

PROPAGATION IONOSPHERIQUE DES ONDES METRIQUES

(Question 41/6)

(1951-1953-1956-1959-1963-1966-1970-1974-1978-1982-1986-1990)

1. Introduction

L'ionosphère qui est responsable au premier chef de la réflexion des ondes radioélectriques au-dessous de 30 MHz peut, dans certaines conditions, produire des réflexions dans la bande des ondes métriques (30 - 300 MHz), pendant des périodes de temps relativement courtes et dans certaines régions du monde seulement, en fonction des mécanismes de propagation et de la structure locale de l'ionosphère.

Le présent Rapport décrit les conditions dans lesquelles les Régions E et F produisent ces réflexions, qui sont également subdivisées en normales et anormales. En effet, il est possible d'établir des prévisions de la propagation normale en fonction de paramètres géophysiques ou solaires à long terme en ayant une bonne possibilité de prévision sur une base journalière alors que, par définition, cette possibilité de prévision sur une base journalière est faible dans le cas de la propagation anormale, et seules les données statistiques à long terme permettent d'évaluer dans une certaine mesure son comportement.

Il convient de noter que des distances supérieures à 1 000 km peuvent aussi résulter des anomalies de la propagation troposphérique par le milieu non ionisé. Au cas où il serait nécessaire ou souhaitable d'identifier le mode de propagation d'un signal brouilleur, il conviendrait de se référer au § 4 qui contient un tableau des principales caractéristiques.

* Ce Rapport est porté à l'attention des Commissions d'études 5, 8 et 10.

2. Région F

Dans cette section la Région F est étudiée en terme de propagation normale et propagation anormale.

2.1 Propagation normale par la région F

Au voisinage du maximum du cycle d'activité solaire, les transmissions à grande distance par la couche F2, sous des latitudes moyennes, peuvent se faire pendant un pourcentage de temps appréciable, pour des fréquences atteignant ou dépassant 50 MHz. Sous des latitudes basses, une transmission régulière se produit sur des fréquences situées aux alentours de 30 à 40 MHz; il arrive même qu'une telle propagation devienne rare au point qu'il peut être considéré comme insignifiant est environ 60 MHz pour les stations situées aux latitudes moyennes et environ 70 MHz pour les stations situées aux basses latitudes (voir Fig. 1, 2, 3).

Un rapport concernant la propagation normale de signaux de télévision en ondes métriques a été élaboré en Inde [Saksena, 1979]. La propagation de signaux télévisuels à ondes métriques d'environ 60 MHz sur un trajet de 3100 km à partir de Bangkok, a fait également l'objet d'observations à Rohtak (Inde), en particulier pendant les mois d'équinoxe et la période d'activité solaire intense due à la propagation par la couche ionosphérique F à des fréquences supérieures à la MUF de référence. La réception des signaux s'est faite à 2000 heure locale et pour des durées comprises entre une et deux heures et demie [CCIR, 1982-86].

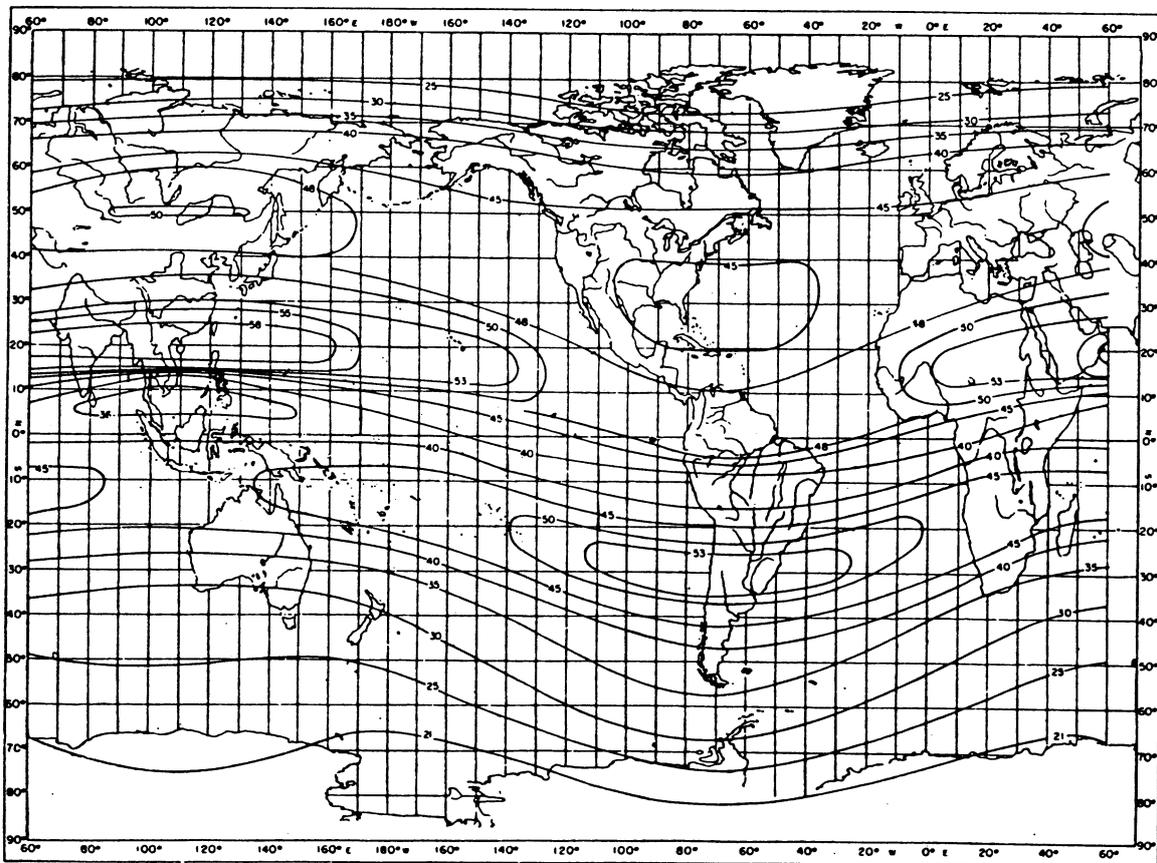


FIGURE 1 - F2 (4000) MUF dépassée pendant 1 % des heures - Solstice de décembre; maximum du nombre de taches solaires

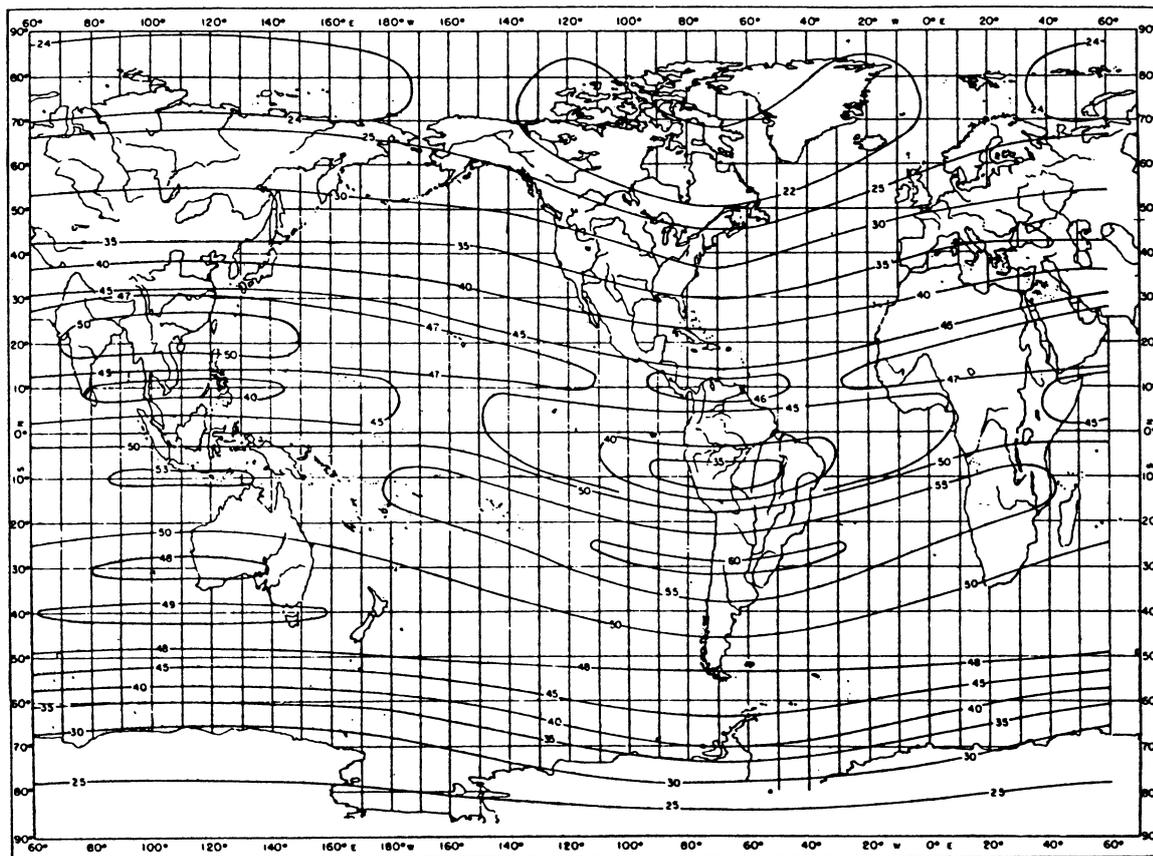


FIGURE 2 - F2 (4000) MUF dépassée pendant 1% des heures - Solstice de juin; maximum du nombre de taches solaires

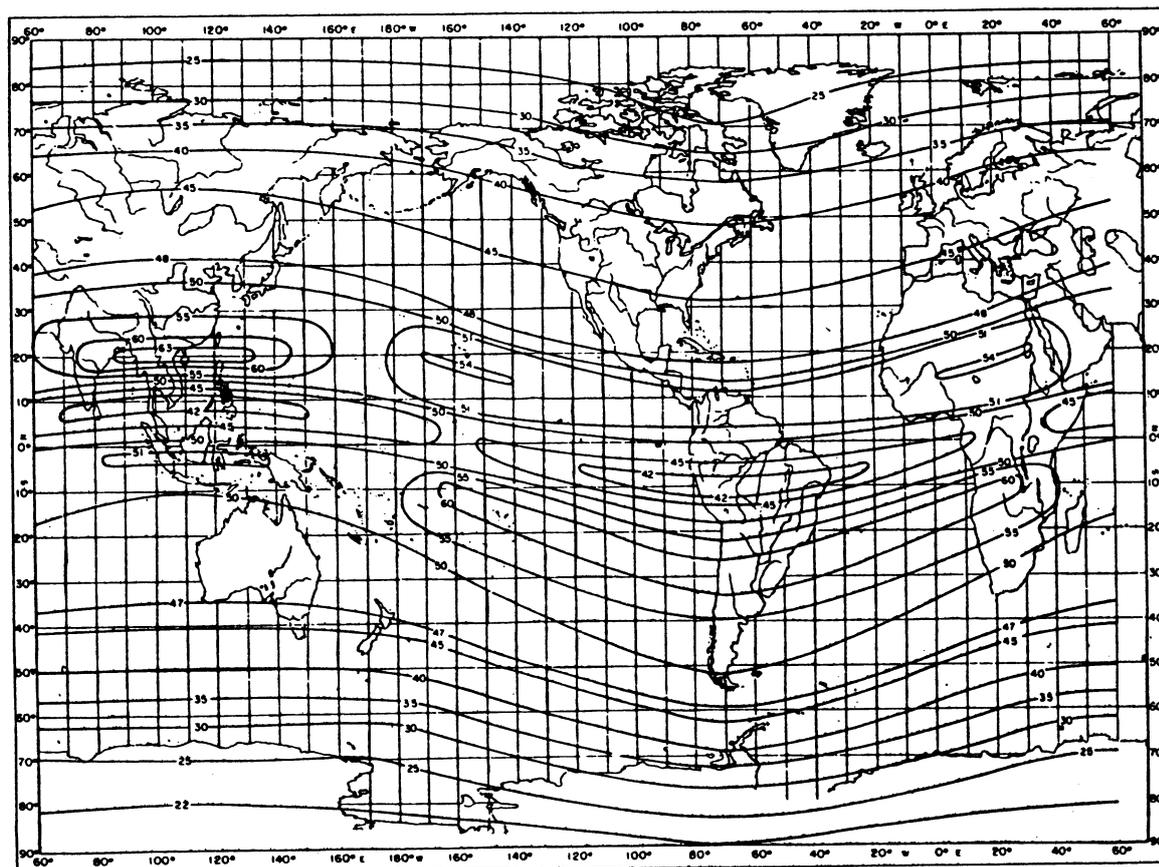


FIGURE 3 - F2 (4000) MUF dépassée pendant 1% des heures - Equinoxe; maximum du nombre de taches solaires

2.2 Propagation anormale par la Région F

2.2.1 *Propagation transéquatoriale*

Des études récentes montrent que des transmissions peuvent se faire avec des niveaux élevés, notamment pendant les années de forte activité solaire, sur les trajets longs nord-sud franchissant l'équateur magnétique. La plupart des observations ont été faites par des amateurs sur une fréquence de 50 MHz et pour des trajets de l'ordre de 4000 à 9000 km; des résultats ont été obtenus pour des trajets Amérique du Nord-Amérique du Sud, Afrique-Europe et Japon-Australie.

D'après l'expérience réalisée entre l'Australie et le Japon pendant environ un cycle d'activité solaire (1965-1974) aux fréquences 32, 48 et 72 MHz, et pendant un demi-cycle d'activité solaire (1969-1974) aux fréquences 88 et 102 MHz, on a constaté que la propagation transéquatoriale s'est manifestée à la fréquence 32 MHz pendant une grande partie de la journée (exception faite de quelques heures de la matinée) et ce, même pendant les années de faible activité solaire. Les heures de réception ont augmenté en fonction de l'activité solaire. Aux fréquences 48, 72, 88 et 102 MHz, la propagation transéquatoriale s'est manifestée après 2000 heure locale environ pendant les périodes d'équinoxe et a duré 6 à 8 heures à 48 MHz, et 2 à 4 heures à 102 MHz. Les variations à long terme des affaiblissements de transmission fondamentaux en ondes métriques qui se sont propagées sur le trajet transéquatorial sont indiquées sur la Fig. 4 [Tao et autres, 1970; Kuriki et autres, 1972; Tanohata et autres, 1980]. Sur la base des niveaux de signal observés sur les quatre fréquences, la puissance du signal reçu, normalisée à une p.a.r. de 1 kW et en utilisant des doublets à l'émission et à la réception, est inversement proportionnelle à une valeur comprise entre la puissance 10 et la puissance 12 de la fréquence [Kuriki et autres, 1972].

Il semble que la propagation de jour s'effectue selon le mode 2F par suite de l'anomalie équatoriale, et que, la nuit, le signal qui manifeste des évanouissements rapides et peu profonds soit dû à un processus de diffusion lié au phénomène F-diffus équatorial [Tao et autres, 1970].

Il semble qu'il existe deux types de propagation transéquatoriale, caractérisés par les heures d'occurrence, les caractéristiques des évanouissements et les modes de propagation. Des études générales de la propagation transéquatoriale ont été faites par McCue et Fyfe [1965] et par Nielson et Crochet [1974].

Le premier type de propagation transéquatoriale, appelé le type de l'après-midi, a les caractéristiques suivantes:

- maximum d'occurrence vers 1700-1900 h, temps local moyen, l'heure étant déterminée au point où le circuit coupe l'équateur magnétique;
- normalement, signaux forts et constants, avec un taux d'évanouissement peu élevé et un faible étalement par effet Doppler (environ $\pm 2-4$ Hz);
- longueurs de trajet de l'ordre de 6000 à 9000 km, parfois plus.

Gibson-Wilde [1969] a suggéré que, dans la zone de l'Australasie au moins, ces signaux se propagent probablement selon le «supermode» ou mode FF proposé par Villard et autres [1957]. Cette propagation s'effectue avec deux réflexions sur la couche F, sans réflexion intermédiaire au sol.

Le deuxième type de propagation transéquatoriale, appelé le type du soir, fait généralement intervenir des fréquences plus élevées que le type de l'après-midi et possède des caractéristiques très différentes:

- une crête d'occurrence vers 2000-2300 h, temps local moyen;
- signaux forts, mais subissant des évanouissements profonds et rapides dont la période peut atteindre environ 15 Hz et avec un grand étalement par effet Doppler qui dépasse parfois 40 Hz;
- longueurs de trajet plus petites que pour le type de l'après-midi, de l'ordre de 3000 à 6000 km.

On ne connaît pas encore avec certitude le type de propagation transéquatoriale du type de l'après-midi. Différents mécanismes ont été proposés pour l'expliquer. On trouvera des détails dans plusieurs publications [Bowen et autres, 1968; Tao et autres, 1970; Kuriki et autres, 1972; McNamara, 1973; Heron et McNamara, 1979; Winkler, 1981; Ferguson et Booker, 1983].

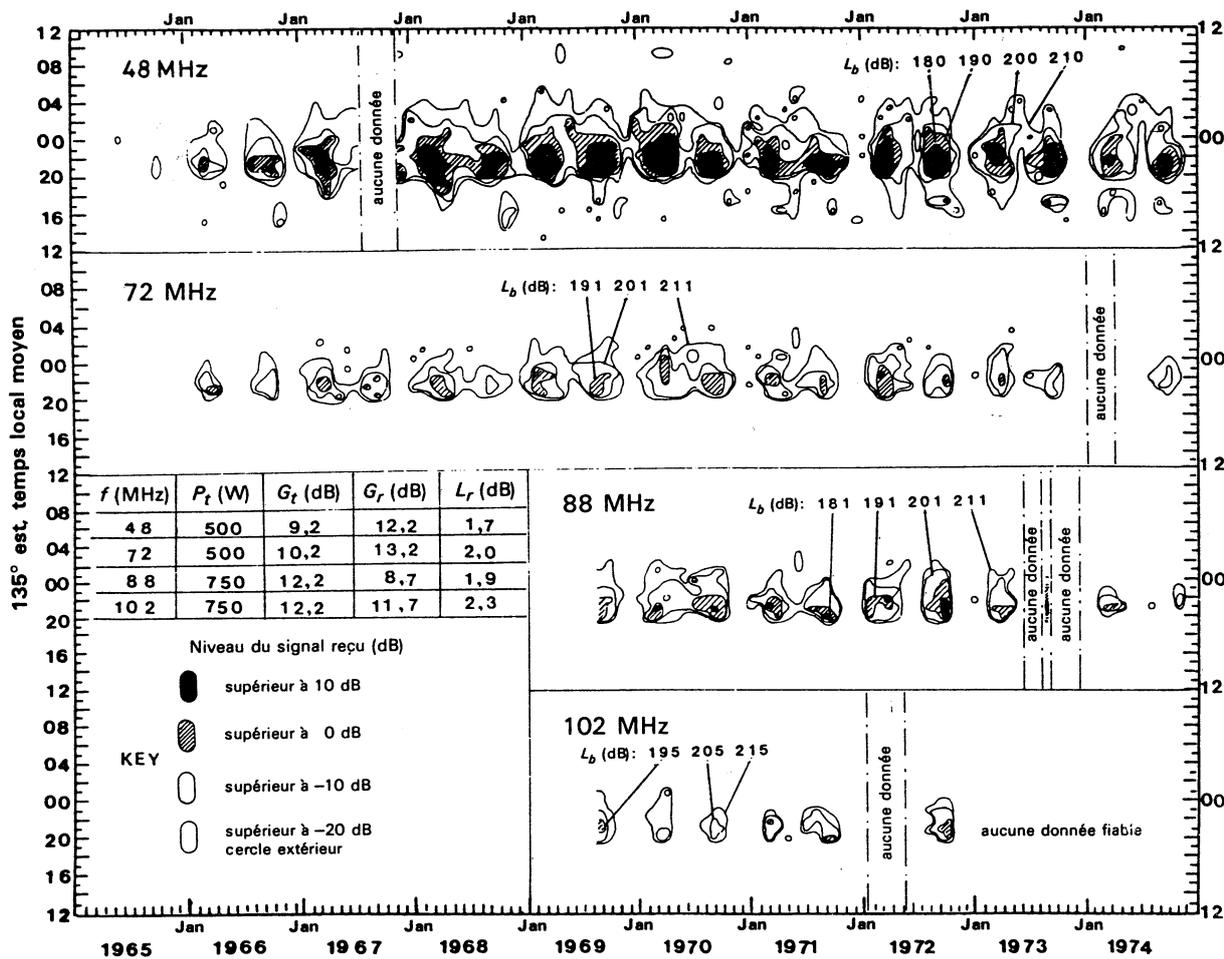


FIGURE 4 — Affaiblissements de transmission de référence (L_b) et champs reçus (V_r) indiqués par la tension d'une antenne de circuit ouvert

P_t : puissance de l'émetteur
 G_t : gain de l'antenne d'émission
 G_r : gain de l'antenne de réception
 L_r : affaiblissement des lignes d'alimentation de réception
 Le champ reçu est donné en dB(1 μ V).

2.2.2 Autres mécanismes de propagation anormale

Les études montrent qu'il peut se trouver, par moments, des îlots d'ionisation situés à des hauteurs autres que celles de toutes les couches ionosphériques reconnues. Ces irrégularités d'ionisation peuvent parfois réfléchir des ondes de fréquence situées dans la gamme de 30 à 300 MHz, le cas le plus typique étant celui où la réflexion se produit sur les bords d'irrégularités d'ionisation alignées sur le champ magnétique, ce qui a lieu dans la zone aurorale ou à proximité de cette zone. Des réflexions de ce genre peuvent constituer une cause de brouillage pour des stations fonctionnant sur des fréquences comprises entre 30 et 300 MHz [Czechowsky, 1970].

Des réflexions par la région F ont été observées sur des fréquences sensiblement supérieures à la MUF de référence F2, mais avec des niveaux bien inférieurs à ceux qui correspondent à l'espace libre. Ces réflexions ont été observées en Extrême-Orient, en Amérique du Sud et en Afrique. Il s'agit, semble-t-il, d'un phénomène caractéristique des années d'intense activité solaire, se produisant de préférence pendant les mois d'équinoxe [Bateman et autres, 1959].

On a observé des MOF renforcées la nuit sur les circuits Guam-N.W. Cape (Australie) et Manille-N.W. Cape pendant les mois d'équinoxe, en période de grande activité solaire. Ces MOF dépassent la 2F MOF; elles dépassent aussi souvent 32 MHz, limite supérieure des appareils. McNamara [1974b] les a expliquées en invoquant un mode de propagation par deux bonds. On en a conclu que pour le premier bond la propagation s'effectue par diffusion à partir des irrégularités alignées sur les lignes de force du champ. On admet que la longueur du premier bond est inférieure à la moitié de la longueur totale du circuit; quant au deuxième bond, il s'effectue sur la couche F et sa MUF est plus élevée que celle du deuxième bond d'un mode 2F normal.

2.2.3 *Diffusion latérale au sol et dans l'ionosphère*

On a observé que les azimuts d'arrivée des ondes métriques qui se propagent par l'ionosphère diffèrent notablement de ceux des ondes qui se propagent le long du grand cercle. Ces signaux résultent principalement de modes de propagation à bonds multiples où la diffusion latérale est due aux irrégularités à la surface de la Terre (Rapport 726). Les niveaux des signaux sont bien inférieurs à ce qu'ils seraient après une propagation en espace libre et ils ont des périodes d'évanouissements de moins d'un Hertz.

3. Région E

La propagation des ondes métriques par la couche E normale n'est probable à aucun moment alors que la propagation par ionisation météorique ou par nuages sporadiques de la Région E peut être significative.

3.1 Propagation par ionisation météorique

Les réflexions produites par les traînées de météores ont fait l'objet d'études au Canada, en République fédérale d'Allemagne, au Royaume-Uni, aux Etats-Unis d'Amérique et dans d'autres pays. On trouvera une bibliographie sur ce sujet dans le Rapport 251.

Malgré leur apparition irrégulière, on peut établir des prévisions journalières de la durée des ouvertures dans la partie inférieure de la bande de ondes métriques et, comme il s'agit d'un phénomène quotidien, on l'utilise, dans de nombreux pays, pour la transmission de données dans des réseaux spécialisés.

3.2 Ionisation sporadique de la région E

L'ionisation sporadique de la région E, _____ se présente comme un renforcement de l'ionisation sous l'aspect de nappes horizontales dont l'épaisseur moyenne est voisine de 1 km et dont les dimensions horizontales sont de l'ordre de 100 km. L'altitude est d'ordinaire de 100 à 120 km. Les nappes apparaissent de façon erratique, mais de préférence à certaines heures et en certains mois de l'année (voir aussi les Rapports 725 et 255). _____ Il existe trois zones d'ionisation sporadique E principales, aux latitudes basses, moyennes et aurorales.

La zone à basse latitude subdivisée en deux sous-régions, la zone équatoriale et la zone subéquatoriale (voir la Recommandation 534-2). La zone équatoriale consiste en une ceinture s'étendant de part et d'autre de l'équateur magnétique jusqu'à 6° d'inclinaison magnétique et dont le bord se déplace d'environ 1° de latitude magnétique entre l'été et l'hiver; c'est au solstice d'été que ce bord est le plus éloigné de l'équateur magnétique. Une forme très transparente d'ionisation sporadique de la région E (Es de type q) se manifeste régulièrement sur la partie éclairée de cette zone et peut être associée à l'électrojet équatorial. On observe pendant des pourcentages élevés du temps et avec des différences marquées entre les divers continents, des échos sous incidence verticale provenant de la couche Es équatoriale, à des fréquences supérieures à 7 MHz [Giraldez, 1980]. Bien qu'il n'y ait pas de variation saisonnière importante du schéma d'occurrence, il existe une tendance à l'apparition de crêtes équinoxiales pour les stations proches de l'équateur magnétique et de crêtes solsticiales pour les stations qui se trouvent à quelques degrés de celui-ci [Oyinloye, 1988]. La propagation des ondes métriques par l'intermédiaire de E sporadique de type q s'effectue par diffusion. La zone subéquatoriale se trouve de part et d'autre de cette ceinture jusqu'à $\pm 20^\circ$ d'inclinaison.

Les zones des latitudes moyennes couvrent la plus grande partie de la Terre et s'étendent de la zone à basse latitude jusqu'à la latitude géomagnétique de 60° environ (en fait jusqu'à la latitude pour laquelle la probabilité d'apparition des aurores atteint 15% de son maximum). Dans les zones des latitudes moyennes, le phénomène le plus important est le maximum très net que l'on observe en été dans la fréquence d'apparition d'ionisation E sporadique intense; ce maximum devient plus marqué lorsqu'on se rapproche des latitudes élevées, jusqu'à ce qu'il soit considérablement altéré par les phénomènes de la zone aurorale. L'ionisation E sporadique est rarement présente entre minuit et 0600 heure locale. Elle apparaît le plus fréquemment aux environs de 1000 heure locale et dans certaines régions, parfois aussi dans l'après-midi ou dans la soirée. L'ionisation E sporadique est souvent très dense pendant la journée. Dans les zones des latitudes moyennes, la probabilité d'apparition de E sporadique présente des variations importantes en fonction de la longitude aussi bien que de la latitude. Il est confirmé que la valeur mondiale maximale se situe entre 120 et 160 degrés de longitude Est et entre 15 et 40 degrés de longitude Nord, coordonnées géographiques [Li Zanju, 1988]. Un mécanisme associé aux cisaillements de vent semble pouvoir fournir une explication pour les ionisations sporadiques intenses dans la Région E aux latitudes moyennes.

Dans les zones aurorales, le phénomène prédominant est le maximum de nuit présenté par la probabilité d'apparition de E sporadique. Le maximum observé en été aux latitudes moyennes disparaît complètement dans la zone de maximum des aurores visibles. Les zones aurorales, comme la zone équatoriale, sont des régions où un courant important circule dans la basse ionosphère. De plus, ce sont des régions où des couches ionisées peuvent être formées par les précipitations de particules chargées. Il semble que ces deux phénomènes puissent être responsables de l'ionisation E sporadique. L'apparition de la couche E sporadique dans les régions de hautes latitudes est étroitement liée à l'ovale auroral instantané [Wagner et autres, 1973]. Le rôle des précipitations de particules chargées, des courants ionosphériques et des cisaillements de vent dans la formation de l'ionisation E sporadique, ainsi que la morphologie et la structure de cette ionisation ont été décrits par Hunsucker [1975], Wilson et autres [1976] et Wright et Hunsucker [1983]. Le phénomène prédominant semble être la précipitation de particules aurorales (1-10 keV). Hagg et autres [1959] ont trouvé que la fréquence maximale d'apparition de E sporadique présentait une intéressante variation en fonction de l'heure locale et de la latitude (on notera qu'en l'état actuel des connaissances, leur explication du phénomène est incorrecte). A 20 heures environ (heure locale), ce maximum se manifeste à 72° environ de latitude géomagnétique; il se déplace graduellement en direction de l'équateur à mesure que le temps local s'écoule et atteint, à 3 heures (heure locale), la latitude géomagnétique de 60° environ.



3.3 Propagation par E-sporadique

La probabilité de propagation par E-sporadique diminue lorsque la fréquence augmente. Elle peut être considérée comme négligeable au-dessus de 100 MHz, sauf en tant que source de brouillage pour des circuits dont on exige une haute fiabilité.

3.3.1 Basses latitudes

On a également étudié [Saksena, 1979] la réception en Inde de signaux de télévision dans la bande comprise entre 47 et 68 MHz. De plus, les radioamateurs portent un grand intérêt à la propagation par la couche E sporadique et il arrive souvent que des communications soient effectuées par cette couche sur des fréquences jusqu'à 144 MHz [CCIR, 1978-82].

On a observé, sur des circuits entre Guam et N.W. Cape (Australie) et entre Manille et N.W. Cape, des modes de propagation combinés dans lesquels un bond s'effectue par l'intermédiaire de la couche Es équatoriale, l'autre bond étant un bond normal, mais de grande longueur, par la couche F [McNamara, 1974a]. Pendant les heures de jour, il existe sur ces deux circuits un mode Es-F avec une MOF souvent supérieure à 32 MHz (limite supérieure du sondeur oblique) et un mode 2Es-F avec une MOF un peu plus petite. Il semble que, sur le circuit Manille-N.W. Cape, la propagation s'effectue également selon les modes normaux 2F et 3F, mais il est possible que le mode 2F n'existe pas sur le circuit Guam-N.W. Cape par suite d'occultation par Es.

Des résultats obtenus sur un trajet subéquatorial de 1985 km (est-ouest) entre Sao Paulo (Brésil) et Tucuman (Argentine) pour la transmission à 59,75 MHz (son de télévision), une puissance équivalente de l'émetteur dans le sens réception de 9 kW, un gain d'antenne à la réception de 6 dB (polarisation horizontale, hauteur de 14 m) [Moro, 1984] mettent en évidence les caractéristiques suivantes:

- grand pourcentage d'occurrence pendant la nuit (2000-0100 h, temps local);
- pour des champs supérieurs à 5 $\mu\text{V/m}$, l'apparition est normalement distribuée avec un maximum (70 h par mois) à la fin du printemps et un minimum (1 h par mois) à la fin de l'automne;
- pour la période printemps-été, on a relevé pendant 60% des jours des contacts d'une durée de 2½ h pour des champs égaux ou supérieurs à 5 $\mu\text{V/m}$;
- le pourcentage des heures-mois diminue très rapidement quand le champ augmente, passant d'un maximum à la fin du printemps à deux maxima au début du printemps et au début de l'automne (septembre et mars) pour des champs supérieurs à 10 $\mu\text{V/m}$. La Fig. 5 récapitule le nombre observé d'heures-mois de réception en fonction du mois et de la valeur du champ.

3.3.2 Latitudes moyennes

D'après des études préliminaires effectuées dans le secteur de l'Amérique du Sud, le comportement de la propagation oblique par la couche E sporadique dans ledit secteur peut être décrit de façon acceptable par les caractéristiques indiquées ci-après à propos du secteur européen.

Des sondages sous incidence oblique entre la Grèce et la République Fédérale d'Allemagne (1700 km) [Reinisch, 1965] ont montré que la fréquence maximale observée (MOF) est souvent déterminée, de mai à fin septembre, par des réflexions sur E sporadique. La probabilité moyenne d'apparition, pendant le jour (0600 à 1800 heure locale) était environ 10% sur 22 MHz et s'annulait presque sur 30 MHz. Les données obtenues sous incidence oblique sur les trajets Ottawa-La Haye (5500 km) et Winnipeg-Resolute Bay (2800 km) montrent que le mode de propagation par E sporadique détermine parfois la MUF d'exploitation, mais que la propagation s'effectue rarement par E sporadique sur ces trajets aux fréquences supérieures à 30 MHz [Stevens, 1968].

Minoulline [1988], Minoulline et autres [1988] ont mis en évidence et décrit de manière analytique les variations spatio-temporelles des fréquences limites F_oE_s pour des latitudes moyennes, ce qui permet de calculer la probabilité d'apparition de valeurs données de f_oE_s pour une latitude, une saison et une heure du jour données. On a obtenu des relations entre le coefficient de réflexion par la couche E_s sous incidence oblique et sa fréquence limite pour la couche sporadique E ainsi que celle de la couche régulière E.

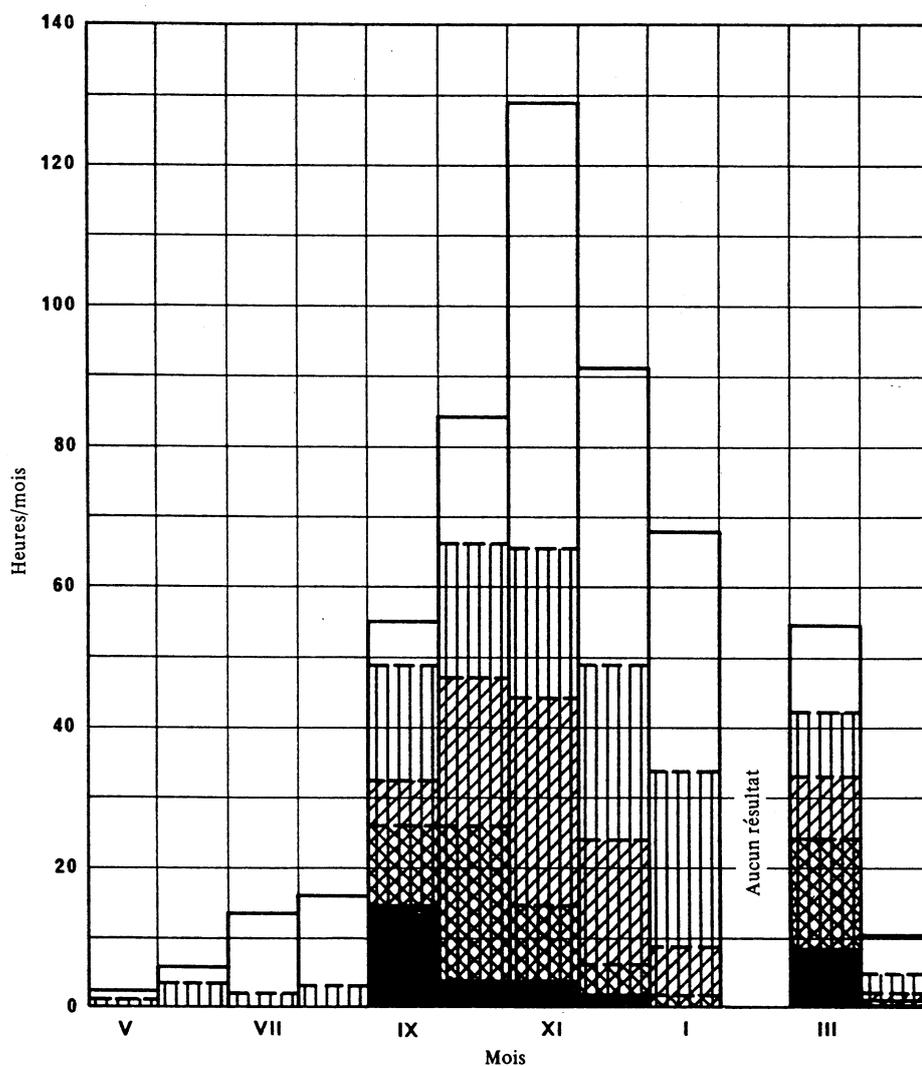


FIGURE 5 – Nombre cumulé d'heures par mois pour une valeur donnée du champ (1980-1981)

-  E > 2 μV/m
-  E > 5 μV/m
-  E > 10 μV/m
-  E > 20 μV/m
-  E > 50 μV/m

Les chiffres romains indiquent le numéro des mois (1 = janvier)
 Puissance efficace rayonnée dans la direction du récepteur: 9 kW

Depuis 1962, l'UER [Lari et autres, 1967] a effectué des enregistrements sur 23 trajets qui s'étendent dans diverses directions en Europe occidentale et dont la longueur varie de 900 à 2510 km. Les mesures ont été effectuées sur 5 fréquences comprises entre 41 et 59 MHz, tous les jours de 0800 à 2300 h UTC, chaque année d'avril à fin octobre. Les résultats peuvent être résumés comme suit:

- les résultats diffèrent beaucoup d'une année à l'autre et l'on a observé des écarts du champ allant jusqu'à 35 dB;
- le mois d'ionisation sporadique maximale de la région E varie entre la fin du printemps et la fin de l'été;
- pour un trajet donné, ce mois varie d'une année à l'autre et, pour une année donnée, il varie d'un trajet à l'autre;
- des études sur la variation du champ avec la distance ont montré que les valeurs maximales du champ (dépassées pendant 1% du temps) se rencontrent à une distance d'environ 1400 à 1500 km; à ces distances, la valeur du champ dépassée pendant 5% du temps était inférieure d'environ 15 à 30 dB. Pour une distance de 2500 km, les valeurs correspondantes du champ n'étaient que de 10 à 20 dB inférieures à celles relevées sur 1500 km. Ce résultat donne à penser que la réfraction atmosphérique et l'emploi d'antennes surélevées permettent d'augmenter la portée maximale, dans une propagation ionosphérique en ondes métriques à un seul bond, au-delà de la portée normalement obtenue aux fréquences plus basses.

Les observations effectuées au cours d'une période de 11 années, couvrant un cycle complet d'activité solaire, montrent qu'il n'existe pas de corrélation simple à long terme entre l'activité solaire* et la propagation en ondes métriques par E sporadique. On a pu cependant constater que les variations annuelles sont assez régulières et que leur allure tendrait à être la même pour différents trajets.

Le Tableau I indique les années où l'on a observé les valeurs de champ maximales et minimales.

TABLEAU I

Trajet	f (MHz)	Valeurs du champ maximales	Valeurs du champ minimales
Divis — Enköping	41,465	1964, 1966, 1971	1965, 1967/8
Divis — Châtonnaye	41,465	1964, 1966, 1971	1965, 1967/8
Meldrum — Enköping	58,215	1963/4, 1966	1965
Divis — Monte-Lauro	41,465	1964, 1968/9, 1971	1963, 1965/6, 1970

Une analyse, faite à Aberystwyth (Royaume-Uni), de plusieurs années d'enregistrement du champ reçu sur trois fréquences de la bande des ondes métriques a permis d'établir des statistiques du comportement dans le temps de phénomènes d'ionisation E sporadique observés [Edwards et autres, 1984]. Ces statistiques portent sur environ 9 années d'enregistrement aux fréquences 59,25 et 62,25 MHz et sur environ six années d'enregistrement à la fréquence 77,25 MHz. Les signaux provenaient de stations de radiodiffusion situées pour la plupart en Europe centrale et en Europe de l'Est, situées à des distances de 1000 à 2000 km, et de puissance apparente rayonnée comprise entre 50 et 100 kW. L'analyse a été limitée chaque jour à la période comprise entre 0600 et 2300 h UTC car il y a peu d'émissions régulières de radiodiffusion en dehors de ces heures.

* Maximum d'activité solaire: 1968/1969; minimum: 1964/1965.

Sur la Fig. 6 sont représentées, pour la fréquence 62,25 MHz, des distributions cumulatives indiquant le pourcentage de la durée totale d'occurrence de l'ionisation E sporadique, pendant l'été, en fonction de la durée de ces phénomènes. On voit bien que la durée totale de tous les phénomènes est en grande partie due à celle des phénomènes les plus longs. 75% de la durée totale sont dus à des phénomènes de plus de 5 min au niveau de référence de 3 dB($\mu\text{V}/\text{m}$) et à des phénomènes de plus de 4 min au niveau de 13 dB($\mu\text{V}/\text{m}$). On a obtenu des distributions semblables pour les fréquences 59,25 et 77,25 MHz.

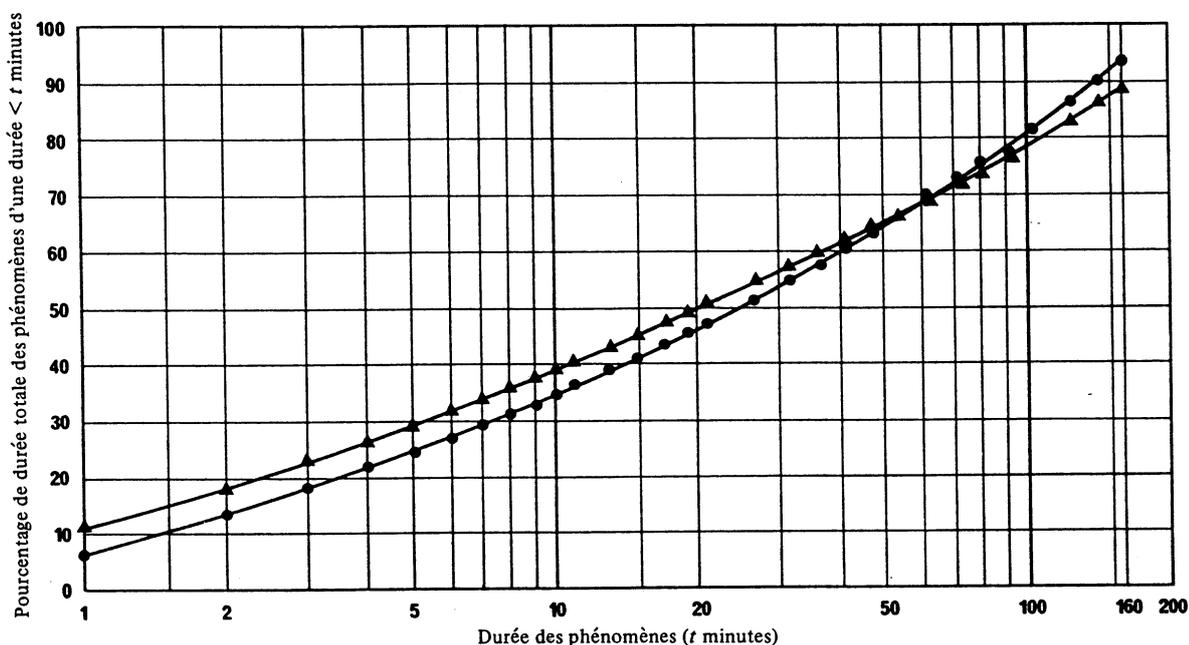


FIGURE 6 - Pourcentage de durée cumulative des phénomènes d'ionisation E sporadique, pendant l'été, en fonction de leur durée, pour les deux niveaux de seuil. Observations faites à Aberystwyth sur 62,25 MHz

Niveau de seuil ($\mu\text{V}/\text{m}$):

● 3 dB

▲ 13 dB

Les Fig. 7a) et 7b) montrent la durée moyenne totale des phénomènes d'ionisation E sporadique pour les trois fréquences, mois par mois. Elles se rapportent respectivement aux cas où le niveau du champ dépasse 3 dB($\mu\text{V}/\text{m}$) et 13 dB($\mu\text{V}/\text{m}$). Une variation saisonnière bien visible y apparaît: l'ionisation E sporadique s'y manifeste comme un phénomène estival; son activité entre septembre et avril est très faible. Un fait remarquable est que l'occurrence de cette ionisation sporadique est plus fréquente sur 62,25 MHz que sur 59,25 MHz, ce qui est contraire à ce que l'on admet généralement au sujet de l'influence de la fréquence sur ce phénomène. Cependant, dans une comparaison de cette sorte, il est important de prendre en considération la distribution géographique des sources d'émission sur chaque fréquence ainsi que leur nombre. Bien que l'on trouve moins de stations fonctionnant sur 62,25 MHz que sur 59,25 MHz, leur répartition sur un arc ayant pour centre Aberystwyth est beaucoup plus large, aussi le nombre des trajets de propagation possibles pourrait-il sans doute être plus grand sur 62,25 MHz que sur 59,25 MHz.

Les Fig. 7a) et 7b) montrent que le maximum d'activité a lieu en juin. Les pourcentages du temps total soumis à l'analyse pendant lequel on a observé des phénomènes d'ionisation E sporadique sont résumés dans le Tableau II pour chacune des trois fréquences.

TABLEAU II – Pourcentages maximaux du temps pendant lequel on a observé en moyenne la propagation par ionisation E sporadique

	59,25 MHz	62,25 MHz	77,25 MHz
3 dB ($\mu\text{V/m}$)	8	12	2
13 dB ($\mu\text{V/m}$)	5	6	1,3

Les Fig. 8a) et 8b) montrent la variation diurne moyenne de la durée des phénomènes d'ionisation E sporadique pour les mois d'été (mai à août).

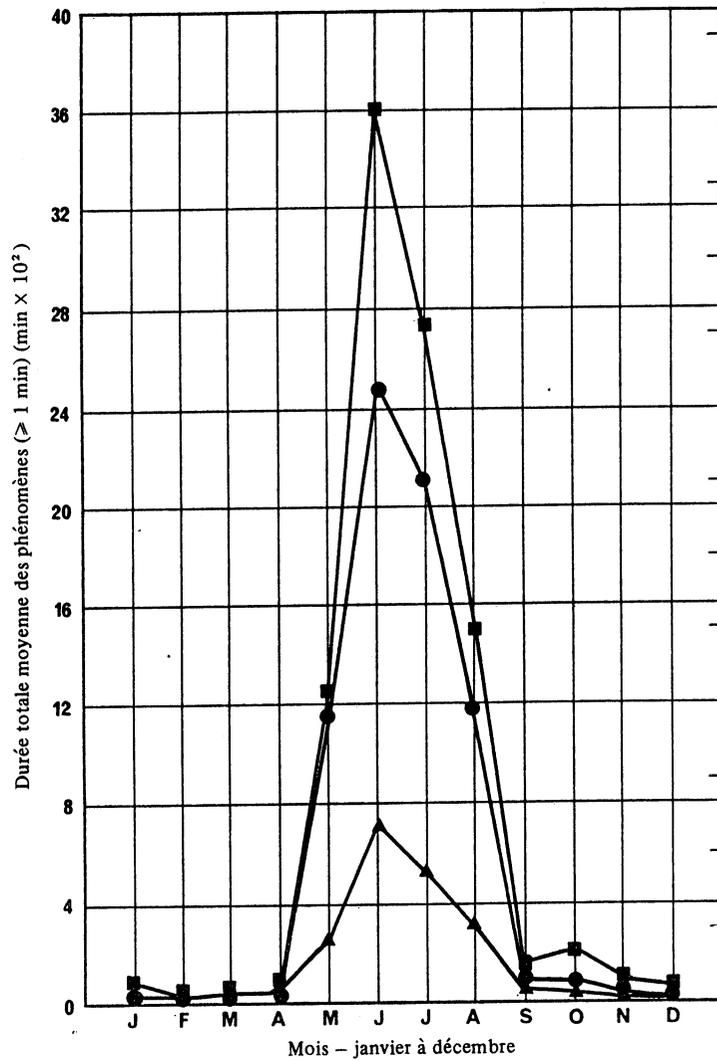
Les courbes relatives aux fréquences 59,25 et 62,25 MHz présentent deux maxima, tandis que, sur la fréquence 77,25 MHz, on a un maximum unique, le soir. Il convient d'ajouter que les variations diurnes se sont révélées extrêmement variables d'un mois à l'autre.

Les distributions des durées des phénomènes qui, en période estivale, dépassent les deux niveaux de seuil pour la fréquence 62,25 MHz sont représentées sur la Fig. 9. On observe deux choses:

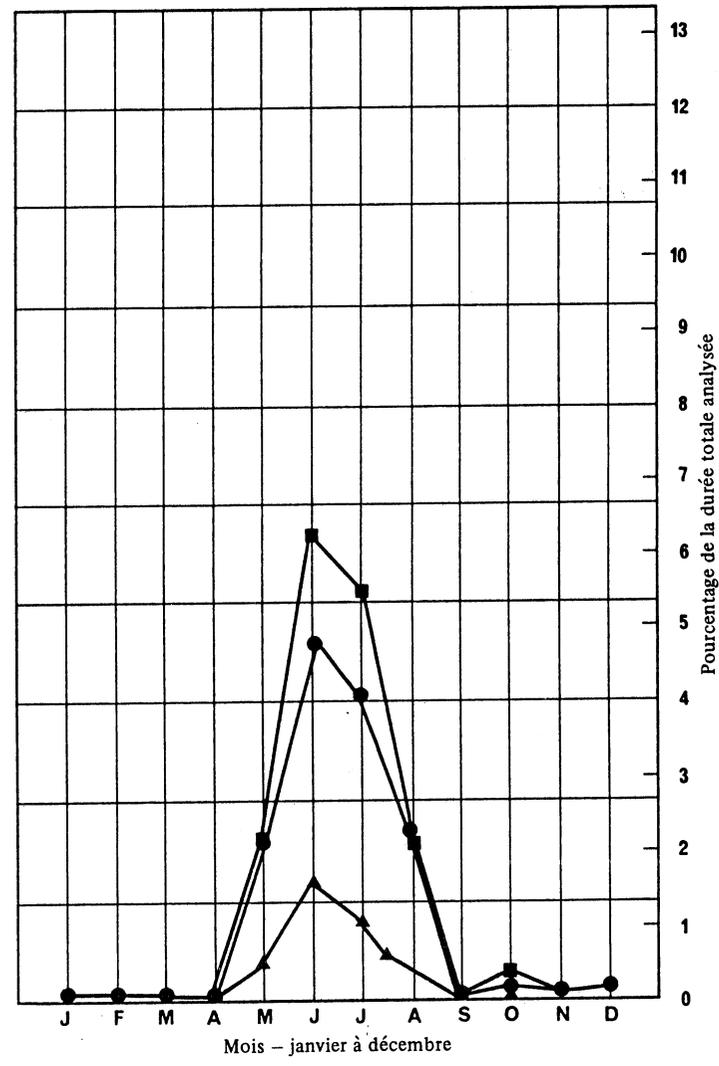
- les phénomènes dont la durée est la plus courte sont les plus fréquents: environ 75% des phénomènes dont le niveau dépasse 3 dB($\mu\text{V/m}$) ont une durée inférieure à 3 min et 75% de ceux dont le niveau dépasse 13 dB($\mu\text{V/m}$) ont une durée inférieure à 4 min;
- les phénomènes les plus marqués (dépassement du seuil de 13 dB) ont tendance à être plus longs que ceux observés au-dessus du seuil le plus bas (3 dB($\mu\text{V/m}$)).

Des distributions semblables ont été obtenues pour les fréquences 59,25 et 77,25 MHz; elles font apparaître une légère influence de la fréquence, les phénomènes tendant à être plus brefs sur la fréquence la plus élevée. D'autres études de la durée des phénomènes ont mis en évidence des augmentations du nombre des phénomènes les plus brefs qui coïncident avec des averses récurrentes de météores, ce qui indique une contribution de la propagation associée aux traînées météoriques de longue durée.

Une distribution ressemblant à celle de la Fig. 9 a été obtenue à l'issue d'une brève étude effectuée par l'UER sur trois trajets pour le mois de juin 1971. L'UER a trouvé que cette distribution est sensiblement indépendante de la longueur du trajet [UER, 1976].



a) Niveau de seuil 3 dB



b) Niveau de seuil 13 dB

FIGURE 7 - Variations saisonnières de la durée totale moyenne des phénomènes pour lesquels les champs dépassant 3 dB($\mu V/m$) et 13 dB($\mu V/m$)

Fréquence (MHz):

● 59,25 ■ 62,25 ▲ 77,25

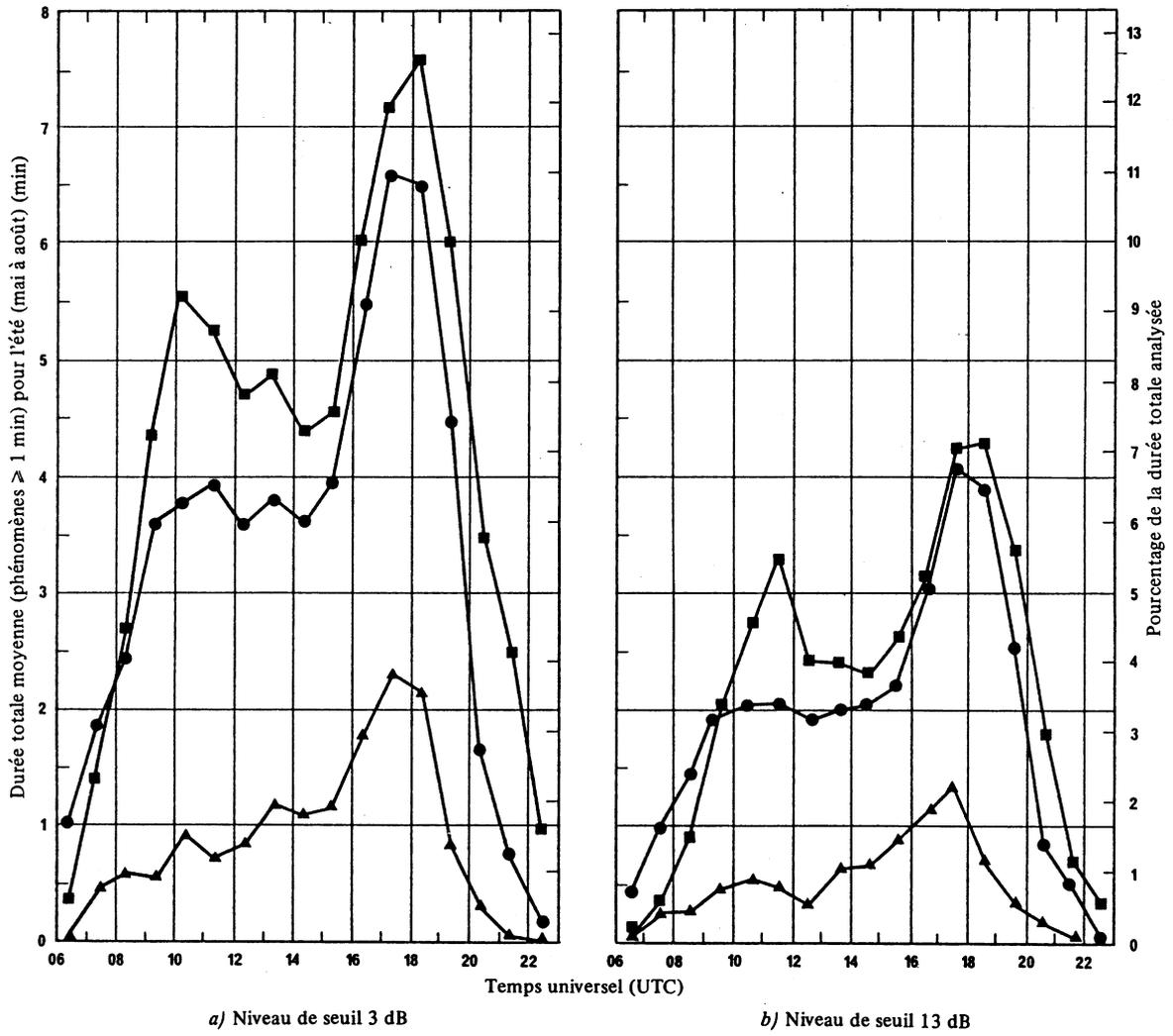


FIGURE 8 - Variations diurnes de la durée totale moyenne des phénomènes pour lesquels les champs ont dépassé 3 dB($\mu V/m$) et 13 dB($\mu V/m$)

Fréquence (MHz):

● 59,25

■ 62,25

▲ 77,25

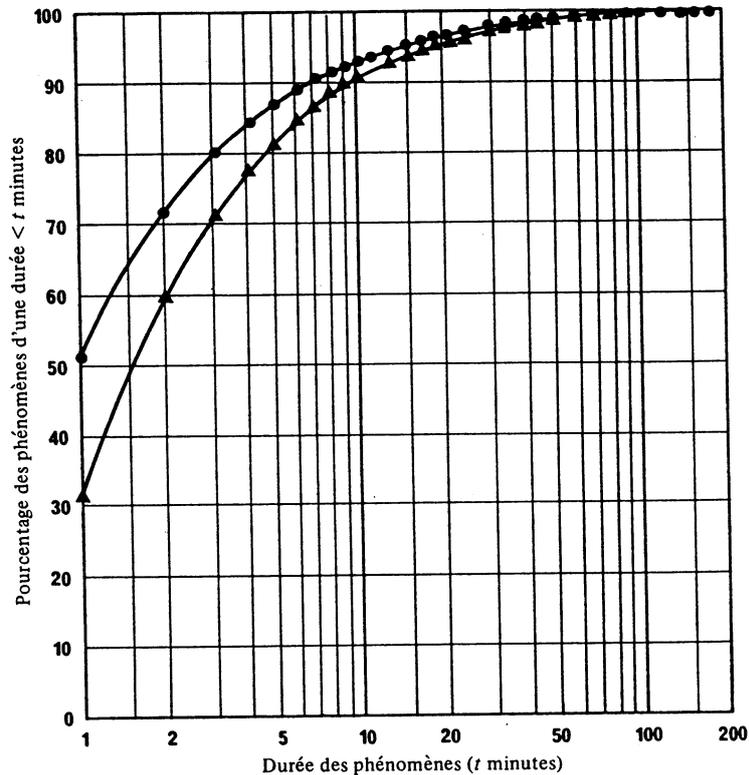


FIGURE 9 – Distribution cumulative des phénomènes d'ionisation E sporadique, pendant l'été, en fonction de leur durée, pour les deux niveaux de seuil. Observations faites à Aberystwyth sur 62,25 MHz

Niveau de seuil ($\mu\text{V/m}$):

- 3 dB
- ▲ 13 dB

Canivenc [1988] _____ a publié des rapports détaillés établis sur la base d'observations effectuées par des radioamateurs à des fréquences allant jusqu'à 144 MHz dans la région de l'Europe.

3.3.3 Latitudes élevées

Des fréquences de plasma atteignant 14,9 MHz à une altitude de 100 km ont été observées près de Fairbanks, Alaska [Wilson et autres, 1976]. Dans l'hypothèse d'un facteur de sécante limité par la courbure de la Terre et supposé égal à 5, la MUF est égale à 74,5 MHz. La propagation par l'ionisation E sporadique sur des trajets polaires atteignant 5000 km a été observée avec des MUF allant jusqu'à 46 MHz [Hunsucker, 1979].

3.4 Evaluation du champ de propagation par E sporadique

L'unique source importante et continue de données concernant E sporadique est le réseau mondial des stations ionosphériques. Il est par conséquent important de développer des méthodes quantitatives pour déterminer, à partir des données obtenues en incidence verticale, les caractéristiques des transmissions en incidence oblique. Une étude de ce problème a été faite, pour les Etats-Unis d'Amérique, par Davis et autres [1959].

Le problème a aussi été étudié au Japon par Miya et Sasaki [1966] et par Miya et autres [1978]. E sporadique est d'abord caractérisée par son coefficient de réflexion Γ observé sur des liaisons en ondes métriques. L'étude suggère que si $\Gamma \leq 45$ dB, la réflexion sur E sporadique est spéculaire, tandis que si $45 \text{ dB} < \Gamma < 70 \text{ dB}$, la propagation implique une diffusion. Des courbes permettent de calculer Γ en fonction du rapport $f/foEs$, où f est la fréquence d'émission et $foEs$ la fréquence critique, sous incidence verticale, de l'onde ordinaire réfléchi sur E sporadique que l'on relève sur les ionogrammes. On possède ainsi des estimations pour la propagation par E sporadique par un bond unique (0 à 2600 km) et par deux bonds (2600 à 4000 km). Cette méthode a l'avantage de tenir compte de la perte de couplage entre l'antenne et le milieu de propagation.

Le Groupe de travail intérimaire 6/8 a étudié l'affaiblissement de réflexion du signal transmis par la couche E sporadique en appliquant la méthode d'analyse utilisée dans l'étude conduite au Japon et ci-dessus exposée. Les travaux ont fait appel à de nombreuses données obtenues à des latitudes moyennes, y compris des données tirées des campagnes de mesure organisées par l'UER de 1962 à 1972 [UER, 1976]. La méthode élaborée par le GTI 6/8 pour calculer l'intensité des signaux en ondes métriques transmis par l'intermédiaire de E sporadique, pour un certain pourcentage du temps d'occurrence, est décrite dans l'Annexe I à la Recommandation 534. Cette méthode n'est pas seulement applicable dans le cas des ondes métriques, mais on pense qu'elle est également valable dans la moitié supérieure de la bande des ondes décamétriques, s'il est tenu compte de l'absorption sans déviation dans la région D [CCIR, 1974-78].

Une série de mesures a été effectuée en Italie en 1973 et 1974 à des distances comprises entre 1000 km et 2500 km d'émetteurs de télévision pour déterminer, à 55 MHz environ, le champ brouilleur dû à la propagation par E sporadique. Les résultats obtenus ont indiqué un maximum aplati du champ à une distance proche de 1800 km; ils concordent bien avec les résultats des prévisions fondées sur la méthode décrite par Miya et autres [1978].

Une méthode a été mise au point en URSS permettant de calculer l'irrégularité horizontale de la couche Es qui se caractérise par l'angle d'inclinaison des isolignes de densité électronique déduites de données obtenues par sondage vertical. Cette méthode a été utilisée pour calculer les effets de focalisation et de défocalisation sur les ondes réfléchies provoqués par la couche Es [Kerblai et Kishcha, 1985].

L'analyse de données provenant de la ceinture équatoriale montre que le pourcentage du temps d'occurrence de l'ionisation E sporadique est beaucoup plus élevé pour les trajets dont le point de réflexion est situé dans la ceinture équatoriale et l'on constate qu'il est en relation sensiblement linéaire avec la fréquence maximale de réflexion verticale; ce comportement est donc différent de la relation logarithmique bien connue sous le nom de la loi de Phillips, admise aux latitudes moyennes.

Des études faites à l'Institut Max-Planck [Möller, 1963], en utilisant des transmissions par impulsions en ondes décamétriques avec des émetteurs de diverses puissances sur un trajet de 1965 km à des latitudes moyennes indiquent que la propagation par E sporadique pourrait être sensible à la puissance. C'est ainsi qu'une variation de 10 dB de la puissance de l'émetteur pourrait entraîner une légère modification (6 à 8%) de la MOF-Es. Pendant les mois d'été, la sensibilité à la puissance semble varier selon l'heure du jour, ce qui indique qu'il existe peut-être une corrélation entre cette sensibilité et la structure physique E sporadique (voir le Rapport 255).

On a étudié en URSS la propagation en incidence oblique sur des trajets d'environ 1000 km et à des fréquences comprises entre 4,5 et 40 MHz, en effectuant des sondages au voisinage des points milieux des trajets; cette étude a permis de formuler les conclusions suivantes [Kerblai et autres, 1973, 1979]:

- le taux d'évanouissement est faible (0,01 à 0,1 Hz) lorsque la réflexion sur E sporadique est spéculaire, mais augmente lorsqu'une diffusion commence à se manifester (0,05 à 0,4 Hz);
- la loi de la sécante (relation entre les valeurs de $foEs$ sous incidence verticale et sous incidence oblique) donne des résultats valables en ondes décamétriques; par contre, en ondes métriques, les valeurs fournies par cette loi sont trop faibles (1,2 à 1,3 fois trop petites);
- les valeurs des effets de focalisation et de défocalisation au cours de la propagation par Es sont comprises en moyenne entre 2 et 4 dB, et entre 5 et 7 dB respectivement; dans certains cas (4% du nombre total de cas concernant la couche Es), la défocalisation atteint 10 à 13 dB.

4. Tableau des principales causes de brouillage pour les stations travaillant sur des fréquences de 30 à 300 MHz

Origine des brouillages	Zone de latitudes	Période où les brouillages sont intenses	Valeur approximative de la fréquence de la plus haute affectée d'un brouillage intense	Valeur approximative (MHz) au-dessus de laquelle le brouillage est négligeable	Distances approximatives entre lesquelles les brouillages se font sentir (km)	Principales caractéristiques
Réflexions par la couche F normale	Latitudes moyennes	Jour, équinoxe et hiver, activité solaire maximale	50	60	Trajets E-O 3000-6000 ou trajets N-S 3000-10 000	Occurrence généralement conforme à la morphologie de la couche normale.
	Latitudes basses	Entre l'après-midi et la fin de la soirée, activité solaire maximale	60	70		
Réflexions par l'ionisation E sporadique	Latitudes élevées	Nuit	70	90	500-4000	Principalement pendant les mois d'été aux latitudes moyennes. Début et fin soudains, commençant plus tard et se terminant plus tôt à mesure que la fréquence d'exploitation augmente. Zone concernée relativement restreinte et mobile. Durée plusieurs minutes ou plusieurs heures. Pas de renforcement du signal associé sur une courte distance.
	Latitudes moyennes	Jour et soir - Été	60	83-135 ⁽¹⁾		
	Latitudes basses	Jour	60	90		
Diffusion par E sporadique	Latitudes basses	Soir jusqu'à minuit	60	90	Jusqu'à 2000	
Réflexions par l'ionisation météorique	Toutes latitudes	Surtout pendant les averse météoriques	Peut être importante sur n'importe quelle fréquence de la gamme		Jusqu'à 2000	Salves de signaux d'une durée allant d'une fraction de seconde à plusieurs minutes. Variation diurne marquée, maximum 6 heures, heure locale, minimum 18 heures. Une certaine activité présente à toutes les heures, avec augmentation considérable pendant les périodes d'averses prévisibles.
	Latitudes élevées	Fin de soirée et nuit				Associée aux perturbations géomagnétiques, en général lorsque l'indice K local atteint 5 ou plus. Note grinçante caractéristique due à l'effet Doppler multiple. Durée normale quelques heures, souvent entre les heures de l'après-midi et minuit.
Diffusion dans la région F	Latitudes basses	Soir, jusqu'à minuit, équinoxe	60	80	1000-4000	
	Latitudes basses	Soir, jusqu'à minuit	60	80	4000-9000	Trajets généralement alignés de façon symétrique de part et d'autre de l'équateur d'inclinaison. En général, aux environs des périodes d'équinoxe avec réapparitions régulières. Signaux forts. Se référer au corps du texte pour plus de détails.
Effets spéciaux de propagation transéquatoriale	Latitudes basses	Soir, jusqu'à minuit	Peut s'étendre aux ondes décimétriques		Jusqu'à 2 000 km	Associées à une haute pression atmosphérique. Les effets couvrent une vaste zone avec un mouvement lent, une augmentation et un déclin progressifs, avec renforcement des signaux normaux sur des distances plus courtes. Peuvent durer plusieurs jours. Effets comparables sur une large gamme de fréquences, en général au-delà de celles qui sont affectées par la couche sporadique E.
Proposition troposphérique anormale ²	Toutes latitudes	Toute saison ou heure	Généralement au-delà de la bande des ondes métriques			

(¹) Pour 0,1% du temps, pendant les heures comprises entre 08 h 00 et 23 h 00 (heure locale), de mai à août (111 min au total), on peut déduire de l'Annexe I à la Recommandation 534 les fréquences suivantes, pour une distance de 1800 km et pour $\Gamma = 30$ dB aux latitudes moyennes:

Région A (Europe et Afrique du Nord) 83 MHz Région C (Asie) 135 MHz
Région B (Amérique du Nord) 93 MHz Région D (Moyenne pour l'hémisphère nord) 115 MHz

(²) Voir la Recommandation 370.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BATEMAN, R., FINNEY, J. W., SMITH, E. K., TVETEN, L. H. et WATTS, J. M. [1959] IGY observations of F-layer scatter in the Far East, *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, 403-405.
- BOWEN, E. D., FAY, W. J. et HERITAGE, J. L. [1968] VHF characteristics of the transequatorial ionosphere. *J. Geophys. Res.* Vol. 73, 2469-2476.
- CANIVENC, S. [1988] Propagation via la couche E sporadique et propagation sur les irrégularités alignées sur le champ magnétique terrestre. Analyse générale de quinze années d'observation dans la bande VHF. *Radio REF*, 01, 20-23; 02, 18-21; 03, 16-19.
- CZECHOWSKY, P. [1970] Berechnung eines Stromsystems in der polaren E-Region (Calcul d'un système de courant dans la région E polaire). *Z. für Geophysik*, Vol. 36, 647-650.
- DAVIS, R. M., SMITH, E. K. et ELLYETT, C. D. [1959] Sporadic E at VHF in the USA *Proc. IRE*, Vol. 47, 762-769.
- EDWARDS, K.J., KERSLEY, L. et SHRUBSOLE, L.F. [1984] - Sporadic-E propagation at frequencies around 70 MHz. *Radio and electronic engineer*, Volume 54 (5), 231-237.
- FERGUSON, J. A. et BOOKER, H. G. [1983] A scattering theory of VHF transequatorial propagation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 45, 641-657.
- GIBSON-WILDE, B. C. [1969] Relation between the equatorial anomaly and transequatorial VHF radio propagation. *Radio Sci.*, Vol 4, 797-802.
- GIRÁLDEZ, A. E. [1980] Equatorial belt sporadic-E statistics, LIARA C-30. Laboratorio Ionosférico de la Armada, República Argentina.
- HAGG, E.L., MULDREW, D.B. et WARREN, E.S. [1959] - Spiral occurrence of sporadic-E. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 14, 345-347.
- HERON, M. L. et McNAMARA, L. F. [1979] Transequatorial VHF propagation through equatorial plasma bubbles. *Radio Sci.*, Vol 14, 897-910.
- 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. [1979] Morphology and phenomenology of the high-latitude E- and F-regions, *Solar-Terrestrial Predictions Proceedings*, Vol. II, Working Group Reports and Reviews, 543-561 Ed. R. F. Donnelly, US Dept. of Commerce US Govt. Printing Office, No. 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.
- KERBLAÏ, T. S. et KISHCHA, P. V. [1985] Calculation of the horizontal Es layer inhomogeneity and its effects on radio wave field attenuation. *Geomag. i Aeronom.*, 3, 495-497.
- KERBLAÏ, T. S., MINULLIN, R. G., MAKARENKO, S. F., NASYROV, A. M., NASYROV, G. N., NOSOVA, G. N. et PODOLSKAYA, T. Y. [1979] Angles d'azimut des ondes radioélectriques réfléchies sur la couche Es. Dans le volume intitulé *Questions concernant la propagation des ondes radioélectriques aux latitudes hautes et moyennes*, 71-77 (en russe), IZMIRAN, Académie des Sciences de l'URSS, Moscou.
- KERBLAÏ, T. S., NOSOVA, G. N., MINULLIN, R. G. et KURGANOV, R. A. [1973] Periody fluktuatsii signalov s chastotoi 27.8 MGts. otrazhenykh ot intensivnykh sloev Es (Les périodes de fluctuations des signaux de 27,8 MHz réfléchies sur les couches Es intenses). Collection d'articles «*Questions concernant la propagation en ondes décimétriques*». IZMIRAN. Académie des Sciences de l'URSS, Moscou.
- KURIKI, I., TANOHATA, K., SAKAMOTO, T. et IGUCHI, M. [1972] Propagational mode deduced from signal strength in the VHF band of the trans-equatorial path, *J. of Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 19, 175-195.
- LARI, G., TAGHOLM, L. F. et BELL, C. P. [1967] Etude de la propagation ionosphérique des ondes métriques (Bande I). Techn. 3085-F. Centre technique de l'UER, 32, Avenue Albert-Lancaster, 1180-Bruxelles, Belgique.

- LI ZANJU [1988] - "On the geographic occurrence of ionospheric Sporadic-E in the Far East". Proceedings of Symposium international sur la propagation radioélectrique, Pékin, Chine.
- McCUE, C. G. et FYFE, D. F. [1965] Transequatorial propagation. Task Bridger introductory review. *Proc. IREE* (Australie), Vol 26, 825-835.
- McNAMARA, L. F. [1973] Evening-type transequatorial propagation on Japan-Australia circuits. *Austral. J. Phys.*, Vol. 26, 521-543.
- McNAMARA, L. F. [1974a] Sporadic E propagation modes on transequatorial circuits. Report IPS-R25, Ionospheric Prediction Services, Sydney, Australie.
- McNAMARA, L. F. [1974b] Unusual night-time propagation modes on the Guam and Manila-N.W. Cape Circuits. Report IPS-R27 Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.
- MINOULLINE, R.G., [1988] - Periodichnosti v variatsiyakh mediannykh znacheny predelnykh chastot sloya Es (périodicités des variations des valeurs médianes des fréquences limites de la couche E_S). Geomagnetizm i aeronomiya, Vol. 28, 969-975.
- MINOULLINE, R.G., NAZARENKO, V.I. et SHERSTYUKOV, O.N. [1988] - Vysoty i koeffitsienty otrazheniya ot sloya Es (Hauteurs et coefficients de réflexion de la couche E_S). Ionosfernye issledovaniya, Moscow, No. 44, 48-55.
- MIYA, K. et SASAKI, T. [1966] Characteristics of ionospheric Es propagation and calculation of Es signal strength. *Radio Sci.*, Vol. 1 (nouvelle série), 99-108.
- MIYA, K., SHIMIZU, K. et KOJIMA, T. [1978] Oblique incidence sporadic-E propagation and its ionospheric attenuation. *Radio Sci.*, Vol. 13, 3, 559-570.
- MÖLLER, H. G. [1963] Impulsübertragungsversuche mit schräger Inzidenz und veränderlicher Frequenz über Entfernungen zwischen 1000 km und 2000 km (Essais d'émission d'impulsions sous incidence oblique et sur une fréquence variable effectués sur une distance comprise entre 1000 et 2000 km). *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen* Nr. 1149.
- MORO, E. S. M. [1984] Anomalous VHF Propagation. *Contributions on Radiopropagation and Electromagnetic Compatibility 1982-1984*. SECYT, Secretaría de Ciencia y Técnica, Buenos Aires, Argentine.
- NIELSON, D. L. et CROCHET, M. [1974] Ionospheric propagation of HF and VHF radio waves across the geomagnetic equator. *Rev. Geophys.*, Vol 12, 688.
- OYINLOYE, J. [1988] - "Caractéristiques ionosphériques et propagation radioélectriques dans la zone équatoriale", *Journal des Télécommunications*, Volume 55-5, 322-335.
- REINISCH, B. [1965] Die Bedeutung von Echos an der sporadischen E-Schicht bei Impulsfernübertragung über 1700 km (Athen-Breisach) (L'importance des échos de la couche E sporadique dans les transmissions par impulsions sur une distance de 1700 km) (Athènes-Breisach). *AEÜ*, Vol. 19, 361-366.
- SAKSENA, R. C. [1979] Anomalous long distance TV reception at Delhi. *Indian J. Radio and Space Phys.*, Vol. 8, 351-356.
- STEVENS, E. E. [1968] The significance of sporadic-E propagation in determining the MUF. *Ionospheric Radio Communications*, 289-293 Ed. K. Folkestad, Plenum Press, New York, NY 10011, Etats-Unis d'Amérique.
- TANOHATA, K., KURIKI, I., IGUCHI, M., YAMASHITA, K. et SAKAMOTO, T. [1980] The results of long-term experiment of transequatorial VHF wave propagation, *Rev. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 26, 885-897.
- TAO, K., OCHI, F., YAMAOKA, M., WATANABE, S., WATANABE, C. et TANOHATA, K. [1970] Experimental results on VHF transequatorial propagation. *J. of Radio Res. Labs.* (Tokyo), Vol. 17, 83-101.
- UER, [1976] Ionospheric propagation in Europe in VHF television band I, UER Document technique TECH 3214, Volumes I et II, Centre technique, 32, Avenue Albert-Lancaster, 1180-Bruxelles, Belgique.
- VILLARD, D. G. Jr., STEIN, S. et YEH, K. C. [1957] Studies of transequatorial ionospheric propagation by the scatter-sounding method. *J. Geophys. Res.*, Vol 62, 399-412.
- WAGNER, R. A., SNYDEP, A. L. et AKASOFU, S. I. [1973] The structure of the polar ionosphere during exceptionally quiet periods. *Planet. Space Sci.*, Vol. 21, 1911-1922.
- WILSON, C. R., HUNSUCKER, R. D. et ROMICK, G. J. [1976] An auroral infrasonic substorm investigation using Chatanika radar and other geophysical sensors, *Planet. and Space Sci.*, Vol. 24, 1155-1175.
- WINKLER, C. [1981] Radio wave guidance at VHF through equatorial plasma bubbles. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 43, 307-316.
- WRIGHT, J. W. et HUNSUCKER, R. D. [1983] Estimation of turbulent energy dissipation, winds and ionospheric structure from dynasonde measurements, *Radio Sci.*, Vol. 18, 988-994.

Documents du CCIR

[1974-78]: 6/251 (URSS).

[1978-82]: 6/74 (GTI 6/8).

[1982-86]: 6/231 (Inde).

BIBLIOGRAPHIE

BAILEY, D. K. [1962] Ionospheric forward-scattering. *Monograph on ionospheric radio*, 189-199. Ed. W. J. G. Beynon, Elsevier, Londres, Royaume-Uni.

COLLINS, C. et FORSYTHE, P. A. [1959] A bistatic radio investigation of auroral ionization. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 13, 315-345.

DIEMINGER, W., ROSE, G. et WIDDEL, H. U. [1963] Probabilité de brouillages dans une même voie, causés en Afrique, dans les bandes I, II et III par la diffusion et la réflexion sur les couches E et F. *J. des Télécomm.*, Vol. 30, 251-256.

RAPPORT 251-5*

COMMUNICATIONS UTILISANT LA PROPAGATION
PAR IMPULSIONS MÉTÉORIQUES

(Question 41/6)

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

1. Introduction

La diffusion par l'ionisation provoquée par les traînées météoriques constitue un moyen de communication en ondes décimétriques et métriques. On a pu exploiter des circuits de télécommunication bidirectionnels expérimentaux sur des fréquences comprises entre 30 et 100 MHz, à des distances allant jusqu'à 1300 km. Pour ces communications, on tire parti de créneaux de propagation créés par les traînées météoriques; comme valeur moyenne sur plusieurs minutes, on peut escompter des débits d'information allant jusqu'à 100 bauds.

Certaines techniques modernes de télécommunication, qui ont recours à des mini-ordinateurs pour effectuer des opérations interactives entre terminaux d'émission et de réception, ont rendu les communications par impulsions météoriques relativement plus intéressantes pour des applications spéciales dans lesquelles on peut tolérer des retards atteignant éventuellement quelques minutes. Parmi ces applications, on peut citer la transmission intermittente d'informations d'un grand nombre de stations éloignées vers une station centrale, les transmissions à destination et en provenance de terminaux mobiles, enfin les communications sur ligne de service pour des liaisons techniques à l'appui de circuits à ondes courtes de longueur moyenne.

La première fois que l'on s'aperçut que des météores étaient capables de provoquer une ionisation dans la haute atmosphère, c'est lorsqu'on observa une corrélation entre la propagation de signaux en ondes décimétriques à travers l'Atlantique et des averses de météores [Pickard, 1931]. En 1943, une surveillance systématique de stations à ondes métriques éloignées effectuée aux Etats-Unis montra que l'on pouvait parfois recevoir, à des distances allant jusqu'à 2200 km, des paquets de signaux exempts de distorsion [Allen, 1948]. Ces paquets duraient jusqu'à une seconde et leur fréquence d'apparition présentait une variation diurne en corrélation avec ce que l'on savait des météores visuels et avec les estimations théoriques s'y rapportant.

Dans des expériences ultérieures, on recourut aussi bien à des techniques de rétrodiffusion que de prodiffusion. Aux résultats des études théoriques était venue s'ajouter, dès le milieu des années 50, une importante masse de renseignements pratiques sur la propagation par impulsions météoriques. Cette activité a été résumée dans un important ensemble d'articles comportant la description de deux systèmes de communication expérimentaux [Forsyth et autres, 1957; Vincent et autres, 1957].

Au cours de la décennie suivante, on fit des travaux qui permirent de mieux évaluer les performances probables d'un système de communication utilisant les impulsions météoriques. L'état de la question fut résumé dans un livre [McKinley, 1961] et dans un article tout à fait complet [Sugar, 1964]. Avec un système expérimental relativement compliqué (répétition automatique de l'émission en présence d'erreurs (ARQ) et réception en diversité), on peut faire des transmissions avec un débit minimal de 50 bauds sur un circuit de 1000 km [Bartholomé et Vogt, 1968]. Kokjer et Roberts [1986] ont décrit des réseaux de communications par impulsions météoriques. Cannon et Reed, [1987], ont donné une historique des systèmes de communications par impulsions météoriques et ont examiné aussi la théorie et les principes fondamentaux de la propagation par impulsions météoriques. L'accent est mis sur les caractéristiques spéciales qui distinguent les communications par impulsions météoriques des autres modes de radiocommunications, ce qui permet de suivre l'évolution des systèmes de communications par impulsions météoriques.

* Ce Rapport est porté à l'attention de la Commission d'études 3.