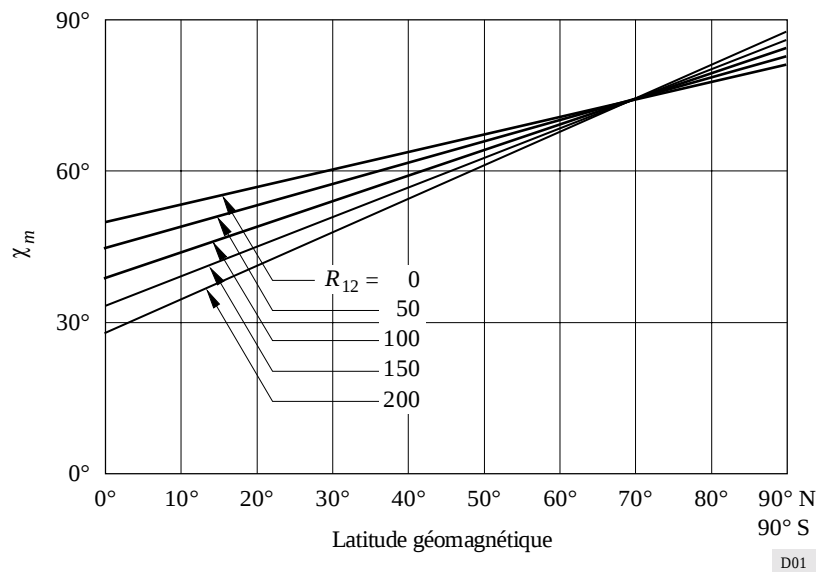
$$\chi_m = \chi_0 + 0,01 (\chi_{100} - \chi_0) R_{12} \quad \text{degrés} \quad (20)$$

avec:

$$\begin{aligned} \chi_0 &= 50,0 + 0,348 \lambda \\ \chi_{100} &= 38,7 + 0,509 \lambda \end{aligned}$$

FIGURE 1

Variation de χ_m en fonction de la latitude géomagnétique et de R_{12}



6 Prévion de foEs et de fbEs

On dispose d'un jeu de coefficients numériques définissant les variations diurnes, géographiques et mensuelles des valeurs médianes et des déciles inférieur et supérieur de foEs pour une année d'activité solaire minimale et une année d'activité solaire maximale, ainsi que d'un jeu de coefficients numériques définissant les variations des valeurs médianes et des déciles inférieur et supérieur de fbEs (fréquence d'occultation de E sporadique), pour une année d'activité solaire minimale.

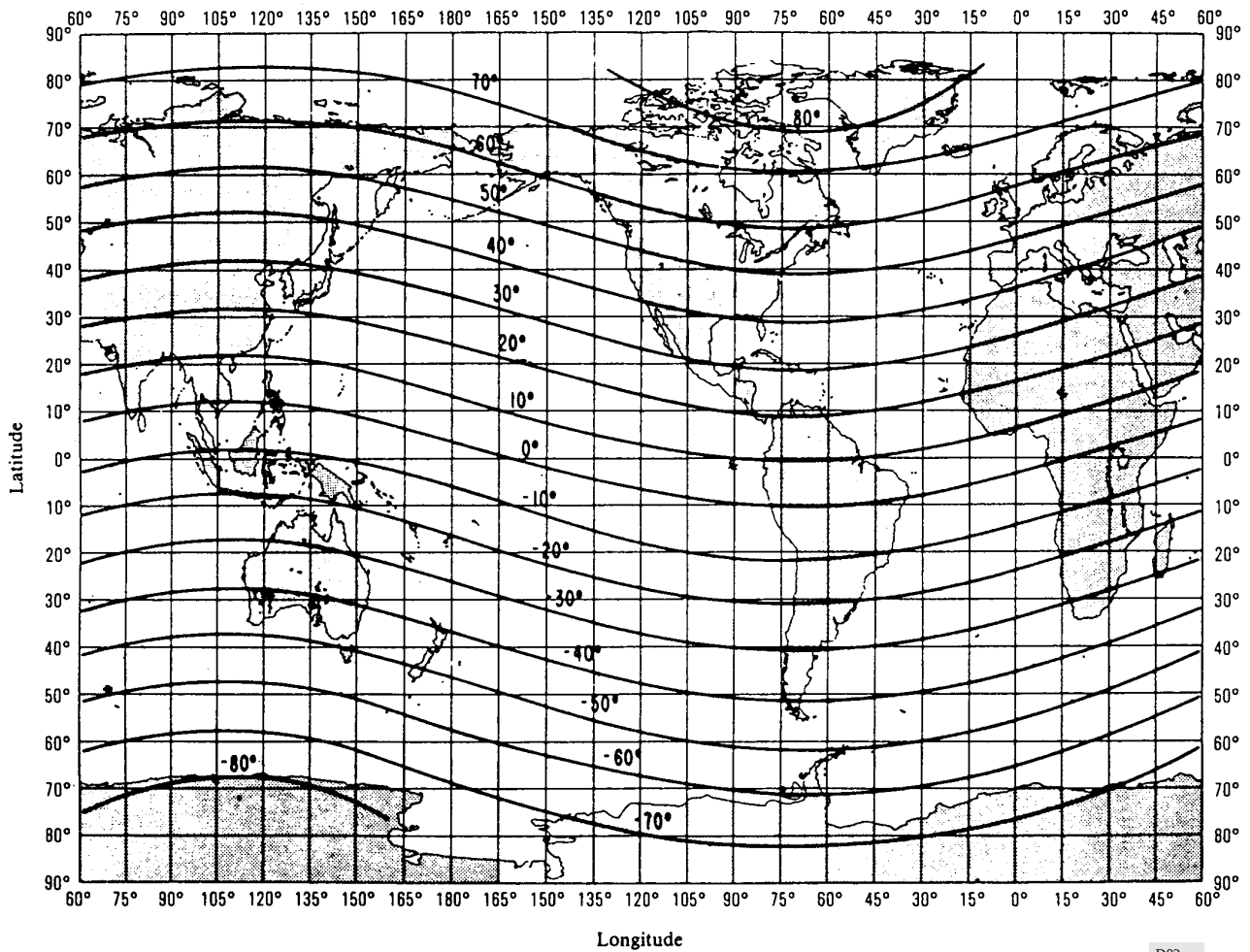
7 Prévion de h'F et de h'F,F2

Des cartes numériques des valeurs médianes mensuelles de h'F ont été établies, sur une base mensuelle, et pour des années d'activité solaire maximale et minimale, h'F étant la hauteur virtuelle minimale observée de réflexions de signaux à incidence verticale en provenance de la région F (généralement, de nuit la couche F2, et de jour la couche F1). De même, des cartes numériques de h'F,F2 ont été établies pour des années d'activité solaire maximale et minimale. h'F,F2 est la hauteur virtuelle minimale observée de réflexions de signaux à incidence verticale en provenance de la couche F la nuit et de la couche F2 le jour.

8 Prévion du pourcentage d'occurrence de F-diffus

Le pourcentage d'occurrence de F-diffus a été déterminé, sur une base mensuelle, à partir de données ionosphériques provenant du réseau mondial d'ionosondes à incidence verticale, pour une année caractéristique d'un niveau élevé de l'activité solaire et pour une année de faible activité solaire. Ces valeurs ont été représentées numériquement au moyen d'une technique de cartographie.

FIGURE 2
Latitudes géomagnétiques



D02-sc

9 Programmes informatiques et données de référence disponibles

Le catalogue de logiciels pour la gestion du spectre des fréquences radioélectriques de l'UIT-BR donne une liste des programmes informatiques et des données de référence disponibles pour l'évaluation à l'aide de micro-ordinateurs, des caractéristiques ionosphériques mentionnées ci-dessus. Le programme WOMAP affiche, pour des emplacements situés dans une région géographique spécifiée, les valeurs des caractéristiques ionosphériques choisies pour un temps universel, un mois et une étape d'activité solaire donnés. Le programme complémentaire HRMNTH affiche les caractéristiques ionosphériques sélectionnées pour un emplacement et une année donnés, en fonction du temps universel, pour chaque mois et pour l'époque d'activité solaire associée.