

RAPPORT 1012-1

**MODÉLISATION, POUR L'EXPLOITATION, DES CONDITIONS DE PROPAGATION DES
ONDES DÉCAMÉTRIQUES AUX LATITUDES ÉLEVÉES**

(Question 27/6)

(1986-1990)

1. Introduction

Les radiocommunications à ondes décimétriques aux latitudes élevées sont un sujet d'étude très délicat et leurs applications pratiques se heurtent encore à des difficultés. Dans l'état actuel de nos connaissances, il est possible de faire des prévisions à long terme pour les radiocommunications à ondes décimétriques, ainsi que des ébauches de spécifications en temps réel de l'ionosphère aux latitudes élevées. Nous sommes capables de faire des prévisions à court terme pour les radiocommunications à ondes décimétriques, dans la mesure où nous pouvons extrapoler dans le temps la morphologie observée. Les propriétés particulières à l'ionosphère aux latitudes élevées affectant les radiocommunications sont exposées dans le Rapport 886. D'autres articles consacrés à l'ionosphère aux latitudes élevées et aux prévisions de ses propriétés ont été publiés dans les Solar-Terrestrial Predictions Proceedings [Donnelly, 1979, 1980] (voir, par exemple, ceux de Besprozvannaya et autres [1979], d'Hunsucker [1979a, b] et de Vondrak [1979]), dans un numéro spécial de Radio Science [Hunsucker et Greenwald, 1983], par Tsunoda [1988] et par Belrose [1988].

2. Modèles d'ionosphère aux latitudes élevées

Pour prévoir la propagation des ondes décimétriques aux latitudes élevées, il faut disposer d'un modèle des distributions spatiale et temporelle de la densité électronique dans l'ionosphère à ces latitudes. Etant donné la structure spatiale très particulière de l'ionosphère dans la région aurorale et la calotte polaire, les prévisions relatives à la propagation peuvent dépendre étroitement de la position des structures et de leurs changements dynamiques.

Parmi les caractéristiques de l'ionosphère aux latitudes élevées qu'il faut modéliser pour les prévisions de propagation des ondes décimétriques, Hunsucker [1979b] cite les suivantes:

- a) emplacement et extension de l'ovale auroral en fonction de l'activité magnétique,
- b) caractéristiques des régions E et F dans l'ovale auroral, dans le creux aux latitudes moyennes, dans le cornet diurne et dans la calotte polaire,
- c) profil de N_e en fonction de la hauteur, entre les régions E et F2 (ce profil est important également pour la prévision de la propagation guidée),
- d) absorption aurorale, absorption dans la calotte polaire (effets intéressant la région D),
- e) irrégularités des régions E et F auxquelles sont dus la propagation diffuse par trajets multiples (F diffus), les évanouissements rapides (papillotement) et la propagation en dehors du grand cercle;

aussi [Buchau et autres, 1985]:

- f) emplacement et importance des "taches" et des arcs alignés en direction du Soleil de la calotte polaire, phénomènes qui génèrent de la scintillation.

Pour les prévisions de la propagation ionosphérique en ondes décimétriques, le profil et les forts gradients de l'ionosphère de haute latitude doivent être représentés dans leurs trois dimensions. Des prévisions de MUF et de LUF mettant en jeu de la triangulation, la définition des modes de propagation et l'emplacement des points de réflexion peuvent présenter un intérêt limité, car de forts gradients horizontaux modifient sérieusement la géométrie du bond et les estimations de l'absorption.

Les possibilités actuelles en matière de prévision de propagation des ondes décimétriques aux latitudes élevées sont de nature statistique; on se sert de données synoptiques dans lesquelles il n'est pas tenu compte de la structure à petite échelle (moins de 100 km) ni des phénomènes transitoires (d'une durée inférieure à 3 h). Cela revient à dire que des phénomènes importants, comme les arcs auroraux et les sous-orages, sont totalement négligés. Certains modèles tiennent compte de la couche E aurorale, de Es aurorale, de l'absorption aurorale et des régions F1 et F2. Les modèles incorporés dans les programmes d'ordinateur pour la prévision de la propagation des ondes décimétriques n'ont, pour la plus grande partie, pas été vérifiés par des données mesurées sur des trajets obliques.

2.1 Modèles dont on dispose pour les prévisions

Hunsucker [1979b] a passé en revue les modèles ionosphériques pour les latitudes élevées dont on dispose pour faire des prévisions. Tsunoda [1987] a fait un bilan des caractéristiques et des processus des irrégularités à grande échelle (>10 km) et à petite échelle (<10 km) de la région F aux latitudes élevées; un modèle descriptif en a été déduit. Il existe plusieurs modèles qui tiennent compte des caractéristiques énumérées plus haut.

On s'est servi des données rassemblées au moyen d'ionosondes au sol ou aéroportées pour mettre au point un modèle amélioré [Elkins et Rush, 1973]. Ultérieurement, ce modèle a encore été modifié en utilisant les données du sondeur à diffusion incohérente [Vondrak et autres, 1977]. Le nouveau modèle emploie, pour foF2 et hmF2, les mêmes valeurs que le modèle polaire antérieur [Elkins et Rush, 1973] et comporte une couche E aurorale (essentiellement équivalente à une couche Es occultante), une vallée dans le profil déterminé à partir des données du sondeur à diffusion et un modèle d'absorption qui dépend de l'activité magnétique.

L'URSS a mis au point des modèles statistiques de la structure de l'ionosphère aux latitudes élevées [Kovalevskaya et Joulina, 1979; Avdiouchine et autres, 1979]. On a constaté des différences entre les prévisions soviétiques et américaines pour l'absorption aurorale et la foF2 dans le creux de latitude moyenne en période d'activité solaire maximale. Pendant les perturbations magnétiques, les soviétiques ont identifié trois régions distinctes d'absorption aurorale, alors que le modèle d'absorption proposé par Vondrak et autres [1977] comporte deux régions d'absorption renforcée en temps et en latitude. Les deux modèles donnent aussi une description différente des gradients de foF2 dans le creux en période d'activité solaire maximale [Miller et Gibbs, 1975].

Foppiano et Bradley [1983] ont mis au point une méthode de prévision de l'intensité de l'absorption aurorale, que le CCIR utilise dans la méthode d'évaluation du champ pour les ondes décimétriques (voir le Supplément au Rapport 252). On a constaté que la distribution statistique quotidienne de l'absorption est log-normale et l'on peut déterminer la probabilité pour qu'un niveau donné soit dépassé si l'on connaît deux paramètres: l'absorption médiane et la probabilité de dépassement du niveau de 1 dB. Foppiano et Bradley [1984] ont étudié les variations statistiques des données d'absorption mesurées avec un riomètre différents jours et à une heure donnée. Une nouvelle relation approximative a été établie entre A_m et Q_1 et la famille de courbes de distribution d'amplitude compatible avec cette relation a été présentée. Les résultats obtenus avec cette relation et ceux obtenus lors de travaux antérieurs ont été comparés. Foppiano et Bradley [1985] ont également pris en compte les variations géographiques, diurnes, saisonnières et celles liées au cycle solaire. Hargreaves et autres [1985] ont suggéré qu'il peut être tenu compte, dans le modèle, des variations du cycle d'activité solaire en utilisant un indice d'activité magnétique (tel que A_p) plutôt que le nombre de taches solaires étant donné que la précipitation aurorale dépend du vent solaire plutôt que directement du nombre de taches. Une méthode de prévision

de l'intensité de l'absorption aurorale a été mise au point par Joulina et autres [1983]. Elle aussi est fondée sur un modèle empirique de distribution de probabilité de l'intensité de l'absorption aurorale déduite d'observations du bruit cosmique radioélectrique effectuées à l'aide de riomètres situés dans la partie eurasienne de l'hémisphère nord. Dans cette méthode, les variations de l'absorption aurorale en fonction de l'espace et du temps sont présentées sous forme de cartes et de tableaux [CCIR, 1982-86a, b]. Une approximation analytique de ces variations de l'absorption aurorale est donnée dans [CCIR, 1982-86c].

Un modèle comportant une classification grossière de $N(h)$ dans la région F pour les diverses structures (creux, ovale, etc.) ainsi que des renseignements plutôt qualitatifs au sujet des effets des régions D et E sur la propagation des ondes décimétriques a été utilisé [Rush et autres, 1982] pour modifier des modèles ionosphériques médians mensuels, pour spécifier les conditions de propagation des ondes décimétriques et pour faire des prévisions.

L'utilisation de modèles théoriques peut aider à mieux comprendre la chaîne des événements qui relie l'activité solaire aux modifications de l'ionosphère aux latitudes élevées et ses effets sur les radiocommunications à ondes décamétriques. Des schémas généraux pour la spécification et la prévision du vent solaire, de la magnétosphère, de la thermosphère, du champ géomagnétique et de l'ionosphère aux latitudes élevées ont été élaborés [Akasofu, 1981, 1982, 1983; Hakamada et Akasofu, 1982; Fuller-Rowell et autres, 1987]. Des modèles théoriques de l'ionosphère aux latitudes élevées permettent de reproduire de façon satisfaisante un grand nombre des caractéristiques observées [Watkins, 1978; Sojka et autres, 1982], telles que le «creux principal», le «trou d'ionisation», la «langue d'ionisation», les «crêtes d'ionisation qui se produisent à l'occasion des aurores» et les «effets UT».

Le modèle descriptif des irrégularités de la région F proposé par Tsunoda [1987] semble harmoniser la plupart des diverses observations effectuées indépendamment les unes des autres aux latitudes élevées.

2.2 Spécification en temps réel

Pour optimiser les performances des systèmes de radiocommunications et des radars à ondes décamétriques, on doit disposer d'une spécification en temps réel des principales caractéristiques aurorales et polaires telles que les arcs, le creux de latitude moyenne et le cornet polaire. Des satellites placés sur une orbite polaire très inclinée peuvent examiner en temps réel les régions polaires et aurorales sur plusieurs longueurs d'ondes optiques. La méthode du tracé des rayons en temps quasi réel permettrait de prévoir des paramètres de la propagation des ondes décamétriques, tels que la disponibilité des modes, la dispersion, les modes multiples et la propagation en dehors du grand cercle.

2.3 Prévision à court terme

Pour améliorer les programmes de prévision actuels, on pourrait utiliser des paramètres du vent solaire (vitesse, densité et champ magnétique interplanétaire) mesurés par des engins spatiaux afin de prévoir les caractéristiques de l'ovale auroral, l'apport total d'énergie de la magnétosphère et la morphologie des systèmes de courants [Vondrak, 1979]. Des satellites à haute altitude, fournissant en temps réel des images mondiales de la réaction de l'ionosphère à l'arrivée de particules provenant de la magnétosphère, faciliteraient grandement la prévision des modifications de détail de la structure, de la dimension et de l'emplacement des régions de l'ionosphère où la densité électronique est renforcée. Un sondeur à diffusion incohérente fournit des renseignements supplémentaires sur l'ionosphère aux latitudes élevées (ovale auroral, cornet et calotte polaire) entre 69 et 81° de latitude magnétique invariante [Kelly, 1983]. A l'intérieur même de la calotte polaire, une ionosonde numérique installée au sol, fournit des mesures continues de la partie inférieure de la couche F [Buchau et autres, 1987].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKASOFU, S.-I. [1981] Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Sci. Rev.*, Vol. 28, 121.
- AKASOFU, S.-I. [1982] Prediction of development of geomagnetic storms by using the solar wind-magnetosphere energy coupling function, *Planet. and Space Sci.*, Vol. 29, 1151.
- AKASOFU, S.-I. [1983] Energy flow and dynamical coupling in the solar wind-magnetosphere-ionosphere system. *Radio Sci.*, Vol. 18, 971-980.
- AVDIOUCHINE, S. I., DANILOV, A. D., MALICHEV, A. B., NOVIKOVA, G. N. et SVIDSKY, P. M. [1979] Forecasting ionospheric and geomagnetic conditions in the forecasting center of IAG. *STPP**, Vol. I, 104.
- BELROSE, J.S. [1988] - HF Communications and remote sensing in the high latitude region. AGARD LS N° 162, Media effects on electronic systems in the high latitude regions. ISBN 92-835-0478-X, pp. 5-1 à 5-42.

* L'abréviation STPP signifie «Solar-Terrestrial Predictions Proceedings», 4 volumes publiés par la «National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)», US Dept. of Commerce, édités par R. F. Donnelly (voir [Donnelly, 1979, 1980]).

- BESPROZVANNAIA, A. S., CHIROTCHOV, A. V. et CHTCHOUKA, T. I. [1979] On the approach to forecasting polar ionospheric conditions. *STPP*, Vol. II, 528.
- Buchau, J., Weber, E.J., Anderson, D.N., Carlson, Jr., H.C., Moore, J.G., Reinisch, B.W. et Livingston, R.C. [1985] Ionospheric Structures in the Polar Cap: Their Origin and Relation to 250-MHz Scintillation. *Radio Science*, Vol. 20, No. 3, 325-338.
- Buchau, J., Reinisch, B.W., Anderson, D.N., Weber, E.J., et Dozois, C. [1987], Polar Cap Plasma Convection Measurements and their Relevance to the Real-Time Modeling of the High Latitude Ionosphere, Proceedings of the Ionospheric Effects Symposium, The Effects of the Ionosphere on Communications, Navigation, and Surveillance Systems. Eds. J.M. Goodman, J.A. Klobuchar, H. Soicher, G. Joiner, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 20402.
- DONNELLY, R. F. Ed. Solar-Terrestrial Predictions Proceedings:
- Vol. I [1979] Prediction Group Reports. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-023-00041-9, Washington, DC 20402.
- Vol. II [1979] Working Group Reports and Reviews. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.
- Vol. III [1980] Solar Activity Predictions. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00473-2, Washington, DC 20402.
- Vol. IV [1980] Predictions of Terrestrial Effects of Solar Activity. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00479-1, Washington, DC 20402.
- ELKINS, T. et RUSH, C. [1973] A statistical predictive model of the polar ionosphere. *An Empirical Model of the Polar Ionosphere*. Ed. T. Elkins. AFCRL-TR-73-0331. Air Force Cambridge Research Laboratories, Hanscom AFB, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.
- FOPPIANO, A. J. et BRADLEY, P. A. [octobre 1983] Préviation de l'absorption aurorale des ondes décimétriques à incidence oblique. *J. des Télécomm.*, Vol. 50, X, 547-560.
- FOPPIANO, A. J. et BRADLEY, P. A. [1984] Day-to-day variability of riometer absorption. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 46, 689-696.
- FOPPIANO, A. J. et BRADLEY, P. A. [1985] Morphology of background auroral absorption. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 47, 663-674.
- Fuller-Rowell, T J, Rees, D, Quegan, S, Bailey, G J et Moffett, R J [1987] Interactions between neutral thermospheric composition and the polar ionosphere using a coupled ionosphere-thermosphere model, *J Geophys Res.*, 92, A7, 7744-7748.
- HAKAMADA, K. et AKASOFU, S. I. [1982] Simulation of three dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms. *Space Sci. Revs.*, Vol. 31, 3.
- Hargreaves, J.K., Reeney, M.T. et Burnes, C.J. [1985] Statistics of Auroral Radio Absorption in Relation to Prediction Models. AGARD-CP-321, 7.3-1 to 7.3-10.
- HUNSUCKER, R. D. [1979a] Morphology and phenomenology of the high latitude E and F regions. *STPP*, Vol. II, 543.
- HUNSUCKER, R. D. [1979b] High latitude E and F region ionosphere predictions. *STPP*, Vol. II, 513.
- HUNSUCKER, R. D. et GREENWALD, R. A. (Guest Eds.) [1983] Including special papers: radio probing of the high-latitude ionosphere and atmosphere: new techniques and new results. *Radio Sci.*, Vol. 18, 6.
- JOULINA, E. M., KISHCHA, P. V., LUKASHKIN, V. M. et SHIROCHKOV, A. V. [1983] Pertes d'énergie supplémentaires sur des liaisons radioélectriques de haute latitude (en russe), 208, Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.
- KELLY, J. D. [1983] Sondrestrom radar - initial results. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 10, 1112-1115.
- KOVALEVSKAYA, E. M. et JOULINA, E. M. [1979] The statistical properties of the disturbed high latitude ionosphere in radio wave propagation computations. *STPP*, Vol. III, D2-16.
- MILLER, D. C. et GIBBS, J. [1975] Ionospheric analysis and modeling. Scientific Report 2, AFCRL-TR-75-0549. Air Force Cambridge Research Laboratories, Hanscom AFB, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.
- RUSH, C. M., ROSICH, R. K., BROOKS, C. B., LEISE, D. L. et POKEMPNER, M. [1982] A simplified model of the high latitude ionosphere for telecommunications purposes. NTIA Report 82-94. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- SOJKA, J. J., SCHUNK, R. W. et RAITT, W. J. [1982] Seasonal variations of the high latitude F region for strong convection. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 187.
- Tsunoda, R.T. [1988] High-Latitude F-Region Irregularities: A Review and Synthesis. *Review of Geophysics*, 26, 719-760.

VONDRAK, R. R. [1979] Ionospheric predictions, magnetosphere-ionosphere interactions. *STPP*, Vol. II, 476.

VONDRAK, R., SMITH, G., HATFIELD, V., TSUNODA, R., FRANK, V. et PERREAULT, P. [1977] Chatanika model of the high-latitude ionosphere for application to HF propagation prediction. RADC-TR-78-7. Rome Air Development Center, Hanscom AFB, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.

WATKINS, B. [1978] A numerical computer investigation of the polar F region ionosphere. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 26, 559.

Documents du CCIR

[1982-86]: a. 6/48 (URSS); b. 6/49 (URSS); c. 6/194 (URSS).

RAPPORT 894-2

METHODE DU CCIR POUR LA PREVISION DE LA PROPAGATION
DES ONDES DECAMETRIQUES

Troisième méthode informatique du CCIR pour l'évaluation de la MUF,
du champ de l'onde ionosphérique, du rapport signal/bruit, de la LUF
et de la fiabilité de référence de circuit

(Programme d'études 30A/6)

(1982-1986-1990)

SOMMAIRE

1. Introduction
2. Géométrie du trajet
3. Fréquences maximales utilisables de référence et d'exploitation
 - 3.1 MUF de référence
 - 3.2 Prévision de foE
 - 3.3 Prévision de la MUF de référence pour la couche E
 - 3.4 Fréquence d'occultation par la couche E (f_s)
 - 3.5 Données relatives à la couche F2
 - 3.6 Prévision de la MUF de référence pour la couche F2
 - 3.6.1 Pour des trajets de longueur inférieure à 4 000 km
 - 3.6.2 Pour des trajets de longueur supérieure à 4 000 km
 - 3.7 MUF d'exploitation de la liaison
4. Angle de site
5. Prévision du champ médian de l'onde ionosphérique
 - 5.1 Méthode pour des trajets de longueur comprise entre 0 et 7 000 km
 - 5.2 Méthode pour des trajets de longueur supérieure à 9 000 km