

PROPAGATION À DES FRÉQUENCES SUPÉRIEURES À LA MUF DE RÉFÉRENCE

(1997-1999)

1 Introduction

Selon la Recommandation UIT-R P.373, la MUF de référence est «la fréquence la plus élevée à laquelle une onde radio-électrique peut se propager entre des stations terminales données, en une occasion spécifiée, par réfraction ionosphérique seulement». Dans cette même Recommandation, il est également précisé que cette fréquence n'est pas nécessairement la fréquence maximale utilisable dans ces conditions: on y définit également une MUF d'exploitation, soit la fréquence la plus élevée permettant une qualité acceptable à un moment donné, dans des conditions de fonctionnement spécifiées.

Les divers phénomènes qui peuvent contribuer à la propagation à des fréquences supérieures à la MUF de référence (désignée ci-après, dans un souci de commodité, propagation FSMR) sont décrits dans le § 2. Toutefois, la situation est rendue complexe par deux raisons principales:

- la définition de la MUF de référence implique qu'elle est déterminée par un mode de propagation atypique et que l'on n'y tient pas compte d'éventuelles différences d'amplitude du signal par rapport au mode normal;
- pour l'UIT-R, il est nécessaire de prévoir les valeurs d'intensité du signal; or, les prévisions sont fondées sur des cartes traçant le profil mensuel médian des caractéristiques de l'ionosphère, de sorte que les valeurs instantanées de la MUF de référence ne peuvent être connues. Par ailleurs, en raison des variations au jour le jour des caractéristiques ionosphériques, il peut arriver que la fréquence utilisée soit tantôt supérieure, tantôt inférieure à la MUF de référence.

On notera que les valeurs instantanées de la MUF de référence ne peuvent être déterminées qu'à partir d'un examen d'ionogrammes, mesurés le long du trajet de propagation, sous incidence oblique. On peut approximer ces valeurs à partir de sondes à incidence verticale judicieusement positionnées sur le trajet le long du grand cercle, en supposant une homogénéité ionosphérique ou des gradients horizontaux spécifiques. Des systèmes d'évaluation des canaux en temps réel ne donneront pas en général d'indication précise sur la MUF de référence.

2 Phénomènes de propagation observables aux fréquences supérieures à la MUF de référence

Les phénomènes de propagation et les caractéristiques de l'ionosphère pouvant assurer la propagation FSMR sont les suivants:

2.1 Irrégularités ionosphériques

L'ionosphère ne peut manquer de contenir des inhomogénéités spatiales dans l'ensemble du volume responsable de la réflexion de la plupart des composantes contribuant à la puissance du signal reçu; ces inhomogénéités peuvent se produire à toutes les altitudes, et toutes celles apparaissant en dessus de l'altitude de réflexion des rayons peuvent être importantes, voire significatives. Dans des conditions faibles, les fluctuations de la densité électronique, spatialement aléatoires, auront des intensités qui varient selon et la position, et le temps; de grands changements se produisent, par exemple, en présence de perturbations ionosphériques migratoires. Des études théoriques ont été réalisées à l'aide de ionosphères modèles représentatives des conditions moyennes existant à des latitudes médianes; les fluctuations ionosphériques y étaient de type turbulent, avec fonction de corrélation spatiale de forme kolmogorovienne. Une analyse par diffraction en termes de composantes stochastiques (fluctuationnelles) et de composantes cohérentes permet de conclure que les intensités importantes du signal dues à ce phénomène ne se produisent qu'à des fréquences de 60 kHz au plus au-dessus de la MUF de référence, soit une extension inférieure (voir ci-dessous) aux résultats normalement constatés en pratique.

Dans d'autres conditions, des irrégularités ionosphériques, fortes mais spatialement circonscrites, peuvent être présentes, comme celles à l'origine du phénomène de couche F étalée que l'on observe dans les ionogrammes à incidence verticale. Un étalement en distance ou en fréquence peut rendre possible une propagation par réfraction ou par diffusion à des fréquences supérieures à la MUF de référence dans la partie moyenne de cette région de l'ionosphère. Ce phénomène est observé sur certains ionogrammes à incidence oblique où la fréquence maximale observée est déterminée par une «fosse» au-delà de la fréquence de jonction des rayons de petits et grands angles. En général, ces irrégularités ionosphériques présentent des densités électroniques proportionnelles à la masse ionosphérique, de sorte que ces extensions de fréquences seront d'autant plus importantes que la MUF de référence sera grande.

2.2 Rétrodiffusion et diffusion latérale par le sol

La propagation en dehors du grand cercle, faisant intervenir deux sauts ionosphériques et une diffusion intermédiaire à la surface de la Terre, peut permettre une propagation à des fréquences au-delà de la MUF de référence sur le grand cercle; les signaux de diffusion correspondants ont souvent des vitesses d'évanouissement supérieures à 1/s et sont reçus selon des angles d'incidence d'azimut variable. La puissance du signal décroît progressivement à un niveau de 25-40 dB inférieur à celui du mode correspondant au grand cercle à mesure que le trajet de propagation s'écarte du grand cercle. Les coefficients de diffusion de la surface de la Terre peuvent être très variables selon la nature du sol et l'angle d'élévation. Le coefficient de diffusion par le sol est fonction de l'azimut et de la différence d'azimut entre les rayons descendants et les rayons montants, de la présence de masses de terre ou d'eau, du relief du sol et aussi de la focalisation due à la courbure de l'ionosphère pour des angles de très faible incidence. L'intensité des signaux diffusés soit par la mer, soit par la terre ont fait l'objet d'observations contradictoires. L'intensité de la rétrodiffusion et de la diffusion latérale aux fréquences supérieures à la MUF de référence correspondant au trajet sur le grand cercle dépendra des longueurs de trajet respectives et variera proportionnellement à leurs MUF de référence respectives. L'affaiblissement sur le trajet le moins important devrait normalement correspondre au faisceau d'intersection des distances de saut autour de l'émetteur et du récepteur à cause du phénomène de focalisation; toutefois, dans la pratique la directivité des antennes émettrices et réceptrices peut influencer sur l'axe de la puissance maximale du signal reçu: pour certains c'est là le principal phénomène de la propagation FSMR dans le cas des trajets à bond unique jusqu'à 4 000 km de longueur.

2.3 Rétrodiffusion par mode d'ordre élevé

Il existe une extension du phénomène de rétrodiffusion par le sol en deux bonds, à savoir la rétrodiffusion sur longue distance, avec propagation par bonds multiples. Ce phénomène semble devoir être d'autant plus important qu'il sera en présence d'importants gradients horizontaux de densité électronique de l'ionosphère.

2.4 Propagation par effet de conduit

Dans certains cas, des rayonnements de faible incidence peuvent être captés par des conduits constitués par des profils spécifiques de hauteur de densité électronique. Dans de tels cas, la propagation peut se faire sur de longues distances et à des fréquences supérieures à celles correspondant à la MUF de référence sur le grand cercle. Ce mécanisme, combiné par exemple avec la rétrodiffusion et la diffusion latérale par le sol en dehors du grand cercle, peut faciliter la propagation FSMR.

2.5 Propagation par bonds en corde d'arc

Certains phénomènes de bascule ionosphérique, surtout de part et d'autre de l'équateur magnétique, mais également dans les creux subauroraux, peuvent être à l'origine de trajets de réfraction directe entre deux régions, sans passage intermédiaire par le sol. On a largement observé ce type de propagation transéquatoriale dans le domaine des ondes métriques, type souvent accompagné par un signal en mode diffusion associé à la présence d'irrégularités ionosphériques. Des signaux de ce type, surtout lorsqu'ils sont combinés à une rétrodiffusion et à une diffusion latérale par le sol, peuvent sensiblement faciliter la propagation au-dessus de la MUF de référence.

2.6 Diffusion ionosphérique directe

L'énergie d'un signal peut être diffusée à partir de toute région de l'ionosphère, aussi bien le long du grand cercle que pour toute autre valeur d'orientation. Pour les latitudes élevées, aurorales et équatoriales, d'importants gradients de densité d'ionisation peuvent faciliter un important phénomène de diffusion dans la région F, mais, lorsque l'on n'observe pas ces importants gradients, la diffusion à partir de la région E est généralement plus importante, et se limite dans ce cas à des distances d'environ 2 000 km. Ce mode de diffusion ionosphérique est étudié en détail dans le Rapport 260-2 de l'ex-CCIR (1974) (officiellement supprimé), qui indique au moins pour les fréquences supérieures à 30 MHz que l'intensité du signal varie en raison inverse de 7,5 fois la fréquence.

L'existence d'une diffusion latérale ionosphérique provenant des irrégularités de la Région F, dans les zones aurorales, a été rapportée par plusieurs chercheurs. Dans certains cas les signaux ne s'inscrivant pas dans le grand cercle sont attribués à une diffusion directe causée par des irrégularités ionosphériques en l'absence d'un type ordinaire de réflexion ionosphérique; dans d'autres ils sont considérés comme provenant de modes à bonds multiples; les signaux de diffusion les plus forts étant produits par des irrégularités ionosphériques et entraînant un phénomène de focalisation. On a observé sur les trajets transéquatoriaux des écarts d'azimut pouvant atteindre $\pm 50^\circ$, qui sont confirmés comme dus à une diffusion directe résultant d'inhomogénéités de la couche F à proximité de l'équateur magnétique de la Terre. Les signaux de diffusion dominants ont été attribués à de faibles irrégularités des lignes de champs ou à une réflexion spéculaire à des gradients horizontaux de densité électronique.

2.7 Propagation sporadique dans la région E

L'existence d'une ionisation sporadique de la couche E peut favoriser la propagation, par réflexion partielle ou par diffusion, à des fréquences très élevées. Ce mode n'est pas toujours reconnu et, en tout état de cause, ne figure pas dans la plupart des procédures de prévision. On peut donc y voir un autre élément contribuant à la propagation à des fréquences supérieures à la MUF de référence attendue pour des longueurs de trajet pouvant atteindre 2 000 km.

2.8 Diffusion aurorale

Dans les régions aurorales, certaines irrégularités des lignes de champs, associées à des perturbations géomagnétiques, sont à l'origine d'un type spécial de phénomène E sporadique. Sur les trajets de propagation à proximité des régions aurorales, ces irrégularités peuvent produire une rétrodiffusion directe des signaux à des fréquences de 100 MHz, ou plus; ces composantes du signal ont été modélisées en termes de diffusion faible, et de réflexion critique. Les réflexions dues à ces irrégularités doivent respecter certaines conditions spécifiques de spécularité. La fonction de diffusion volumique a été approximée par une fonction de fréquence exponentielle. On a certes observé une propagation par bonds multiples, mais cet effet est en général limité à des longueurs de trajet inférieures à 2 000 km.

2.9 Diffusion par les météores

La propagation exploitant les phénomènes de réflexion ou de diffusion dus à une ionisation par des météores fait l'objet de la Recommandation UIT-R P.843. Dans des conditions géométriques appropriées, une propagation de brève durée peut se produire largement dans le domaine des ondes métriques pour des longueurs de trajet inférieures à 2 000 km.

3 Données de mesure déjà obtenues et nécessaires

Une bonne partie du volume limité de données de mesure disponibles se compose d'exemples de variations de l'intensité du signal en fonction de la fréquence ou en fonction du temps, sur des trajets spécifiques, variations elles-mêmes associées à des variations de la MUF de référence. Des mesures effectuées sur divers trajets d'une longueur comprise entre 400 et 2 580 km sont décrites par Hagn et autres, [1993].

Les données de mesures et les informations dont on dispose sont insuffisantes pour établir des modèles complets décrivant la dépendance en fonction de la longueur du trajet, du lieu, du temps, etc.

Il faut de toute urgence plus d'informations et de nouveaux types de données de mesures, et en particulier établir les relations de dépendance et le mode d'évolution des phénomènes de propagation dans les différentes régions géographiques par rapport à l'heure, à la saison, à l'époque solaire et au degré de perturbation ionosphérique.

4 Modèles statistiques de l'intensité du signal aux fréquences supérieures à la MUF de référence

Les banques de données de l'UIT-R (Recommandation UIT-R P.845) comportent diverses observations de l'intensité du signal à des fréquences supérieures à la MUF de référence, bien que les valeurs de la MUF de référence correspondant à chaque mesure soient inconnues (il aurait fallu, pour les déterminer, prévoir des mesures spécifiques additionnelles). Dans l'idéal, il aurait fallu effectuer des sondages obliques simultanés sur les trajets de propagation concernés, mais cela n'a pas été possible en règle générale. En conséquence, les résultats doivent être considérés comme des résultats statistiques.

Il convient de noter que, sur un mois, la variation au jour le jour, à une heure donnée, de la MUF de référence se chiffre, d'un décile à l'autre, à 30% à 40% de la valeur médiane de la MUF de référence. Les fréquences utilisées pour les communications dans cette fourchette sont inférieures à la MUF de référence certains jours, et supérieures d'autres jours. Toutefois, les modèles de prévision sur le long terme doivent prendre comme point de départ la MUF de référence médiane, mensuelle. Ainsi, lorsque l'on modélise ces configurations, on cherche à combiner l'intensité du signal sur un trajet de réflexion à une fréquence légèrement inférieure à la MUF de référence médiane, mensuelle, avec les facteurs, décrits plus haut, qui contribuent à une propagation FSMR, puis à donner une représentation statistique des variations au jour le jour. En supposant qu'à une occasion donnée il existe un phénomène de propagation donnant lieu à des signaux de faible puissance au-dessus de la MUF de référence, il ressort alors de la variation au jour le jour de la MUF de référence que les diverses formules (analysées ci-dessous) destinées à refléter un affaiblissement supérieur à la MUF en termes de MUF de référence médiane, mensuelle, doivent inclure un élément indéterminé pour rendre compte du fait que certains jours la MUF de référence est en-dessous de la valeur médiane mensuelle.

Indépendamment de sa variabilité au jour le jour, la ionosphère subit également des changements à l'intérieur d'une heure, changements qui peuvent se traduire par le maintien, pendant une partie d'une heure, de la propagation selon des moyens classiques et par l'existence d'une propagation FSMR pendant d'autres parties de l'heure; c'est en particulier le cas en présence de perturbations ionosphériques migratoires. Des effets d'évanouissement et de focalisation sur les distances de saut, associés au brouillage entre les rayons de petits angles et les rayons de grands angles, peuvent se produire, mais tous doivent être traités statistiquement à l'aide d'estimations de la MUF de référence médiane, mensuelle.

Les approches adoptées permettront d'estimer la probabilité d'obtention de telles valeurs d'intensité du signal, élément qui peut suffire à évaluer la compatibilité. Toutefois, elles ne conviennent pas nécessairement pour prévoir le comportement d'un circuit puisque la fonction de transfert du canal en termes de taux d'évanouissement, l'étalement des temps de propagation et des fréquences, et enfin les décalages de fréquence, peuvent varier selon que les fréquences considérées sont inférieures ou supérieures à la MUF de référence.

5 Définition de l'affaiblissement FSMR

On appelle affaiblissement FSMR la réduction de l'intensité du signal à des fréquences supérieures à la valeur médiane mensuelle de la MUF de référence sur le trajet, par rapport à l'intensité relevée sur un trajet établi par réfraction à une fréquence légèrement inférieure à la MUF de référence.

6 Formules d'affaiblissement connues

Les diverses formules proposées pour l'affaiblissement FSMR ont été décrites par Hagn et autres [1993].

6.1 Le modèle Phillips-Abel

Ce modèle [Phillips, 1963], qui repose sur des mesures effectuées aux Etats-Unis d'Amérique, est le seul, actuellement disponible, à pouvoir être pris en considération pour établir une relation avec les valeurs instantanées de la MUF de référence, bien que dans son implémentation il soit considéré habituellement comme s'appliquant à la MUF de référence médiane, mensuelle. Il suppose que l'ionosphère se compose d'un certain nombre de zones d'ionisation à l'intérieur de la région de réflexion, dont chacune donnerait une MUF de référence différente selon le trajet; ces MUF sont censées être l'objet d'une distribution spatiale normale, avec un écart type σ . D'après Phillips, σ est compris entre 1 et 4 MHz, selon la perturbation ionosphérique, pour une longueur de trajet d'environ 3 000 km. Des mesures ultérieures faites par Wheeler et Hagn indiquent que σ est compris entre 0,9 et 3 MHz. La puissance du signal reçu est exprimée en fonction de la probabilité spatiale de réflexion des ondes.

Dans ce modèle, l'affaiblissement FSMR, L_m (dB), répond à l'équation suivante:

$$L_m = 10 \log p$$

où:

$$p = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x/a} \exp(-x/2\sigma) d(x/a) \quad \text{et } x = f - f_b$$

On notera en particulier que suivant cette formulation L_m dépend de la différence entre la fréquence d'exploitation, f , et la MUF de référence, f_b .

Des versions modifiées de la formulation Phillips-Abel sont utilisées aux Etats-Unis d'Amérique dans le cadre des procédures de prévision de la propagation en ondes décimétriques IONCAP [Teters et autres, 1983] et VOACAP [DeBlasio et autres, 1993]. L'affaiblissement FSMR est déterminé séparément pour chaque mode de propagation actif à l'aide des formules ci-dessus, concernant les MUF de référence médianes mensuelles, et en supposant que σ , le paramètre de variabilité spatiale, est identique à l'écart type des MUF de références journalières.

6.2 Le modèle Suessmann

Le modèle de Suessmann [1990] se fonde sur l'hypothèse d'une diffusion par le sol à deux bonds et sur l'analyse des données de mesure de la banque de données D1 de la Recommandation UIT-R P.845; il conduit à l'expression suivante, pour un affaiblissement FSMR sur des trajets de 4 000 km et moins de longueur:

$$L_m = 20 + 40 [M(d) + 1 - f_b/f] \quad \text{dB}$$

où: $M(d)$ est le facteur MUF pour la longueur de trajet d .

6.3 Le modèle Hunt

Utilisant des analyses distinctes des données de la banque D1, Hunt [1991] a formulé l'expression suivante, pour un affaiblissement FSMR sur des trajets de 9 000 km et moins de longueur:

$$L_m = 36 (f/f_b - 1)^2 \quad \text{dB}$$

avec une valeur maximale de 62 dB.

6.4 Le modèle Gibson-Bradley

Contrairement aux autres modèles disponibles, ce modèle [Gibson et Bradley, 1991 et Gibson, 1993] se fonde non sur des comparaisons de données de mesure, mais sur des calculs théoriques des effets de rétrodiffusion et de diffusion latérale par le sol à deux bonds. Les calculs visent à trouver une expression pour la coupe verticale de diffusion en ondes décamétriques de la surface de la Terre par zone unitaire en fonction des angles d'élévation des signaux incidents et diffusés et de l'angle de diffusion azimutal. La puissance diffusée intègre tous les éléments de la surface pour lesquels la puissance d'exploitation est inférieure à la moins élevée des MUF de référence des deux trajets entre, d'une part, l'émetteur et l'élément de diffusion et, d'autre part, le récepteur et l'élément de diffusion, et est rapportée à la puissance correspondant à une fréquence juste au-dessous de la MUF de référence sur le grand cercle. On peut tenir compte de la relation de dépendance de la coupe verticale de diffusion sur différentes surfaces, des processus de second ordre et des effets de gains d'antennes différents. On constate que, si l'utilisation de la MUF de référence médiane mensuelle dans les différentes équations conduit à l'évaluation de l'affaiblissement FSMR médian mensuel; l'emploi des MUFS de référence, du décile soit supérieur soit inférieur, dans le cadre de la variabilité au jour le jour donne les affaiblissements FSMR correspondants.

Pour un trajet de 2 000 km, avec $f/f_b = 1,4$, le modèle de Gibson-Bradley donne $L_m = 80$ dB, alors que le modèle de Suessmann conduit à un chiffre de 53 dB pour une même situation: des différences de cet ordre devraient pouvoir être réglées à l'aide d'instruments de mesure possédant une plage de fonctionnement suffisante.

6.5 Le modèle de la Recommandation UIT-R P.533

Pour des distances allant jusqu'à 7 000 km, la Recommandation UIT-R P.533 prévoit la valeur de L_m pour chacun des modes de propagation considérés, et une sommation de puissance permet ensuite d'obtenir la valeur globale du champ. Les critères à prendre en considération pour chaque mode envisagé sont indiqués dans la Recommandation, et pour ces divers modes, L_m est donnée par l'expression suivante:

$$L_m = 0 \quad \text{dB}$$

quand $f \leq f_b$ pour le mode considéré.

Pour les modes E (jusqu'à une distance maximale de 4 000 km) et suivant une adaptation de Wheeler [1966], lorsque $f > f_b$, on a:

$$L_m = 130 \left[\frac{f}{f_b} - 1 \right]^2 \quad \text{dB, ou 81 dB, en prenant la valeur la plus faible.}$$

Pour les modes F2 (jusqu'à 7 000 km), quand $f > f_b$, on a:

$$L_m = 36 \left[\frac{f}{f_b} - 1 \right]^{1/2} \quad \text{dB, ou 62 dB, en prenant la valeur la plus faible.}$$

Le modèle ne tient pas spécifiquement compte de l'affaiblissement FSMR pour les distances supérieures à 9 000 km.

A noter qu'ici encore L_m dépend du rapport de la fréquence d'exploitation, f , à la MUF de référence, f_b , et non de la différence de fréquence.

7 Facteurs à prendre en considération dans le développement des formules de calcul de l'affaiblissement FSMR

7.1 Mode magnéto-ionique à prendre en hypothèse pour la détermination de la MUF de référence

Dans les Recommandations UIT-R P.533 et UIT-R P.1240, on utilise la médiane mensuelle prévue de l'onde o pour la détermination de la MUF de référence dans la région E. A de très courtes distances la MUF de référence en région F2 est donnée pour l'onde x; pour les longueurs de trajet de 4 000 km et plus on utilise la MUF de référence en onde o, alors qu'une MUF de référence en mode composante s'applique aux distances intermédiaires. (La relation entre les MUF de référence en onde o ou en ondes x dépend de la latitude magnétique ainsi que de l'orientation et de la longueur du trajet.) Ces références de fréquences constituent peut-être les meilleures dont on dispose pour formuler les affaiblissements FSMR, mais il conviendrait de confirmer cette supposition.

7.2 Référence d'amplitude

On suppose que l'affaiblissement FSMR est égal à 0 dB aux fréquences inférieures à la médiane mensuelle de la MUF de référence pour le mode considéré. Ainsi, selon la Recommandation UIT-R P.533, il semble approprié de prévoir empiriquement l'affaiblissement FSMR en fonction de la valeur de champ ou d'intensité du signal prévue pour la médiane mensuelle de la MUF de référence et de supposer que tous les autres facteurs d'affaiblissement ou de gain, comme par exemple ceux qui sont associés à l'absorption ionosphérique ou à la qualité des antennes, sont insensibles aux fréquences. Cette référence en amplitude semble convenir pour les formules fondées sur les principes actuels, mais d'autres références pourront être préférées avec des modèles de formulation différente. Par exemple, l'amplitude du signal chute lorsque cesse la prise en charge du mode en onde o, la fréquence augmentant et la propagation étant maintenue au moyen de l'onde x. Il serait peut-être judicieux de prendre comme référence en amplitude celle correspondant à une fréquence légèrement au-dessous de la MUF de référence en onde o étant donné l'absence de focalisation relative à la distance de saut.

7.3 Facteur de conversion en fréquence

Comme nous l'avons déjà noté, la procédure recommandée utilise le rapport de la MUF de référence à la fréquence d'exploitation, tandis que la méthode Phillips-Abel utilise la différence de fréquence. Les divers phénomènes décrits au § 2 semblent en général, soit dépendre du rapport des fréquences, soit être fonction de la fréquence absolue, quelle que soit la MUF de référence correspondant au trajet considéré. Ainsi, en ondes décamétriques, il semble indiqué de fonder une formulation composite sur le rapport des fréquences. Pour des méthodes d'évaluation de la compatibilité en ondes métriques, il serait peut-être plus correct d'utiliser une formulation ne tenant pas compte de la MUF de référence correspondant au trajet considéré.

7.4 Dépendance par rapport à la longueur du trajet

Les méthodes actuelles ne tiennent compte d'aucune dépendance en ce qui concerne la longueur du trajet. Toutefois, on peut sans doute dire que pour les trajets inférieurs à 2 000 km, c'est-à-dire lorsque la région E revêt une certaine importance, les phénomènes observés différeront des mécanismes qui interviennent avec des trajets plus longs, c'est-à-dire lorsque le rapport de la MUF associée au trajet à la MUF associée à la distance de 4 000 km peut être important.

7.5 Tenir compte du gain de l'antenne d'émission et du gain de l'antenne de réception

Un grand nombre des phénomènes décrits au § 2 ont une plus grande influence aux faibles angles d'élévation. Ainsi, la propagation au-dessus de la MUF de référence peut être moins importante lorsque l'on utilise des antennes à angle d'élévation élevé. On peut tenir compte de cet effet, de manière générale, en modifiant la relation de dépendance, en fonction de la distance, de l'affaiblissement FSMR sur de petits trajets (on suppose naturellement que des antennes appropriées sont utilisées sur le trajet utile).

En dehors des phénomènes dus aux irrégularités ionosphériques, c'est-à-dire lorsque l'extension du rapport des fréquences peut être relativement limitée, et des phénomènes dérivés directement de la diffusion par l'ionosphère, la plupart des modes de propagation examinés font intervenir une propagation en dehors du grand cercle. Il sera nécessaire de prévoir un complément d'étude pour déterminer s'il y a lieu d'utiliser le gain d'antenne le long du grand cercle, le gain maximal de l'antenne ou encore une fonction du gain d'antenne.

8 Qualité des signaux ABM: quelques observations sur la fiabilité et la compatibilité

Pour observer certains des phénomènes décrits au § 2, il n'est pas nécessaire que les irrégularités ionosphériques soient importantes, car ces phénomènes dépendent d'une propagation normale, associée à une rétrodiffusion et à une diffusion latérale par le sol. Dans de tels cas, la fonction de transfert de canal est en général assez semblable à la fonction de propagation aux fréquences inférieures à la MUF de référence, quoique l'existence de trajets de propagation multiples ait toujours tendance à créer une fonction de transfert «floue».

En revanche, des phénomènes de propagation particuliers peuvent être très importants dans certains scénarios, par exemple aux latitudes équatoriales et aux latitudes hautes, ainsi que dans des conditions de perturbations magnétiques. On observe alors que la fonction de transfert présente des étalements dans le temps et des étalements en fréquence importants et variant rapidement. On peut alors s'attendre à une dégradation de la qualité des signaux de parole et plus particulièrement de la musique, surtout avec les systèmes de modulation à double bande latérale et détection d'enveloppe. Le comportement des systèmes de modulation numérique dépendra quant à lui du système de modulation et du débit de signalisation utilisés.

Ainsi, selon la sensibilité de la méthode de modulation à ces effets, on pourra déterminer la fréquence maximale à retenir dans la planification du service considéré sur la base de la MUF de référence, tandis que l'évaluation des brouillages aux fins d'études de compatibilité pourra se faire sur la base d'une fréquence plus élevée, compte tenu de la propagation FSMR.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DeBLASIO, L. M., LANE G. and RHOADS, F. J. [1993] Model enhancements: IONCAP and VOACAP methodology comparisons. p. 4A-6-1 to 4A-6-9. *Actes du septième Symposium international sur les effets ionosphériques*, Alexandria, VA, Etats-Unis d'Amérique.
- GIBSON, A. J. [1993] HF propagation at frequencies above the MUF by ground sidescatter, Part 1 (Theory). NRPP Research Note 137, Rutherford Appleton Laboratory, Royaume-Uni.
- GIBSON, A. J. et BRADLEY, P. A. [1991] A new formulation for above the MUF loss. IEE Conf. Publ. No. 339, p. 122-125. *Proc. 6th International Conference on Antennas and Propagation*.
- HAGN, G. H., GIBSON, A. J. et BRADLEY, P. A. [mai 1993] Propagation on frequencies above the basic MUF. *Proc. 7th International Ionospheric Effects Symposium*, Alexandria, VA, Etats-Unis d'Amérique.
- HUNT, K. [1991] Above the MUF loss for E and F2-modes. Ex-CCIR, GTI 6/1, Doc. 392.
- PHILLIPS, M. L. [1963] Auxiliary procedures used in theoretical evaluation of HF backscatter observations and other communications problems. External Tech. Memo. E14, p. 20-23, *ITT Electro-Physics Labs.*, Hyattsville, MD, Etats-Unis d'Amérique.
- SUESSMANN, P. [1990] Projet de révision du calcul de l'affaiblissement aux fréquences supérieures à la MUF, Rapport 894. Ex-CCIR, GTI 6/1. Doc. 351(Rév.1).
- TETERS, L. R., LLOYD, J. L., HAYDON, G. W. and LUCAS, D. L. [1983] Estimating the performance of telecommunication systems using the ionospheric transmission channel (IONCAP user's manual). NTIA Report 83-127, US Dept. of Commerce, Boulder, CO, Etats-Unis d'Amérique.
- WHEELER, J. L. [1966] Transmission loss for ionospheric propagation above the standard MUF. *Radio Sci.*, Vol. 1, **11**, p. 1303-1308.