

RAPPORT 889-2*

EVALUATION EN TEMPS REEL DU CANAL DE TRANSMISSION DE CIRCUITS
RADIOELECTRIQUES IONOSPHERIQUES EN ONDES DECAMETRIQUES

(Programme d'études 27B/6)

(1982-1986-1990)

Sommaire

1. Introduction
 - 1.1 Prévisions à long terme
 - 1.2 Prévisions à court terme
 - 1.3 Evaluation du canal en temps réel (ECTR)
2. Facteurs ayant une incidence sur la qualité du canal
 - 2.1 Dispersion temporelle et fréquentielle
 - 2.1.1 Dispersion temporelle
 - 2.1.2 Dispersion fréquentielle
 - 2.2 Bruit et brouillage externes
 - 2.3 Paramètres indiquant la qualité du canal
3. Méthodes de mesure de la qualité du canal
 - 3.1 Sondage ionosphérique à balayage de fréquence
 - 3.1.1 Sondage à incidence oblique
 - 3.1.2 Sondage à incidence verticale
 - 3.1.3 Sondage par rétrodiffusion
 - 3.1.4 Sondage transionosphérique
 - 3.2 Evaluation passive du canal
 - 3.2.1 Contrôle des fréquences
 - 3.2.2 Contrôle du bruit et des brouillages
 - 3.3 Sondage interne au canal
 - 3.3.1 Contrôle de l'intensité des signaux
 - 3.3.2 Contrôle du rapport signal/bruit
 - 3.3.3 Mesure du taux d'erreur
 - 3.3.4 Comptage des pseudo-erreurs
 - 3.3.5 Mesure de l'erreur de phase
 - 3.3.6 Elargissement spectral des tonalités en ondes entretenues
 - 3.3.7 Forme des impulsions
 - 3.3.8 Répétition automatique
 - 3.3.9 Estimation/égalisation du canal
4. Tendances actuelles
5. Conclusions
6. Références bibliographiques

* Ce Rapport est porté à l'attention des Commissions d'études 3 et 8.

1. Introduction

Afin de tirer le meilleur parti du potentiel de l'ionosphère pour les radiocommunications en ondes décimétriques et de surmonter sa variabilité inhérente, il convient de mettre en œuvre une gestion des fréquences en trois étapes, à savoir: prévisions à long terme, prévisions à court terme et évaluation des voies du canal en temps réel (ECTR)*.

1.1 Prévisions à long terme

Les prévisions à long terme des valeurs médianes mensuelles de certains paramètres constituent la méthode traditionnelle de gestion des fréquences et de conception des systèmes. On effectue des prévisions pour la planification des fréquences à partir des données ionosphériques antérieures à l'aide de méthodes telles que celles décrites dans le Rapport 252 et 894. Les fréquences sont choisies de façon à garantir une fiabilité d'au moins 90% pour les radiocommunications, quelles que soient l'heure du jour, la saison et la période du cycle solaire. A ce stade, il faut également prendre des décisions techniques concernant la puissance d'émission et les antennes adéquates.

Les fréquences optimales de travail (FOT) pour un circuit particulier sont définies pour chaque heure de la journée, habituellement pour un mois, sur la base d'algorithmes obtenus empiriquement. Les prévisions de ce genre permettent d'assurer des communications acceptables, mais pas forcément de haute qualité, à de nombreuses fins telles que les transmissions téléphoniques et télégraphiques.

Les difficultés qui vont de pair avec les prévisions à long terme sont les suivantes:

- a) ~~les fréquences optimales de travail assurent des communications pour seulement 90% des jours du mois;~~
- b) les prévisions ne tiennent pas compte des conséquences des orages ionosphériques et d'autres changements à court terme de l'ionosphère;
- c) les estimations relatives au signal et au bruit ne sont pas toujours précises et le rapport signal/bruit n'est pas nécessairement un critère suffisant pour choisir des fréquences destinées à certains types de communication;
- d) on ne dispose pas de prévisions à long terme fiables de la couche E sporadique;
- e) on ne tient pas compte des brouillages causés par d'autres utilisateurs;
- f) certaines divergences existent entre les valeurs observées de foF2 et celles qui figurent sur les cartes du CCIR (voir Rapport 430) conduisent à des erreurs dans les modes de propagation prévus et les fréquences maximales utilisables (MUF).

* En anglais, RTCE, real-time channel evaluation

1.2 *Prévisions à court terme*

La deuxième phase délicate de la planification des communications intervient lorsqu'il s'agit de spécifier quelles sont, parmi les fréquences assignées, celles qui sont en fait disponibles à un moment donné, en tenant compte de la variabilité à court terme de l'ionosphère. Les Rapports 727 et 888 décrivent des techniques fondées sur des observations faites en temps réel du Soleil, de l'ionosphère et des fréquences effectivement utilisées pour un circuit donné. Il est possible, grâce à ces techniques, de surveiller en temps réel l'ionosphère et d'établir des prévisions à une échelle allant de la minute à la journée et ainsi de surmonter les difficultés mentionnées aux § a) et b) ci-dessus. Les méthodes de prévision à court terme de la propagation en ondes décimétriques n'ont pas encore été testées complètement, faute de systèmes adéquats de surveillance du Soleil. Rothmuller [1978], à la suite d'essais en exploitation mettant à profit les données solaires fournies par le satellite Solrad HI, a constaté que le nombre des interruptions des ondes décimétriques dues à la propagation était réduit de 15% et que la durée de ces interruptions était réduite de 15 à 20%.

Toutefois ces techniques n'indiquent pas quelles fréquences assignées seraient le mieux adaptées à un certain type de communication à une heure déterminée. De même les prévisions relatives à la gamme des fréquences ne sont pas tout à fait exactes, étant donné les erreurs inévitables dans les techniques de prévision.

1.3 Evaluation du canal en temps réel (ECTR)

L'ECTR est un procédé permettant de mesurer en temps réel les paramètres pertinents d'un ensemble de canaux de communication et d'utiliser les données ainsi obtenues pour décrire quantitativement les états de ces canaux et donc leurs capacités relatives d'acheminement d'une ou plusieurs classes données de trafic.

L'ECTR permet intrinsèquement d'assurer des communications en ondes décimétriques de haute qualité même dans les conditions de propagation les plus défavorables. C'est à ce stade que toutes les fréquences assignées qui pourraient être utiles sont examinées en temps réel afin de déterminer quelle est la meilleure pour certaines communications.

Il n'est pas nécessaire que l'opérateur connaisse en détail les principes physiques fondamentaux qui sont à l'origine des distorsions provoquées par le milieu ionosphérique sur un signal donné, mais plutôt que cet opérateur, ou le sous-ensemble de gestion automatique du système de radiocommunications, ait accès aux valeurs des paramètres d'un modèle en temps réel approprié qui décrit comme il convient le comportement du trajet. Une fois ces valeurs obtenues, le modèle peut servir à adapter de façon optimale le format du signal et les algorithmes de traitement du signal applicables à la liaison considérée.

Il est possible d'utiliser l'ECTR pour résoudre les problèmes c), d), e) et f) énumérés au § 1.1. Il n'est pas nécessaire que les systèmes d'ECTR utilisent des modèles synoptiques du bruit atmosphérique ou artificiel, étant donné que ces systèmes peuvent mesurer en temps réel le bruit à la fréquence de fonctionnement. Le système peut aussi mesurer des paramètres mieux adaptés au type de modulation du signal utilisé. Ces systèmes peuvent également tirer parti des modes de propagation par E sporadique qui permettent souvent des transmissions à des fréquences supérieures à la MUF de référence de la couche F avec des taux d'erreur très faibles. Les systèmes d'ECTR tiennent directement compte du brouillage. Grâce à leur aptitude à sélectionner des fréquences supérieures à la MUF de référence prévue, l'utilisation de fréquences plus élevées, qui sont en général affectées de niveaux plus faibles de brouillage, est alors possible.



2. Facteurs ayant une incidence sur la qualité du canal

2.1 Dispersion temporelle et fréquentielle

En règle générale, deux sources fondamentales de distorsion du signal sont associées aux trajets en ondes décamétriques : la dispersion temporelle et la dispersion fréquentielle. Les effets de ces mécanismes sont facilement représentés par la «fonction de propagation du canal dont un exemple est présenté à la Fig. 1. C'est une fonction composite montrant les effets de dispersion du trajet sur une impulsion idéale dans le domaine du temps et sur une ———— onde entretenue dans le domaine des fréquences.

L'exemple propose trois modes de propagation distincts, qui peuvent être dus à des réflexions sur des couches ionosphériques différentes et/ou à des réflexions multiples sur une même couche. Dans la pratique, les dispersions temporelles et les dispersions fréquentielles de différents modes sont souvent susceptibles de se chevaucher, en présence notamment d'une propagation par diffusion sur la couche F, de rayons vus hauts ou bas ou de différents modes magnétoioniques. Une fonction de propagation donnée n'offre une description valable du comportement d'un trajet que dans le cas où la fréquence porteuse est spécifiée et pendant une période où l'ionosphère reste sensiblement constante. La fonction de propagation dépend aussi de la combinaison des directivités et des gains d'antenne d'émission et de réception. A plus long terme, les variations dans le temps des paramètres du trajet entraîneront des modifications du nombre de modes, des amplitudes, des temps de propagation ainsi que de la forme des distributions associées à chacun de ces modes.

La plupart des modèles de trajet utilisés dans les systèmes d'ECTR sont liés à la fonction de propagation. Ils appartiennent en général à l'une ou l'autre des catégories, domaine temporel ou domaine fréquentiel selon la nature des signaux qui doivent être transmis sur la liaison correspondante.

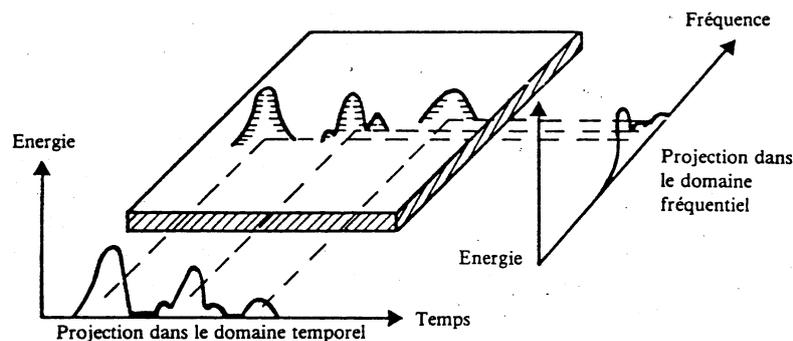


FIGURE 1

Exemple caractéristique de fonction de propagation d'un canal de transmission [Darnell, 1975]

2.1.1 Dispersion temporelle

La projection de la fonction de propagation dans le domaine temporel donne les amplitudes et les temps de propagation relatifs à chaque mode de la propagation multimodes. Il a été largement reconnu que ce type de propagation est une source d'erreurs importante pour les transmissions de données numériques à modulation par déplacement de phase (MDP) et produit habituellement un taux d'erreur irréductible, impossible à améliorer en augmentant le rapport signal/bruit. Cet effet, appelé interférence intersymboles, se produit lorsque l'étalement des temps de propagation devient comparable à la durée d'un état de la trame de données numériques.

2.1.2 Dispersion fréquentielle

Les conséquences de la dispersion fréquentielle sont moins connues. La dispersion fréquentielle accompagne invariablement une dispersion temporelle mais l'inverse n'est pas nécessairement vrai: la dispersion fréquentielle peut se produire en l'absence d'une dispersion temporelle notable [Clarke et Tibble, 1978]. La dispersion fréquentielle se produit parce que les composantes d'une onde ionosphérique traversent différentes régions de l'ionosphère et, par conséquent, sont affectées de différents décalages de fréquence dus à l'effet Doppler. Le champ de l'onde qui en résulte s'évanouit avec un taux qui dépend de l'étalement fréquentiel dû à l'effet Doppler. L'analyse d'une transmission MDPD sur des tonalités parallèles modulées à 75 bauds entre Townsville et Sydney a montré une corrélation nettement positive entre le taux d'erreur binaire et l'étalement fréquentiel dû à l'effet Doppler d'une onde entretenue située dans la bande passante à 3 kHz du signal de données [Clarke, 1979].

2.2 Bruit et brouillage externes

Outre l'influence de la variabilité ionosphérique et de la fonction de propagation sur la qualité du canal ionosphérique à ondes décimétriques, le bruit et le brouillage externes causés par d'autres usagers du spectre radioélectrique sont également des considérations importantes. C'est le brouillage qui perturbe le plus le fonctionnement normal d'un système de radiocommunication correctement planifié. Les caractéristiques des signaux brouilleurs dépendent des services qu'ils fournissent. Le comportement des signaux de radiodiffusion de grande intensité est relativement prévisible alors que la multitude de transmissions de données à bande étroite et de courte durée sont, prises isolément, imprévisibles. L'un des rôles principaux des techniques d'ECTR dans les systèmes de radiocommunications modernes est d'adapter les algorithmes de traitement et de transmission des signaux de manière à réduire au minimum les brouillages pendant que le canal ionosphérique est utilisé.

On dispose d'informations quantitatives sur la forme du brouillage en ondes décimétriques à certains endroits du Royaume-Uni [Gott et autres, 1982; Gibson et Arnett, 1988].

2.3 Paramètres indiquant la qualité du canal

Il existe plusieurs types de systèmes d'ECTR ainsi que de nombreux paramètres mesurables sur lesquels il est possible de fonder un système ETCR particulier. Les paramètres dépendant du temps et de la fréquence qu'il est possible de mesurer dans un récepteur d'ECTR, sont par exemple:

- le mode de propagation ionosphérique,
- l'étalement du temps de propagation du signal,
- l'amplitude du signal,
- l'intensité du bruit de fond,
- l'intensité du brouillage,
- le rapport signal/bruit,
- la stabilité de phase des signaux,
- l'étalement fréquentiel dû à l'effet Doppler,
- la forme des impulsions du signal,
- la qualité du signal reçu, par exemple, l'intelligibilité de la parole ou le taux d'erreur sur les bits.

mais il s'agit d'une tâche importante faisant intervenir des techniques complexes de reconnaissance des formes. Une autre difficulté potentielle avec le sondage à incidence oblique est la différence qui pourrait exister entre la sensibilité du système de sondage et les performances des antennes d'une part et celles du système de communication principal d'autre part.

Une considération importante, lorsque des sondages à incidence oblique sont utilisés pour déduire les conditions sur un trajet différent ou à un moment différent, est la corrélation spatiale et temporelle du paramètre d'ECTR retenu. Goodman et Daehler [1988] ont examiné ces facteurs pour des mesures de la fréquence maximale observée (MOF).

3.1.2 Sondage à incidence verticale

Un sondeur à incidence verticale émet un signal de sondage capable de prendre n'importe laquelle des formes décrites précédemment pour le sondage en incidence oblique. Les signaux réfléchis sont traités par un récepteur synchronisé pour produire un ionogramme sous incidence verticale. Un des progrès les plus importants de ces dernières années est l'ionosonde numérique [Bibl et Reinisch, 1978; Wright et Pitteway, 1979] et l'interprétation automatique des données qu'elle permet [Reinisch et Huang, 1982].

Les données acquises sans incidence verticale peuvent être utilisées directement dans la formulation d'un modèle de propagation pour des trajets ionosphériques courts, par exemple jusqu'à 300 km environ. Pour des trajets plus longs, on peut appliquer des facteurs géométriques aux données des ionogrammes pour calculer les propriétés en incidence oblique. La validité de ces calculs dépend du degré de corrélation entre l'ionosphère aux points de réflexion du circuit et l'ionosphère à la station de sondage. Rush [1976], McNamara et Wilkinson [1986] et Milsom [1986] ont étudié dans quelle mesure on peut déduire d'une observation effectuée en un point les conditions ionosphériques en un autre point.

3.1.3 Sondage par rétrodiffusion

Le sondage par rétrodiffusion peut être réalisé en un seul emplacement, l'énergie transmise étant rayonnée obliquement. Le signal reçu est dû à l'énergie propagée par voie ionosphérique et diffusée soit par le sol, soit directement par l'ionosphère, jusqu'au sondeur en suivant au retour un trajet ionosphérique similaire à celui de l'aller.

Dans ce type de système, l'affaiblissement est important en raison des très fortes pertes au sol, et il faut des puissances d'émission bien supérieures à celles requises pour les ionosondes sous incidence verticale ou oblique. La définition de l'ionogramme de rétrodiffusion est aussi plus mauvaise que celle des ionogrammes sous incidence oblique ou verticale. Cependant, le sondage par rétrodiffusion donne une bonne indication des gammes de fréquences utilisables pour des trajets à un seul bond. Les trajets à bonds multiples ont tendance à subir des affaiblissements excessifs sur le parcours. Les formes de modulation utilisées pour les sondeurs à incidence oblique peuvent être utilisées dans les systèmes à rétrodiffusion. Le sondage par rétrodiffusion a été étudié par Croft [1972]; il est aussi traité brièvement dans le Rapport 726. Il peut fonctionner soit à fréquence fixe, soit à balayage de fréquences. On utilise habituellement des réseaux d'antennes hautement directifs, tant pour améliorer le rapport signal/bruit reçu que pour limiter les zones de surveillance.

Le sondage par rétrodiffusion a été utilisé sur le plan opérationnel dans le domaine des radars et de la radiodiffusion en ondes décamétriques. Dans ce dernier cas, la technique consiste à ajouter une modulation pratiquement inaudible aux émissions de radiodiffusion puis à recevoir par rétrodiffusion l'énergie modulée. Ces sondages pourraient aider le personnel de l'émetteur à déterminer la bande de radiodiffusion optimale et l'antenne d'émission pour chacune des zones de couverture désirée. Ce processus devient plus précis en déployant des répéteurs dans la zone de couverture de manière à pouvoir étalonner la portée au sol.

Dans la pratique, la fréquence émise n'est en général pas modifiée à court terme et les changements opérationnels en temps réel consisteraient à employer une autre antenne d'émission ayant un angle de site du lobe plus approprié. Le gros de l'énergie réfléchiée par l'ionosphère est alors dirigé vers la zone cible, ce qui permet de maîtriser les variations d'un jour à l'autre de la géométrie du circuit dues aux variations correspondantes de l'ionosphère.

Headrick et Skolnik [1974] ont décrit l'importance du sondage par rétrodiffusion pour les radars à ondes décamétriques. Un procédé qui permet de s'assurer que les conditions de réception d'un canal radioélectrique présélectionné selon un horaire de fonctionnement approprié sont convenables, a été étudié par David et autres [1976]. Earl et Ward [1986] ont décrit un système de sondage par rétrodiffusion utilisé avec un radar à ondes décamétriques. Ce système fournit des estimations en temps réel de niveaux étalonnés de la puissance rétrodiffusée et des estimations simultanées des intensités de bruit dans la bande décamétrique.

Le sondage par rétrodiffusion peut aussi être utilisé pour surveiller la propagation par la couche E sporadique sur un circuit, étant donné que les échos de rétrodiffusion ont une signature caractéristique [Croft, 1972]. Les modes de propagation par E sporadique donnent souvent des taux d'erreur extrêmement bas. Cependant, l'interprétation des échos de rétrodiffusion est un problème très complexe qui nécessite l'intervention d'un opérateur, alors qu'un système de gestion de fréquence (voir le § 3.2.1) peut détecter les modes de propagation par E sporadique plus simplement en utilisant le fait que leur décalage par effet Doppler est pratiquement nul.

3.1.4 Sondage transionosphérique

Le sondage transionosphérique est fondé sur des mesures du temps de propagation à des fréquences proches de la fréquence critique [Avdyushin et autres, 1983]. Les observations faites par les satellites Intercosmos-19 et Cosmos-1809 ont montré que les possibilités suivantes existaient:

- mesure des profils de densité électronique en contre-bas;
- détermination de la MUF;
- mesure des gradients horizontaux de la densité électronique;
- mesure de la présence, de l'emplacement et de la concentration des inhomogénéités ionosphériques.



Cette méthode complète les capacités du sondage à incidence verticale au sol, du sondage sous incidence oblique et du sondage en contre-haut par satellite [Danilkin, 1985]. Une grande partie de l'ionosphère peut être sondée en utilisant le déplacement du satellite, des mesures simultanées étant faites à partir de plusieurs stations au sol. Cette méthode peut être utilisée seule ou en complément de sondeurs classiques.

3.2 Evaluation passive du canal

Des informations sur le comportement de l'ionosphère et sur les brouillages présents sur des canaux radioélectriques assignés peuvent être recueillies à l'aide d'émetteurs d'opportunité et de méthodes passives de contrôle des récepteurs. Les canaux rendus inutilisables en raison de niveaux de bruit et de brouillage élevés peuvent être enregistrés.

3.2.1 Contrôle des fréquences

Sous sa forme originale, l'ECTR en un seul emplacement se présente comme un dispositif dans lequel la bande de fréquences est explorée manuellement à l'aide d'un récepteur afin d'évaluer les transmissions identifiables qui se propagent à partir d'un emplacement donné, ainsi que leurs qualités relatives. L'hypothèse de la réciprocité permet de faire une estimation _____ de la fréquence qui doit être utilisée pour la transmission vers un emplacement spécifié. Cette procédure peut maintenant être complétée à l'aide de réseaux d'antennes de réception adaptables ou orientables qui permettraient d'obtenir une orientation du «pinceau» à la fois en azimut et en site. Cette procédure permettra d'inclure des transmissions non identifiables dans le processus passif d'ECTR étant donné que leurs positions peuvent être évaluées en mesurant l'angle d'arrivée en azimut et en site.

Darnell et autres [1988] proposent un système mondial d'utilisateurs dans lequel des organismes munis d'équipements de réception appropriés pourront acquérir des informations d'ECTR à différents degrés de complexité.

3.2.2 Contrôle du bruit et des brouillages

Cottrell [1979] a recueilli des statistiques de bruit qui indiquent qu'un canal sur 10 de 3 kHz devrait suffire pour un système opérationnel pendant les heures de jour. En revanche, pour le fonctionnement nocturne, lorsque l'occupation des canaux en ondes décimétriques est plus forte, il est probable que davantage de canaux seront nécessaires pour faire en sorte qu'au moins un d'entre eux soit utilisable. Sur une durée d'une minute, le canal optimal ne variera pas sensiblement.

La mesure des brouillages avec une résolution de 3 kHz peut constituer un critère utile de sélection des voies. L'évaluation de la disponibilité d'un trajet ionosphérique au moyen de prévisions à long et à court terme peut également faire partie de la méthode de sélection. Des signaux d'essai sur le circuit considéré sont un moyen fiable de déduire les conditions ionosphériques qui prévalent. Ils permettent d'acheminer des informations sur les conditions de brouillage à des sites distants dans un réseau.

Gott et autres [1983] ont indiqué l'existence de composantes de brouillage importantes dans une largeur de bande de 3 kHz. Il est tout à fait souhaitable de contrôler les brouillages dans une largeur de bande de 3 kHz, de manière à pouvoir les éviter ou les supprimer.

Les observations ci-dessus démontrent clairement les avantages que revêt un contrôle passif du bruit et des brouillages par ECTR.

3.3 Sondage interne au canal

3.3.1 Contrôle de l'intensité des signaux

Une mesure de l'intensité des signaux disponibles dans un canal ionosphérique n'est pas, en soi, une bonne indication de la qualité de la liaison. Des essais de modems à grande vitesse et de modems à 75 bauds ont conduit à éliminer cette caractéristique de la liste des mesures possibles de la qualité du canal.

3.3.2 Contrôle du rapport signal/bruit

Le rapport signal/bruit (y compris le brouillage) a été utilisé comme mesure de qualité de liaisons dans plusieurs systèmes anciens [Probst, 1968; Stevens, 1968]. Dans tous les cas, l'adjonction de cette fonction s'est révélée utile. Cette option semble être un critère d'ECTR viable pour des systèmes destinés à acheminer des données à petite vitesse. Une liaison à saut de tonalités à 75 bauds sur un canal unique entre dans cette catégorie. Pour des liaisons à moyenne ou à grande vitesse, une mesure du rapport signal à bruit est probablement insuffisante. Dans ces conditions, la dispersion temporelle sous forme de propagation par trajets multiples discrets jouera un rôle critique dans la détermination de la qualité des canaux.

Dans l'une des comparaisons les plus détaillées qui soient des mesures de qualité de liaison rivales, Humphreys et Shearman [1985] montrent que le rapport signal à bruit est un bon choix pour des liaisons de données à petite vitesse. Ce choix est notamment intéressant en présence d'un taux d'erreur élevé.

Tandis que le niveau de la moyenne temporelle des signaux à des fréquences situées dans une bande de 3 kHz ne variera pas sensiblement, il n'en est pas de même des brouillages sous-jacents qui seront souvent présents. Il faut être attentif à la largeur de bande dans laquelle la partie bruit de ce rapport est mesurée. Si les canaux éventuellement utiles sont d'abord évalués dans une largeur de bande de 3 kHz, et si ceux qui présentent un faible rapport signal/bruit sont écartés, il est possible d'explorer les autres pour trouver des emplacements optimaux de tonalités avec une plus grande résolution. Cela permet de réduire le temps perdu à rechercher une voie satisfaisante.

Des dispositifs ont été mis au point [Darbyshire et Gott [1986]] pour supprimer les brouillages à bande étroite d'une voie téléphonique normale à 3 kHz. De la même façon, les avantages de l'agilité de tonalité dans la bande ont été largement discutés [Darnell, 1978, 1979; Gott et Hillam, 1979; Sloggett, 1979].

Un système d'ECTR pratique, appelé CHEC (évaluation du canal et appel) a été mis au point au Canada [Stevens, 1968]. Il s'agit d'un système de sondage "interne au canal", c'est-à-dire qu'il sonde à l'intérieur des canaux de fréquences réellement assignées à l'utilisateur. Dans chacun des canaux, relativement peu nombreux, l'émetteur de base du CHEC émet un signal de plusieurs secondes qui est codé à l'aide d'un code d'appel sélectif, des données sur le niveau de brouillage à la station de base dans ce canal et d'une partie en ondes entretenues. Au récepteur spécifié par l'appel sélectif, le niveau de brouillage à la station de base dans chacun des canaux possibles est décodé et on mesure l'intensité du signal à l'aide de la partie de l'émission en ondes entretenues.

En supposant qu'il y ait réciprocité, un processeur à la station éloignée calcule la voie optimale pour l'émission vers la station de base en se fondant sur le critère du rapport signal/bruit prévu à la station de base, dû à l'émetteur éloigné. La technique CHEC permet d'améliorer sensiblement la disponibilité des voies.

Le système CHEC d'origine n'est plus opérationnel. Un système commandé par microprocesseur du type CHEC, appelé RACE (radiotéléphone avec évaluation automatique du canal), a été mis au point [Chow et autres, 1981; McLarnon, 1982].

3.3.3 Mesure du taux d'erreur

La technique de comptage d'erreurs étudiée par Darnell [1978] utilise un signal de test dont les paramètres sont essentiellement les mêmes que ceux du signal de trafic. Le signal de test occupe successivement chacune des bandes assignées et établit un taux d'erreur binaire pour chaque voie. Cette technique présente l'avantage évident de mesurer directement la qualité des données numériques. Pour certaines formes de trafic, il est possible de déduire les données d'ECTR du système normal en fonctionnement, c'est-à-dire qu'une voie peut être évaluée alors qu'elle achemine réellement du trafic. Darnell [1978] a décrit les résultats des essais d'un système RTCE basé sur des techniques de comptage d'erreurs qui a utilisé 10 voies possibles acheminant deux types de trafic sur deux trajets européens.

La qualité d'un circuit utilisant deux fréquences choisies à l'aide de techniques classiques de prévision de fréquences a été comparée à celle obtenue à l'aide de la sélection de fréquences fondée sur des données d'ECTR. La première technique se limitait à utiliser une fréquence de jour et une fréquence de nuit. Les résultats des essais ont indiqué que, pour les deux types de trafic examinés, on pouvait obtenir une augmentation sensible du pourcentage de fiabilité du circuit, environ 45%, en utilisant l'ECTR au lieu des techniques de sélection de deux fréquences.

3.3.4 Comptage des pseudo-erreurs

Une technique visant à accélérer l'accumulation du comptage d'erreurs a été mise au point; on l'appelle généralement comptage "des pseudo-erreurs". Au lieu d'utiliser un circuit de détection normal du système, on provoque une certaine détérioration du fonctionnement, de manière que le comptage final d'erreurs devienne plus sensible aux défauts de qualité de la voie [Leon, 1973].

Une méthode de production de pseudo-erreurs pourrait consister en un assouplissement des seuils de détection pour l'identification des "zéro" et des "un" numériques. Une autre méthode consiste à utiliser les marges de "décisions douces" et cela également devrait être considéré comme une autre forme d'accélération du taux d'erreur [Darnell [1978], Chase [1973], Humphreys et Shearman [1985]]. McLarnon [1982] décrit l'utilisation du contrôle du taux de pseudo-erreurs dans la conception d'un système radiotéléphonique automatique à ondes décimétriques.

3.3.5 Mesure de l'erreur de phase

On peut évaluer la qualité du circuit pour des liaisons à modulation par changement de tonalités en déterminant par échantillonnage la stabilité de phase d'une tonalité pilote transmise avec le trafic de communication. Généralement, la tonalité pilote se situe entre les fréquences "travail" et "repos". La phase de la tonalité pilote est échantillonnée en synchronisme à environ 100 Hz. La fréquence avec laquelle la différence de phase entre deux échantillons consécutifs dépasse un seuil prédéterminé peut servir de mesure de l'intégrité du canal [Darnell, 1978; Betts et Darnell, 1975].

Betts et Darnell [1975] ont décrit une expérience pour vérifier les relations déduites théoriquement entre la fréquence des erreurs sur la phase d'une tonalité pilote et la fréquence des erreurs des données transmises en modulation par déplacement de fréquence (MDF). On a effectué trois essais sur des circuits de 850, 1 700 et 9 800 km.

Les résultats de tous les essais ont confirmé les relations prévues entre le taux d'erreur de données MDF et le taux d'erreur sur la phase de la tonalité pilote. Des écarts importants sont apparus pendant moins de 1% de la durée totale des enregistrements. Ces écarts étaient essentiellement imputables à un évanouissement très rapide (supérieur à un évanouissement/s) et à un certain brouillage inhabituel et très intense d'origine artificielle.

Betts et Suleiman [1979] suggèrent, après avoir procédé à une analyse théorique, à une simulation en laboratoire et à des essais en vraie grandeur, que l'information concernant les erreurs de phase pourrait être utilisée à l'appui de toute forme de modulation numérique. Betts et Suleiman décrivent aussi une technique de tonalité pilote de deuxième génération, dans laquelle on calcule la différence de temps de propagation par trajets multiples entre signaux dans un circuit à deux trajets. La méthode fait appel à plusieurs tonalités pilotes et à une technique de corrélation pour déterminer la structure de l'évanouissement sélectif en fréquence.

Un inconvénient de la méthode de l'erreur de phase est le temps nécessaire pour évaluer une voie.

3.3.6 Élargissement spectral des tonalités en ondes entretenues

Clarke [1980] décrit un système d'ECTR qui s'applique à un format de modulation Kineplex à 2 400 bit/s. Des expériences ont montré que le taux d'erreur sur ces circuits présente une corrélation positive marquée avec l'élargissement spectral des composantes spectrales à l'intérieur du signal de données. Une technique de gestion des fréquences basée sur la largeur spectrale des tonalités en ondes entretenues à chaque fréquence attribuée est à l'étude. Une méthode mixte a été adoptée dans laquelle les voies sont classées sur la base des valeurs mesurées du rapport signal/bruit, des statistiques d'évanouissement et de la largeur de tonalité. D'après Clarke, on peut évaluer dix voies toutes les 5 à 10 minutes.

3.3.7 Forme des impulsions

Gott et Dutta [1979] décrivent un combineur en diversité qui adapte sa méthode de combinaison en fonction de la qualité de chaque trajet de propagation. La qualité du circuit est analysée en fonction de la régularité des transitions des signaux MDF (gigue). Un système analogue peut être adapté pour choisir des fréquences et non des voies de diversité. Shaw et autres [1988] présentent une évaluation théorique d'une ECTR avec filtre avec passage à zéro. La technique présente l'avantage de permettre une évaluation du canal pendant la transmission du trafic ordinaire.

Humphreys et Shearman [1985] ont comparé des mesures concurrentes de qualité de circuits pour des liaisons de données en décimétrique à faible vitesse et ont conclu que la distorsion télégraphique est utile mais pas aussi importante que le rapport signal/bruit.

3.3.8 Répétition automatique (ARQ)

De nombreux systèmes à ondes décimétriques utilisent la technique de contrôle d'erreurs appelée ARQ. Cette méthode est très performante et plusieurs chercheurs ont pensé que le rythme de répétition des demandes pourrait être utilisé pour évaluer la qualité des voies durant le passage normal du trafic [Darnell [1978], Elvy [1985] et Borgmann [1988]]. D'autres (voir par exemple Reed et Hopkinson [1988]) utilisent des renseignements obtenus d'après le débit des corrections du code de contrôle d'erreur pour évaluer la qualité de la liaison.

3.3.9 Estimation/égalisation du canal

Le moyen classique de transmission de données à des débits de l'ordre de 2 400 bit/s consiste à multiplexer des données entre plusieurs voies séparées dans le domaine fréquentiel, chaque voie transportant des données à petit débit. George et Halligan [1985] ont décrit un "sondeur de qualité de canal" pratique à utiliser sur ces circuits de données à des débits de 2 400 à 4 800 bit/s. On voit apparaître de nouvelles techniques de transmission en ondes décimétriques qui permettent de transporter des données à grande vitesse sur une tonalité modulée unique. Un modem utilisant une telle technique a été décrit par Currie et Weale [1985], mais il en existe plusieurs autres. Les opinions varient sur le point de savoir quelle est la meilleure méthode de traitement des signaux, les deux principaux systèmes sont appelés "estimation du canal" [Clark, 1981] et "égalisation du canal". Dans les deux méthodes, il faut que le processeur des signaux à la réception traite un volume important d'informations sur la réponse impulsionnelle du canal, ou son inverse. Dans ces conditions, il est nettement possible de faire des analyses de la qualité d'un circuit, en se fondant sur la dispersion temporelle globale, la proportion d'énergie dans le mode ionosphérique dominant, l'évanouissement mesuré des différents modes, une mesure de la stabilité de phase et des mesures statistiques de "confiance" dans le modèle de canal. Pennington [1983] a étudié l'ECTR pour cette catégorie de modems.

4. Tendances actuelles

Ces dernières années ont vu les micro-ordinateurs et des processeurs de signaux élaborés devenir partie intégrante des systèmes de radiocommunications pour l'utilisation ou l'atténuation des effets de propagation, et ainsi améliorer leurs performances en exploitation [Agard, 1989]. L'ECTR contourne les problèmes rencontrés avec les techniques de sondage à incidence oblique (voir le § 3.1.1). Ces nouveaux systèmes deviennent totalement intégrés dans l'équipement radioélectrique qui achemine le trafic. Cela offre des avantages financiers considérables par rapport aux systèmes autonomes.

Avec l'utilisation accrue de l'ECTR, il est nécessaire que les équipements de divers constructeurs soient compatibles. Cela suppose la normalisation de protocoles pour le processus de sondage et l'établissement ultérieur des communications. Il est probable que ces protocoles devront être normalisés pour chaque application (c'est-à-dire que les protocoles de liaison point à point seront sans doute différents des protocoles de réseau tactique).

5. Conclusions

Compte tenu des incertitudes inhérentes à la prévision, l'ECTR peut être considéré comme la meilleure technique de sélection d'une fréquence de fonctionnement dont on dispose pour les communications en ondes décimétriques. Les fréquences attribuées sont évaluées en temps réel, la "meilleure" est sélectionnée et la liaison de communication est modifiée en conséquence. En principe, tout paramètre de la liaison peut être adapté, toutefois, à l'heure actuelle, les systèmes réels d'ECTR portent presque exclusivement sur le choix de la fréquence de fonctionnement.

Les avantages possibles qu'offre l'utilisation de techniques d'ECTR ont été résumés par Darnell [1975, 1986]:

- l'effet du bruit et du brouillage artificiels peut être mesuré et spécifié quantitativement [Darnell, 1979];
- la possibilité de mesurer la propagation et le brouillage en temps réel et en ligne permet d'utiliser des modes de propagation relativement transitoires, par exemple la propagation par E sporadique;
- l'effet du bruit et du brouillage artificiels peut être mesuré et spécifié quantitativement [Darnell, 1979];
- la possibilité de mesurer la propagation et le brouillage en temps réel et en ligne permet d'utiliser des modes de propagation relativement transitoires, par exemple la propagation par E sporadique;
- l'évaluation de l'ECTR permet d'utiliser de façon plus efficace le spectre des fréquences, en tendant à sélectionner des voies de fréquences plus élevées que celles qui seraient choisies par les techniques de prévision. En conséquence, l'encombrement du spectre est réduit;
- l'ECTR offrira le moyen de sélectionner automatiquement la meilleure fréquence et d'indiquer simultanément les voies de réserve préférables
- la puissance de l'émetteur peut être réduite, tout en assurant une qualité acceptable du trafic reçu;
- on peut utiliser les données d'ECTR afin d'adapter de façon optimale d'autres paramètres d'un système de télécommunications pour les conditions dominantes du trajet, par exemple: largeur de bande, débit de données, type de modulation, instant de début et durée de la transmission, algorithme de traitement du signal dans le récepteur, angles de site des faisceaux des réseaux d'antennes, type de diversité, égalisation adaptative;
- on peut se dispenser de l'analyse de la propagation en temps différé pour l'exploitation d'une liaison fixe; elle sera cependant utile pour la planification de systèmes.

La sélection des fréquences à évaluer peut se faire sur la base des prévisions à long terme mises à jour par des prévisions à court terme. De plus, avec un réseau de communications, il faut répartir la gamme totale des fréquences assignées, conformément à un certain plan général, afin d'éviter tout brouillage inutile entre les membres du réseau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGARD [1989] - Operational aids for exploiting or mitigating electromagnetic propagation effects - Conference Proceedings No. 453
- AVDYUSHIN, S.I., DANILKIN, N.P., IVANOV, I.I., IPATOV, E.B., KUSHNEREVSKY, YU.V., LUKIN, D.S. et MIGULIN, V.V. [1983] - "Transionosfernoe zondirovanie na granitse radioprozrachnosti ionosfery ("Transionospheric sounding at the limit of ionospheric transparency") - Geomagnetizm i Aeronomiya, Vol. 23, No. 4, pages 567-572.
- BARRY, G. et FENWICK, R. B. [1975] Techniques for real-time HF channel measurement and optimum data transmission. AGARD Conf. Proc. No. 173, *Radio Systems and the Ionosphere*. Ed. W.T. Blackband. NASA Accession No. N77-20302. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- BELLO, P. A. [1965] Some techniques for the instantaneous real-time measurement of multipath and Doppler spread. *IEEE Trans. Com. Tech.*, Vol. 13, 3, 285-292.
- BETTS, J. A. et DARNELL, M. [1975] Real-time HF channel estimation by phase measurements on low-level pilot tones. AGARD Conf. Proc. No. 173, *Radio Systems and the Ionosphere*, Paper 18. Ed. W. T. Blackband. NASA Accession No. N77-20302. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- Betts, J.A. et Suleiman, Z.A. [1979], "Real-Time Channel Estimation of Data Circuits", IEE Coll Dig. 1979/48. Recent Advances in HF Communications Systems and Techniques, février.
- BIBL, K. et REINISCH, B. W. [1978] The universal digital ionosonde. *Radio Sci.*, Vol. 13, 519-530.
- Borgmann, D. [1988], "An HF Radio Link Processor with Adaptive Frequency Management", IEE Conf. Pub. No. 284, pp. 81-85. Fourth International Conference on HF Radio Systems and Techniques, 11-14 April, (Londres, Royaume-Uni)
- BUDDEN, K.G. et JULL, G.W. [1964] - Reciprocity and non-reciprocity with magnetoionic rays. *Can. J. Phys.*, No. 42, pp. 113-130.
- Chase, D. [1973], "A Combined Coding and Modulation Approach to Communications over Dispersive Channels", *IEEE Trans.*, Vol. COM-21, No. 3, mars, p. 159-174.
- CHOW, S. M., IRVINE, G. W., McLARNON, B. D. et KAYE, A. R. [1981] Communications for small communities in developing countries. Proc. Pacific Telecommunications Conference, Pacific Telecommunications Council, Honolulu, Hawaii.
- Clark, A.P. [1981], "Channel Estimation for an HF Radio Link", *Proc. IEE*, Vol. 128, Part F, No. 1, février, p 33-42.
- CLARKE, R. H. [1979] Influence of ionospheric irregularities on HF skywave communications. Article présenté à la Sydney Ionospheric Propagation Conference du 14 au 17 mai. Résumé publié dans IPS-X10, Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.
- Clarke, R.H. [1980], "A Frequency Management Technique for HF Sky-Wave Communications Based on CW Soundings", Australian DOD Rpt. ERL-0138-tr, mai.
- CLARKE, R. H. et TIBBLE, D. V. [1978] Measurement of the elevation angles of arrival of multicomponent HF skywaves. *Proc. IEE*, Vol. 125, 1, 17-24.
- Cottrell, R.A. [1979], "An Automatic HF Channel Monitoring System", IEE Colloquium Digest 1979/48. Recent Advances in HF Communications Systems and Techniques, février.

CROFT, T. [1972] Sky-wave backscatter: a means of observing our environment at great distances: *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 10, 1, 73-156.

Currie, J.C. et Weale, J.R. [1985], "Studies of Inverse Filtering and Channel Estimation Techniques for HF Serial Modems", IEE Conf. Pub. No. 245, pp. 151-155, Third International conference on HF Communications Systems and Techniques, 26-28 février (Londres, Royaume-Uni)

DANILKIN, N.P. [1985] - "Prosvechivanie ionosfern na granitse diapazona radioprozrachnosti" ("Illumination of the ionosphere at the limit of the radiotransparency range") - *Radiotekhnika*, No. 9, page 3.

Darbyshire, E.P. et Gott, G.F., [1986], "Robust Data Transmission at HF", IEE Conf., Pub. No. 68, pp. 63-69, Fourth International Conference on Radio Receivers and Associated Systems, 1-4 juillet.

DARNELL, M. [1975] Channel estimation techniques for HF communications. AGARD Conf. Proc. No. 173, *Radio Systems and the Ionosphere*, Paper 16.

DARNELL, M. [1978] Channel evaluation techniques for dispersive communications paths. *Communications Systems and Random Process Theory*. Ed. J. K. Skwirzynski, Sijthoff and Noordhoff, The Netherlands, 425-460.

DARNELL, M. [1979] An HF data modem with in-band frequency agility. IEE Conference on Recent advances in HF communications systems and techniques.

DARNELL, M. [1986] Embedded Real-Time Channel Evaluation Techniques, AGARD LS-145, 6-1 to 6-16 (ISBN 92-835-1521-3).

Darnell, M., Hague, J. et Chan, A., [1988], "A Global Common-User System for the Provision of HF Propagation Data", AGARD EPP Symposium, Oct., Paris.

DAVID, P., GOUTELARD, C. et VAN UFFELEN, J.P. [1976] Procédé de sélection de la fréquence optimale pour une transmission de données sur canal ionosphérique. AGARD Conf. Proc. No. 173, *Radio Systems and the Ionosphere*, Paper 17. Ed. W. T. Blackband. NASA Accession No. N77-20302. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

EARL, G. F. et WARD, B. D. [1986] Frequency management support for remote sea-state sensing using the Jindalee sky-wave radar. *Proc. IEEE*, Special Issue - Oceanic Engineering.

Elvy, S.J. [1985], "A Design for an Automatic HF Radio System", *Radio Science*, Vol. 20, No. 3, mai-juin, pp. 261-268.

GEORGE, P.L. et HALLIGAN, R.J. [1985] Techniques for real-time HF channel evaluation in aid of optimized data transmission. Proc. URSI-IPS Conference on the Ionosphere and Radio Wave Propagation. Eds. D. G. Cole and L. F. McNamara, Technical Report TR-85-04. Ionospheric Prediction Service, Sydney, Australie.

Gibson, A.J. et Arnett, L. [1988], "New HF Spectrum Occupancy Measurements in Southern England", IEE Conf. Pub. No. 284, pp. 159-164, Fourth International conference on HF Radio Communications Systems and Techniques, 11-14 avril (Londres Royaume-Uni)

Goodman, J.M. et Daehler, M. [1988], "Use of Oblique-Incidence-Sounders in HF Frequency Management", IEE Conf. Pub. No. 284, pp. 66-70. Fourth International conference on HF Radio Communications Systems and Techniques, 11-14 avril; (Londres, Royaume-Uni)

Gott, G.F. et Hillam, B. [1979], "The Improvement of Slow Rate FSK by Frequency Agility and Coding", IEE Coll. Dig. 1979/48. Recent Advances in HF Communications Systems and Techniques, février 1979.

Gott, G.F. et Dutta, S. [1979], "Improved diversity Combiner in HF Interference", IEE Coll. Dig. 1979/48. Recent Advances in HF Communications Systems and Techniques, février.

GOTT, G.F., DUTTA, S. et DOANY, B.E. [1983] - Analysis of HF interference with application to digital communications, Proc. IEE, 130 Part F, pp. 452-458.

GOTT, G.F., WONG, N.F. et DUTTA, S. [1982] - "Occupancy Measurements Across the Entire HF Spectrum", AGARD Conf. Proc. No. 332. "Propagation Aspects of Frequency Sharing Interference and System Diversity", Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N83-30873. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, USA.

HEADRICK, J. M. et SKOLNIK, M. I. [1974] Over the horizon radar in the HF band. *Proc. IEEE*, Vol. 62, 6, 664-673.

Humphreys, J.A. et Shearman, E.D.R. [1985], "Propagation and Performance Assessment on a Working HF Data Link", IEE Conf. Pub. No. 245, pp. 32-36. Third International conference on HF Communications Systems and Techniques, 26-28 février, (Londres, Royaume-Uni)

JULL, G.W. et PETERSEN, G.W.E. [1964] - Origin of non-reciprocity on high frequency ionospheric paths. *Nature*, Vol. 201, pp. 483-484.

KURIKI, I. et TAKEUCHI, T. [1986] Vertical-oblique incidence ionospheric sounding. *J. Radio Res. Labs. (Japon)*, Vol. 33.

Leon, B.J. [1973], "Bit Error ratio Amplification", National Telecommunications Conf., Nov. 26-28, Atlanta GA, IEEE p. 4A/1, Vol. 1.

McLARNON, B.D. [1982] Real-time channel evaluation in an automatic HF radio telephone system. Proc. Second IEE Conference on HF Communication Systems and Techniques, Londres, Royaume-Uni.

McNAMARA, L.F. et WILKINSON, P.J. [1986] - A cautionary note on the use of F2 region correlation coefficients for short-term forecasting purposes. *Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, June 18-22, 1984*, 529, Ed. P.A. Simon, G. Heckman and M.A. Shea, published by National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA, and Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, USA.

MILSON, J.D. [1986] - Towards improving a short-term ionospheric forecasting service. *Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, June 18-22, 1984*, 524, Ed. P.A. Simon, G. Heckman and M.A. Shea, published by National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, USA, and Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, USA.

Pennington, J. [1983], "HF Channel Evaluation Measurements for 2.4 kbits/sec Modems", IEEE International Conf. on Communications, pp. 1116-1120, Vol. 2, 19-22 juin, Boston MA.

PROBST, S. E. [1968] The CURTS concept and current state of development dans *Ionospheric Radio Communications*, 370-379, Ed. K. Folkstad, Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

REINISCH, B.W. et HUANG, X. [1982] - Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms, 1. Automatic O and X trace identification for topside ionograms, pp. 421-434, 3. Processing of bottomside ionograms, pp. 837-844, *Radio Sci.*, Vol. 17.

Reed, A.P.C. et Hopkinson, J.N. [1988], "Adaptive Data Link Protocols: Design and Performance over Automated HF Skywave Links", IEE Conf. Pub. No. 284, pp. 6-11. Fourth International Conference on HF Radio Communications Systems and Techniques, 11-14 avril, (Londres, Royaume-Uni)

ROTHMULLER, I. J. [1978] Real-time propagation assessment: initial test results. IES 1978, *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*. Ed. J. M. Goodman. US Govt. Printing Office, Washington DC 20402.

RUSH, C. M. [1976] An ionospheric observation network for use in short-term propagation conditions. *Telecomm. J.* Vol. 43, 544-548.

Shaw, M., Honary, B. et Darnell, M. [1988], "An RTCE-assisted ARQ Transmission Scheme: Design and Performance", IEE Conf. Pub. No. 284, pp. 43-50. Fourth International Conference on HF Communications Systems and Techniques, 11-14 avril.

Sloggett, C.D.R. [1979], "Improving the Reliability of HF Data Transmissions", IEE Coll. Dig. 1979/48. Recent Advances in HF Communications Systems and Techniques, février 1979.

STEVENS, R. W. [1968] The CHEC sounding system. *Ionospheric Radio Communications*. Ed. K. Folkstad, Plenum Press, New York, NY Etats-Unis d'Amérique.

WRIGHT, J.W. et PITTEWAY, M.L.V. (1979) - Real-time data acquisition and interpretation capabilities of the Dynasonde. 1. Data acquisition and real-time display, p. 815-825, et 2. Determination of magnetoionic mode and echo-location using a small spaced receiving array, p. 827-835. *Radio Sci.*, Vol. 14, 5.
