

RAPPORT 249-7

UTILISATION DES SONDAGES SOUS INCIDENCE OBLIQUE A DES
FINS D'ANALYSE ET D'OPTIMISATION DES CONDITIONS DE PROPAGATION

(Programme d'études 27B/6)

(1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introduction

Le présent Rapport traite de l'utilisation de sondages sous incidence oblique pour l'analyse des conditions de propagation sur un circuit fixe point à point et pour la sélection en temps réel de la fréquence optimale de travail (FOT). L'évaluation d'un circuit à ondes décamétriques est plus facile si l'on connaît les modes de propagation, ainsi que le temps de propagation et le déplacement Doppler sur chaque mode, en fonction de la fréquence. Les applications des techniques décrites dans le présent Rapport pour l'évaluation d'un circuit en temps réel sont décrites dans le Rapport 889.

2. Techniques

La structure de mode peut être mesurée au moyen d'émissions d'impulsions avec incréments de fréquence ou d'émissions de porteuses à modulation de fréquence avec balayage de fréquences, les secondes offrant l'avantage de ne nécessiter qu'une faible puissance de crête [Fenwick et Barry, 1965]. Le sondage sous incidence oblique est une technique extrêmement utile pour l'étude des conditions de propagation dans un circuit fixe point à point. Cette technique a permis de rassembler des données expérimentales pour valider les techniques de prévision de la MUF et identifier les modes de propagation inhabituels, ainsi qu'à d'autres fins pour lesquelles il est nécessaire de disposer d'un important volume d'informations détaillées fournies par des ionogrammes obliques.

— Des expériences de propagation à longue distance avec des ionosondes obliques numériques ont permis de mesurer la polarisation, l'amplitude, la phase, le déplacement de fréquence par effet Doppler et l'angle d'incidence [Reinisch et autres, 1985].

Le sondage ionosphérique sous incidence oblique traditionnel ne mesure pas les caractéristiques Doppler. S'il est possible de mesurer le déplacement Doppler sur une émission à onde entretenue il est en général impossible de déterminer la contribution des différents modes. L'étalement des temps de propagation et le déplacement Doppler sur chaque mode peuvent être mesurés au moyen de porteuses: modulation de fréquence à bande étroite [Earl et Ward, 1987] ou d'un sondeur à impulsions codées utilisant un récepteur à corrélation en temps réel [Wagner et Goldstein, 1985].

3. Résultats des analyses de propagation

Des transmissions d'impulsions sous incidence oblique ont été effectuées au Canada [Hatton, 1961], en France [Delobbeau et autres, 1955], en République fédérale d'Allemagne [Möller, 1960], au Japon [Aono, 1962], aux Etats-Unis d'Amérique [Agy et Davies, 1959; Tveten, 1961] et en Afrique [Davies et Barghausen, 1966]. De nombreuses mesures sous incidence oblique ont été faites, dont certaines ont été extrapolées pour la fréquence maximale observée (MOF), sur des circuits à ondes décamétriques dans diverses parties du monde et pour diverses conditions d'activité solaire, entre 1981 et 1988 [Goodman et Daehler, 1988].

3.1 Comparaison entre la MUF et la MOF

Lorsque l'on compare la fréquence maximale observée (MOF) et la MUF prévue, il faut vérifier avec soin qu'aucune différence ne provient de la cartographie ionosphérique ou de l'application du facteur d'obliquité. Des comparaisons effectuées entre les fréquences maximales observées et prévues ont permis d'établir que les théories actuelles de la propagation semblent, d'une manière générale, se prêter au calcul de la MUF de référence pour des distances pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres.

McNamara [1975] a montré que pour deux circuits de 2 000 km en Australie, les valeurs mensuelles médianes de la MUF prévues pour un bond s'écartaient au plus de 5% environ de la MOF. Pour des modes de propagation à 2 et 3 bonds, les écarts étaient plus importants, en partie du fait que la méthode utilisée pour le calcul de la MUF repose sur des hypothèses simplificatrices (bonds de longueur égale, pas d'inclinaison des couches).

On a relevé en URSS, sur cinq trajets de longueur comprise entre 1000 km et 10 000 km, les fréquences maximales et minimales observées (MOF et LOF), ainsi que les parties du spectre où la propagation par trajets multiples était minimale et les modes de propagation actifs [Smirnov, 1972]. Pour une ionosphère calme, la MOF dépassait généralement de 10 à 35% la MUF de référence, laquelle était calculée selon la méthode de prévision appliquée en URSS [Joulina et autres, 1969]. L'augmentation de la MOF causée par la dispersion atteignait 10% environ. Pendant les périodes de perturbation magnétique, la MOF était inférieure à la MUF de référence, alors que la LOF s'élevait. D'autres études ont été effectuées [Rose et autres, 1978] en utilisant les valeurs médianes horaires de la MOF pour 132 mois-trajets.

Des mesures de MUF sur des circuits en ondes décimétriques ont été effectuées au nord-est des Etats-Unis d'Amérique pendant une période d'activité solaire maximale et concordent bien avec les valeurs prévues à l'aide des programmes ITS-78 et IONCAP [Teters et autres, 1983; Millman et Swanson, 1985]. Daehler et autres [1987] ainsi que Roy et Sailors [1987] ont comparé les valeurs de MUF prévues à l'aide de plusieurs modèles de propagation aux MOF correspondant à de nombreux trajets.

Il peut y avoir des différences sensibles entre les résultats observés et les résultats calculés si les calculs sont faits sur la base de modèles théoriques simples. On peut améliorer la concordance en tenant compte, dans la méthode du tracé des rayons, de gradients de densité électronique [Röttger, 1967]. ——— et de gradients horizontaux de modélisation [Davies et Rush, 1985]. Les mesures de l'angle d'arrivée permettent, en principe, de déterminer à quel point il faut tenir compte des gradients.

Lorsque l'on compare les valeurs de MUF et de MOF, il est très important que ces valeurs soient relevées séparément pour chaque mode de propagation, afin qu'il soit possible de comparer la MOF et la MUF pour un même mode. Lorsque les données relatives à la MOF sont présentées compte non tenu du mode, l'analyse doit être faite en termes d'histogrammes du nombre de cas par rapport à la MOF, ce qui permet d'identifier les divers modes de propagation. Les valeurs médianes calculées sans tenir compte du nombre de modes de propagation présents dans les données observées peuvent être extrêmement trompeuses [Mc Namara, 1974]

3.2 Etude de modes de propagation anormaux

La présence de modes de propagation anormaux sur un circuit donné peut être établie soit en comparant des ionogrammes obliques avec des ionogrammes simulés pour tous les modes de propagation habituels, soit en comparant des valeurs de MUF fiables avec les histogrammes horaires de la MOF. L'une et l'autre méthodes peuvent révéler un mode de propagation caractérisé par une MOF supérieure à la valeur de MUF prévue la plus élevée. Le mode de propagation additionnel peut correspondre par exemple, à des modes de propagation par la couche Es, à des modes combinés faisant intervenir la couche Es équatoriale [McNamara, 1974] ou à l'une des deux formes de propagation transéquatoriale (modes TEP) [Nielson et Crochet, 1974; McNamara, 1974].

Il résulte d'une expérience conduite en 1970 et 1971 entre le Japon et l'Australie, sur des trajets de 5873 km [Kuriki et autres, 1974] et de 7374 km [Tanohata et autres, 1975], que le mode de propagation dominant comporte deux réflexions sur la région F et une réflexion intermédiaire à la surface de la Terre (mode 2F). Cependant, entre environ 10 h 00 et 20 h 00 (heure locale), des signaux ont souvent été reçus à des fréquences supérieures à la fréquence maximale observée pour le mode 2F. Ces effets se manifestaient pendant 40% environ de chaque heure d'observation et la MOF de ce mode était de 4 ± 2 MHz supérieure à la MOF du mode 2F qui se propageait en même temps.

Aux basses latitudes on observe des MUF d'exploitation anormalement élevées, qui sont liées, la nuit, à une diffusion dans la région F [Davies et Barghausen, 1966; Nielson et Crochet, 1974].

Pour des trajets situés à des latitudes élevées, la MUF de référence pour des distances de transmission de 2000 à 3400 km dépend généralement de la couche F1 pendant l'été [Petrie et Stevens, 1965]. Pour les trajets de grande longueur, la propagation par un bond sur la couche F2 (rayon de Pedersen) constitue le principal mode de propagation [Hagg et Rolfe, 1963] dans certaines conditions et sur une large gamme de latitudes. Toutefois, la fréquence maximale observée (MOF) peut dépendre parfois d'un mode de propagation par Es. Hunsucker et Bates [1969] ont publié une synthèse d'autres résultats de sondages effectués à des latitudes élevées.

Il faut tenir compte du coefficient de réflexion de la couche Es et des caractéristiques des ionosondes pour évaluer l'utilité de la couche Es comme réflecteur sous incidence oblique [Stevens, 1968a]. D'après des données simultanément fournies par des radars à diffusion incohérente et par des ionosondes, les fréquences maximales observées (MOF) par E sporadique peuvent atteindre 72 MHz dans la région aurorale pour des trajets à un seul bond [Hunsucker, 1975].

Les modes de propagation anormaux qui ont une influence sur la propagation en ondes métriques sont décrits dans le Rapport 259-6.

3.3 Dédoublement des composants magnéto-ioniques

Kopka et Möller [1968] ont étudié le dédoublement entre les composantes magnéto-ioniques x et o, en appliquant la méthode du tracé des rayons. Ces auteurs donnent les résultats obtenus pour un trajet de 2000 km, en fonction de la latitude magnétique et de l'azimut magnétique. En général, le dédoublement magnéto-ionique est moins important pour un trajet est-ouest que pour un trajet nord-sud. Aono [1962], Davies et Barghausen [1966] ont trouvé que cet écart était à peu près égal à la valeur longitudinale de la gyrofréquence f_H sur les trajets nord-sud. Agy et Davies [1959] ont découvert qu'il y avait un écart d'environ 0,2 MHz sur un trajet est-ouest de 2400 km, et que cet écart diminuait lorsque la distance augmentait.

3.4 Caractéristiques de la propagation par trajets multiples

Les résultats de sondages par impulsions avec balayage de fréquence montrent que l'étalement des temps de propagation dû à la propagation par trajets multiples décroît à mesure qu'augmente le rapport K (fréquence de travail/MUF de référence). Des données numériques sont présentées, pour un certain nombre de trajets, par Davies [1965]. Des mesures effectuées en République populaire de Chine [Chen et Zhou, 1984] sur un trajet de 1340 km montrent que pour $K < 1$, l'étalement moyen décroît selon une loi parabolique quand K augmente, avec un minimum pour $K = 1$; pour $K > 1$, jusqu'à la MUF d'exploitation, l'étalement moyen demeure inchangé. L'analyse théorique [Dai, 1985] montre que pour une valeur donnée de K , l'étalement a une distribution — normale et que l'«espérance mathématique» et la variance varient en fonction de la valeur de K . Cela a été confirmé par les mesures ci-dessus mentionnées.

Des expériences de propagation effectuées au cours de la période novembre-décembre 1981 le long d'un arc de grand cercle du nord au sud, sur une distance de 11 000 km, montrent que la largeur de la gamme de fréquences pour la propagation à un seul mode est maximale pour une distance de propagation d'environ 2000 à 3500 km, puis décroît progressivement lorsque la distance augmente. La propagation à un seul mode sur des distances supérieures à environ 8000 km est difficile à identifier, de nombreux modes complexes apparaissant à la même fréquence [Ichinose et autres, 1985].

Les données sur le temps de propagation, nécessaires pour simuler la voie radioélectrique (voir Rapport 549) dans la conception des systèmes de communication à large bande, peuvent être obtenues à partir d'ionogrammes sous incidence oblique. Toutefois, dans quelques systèmes de sondage, la résolution du temps de propagation peut ne pas suffire à une utilisation efficace des données [Sailors et Hill, 1977].

3.5 Fonction de diffusion dans la voie

Un sondeur de voies à large bande, à impulsions codées et à échelons de fréquence a été utilisé pour évaluer les conditions de propagation sur des trajets de latitude élevée [Wagner et autres, 1987]. Les diagrammes de l'évolution du temps de réponse de l'impulsion et les fonctions de diffusion dans la voie établis à partir des données permettent de classer les différents modes qui se propagent en trois catégories: spéculaire, trajets multiples-spéculaires ou trajets multiples diffus. Wagner et Goldstein [1985] ont effectué des expériences de propagation à courte distance en utilisant un sondeur oblique, à impulsions codées et cohérent, conçu pour sonder les voies de circuits de communication en ondes décimétriques jusqu'à une largeur de bande de 1 MHz. Ces expériences ont fourni des mesures d'amplitude, de phase, de dispersion du temps de propagation et du temps de propagation de groupe.

D'autres mesures de sondage de voies, effectuées à des latitudes élevées [Basler et autres, 1987] ont été utilisées conjointement avec un modèle théorique pour déterminer les caractéristiques de l'ionosphère responsables du temps de propagation et du déplacement Doppler observés.

4. Application des résultats à des liaisons réelles en ondes décimétriques

Les résultats des études de sondages sous incidence oblique ont montré quels équipements utilisés à cet effet peuvent être mis en œuvre en parallèle avec des systèmes de radiocommunication en vue de déterminer les fréquences de travail optimales à court terme. On a effectué un certain nombre d'études en vue de déterminer les améliorations qui pourraient résulter de l'emploi des données obtenues par sondages obliques [Probst, 1968; Stevens, 1968b; Slutz et autres, 1969].

On est parvenu à améliorer les radiocommunications lors de mauvaises conditions de propagation, en choisissant avec soin les fréquences de travail disponibles quand les prévisions ou les programmes d'utilisation de ces fréquences n'étaient pas assez précis [Jull et autres, 1962].

On a constaté que les données fournies par les sondages sous incidence oblique pouvaient grandement faciliter l'évaluation de la qualité de fonctionnement d'un système de radiocommunication. Si la propagation ne constitue plus une inconnue, il est plus facile de découvrir les défauts ou les limitations d'un tel système.

Toutefois, des expériences mettant en œuvre des sondages ionosphériques sous incidence oblique font apparaître un certain nombre de difficultés lorsque l'équipement de sondage est utilisé en parallèle avec l'équipement de radiocommunication, ou lorsque le sondage est effectué avec l'équipement de radiocommunication. Il faut tenir compte des points suivants:

- différences éventuelles de sensibilité entre les équipements de radiocommunication et de sondage;
- erreurs commises lorsqu'on effectue le sondage sur un trajet ionosphérique distinct du trajet de radiocommunication (notamment si les résultats de sondage sont utilisés pour des prévisions quantitatives des niveaux des signaux). Certaines études [Jull, 1968] donnent à penser que si les deux trajets sont séparés par 32 km, l'écart quadratique moyen entre les niveaux des signaux atteint 5 dB dans le cas où les résultats de sondage correspondent à une moyenne calculée sur 8 min;
- la non-réciprocité ionosphérique entraîne des différences entre les niveaux des signaux se propageant en sens opposé entre des antennes linéaires. La non-réciprocité de trajet que l'on constate en présence d'évanouissements par polarisation peut être sensiblement réduite si l'on prend la moyenne des niveaux des signaux sur 8 min [Jull, 1968];
- différences éventuelles entre les performances des équipements de sondage et de radiocommunication, en présence de brouillage;
- difficultés pour déterminer la cadence de répétition des sondages nécessaires pour garantir la validité des résultats lorsque les conditions ionosphériques commencent à varier, par exemple pendant les périodes perturbées;
- difficulté pour déterminer un signal de sondage qui soit représentatif de la modulation utilisée dans le système de radiocommunication;

Les applications opérationnelles des sondages sous incidence oblique en ondes décimétriques sont traitées par la Commission d'études 3 (voir le Rapport 357). Les sondages sous incidence oblique sont largement utilisés pour l'évaluation en temps réel des voies (systèmes de classe I) (voir le Rapport 889). Toutefois, d'autres techniques offrent des possibilités considérables.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGY, V. et DAVIES, K. [1959] Ionospheric investigations using the sweep-frequency pulse technique at oblique incidence. *NBS J. Res.*, Vol. 63D, 151-174.
- AONO, Y. [1962] Study of radio wave propagation in sweep frequency pulse transmission tests in Japan. *J. Radio Res. Labs. (Japon)*, Vol. 9, 42, 127-200.
- BASLER, R.P., PRICE, G.H., TSUNODA, R.T. et WONG, T.L. [1987] - HF channel probe. "The effect of the ionosphere on communication, navigation and surveillance systems", Eds J M Goodman, J.A. Klobuchar, H Soicher, G. Joiner, Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- CHEN, Y.C. et ZHOU, G.N. [1984] Dépendance en fréquence des paramètres des voies ionosphériques (en chinois). *J. Inst. Comm. Chine*, Vol. 5, 2, 48-56.
- DAEHLER, M., REILLY, M.H., RHOADES, F J et GOODMAN, J.M. [1987] Comparison of measured MOFs with propagation model forecasts. Page 4A-12. "The effect of the ionosphere on communication, navigation and surveillance systems", Eds. J.M. Goodman, J.A. Klobuchar, H. Soicher, G. Joiner, Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- DAI, Y.S. [1985] Voie à ondes décamétriques variable dans le temps (en chinois). Département des publications du Ministère des Postes et Télécommunications, Beijing, République populaire de Chine.
- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. NBS Monograph 80, 181, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- DAVIES, K. et BARGHAUSEN, A. F. [1966] The effect of spread F on the propagation of radio waves near the equator. *Spread F and its effects upon radiowave propagation*, 437-466. Agardograph 95, Ed. P. Newman, Technivision Maidenhead, Royaume-Uni.
- DAVIES, K. et RUSH, C.M. [1985] - Reflection of high-frequency radio wave in inhomogeneous ionospheric layers. *Radio Science*, Vol. 20, pp. 303-309.
- DELOBEAU, F., EYFRIG, R. et RAWER, K. [1955] Résultats expérimentaux de transmission ionosphérique d'impulsions à incidence oblique. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 10, 55-64.
- EARL, G.F. et WARD, B.D. [1987] The frequency management system of the JINDALEE OTH Radar. *Radio Science*, 22, 275-291.
- FENWICK, R. B. et BARRY, C. H. [1965] Step by step to a linear frequency sweep. *Electronics*, Vol. 38, 66-70.
- GOODMAN, J.M. et DAEHLER, M. [1988] - The NRL data base of oblique-incidence soundings. Naval Research Laboratory Report 6337 (NTIS Accession N° AD-A199 777) National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- HAGG, E. L. et ROLFE, W. [1963] A study of transatlantic radio propagation modes at 41.5 MHz. *Can. J. Phys.*, 41, 220-233.
- HATTON, W. L. [1961] Oblique-sounding and HF radiocommunication. *IRE Trans. Comm. Systems*, Vol. PGCS-9, 275.
- HUNSUCKER, R. D. [1975] Chatanika Radar investigation of high latitude E-region ionization structure and dynamics. *Radio Sci.*, Vol. 10, 277-288.
- HUNSUCKER, R. D. et BATES, H. F. [1969] Survey of polar and auroral region effects on HF propagation. *Radio Sci.*, Vol. 4, 347-365.
- ICHINOSE, M., KURATANI, Y. et YAMAZAKI, I. [1985] HF propagation experiments made with a Chirp sounder aboard a ship. *J. Radio Res. Labs. (Japon)*, Vol. 32, 136, 61-71.
- JOULINA, E. M., KERBLAY, T. S., KOVALEVSKAYA, E. M., et collaborateurs [1969] *Osnovy dolgosrochnogo radioprognozirovaniya* (Principes de la prévision radioélectrique à long terme) 172 pages. Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.
- JULL, G. W. [1968] HF spatial and temporal propagation characteristics and sounding assisted communications. *Ionospheric Radio Communications*, 225-241. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY 10011, Etats-Unis d'Amérique.
- JULL, G. W., DOYLE, D. J., IRVINE, G. W. et MURRAY, J. P. [1962] Frequency sounding techniques for HF communications over auroral zone paths. *Proc. IRE*, Vol. 50, 1676-1682.
- KOPKA, H. et MÖLLER, H. G. [1968] MUF calculations including the effect of the earth's magnetic field. *Radio Sci.*, Vol. 3, 53-56.
- KURIKI, I., KASUYA, I., HOJO, H. et TANOHATA, K. [1974] Analysis of maximum observed frequencies on oblique ionograms by ray tracing technique. *J. Radio Res. Labs. (Japon)*, Vol. 21, 161-190.
- McNAMARA, L.F. [1974] - Ionospheric predictions on trans-equatorial circuits. *Proc IREE (Australia)* Vol 35, 117-126.
- McNAMARA, L.F. [1975] - The accuracy of MUF predictions within Australia. Ionospheric Prediction Service Series R Reports, IPS-R28, Sydney.

- MILLMAN, G. H. et SWANSON, R. W. [1985] Comparison of HF oblique transmissions with ionospheric predictions. *Radio Sci.*, Vol. 20, 3, 315-318.
- MÖLLER, H. G. [1960] Ergebnisse der Impulsübertragung mit veränderlicher Frequenz auf der Strecke Sodankylä-Lindau (Résultats de transmissions d'impulsions à fréquence variable sur le trajet Sodankylä-Lindau). *Kleinheubacher Berichte*, 7, 115-123.
- NIELSON, D. L. et CROCHET, M. [1974] Ionospheric propagation of HF and VHF radio waves across the geomagnetic equator. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 12, 688-702.
- PETRIE, L. E. et STEVENS, E. E. [1965] An F1 layer MUF prediction system for northern latitudes. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-13, 542-546.
- PROBST, S. E. [1968] The CURTS concept and current state of development. *Ionospheric Radio Communications*, 370-379. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- REINISCH, B. W., BIBL, K., AHMED, M., SOICHER, H., GORMAN, F. J. et JODOGNE, J. C. [1985] Multipath and Doppler observations during transatlantic digital HF propagation experiments, Propagation influences on digital transmission systems - problems and solutions. AGARD Conf. Proc. No. 363, *Propagation Influences on Digital Transmission*. Ed. J. H. Blythe. NASA Accession No. N85-19269. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- ROSE, R. B., MARTIN, J. N. et LEVINE, P. H. [1978] MINIMUF-3: A simplified HF MUF prediction algorithm. Naval Ocean Systems Center Tech. Rep. 186, NTIS Accession No. AD A0522052. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- RÖTTGER, J. [1967] Messung des Erhebungswinkels von Kurzwellen bei schrägem Einfall in die Ionosphäre (Mesure de l'angle de rayonnement sur ondes décimétriques à incidence oblique dans l'ionosphère). Thèse de l'institut de géophysique et de météorologie de l'Ecole supérieure technique de Brunswick.
- ROY, T. N. et SAILORS, D. B. [1987] - HF maximum usable frequency (MUF) model uncertainty assessment. Naval Ocean Systems Center Technical Report 1184 (NTIS ACCESSION N° AD-A189 132) National Technical Information Service, Springfield, VA 2161, Etats-Unis d'Amérique.
- SAILORS, D. B. et HILL, J. R. [1977] Simulation and measurement of the HF channel. Naval Ocean Systems Center Tech. Rep. 111, NTIS Accession No. A043384. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- SLUTZ, R. J., GAUTIER, T. N. et LEFTIN, M. [1969] Short-term radio propagation forecasts in Southeast Asia, ESSA Tech. Rep., ERL-97-ITS-72. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- SMIRNOV, V. B. Ed. [1972] Naklonnoe zondironavie ionosfery (Sondage ionosphérique sous incidence oblique). Collection d'articles, N° 1, publiée par Gidrometizdat, Leningrad, URSS.
- STEVENS, E. E. [1968a] The significance of sporadic E propagation in determining the MUF. *Ionospheric Radio Communications*, 289-293. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- STEVENS, E. E. [1968b] The CHEC sounding system. *Ionospheric Radio Communications*, 359-369. Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- TANOHATA, K., YAMAOKA, M., NAKAJIMA, M., SAKAMOTO, T., IGUCHI, M. et YAMASHITA, K. [1975] Some consideration of maximum observed frequencies on the path between St. Kilda and Yamagawa. *Rev. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 21, 33-41.
- TETERS, L. R., LLOYD, J. L., HAYDON, G. W., et LUCAS, D. L. [1983] Estimating the performance of telecommunication systems using the ionospheric transmission channel - ionospheric communications analysis and prediction program user's manual. NTIA Report 83-127. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- TVETEN, L. H. [1961] Long-distance one-hop F1 propagation through the auroral zone. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 1683-1684.
- WAGNER, L. S. et GOLDSTEIN, J. A. [1985] - High resolution probing of the HF ionospheric sky wave channel: F2 layer results. *Radio Science*, Vol. 20, pp. 287-302.
- WAGNER, R. P., PRICE, G. H., TSUNODA, E. T. et WONG, T. L. [1987] - HF channel probe. "The effect of the ionosphere on communication navigation and surveillance systems", Eds. J. M. Goodman, J. A. Klobuchar, H. Soicher, G. Joiner, Government Printing Office, Washington, DC 20402.