

RAPPORT 262-7

**PROPAGATION DES ONDES KILOMÉTRIQUES, MYRIAMÉTRIQUES
ET PLUS LONGUES DANS ET A TRAVERS L'IONOSPHERE**

(Question 25/6)

(1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introduction

Les fréquences radioélectriques émises dans la gamme de 30 Hz à 300 kHz, qui ont comme particularité d'être réfléchies par les couches les plus basses de l'ionosphère, sont utiles pour toutes sortes d'applications en plus des radiocommunications. En particulier, la stabilité de la propagation des ondes myriamétriques (TBF) (3-30 kHz) est une propriété qui rend ces ondes très utiles pour les systèmes de radionavigation et pour la synchronisation des bases de temps. (Pour les trajets de Terre, on trouve dans le Rapport 895 une étude des caractéristiques de propagation des fréquences inférieures à 30 kHz environ, le Rapport 265 contient des renseignements sur les performances des circuits aux fréquences comprises entre 30 et 500 kHz.) On sait cependant depuis de nombreuses années que les ondes de très basses fréquences peuvent se propager à travers l'ionosphère suivant le «mode sifflement». Des signaux dus aux éclairs furent reçus dans le spectre acoustique et furent appelés «atmosphériques musicaux» [Eckersley, 1925; Barkhausen, 1919]. Au cours de la propagation, ces ondes étaient soumises à la dispersion de telle sorte que leur vitesse décroissait avec la fréquence. Aussi, le signal reçu se présentait-il comme un sifflement de fréquence décroissante en un temps de l'ordre de la seconde ou plus, pouvant être suivi de séries d'échos de dispersion croissantes. Ces caractéristiques furent théoriquement expliquées par la propagation à faible vitesse de l'onde extraordinaire peu atténuée le long d'une trajectoire étroitement confinée autour d'une ligne de force du champ magnétique terrestre. Les échos étaient dus à la réception de signaux se propageant entre points magnétiquement conjugués et se réfléchissant sur le sol [Storey, 1953; Morgan et autres, 1956; Helliwell et Morgan, 1959]. Une bonne revue historique de ces recherches a été publiée [Helliwell, 1965].

La propagation suivant le mode sifflement peut être due à un guidage par des irrégularités d'ionisation alignées le long des lignes de force [Smith, 1961; Cerisier, 1974] ou à un mode non guidé lorsque la normale aux ondes fait un angle notable avec la direction du champ magnétique [Kimura, 1966; Smith et Angerami, 1968; Aikyo et autres, 1972]. Les résultats du tracé de rayons des ondes myriamétriques dans des modèles de magnétosphère [Aikyo et Ondoh, 1971; Walter et Scarabucci, 1974] ont suggéré un piégeage des ondes par le gradient de densité de la plasmapause et un piégeage des ondes non guidées dans la plasmasphère ou à l'extérieur, comme cela a été observé par des satellites [Burtis et Helliwell, 1969; McPherson et Koons, 1970; Gurnett et Shaw, 1973]. La largeur du conduit de propagation des sifflements dans la plasmasphère augmente avec la latitude géomagnétique corrigée [Ondoh, 1976].

2. Utilisation d'émetteurs en ondes myriamétriques et kilométriques

La propagation suivant le mode sifflement a été étudiée en utilisant des émetteurs de grande puissance en ondes myriamétriques (TBF) et kilométriques. Un intérêt croissant s'est manifesté au sujet des problèmes de transmission de fréquences diverses dans ou au-dessus de l'ionosphère et entre des points à la surface de la Terre. Aussi est-il maintenant préférable de parler de propagation d'ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues en général, et de réserver le terme sifflement aux transmissions couvrant tout un spectre de fréquence, comme lorsque l'origine est l'éclair, et pour lequel on peut observer la dispersion des fréquences en fonction du temps.

Il est intéressant de noter que les périodes au cours desquelles des signaux TBF relativement forts ont été reçus entre points conjugués ne sont que faiblement corrélées à celles où l'occurrence des sifflements est grande. Aussi, bien que les mesures utilisant les sources naturelles soient d'un grand intérêt pour débrouiller certaines des complexités de la propagation des ondes TBF à travers l'ionosphère, elles doivent être complétées par des expériences directement liées à la propagation d'ondes de fréquences données émises par des émetteurs choisis.

3. Remarques sur les fréquences limites et l'intensité des signaux

Quand les extrémités de la trajectoire sont à la surface de la Terre, on a trouvé que le mode sifflement est effectif pour des fréquences aussi basses que 400 Hz et aussi hautes que 35 kHz. Il existe une très nette fréquence de coupure dont la valeur approximative est de 0,6 fois la gyrofréquence électronique minimale le long du trajet. Des récepteurs, portés par des satellites, ont permis d'étendre les observations aux signaux non guidés et mis le mode sifflement en évidence jusqu'à 0,9 fois la gyrofréquence électronique locale [Dunckel et Helliwell, 1977]. La propagation suivant le mode sifflement a été observée en de nombreux endroits entre les latitudes géomagnétiques de 20° et 80° et même, pendant les nuits d'hiver, à Okinawa et Varanasi où la latitude géomagnétique ne dépasse pas 15° [Ondoh et autres, 1979; Singh et Singh, 1977]. Des observations à moyennes latitudes montrent que, la nuit, des signaux effectuant un seul parcours entre points conjugués selon le mode sifflement peuvent être reçus plus de la moitié du temps et, qu'occasionnellement, leur intensité s'approche à moins de 10 dB de la valeur conventionnelle du signal guidé entre la Terre et l'ionosphère. De jour, l'intensité des signaux se propageant suivant ce mode est mal connue, mais il semble qu'ils soient très atténués par la région D de l'ionosphère.

Des facteurs importants interviennent dans le calcul de l'intensité. Ce sont par exemple:

- la polarisation et la directivité de l'antenne d'émission;
- les caractéristiques de la trajectoire entre les extrémités du guide dans l'ionosphère et les points conjugués au sol;
- le coefficient de transmission relatif à la propagation à travers les plus basses régions de l'ionosphère;
- la divergence spatiale à l'intérieur du guide;
- la multiplicité des trajectoires due à la présence de plusieurs guides;
- l'amplification ou l'absorption de l'énergie du signal par des interactions avec les particules chargées du plasma.

4. Analyse de la propagation

Un programme «full-wave» a été élaboré pour étudier par ordinateur les champs dans une ionosphère stratifiée horizontalement, les ondes incidentes arrivant d'en haut ou d'en bas, en fonction d'un vaste échantillonnage de paramètres [Pitteway, 1965; Pitteway et Jespersen, 1966]. Dans quelques uns des modèles étudiés, les effets des couches E sporadique ont été inclus. Pour des ondes arrivant d'en haut, cette ionisation E sporadique peut donner de très grands coefficients de réflexion interne. Ceci n'est important que lorsque l'extrémité la plus éloignée de la ligne de force constituant le guide est éclairée parce qu'alors la propagation aller et retour selon le mode sifflement est possible. Il a été montré qu'une grande partie de l'énergie des sifflements peut être réfléchiée en l'absence de E sporadique pourvu que la direction de la normale à l'onde soit à l'extérieur du cône de transmission [Thomas et Smeathers, 1971]. Ceci est important pour interpréter les mesures de sifflements faites à l'aide de fusées.

Aux environs de 14 kHz, le coefficient de transmission relatif aux ondes ascendantes ne varie que lentement quand l'angle d'incidence est compris entre $\pm 85^\circ$ aux moyennes latitudes, tandis qu'à 100 kHz, une transmission efficace n'est possible que si la normale à l'onde est à l'intérieur d'un cône dont l'axe est dirigé suivant le champ magnétique; cette influence du champ magnétique est plus marquée pour toutes les fréquences aux latitudes plus basses [Thomas et Horowitz, 1971]. Tant le jour que la nuit, le coefficient de transmission est principalement déterminé par les pertes dans l'ionosphère pourvu qu'il n'existe pas de gradient exagéré de densité électronique comme on en rencontre dans E sporadique. L'absorption des ondes se propageant suivant le mode sifflement se produit principalement dans les couches inférieures de l'ionosphère et augmente avec la fréquence et avec une diminution de la latitude [Thomas et Horowitz, 1971; Wieder, 1967].

Dans la zone aurorale, l'absorption est considérablement influencée par les précipitations de particules, soit plusieurs dizaines de dB au moment des blackouts polaires, 10 à 20 dB à midi quand le soleil est au-dessus de l'horizon ou la nuit quand il existe une aurore; elle n'est que de quelques dB pendant une nuit d'hiver quand l'ionosphère n'est pas perturbée [Ondoh, 1963; Harang, 1968].

Aux fréquences les plus basses, Galejs [1972] et Pappert [1973] ont trouvé excessifs les moments dipolaires des aériens d'émission portés par un satellite, moments nécessaires pour exciter le guide terrestre de propagation. De Witt et autres [1976] ont calculé les caractéristiques de propagation d'ondes myriamétriques et plus longues à travers l'ionosphère depuis une source située dans la magnétosphère. Les relations établies donnent le rapport de la puissance transmise dans la surface terrestre à celle incidente au sommet de l'ionosphère en fonction du nombre de bonds dans le guide Terre-ionosphère. La polarisation de l'onde a été calculée en fonction de ce nombre de bonds. De plus, pour établir le bilan énergétique du signal émis par une source magnétosphérique d'ondes myriamétriques ou plus longues, il a été nécessaire de tenir compte du facteur de dispersion géométrique de ces ondes qui se propagent depuis la source jusqu'à un récepteur situé à la surface de la Terre [Kelly et autres, 1976a]. Pour tous les émetteurs situés à des altitudes inférieures à 2200 km environ, l'amplitude du facteur de dispersion décroît rapidement à mesure que la distance augmente entre le récepteur et la zone où la puissance reçue sur le sol est maximum. On a montré que ce facteur était plus petit et moins sensible à la position du récepteur si l'émetteur

était immobile à une altitude plus grande. On a calculé en plusieurs cas [Kelly et autres, 1976b] la puissance installée sur le satellite suffisante pour obtenir un rapport signal sur bruit supérieur à 0 dB dans une bande de fréquence large de 1 Hz à une distance au sol de 1000 km mesurée à partir du point d'émergence des ondes hors de l'ionosphère. La puissance nécessaire, de l'ordre du mégawatt, est supérieure à celle qui est disponible à bord des engins spatiaux utilisés pour les missions courantes, mais elle est du domaine réalisable pour les futures centrales électriques spatiales.

5. Observations par satellites

L'étude de la propagation des ondes myriamétriques (TBF) dans et à travers l'ionosphère a considérablement bénéficié de l'usage des satellites. Pour un émetteur situé dans l'ionosphère on doit tenir compte de l'effet d'un milieu fortement anisotrope sur les caractéristiques d'antenne, donc sur l'affaiblissement de transmission. Des observations par satellites de phénomènes TBF dans la magnétosphère ont été publiées [Rycroft, 1967].

Des séries intéressantes d'essais ont eu comme cadre le programme satellite Lofti. Lofti-I a montré que de l'énergie TBF en quantité notable peut pénétrer dans l'ionosphère et que, plus particulièrement, des signaux émis du sol sur 18 kHz y étaient reçus à 16 000 km de distance; l'atténuation, comme attendu, était notablement plus faible la nuit que le jour. Les retards observés allaient de 10 à 200 ms, ce qui montre que la vitesse de propagation des ondes TBF dans l'ionosphère est beaucoup plus faible que dans le vide [Leiphart et autres, 1962]. Avec Lofti-II, les mesures portèrent sur l'intensité des signaux reçus et aussi sur l'impédance d'un dipôle situé dans l'ionosphère; la valeur trouvée, différant totalement de celle relative au vide, est en accord avec la théorie.

Un récepteur, muni d'un dipôle électrique et couvrant la bande 0,4-10 kHz, était placé à bord d'Alouette-1; les signaux reçus étaient intenses. Des sifflements courts fractionnaires, propagés depuis l'éclair en un seul bond à travers l'ionosphère, saturaient souvent le récepteur. Des signaux, qui n'ont pas encore été étudiés, provenaient d'émetteurs situés au sol de grande ou de faible (100 watts) puissance sur 10 kHz. Des sifflements longs fractionnaires, vraisemblablement propagés depuis l'hémisphère opposé le long d'une ligne de force, furent souvent observés avec une dispersion constante pendant un enregistrement d'une dizaine de minutes. On peut penser qu'au cours de cette période, le guidage était particulièrement actif pour conduire les sifflements qui, après être sortis du guide, parcouraient transversalement plusieurs milliers de kilomètres pour atteindre le récepteur. La propagation horizontale des sifflements courts fractionnaires peut amener ces signaux à se réfléchir à l'altitude du satellite [Barrington et Belrose, 1963; Carpenter et autres, 1964; Smith, 1964].

Cependant, la réception simultanée de sifflements au sol et en satellite [Thomson et Dowden, 1977a] montre que la plupart des sifflements ne parviennent aux satellites qu'après réflexion au niveau de la base de l'ionosphère. Comme les sifflements se propageant vers le bas sortent généralement des guides à des altitudes bien supérieures à 1000 km [Thomson et Dowden, 1977b], les sifflements provenant d'un guide donné peuvent être reçus par les satellites sur une grande distance le long de la trajectoire de ces derniers (jusqu'à 2000 km pour ISIS-2 à une altitude de 1400 km). Des domaines de réception encore plus grands, sans que changent les caractéristiques de dispersion, se rencontrent pour des sifflements non guidés «pro-longitudinaux» [Thomson et Dowden, 1977c]. La propagation transverse n'entre pas en ligne de compte dans ces deux cas qui sont dus à une déviation, de l'ordre de 20°, par rapport à une propagation strictement guidée par le champ magnétique.

Alors que, théoriquement, on s'attendrait à ce que la propagation des ondes de fréquence extrêmement basse soit fortement influencée par la présence d'ions, leurs effets n'ont pas été directement observés avant que ne débutent ces mesures en satellites. L'importance des ions est illustrée par la découverte des sifflements ioniques [Smith et autres, 1964; Barrington et autres, 1966a et b] qui ont été utilisés pour mesurer la masse ionique moyenne des composants du milieu à l'altitude du satellite [Gurnett et autres, 1965; Barrington et McEwen, 1967]. De plus, une résonance TBF de plasma, la résonance hybride basse propre à la propagation transverse, a été identifiée parmi les données d'Alouette comme une fréquence de coupure du bruit TBF [Brice et autres, 1964]. C'est là une autre source d'information sur la masse ionique moyenne à l'altitude du satellite [Barrington et autres, 1965]. Des observations du satellite ISIS ont mis en évidence des variations de la probabilité d'apparition de sifflements protoniques et deutéroniques transéquatoriaux en fonction du cycle d'activité solaire [Watanabe et Ondoh, 1984].

6. Conclusions

L'étude de la propagation des ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues dans et à travers l'ionosphère a débuté avec les observations au sol des sifflements dont les caractéristiques sont principalement dues à leur long parcours dans la magnétosphère. Les observations faites en satellite ont fait progresser très sérieusement nos connaissances sur la propagation à l'intérieur de l'ionosphère; elles ont révélé l'importance, aux fréquences les plus basses, de la propagation transverse à la direction du champ magnétique terrestre et du rôle des ions. Comme il fallait s'y attendre, l'ionosphère influence fortement la propagation des ondes kilométriques, myriamétriques et plus longues qui peuvent la pénétrer par le mode sifflement. Ce mode de propagation, qui peut être utilisé de la Terre vers l'espace et vice-versa, est caractérisé par des retards de groupe importants, des atténuations éminemment variables, des trajectoires de parcours indirectes et aussi par une interaction compliquée entre les ondes propagées et les particules énergétiques présentes dans l'ionosphère. En liaison avec cette dernière remarque, il a été proposé d'installer dans les satellites des émetteurs d'ondes myriamétriques et kilométriques très puissants. Il y a là un risque de créer du bruit radioélectrique et des brouillages importants qui ont cependant des chances d'être limités par la difficulté même de fournir de grandes puissances à des émetteurs embarqués.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AIKYO, K. et ONDOH, T. [1971] Propagation of non-ducted VLF waves in the vicinity of the plasmopause, *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **18**, 153-182.
- AIKYO, K., ONDOH, T. et NAGAYAMA, M. [1972] Non-ducted whistlers observed in the plasmasphere, *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **19**, 151-174.
- BARKHAUSEN, H. [1919] Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen (Deux phénomènes découverts grâce à l'emploi de nouveaux amplificateurs), *Phys. Z.*, **20**, 401-403.
- BARRINGTON, R. E. et BELROSE, J. S. [1963] Preliminary results from the very low frequency receiver aboard Canada's Alouette satellite. *Nature*, Vol. 198, **4887**, 651-656.
- BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. et NELMS, G. L. [1965] Ion composition and temperature at 1000 km as deduced from simultaneous observations of a VHF plasma resonance and topside sounding data from the Alouette I satellite. *J. Geophys. Res.*, **70**, 1647-1664.
- BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. et MATHER, W. E. [1966a] A helium whistler observed in Canadian satellite Alouette II. *Nature*, Vol. 210, 80-81.
- BARRINGTON, R. E., BELROSE, J. S. et NELMS, G. L. [1966b] Ion composition and temperature at 1000 km as deduced from VLF plasma resonances and topside ionograms. *Electron density distributions in the ionosphere and exosphere*, edited by J. Frihagen, North-Holland. Publ. Co., Amsterdam, Pays-Bas.
- BARRINGTON, R. E. et McEWEN, D. J. [1967] Ion composition from VLF phenomena observed by Alouette I and II. *Space Res.* **VII**, 624-633.
- BRICE, N. M., SMITH, R. L., BELROSE, J. S. et BARRINGTON, R. E. [1964] Recordings from satellite Alouette I – a very low frequency plasma resonance. *Nature*, Vol. 203, **4948**, 926-927.
- BURTIS, W. J. et HELLIWELL, R. A. [1969] Banded chorus – A new type of VLF radiation observed in the magnetosphere by OGO 1 and OGO 3, *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 3002-3010.
- CARPENTER, D. L., DUNCKEL, N. et WALKUP, J. F. [1964] A new very low frequency phenomenon – whistlers trapped below the protonosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, **23**, 5009-5017.
- CERISIER, J. C. [1974] Ducted and partly ducted propagation of VLF waves through the magnetosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **36**, 1443-1467.
- DE WITT, R. N., KELLY, F. J. et CHAYT, G. A. [1976] Lower ionospheric effects on the propagation of waves from an ELF/VLF source in the magnetosphere. *Radio Sci.*, **11**, 189-197.
- DUNCKEL, N. et HELLIWELL, R. A. [1977] Spacecraft observations of man-made whistler-mode signals near the electron gyrofrequency. *Radio Sci.*, Vol. 12, **5**, 821-829.
- ECKERSLEY, T. L. [1925] A note on musical atmospheric disturbances. *Phil Mag.*, **49**, 1250-1260.
- GALEJS, J. [1972] Stable solutions of ionospheric fields in the propagation of ELF and VLF waves. *Radio Sci.*, **7**, 549-561.
- GURNETT, D. A. et SHAW, R. R. [1973] Electromagnetic radiation trapped in the magnetosphere above the plasma frequency, *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, **34**, 8136-8149.
- GURNETT, D. A., SHAWAN, S. D., SMITH, R. L. et BRICE, N. M. [1965] Ion cyclotron whistlers. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 1665-1688.
- HARANG, L. [1968] VLF emissions observed at stations close to the auroral zone and at stations on lower latitudes, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **30**, 1143-1160.
- HELLIWELL, R. A. [1965] *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*. Stanford University Press, Stanford, CA, Etats-Unis d'Amérique.
- HELLIWELL, R. A. et MORGAN, M. G. [1959] Atmospheric whistlers, *Proc. IRE*, **47**, 200-208.
- KELLY, F. J., BAKER, D. J. et CHAYT, G. A. [1976a] Spreading of waves emitted from an ELF/VLF source in the magnetosphere. *Radio Sci.*, **11**, 93-106.
- KELLY, F. J., CHAYT, G. A. et BAKER, D. J. [1976b] Waveguide-mode power budget for an ELF/VLF transmitting satellite. Naval Research Laboratory Report No. 8032 (Accession N° AD A002287), National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- KIMURA, I. [1966] Effect of ions on whistler-mode ray tracing, *Radio Sci.*, **1**, 269-283.
- LEIPHART, J. P., ZEEK, R. W., BEARCE, L. S. et TOTH, E. [1962] Penetration of the ionosphere by very low frequency radio signals. Interim results of the LOFTI I experiment. *Proc. IRE*, **50**, 6-17.
- McPHERSON, D. A. et KOONS, H. C. [1970] Dependence of ELF emissions on the location of the plasmopause, *J. Geophys. Res.*, **75**, 5559-5564.
- MORGAN, M. G., DINGER, H. E. et ALLCOCK, G. McK. [1956] Observations of whistling atmospherics at geo-magnetically conjugate points. *Nature*, Vol. 177, 29-31.
- ONDOH, T. [1963] The ionospheric absorption of the VLF emissions at the auroral zone, *J. Geomag. Geoelect.*, **15**, 90-108.
- ONDOH, T. [1976] Magnetospheric whistler ducts observed by ISIS satellites. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), **23**, 139-147.
- ONDOH, T., KOTAKI, M., MURAKAMI, T., WATANABE, S. et NAKAMURA, Y. [1979] Propagation characteristics of low-latitude whistlers. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2097-2104.

- PAPPERT, R. A. [1973] Excitation of the earth-ionosphere waveguide by point dipoles at satellite heights. *Radio Sci.*, **8**, 535-545.
- PITTEWAY, M. L. V. [1965] The numerical calculation of wave fields, reflection coefficients and polarizations for long waves in the lower ionosphere. Part I, *Phil. Trans. Roy. Soc., Series A*, **257**, 219-242.
- PITTEWAY, M. L. V. et JESPERSON, J. L. [1966] A numerical study of the excitation, internal reflection and limiting polarization of whistler waves in the lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **28**, 17-43.
- RYCROFT, M. J. [1967] A review of satellite observations of VLF phenomena in the magnetosphere, in MF, LF and VLF propagation. IEE Conf. Publ., **36**, 267-294.
- SINGH, R. N. et SINGH, R. P. [1977] Whistlers recorded at Varanasi. *Nature*, Vol. 266, 40-41.
- SMITH, R. L. [1961] Propagation characteristics of whistlers trapped in field-aligned columns of enhanced ionization, *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 3699-3716.
- SMITH, R. L. [1964] An explanation of sub-protonospheric whistlers. *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, **23**, 5019-5021.
- SMITH, R. L. et ANGERAMI, J. J. [1968] Magnetospheric properties deduced from OGO 1 observations of ducted and non-ducted whistlers, *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 1-20.
- SMITH, R. L., BRICE, N. M., KATSUFRAKIS, J., GURNETT, D. A., SHAWAN, S. D., BELROSE, J. S. et BARRINGTON, R. E. [1964] An ion gyrofrequency phenomenon observed in satellites. *Nature*, Vol. 204, 274-275.
- STOREY, L. R. O. [1953] An investigation of whistling atmospheric. *Phil. Trans. Roy. Soc., Series A*, **246**, 113-141.
- THOMAS, L. et HOROWITZ, S. [1971] The ionospheric absorption of downgoing whistler waves during night-time. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 879-888.
- THOMAS, L. et SMEATHERS, J. R. [1971] The internal reflection of whistler waves in the lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 959-962.
- THOMSON, R. J. et DOWDEN, R. L. [1977a] Simultaneous ground and satellite reception of whistlers: 1. Ducted whistlers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 869-878.
- THOMSON, R. J. et DOWDEN, R. L. [1977b] Ionospheric propagation of whistlers. *Planet. and Space Sci.*, **25**, 1037-1043.
- THOMSON, R. J. et DOWDEN, R. L. [1977c] Simultaneous ground and satellite reception of whistlers: 2. PL whistlers. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 879-890.
- WALTER, F. et SCARABUCCI, R. R. [1974] VLF ray trajectories in a latitude-dependent model of the magnetosphere, *Radio Sci.*, **9**, 7-15.
- WATANABA, S et ONDOH, T [1984] Solar activity dependence of trans-equatorial ion whistler. *Planet. Space Sci.*, **32**, 955-964.
- WIEDER, B. [1967] Transmission of VLF radio waves through the ionosphere. *Radio Sci.*, **2**, 595-605.