

**PRÉVISION A COURT TERME DES FRÉQUENCES CRITIQUES,  
DES FRÉQUENCES MAXIMALES UTILISABLES D'EXPLOITATION  
ET DU CONTENU ÉLECTRONIQUE TOTAL**

(Programme d'études 27C/6)

(1982-1986-1990)

## 1. Introduction

On sait que les valeurs journalières de foF2 varient d'environ 15% à 20% par rapport à la médiane (mensuelle) de foF2 pendant des périodes calmes et aussi pendant des orages magnétiques. Ces variations peuvent se superposer à des augmentations ou des diminutions plus lentes sur plusieurs jours. Il y a intérêt à prévoir toutes ces variations pour assurer des radiocommunications efficaces.

King et Slater [1973] ont souligné la nécessité de prévoir les variations ionosphériques d'un jour à l'autre. Ces auteurs ont montré qu'aux latitudes moyennes, le quartile mensuel des valeurs journalières observées de la foF2, en un point donné et pour une heure locale donnée, est deux fois plus grand en moyenne — et, en été, cinq fois plus grand — que l'erreur sur la valeur médiane correspondante prévue par le Rapport 340. Les diagrammes de Wilkinson [1979] illustrent clairement l'étalement des valeurs de la foF2 pour les stations ionosphériques australiennes entre les latitudes basses et les latitudes élevées. Rush et autres [1974] ont étudié les conséquences de la variabilité journalière de la région F2 sur les circuits en ondes décamétriques, en simulant le fonctionnement de ces circuits par trajectographie.

La prévision des variations journalières dans les régions E et F1 présente peu de difficultés car elles peuvent être représentées par les médianes mensuelles de foE et de foF1 [Rush et Gibbs, 1973].

La méthode fondamentale utilisée pour la prévision à court terme des caractéristiques ionosphériques est une extrapolation d'une série d'observations échelonnées dans le temps, fondée sur l'hypothèse que la tendance actuelle se maintiendra, du moins pendant un avenir rapproché. L'extrapolation peut porter sur la caractéristique ionosphérique elle-même (par exemple foF2), sur un indice dérivé de caractéristiques ionosphériques ou encore sur un paramètre physique dont on sait qu'il présente une corrélation appropriée étroite avec la caractéristique ionosphérique.

On peut effectuer ces prévisions en utilisant des périodes d'anticipation différentes, selon le degré de précision avec lequel les variations ionosphériques doivent être repérées et l'intervalle d'échantillonnage doit être assorti à la période d'anticipation. Par exemple, si des variations notables de l'ionosphère se produisent au cours d'une heure, il faudra faire des observations toutes les cinq à dix minutes et élaborer des prévisions avec des périodes d'anticipation du même ordre.

L'utilité, et les conditions à remplir, d'un réseau d'observatoires ionosphériques installés les uns au sol et les autres à bord de satellites, dont les mesures seraient destinées à la prévision à court terme des conditions de la propagation radioélectrique, ont été décrites en détail par Rush [1976]. Toutefois, il convient de noter que les corrélations relativement élevées obtenues par Rush correspondent à des jours très perturbés (c'est-à-dire des jours d'orage ionosphérique) et que ces mêmes corrélations élevées ne sont pas toujours obtenues pour des jours où les écarts par rapport aux valeurs moyennes sont relativement petits [McNamara et Wilkinson, 1986; Milsom, 1986].

---

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

## 2. Prévision à court terme de foF2 et de la MUF d'exploitation

### 2.1 Causes des variations à court terme de la MUF

Les variations à court terme des conditions ionosphériques dues aux éruptions solaires et aux vents solaires très rapides associés aux trous coronaires et dues aux variations du flux ionisant en provenance du Soleil sont étudiées dans le Rapport 727. D'une manière générale, les variations dues aux éruptions solaires et aux trous coronaires débutent à un instant relativement bien défini; on peut les relier au phénomène solaire qui les a provoquées et on peut les prévoir avec un certain succès.

Même pendant les périodes calmes du point de vue magnétique, les caractéristiques ionosphériques présentent d'un jour à l'autre des différences qui sont dues aux variations du flux ionisant des rayons ultraviolets en provenance du Soleil et aux variations de l'intensité du vent solaire ainsi qu'à son interaction avec la magnétosphère et l'ionosphère. L'effet total de ce dernier facteur est très complexe et la chaîne causale complète n'a pas encore été établie. Le premier facteur pose aussi des problèmes insolubles, le flux de rayons ultraviolets ne pouvant être mesuré qu'au prix de grandes difficultés.

S'ajoutant à ces variations, on en observe d'autres dont l'échelle de temps est de l'ordre de 10 min à quelques heures et qui sont dues aux perturbations ionosphériques itinérantes lesquelles représentent les effets sur l'ionosphère des ondes de gravité en atmosphère neutre [Hines, 1974]. On a constaté que les grandes perturbations ionosphériques itinérantes prennent naissance aux latitudes élevées et sont associées à de fortes perturbations géomagnétiques [Francis, 1975; Richmond et Roble, 1979] alors que les perturbations de faible intensité semblent avoir une origine météorologique locale [Bertin et autres, 1978].

Les perturbations ionosphériques itinérantes peuvent modifier la foF2 de 1 à 2 MHz et introduire de multiples composantes Doppler qui donnent lieu à un évanouissement de longue durée et par conséquent à une diminution de la qualité du circuit. Cependant, les effets des perturbations ionosphériques itinérantes peuvent souvent être éliminés par le recours à la diversité d'espace ou de polarisation.

### 2.2 Prévisions fondées sur des caractéristiques solaires et géophysiques

Bennett et Friedland [1970] ainsi que Ichinose et autres [1980] ont établi des prévisions à court terme de la foF2 en rapportant les variations de ce paramètre aux variations correspondantes de variables géophysiques choisies telles que le flux solaire sur 10,7 cm et l'indice géomagnétique  $K_p$ . L'inconvénient de ce procédé est qu'il faut commencer par prévoir les variables géophysiques indépendantes dont on suppose que dépendent les variations de la foF2. Même si l'on parvenait à prévoir ces variables avec succès, on ne pourrait établir que des prévisions imparfaites de la foF2 [McNamara, 1976a; Wilkinson, 1979].

La corrélation étroite entre les valeurs moyennes à long terme du flux radioélectrique solaire sur la longueur d'onde 10,7 cm et les paramètres ionosphériques est bien établie, ce qui a conduit à utiliser des indices de prévision ionosphérique basés sur ce flux (Recommandation 371). Bien que cette corrélation laisse penser qu'il est possible d'élaborer un système de prévision à court terme fondé sur la prévision du flux sur 10,7 cm de longueur d'onde, plusieurs jours ou semaines à l'avance, en réalité la corrélation entre le flux sur 10,7 cm et foF2, pour de courts intervalles de temps, est médiocre. Cela est probablement dû au fait que l'ionosphère est ionisée par le flux ultraviolet solaire et que la relation entre les deux flux est mal connue pour de courts intervalles de temps [Hall et autres, 1969; Hall et Hinteregger, 1970].

L'utilisation de moyennes à long terme du flux sur 10,7 cm [McNamara, 1976a; Da Rosa et autres, 1973] a obtenu un certain succès mais, en général, la corrélation entre les valeurs quotidiennes du flux et de foF2 ou du CET n'est pas suffisamment étroite pour fournir des prévisions utiles pour les derniers paramètres.

Zevakina et Lavrova [1980] ont constaté une corrélation entre la direction du champ magnétique interplanétaire et le sens de l'écart de la foF2 par rapport à sa valeur médiane. Les jours où la direction du champ magnétique interplanétaire est celle qui s'éloigne du Soleil, les valeurs de la foF2 aux latitudes élevées et moyennes sont, dans la plupart des cas, supérieures aux valeurs médianes; les jours où le champ magnétique interplanétaire est orienté vers le Soleil, elles leur sont inférieures. La direction de la composante du champ magnétique interplanétaire perpendiculaire à l'écliptique influe aussi sur le sens des écarts de la foF2 par rapport à ses valeurs médianes.

Ces relations entre la direction du champ magnétique interplanétaire et les écarts de la foF2 offrent une possibilité de prévision mais l'on ne dispose généralement pas de mesures en temps réel du champ magnétique interplanétaire et la déduction de la direction de ce champ à partir de magnétogrammes de latitudes élevées [Svalgaard, 1972; Fougere, 1974; Wilcox, 1972] n'est pas toujours correcte.

Reilly et Daehler [1986] ont développé une méthode qui combine des prévisions fondées sur des paramètres géophysiques associés et des données de sondage. Dans cette méthode le modèle statistique mensuel médian, qui est typiquement fondé soit sur un nombre moyen de taches solaires soit sur le flux radioélectrique solaire à 10,7 cm, est ajusté pour s'accorder aux observations du sondeur sur un trajet donné, définissant ainsi un paramètre solaire réactualisé qui peut être utilisé pour la prévision pour d'autres trajets.

Kiseliova et Zevakina [1984] ont fait état de succès en reliant les perturbations positives de la foF2 à des modifications des paramètres du vent solaire, de la structure en secteurs du champ magnétique interplanétaire et des indices d'activité géomagnétique. Une revue des récents progrès accomplis par l'URSS en matière de prévision à court terme des perturbations ionosphériques a été préparée par Zevakina [1986].

### 2.3 *Prévisions fondées sur des caractéristiques ionosphériques*

Une solution plus satisfaisante au problème de la prévision à court terme de la foF2 ou de la MUF d'exploitation d'un circuit donné consiste à établir un plan de prévision fondé sur les valeurs de l'une ou l'autre de ces fréquences observées dans un passé immédiat. De tels plans de prévision pour la foF2 sont par exemple décrits par Rush et Gibbs [1973], Lyakhova et Kostina [1973], McNamara [1976b] et Wilkinson [1979].

Rush et Gibbs [1973] ont utilisé une valeur moyenne pondérée de la foF2 sur 5 jours pour prévoir les valeurs journalières et horaires de cette fréquence. La méthode de Lyakhova et Kostina [1973] est fondée sur la constatation suivante: les coefficients de corrélation entre les écarts de la foF2 par rapport aux valeurs médianes restent supérieurs à 0,5 pendant une durée pouvant atteindre 4 h. La forte corrélation entre les variations de la foF2 d'une heure à l'autre a été étudiée par Lyakhova [1960], Radinov [1963], Gautier et Zacharisen [1965] et Rush [1972].

McNamara [1976b] a établi des prévisions de la foF2 en un point donné avec une durée d'anticipation pouvant atteindre 3 h, en extrapolant la tendance d'écart des observations des quelques dernières heures, par rapport à la médiane glissante sur 15 jours: Wilkinson [1979] a simplement extrapolé dans le temps l'écart d'une valeur observée de foF2 par rapport à la médiane mensuelle prévue. Il a constaté l'efficacité de cette méthode pour des périodes d'anticipation de 3 h environ.

Ames et Egan [1967], Ames et autres [1970], Krause et autres [1970, 1973a et b] et D'Accardi [1978] ont appliqué des méthodes similaires à des circuits à incidence oblique.

Le succès de chacune de ces méthodes de prévision dépend des conditions dans lesquelles on se propose de l'appliquer, surtout en ce qui concerne la précision que l'on recherche et la période d'anticipation dont on a besoin. La plupart d'entre elles donnent des résultats raisonnablement satisfaisants lorsqu'il s'agit de prévoir une MUF d'exploitation plus proche de la valeur réelle que ne l'est la médiane mensuelle prévue, mais seulement pour des périodes d'anticipation de l'ordre d'une heure ou moins.

### 2.4 *Prévisions fondées sur des indices ionosphériques*

Afin d'établir des prévisions à court terme pour des circuits pour lesquels il n'existe aucune observation en temps réel, on doit déduire le comportement de l'ionosphère des données dont on dispose et utiliser ces observations pour obtenir les valeurs correspondant aux divers points du circuit étudié.

De nombreuses études ont fait état des coefficients de corrélation qui illustrent le degré d'interdépendance des écarts horaires des caractéristiques ionosphériques observées en plusieurs emplacements [Gautier et Zacharisen, 1965; Zacharisen, 1965; Zevakina et autres, 1967a; Rush, 1972].

McNamara [1979] a utilisé les observations de stations ionosphériques peu éloignées pour déterminer un indice ionosphérique effectif qui a ensuite été utilisé avec les cartes synoptiques des médianes mensuelles de la foF2 pour prévoir la valeur de cette fréquence au point de réflexion du circuit étudié.

Des prévisions ont été faites en projetant l'indice dans le temps. On a pris des périodes d'anticipation de 0 à 3 h et de 24 h et on a constaté que les prévisions faites avec une période d'anticipation de 24 h n'étaient en général pas plus inexactes que celles qui étaient faites 0 à 3 h à l'avance. Les erreurs sur les valeurs prévues de la foF2 en deux stations de latitude moyenne étaient inférieures à 10% dans 50 à 70% des cas pour les périodes considérées. Que ce niveau d'erreur soit acceptable dépend de l'application envisagée.

D'autres méthodes plus compliquées, fondées sur la mise à jour en temps réel des cartes synoptiques des caractéristiques ionosphériques, sont décrites par Thompson et Secan [1979] et Tascione et autres [1979]. Un système de prévision fondé sur l'emploi d'indices ionosphériques journaliers a été décrit par Wilkinson [1986].

Dans les limites d'une période d'anticipation nulle, la «prévision» devient en fait une évaluation en temps réel de l'ionosphère.

### 2.5 *Procédés pratiques pour les prévisions à court et à moyen terme*

Les procédés pratiques pour les prévisions à court et à moyen terme des conditions ionosphériques et des conditions de la propagation radioélectrique sont fondés sur diverses combinaisons des trois méthodes décrites plus haut.

Les prévisions fondées sur des données ionosphériques datant de quelques heures seulement, et destinées à couvrir quelques heures à venir seulement, peuvent tenir compte à la fois des écarts d'un jour à l'autre par rapport aux prévisions à long terme et des écarts dus à une perturbation magnétique en cours, si cette perturbation n'est pas trop forte. Il reste ici une difficulté à surmonter: les écarts varient non seulement en fonction du temps, mais également d'un endroit à un autre au même moment; il faut, par conséquent, faire des observations au voisinage du circuit considéré, ou le long de ce circuit, en incidence verticale ou oblique, ou encore par rétrodiffusion. —

Uffelmann [1982] et Uffelmann et autres [1982] ont décrit une technique permettant d'appliquer avec succès des observations faites en incidence oblique sur un circuit à la prévision de la MUF sur un circuit voisin. Une \_\_\_\_\_

autre méthode consiste à faire des prévisions pour des zones, à l'intérieur desquelles les écarts sont moins grands que d'une zone à l'autre, par exemple la méthode de Zevakina et autres [1967b]. L'étude de Piggott [1970] sur l'utilisation des résultats des sondages en contre-haut pour les prévisions a permis de mettre en évidence les anomalies spatiales, notamment les très grandes différences qui existent entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud. Des techniques avancées de sondage numérique [Bibl et Reinisch, 1978] offrent la possibilité d'identifier et d'interpréter des conditions ionosphériques complexes en temps quasi réel [Reinisch et Huang, 1982; Wright et Pitteway, 1982]. Un réseau mondial de ce type d'ionosondes [Wright, 1981], sondant obliquement et verticalement, pourrait fournir un système de prévision pour tout le globe.

La méthode allemande de la Deutsche Bundespost est fondée sur l'enregistrement continu des données relevées sur 20 circuits radioélectriques européens et extraeuropéens, en plus des méthodes de prévision de l'activité solaire et des perturbations magnétiques déjà décrites. Toutes les 24 heures, on établit les pourcentages d'écart par rapport aux prévisions, en fonction des événements solaires et géographiques actuels et en fonction des conditions qui existaient au même stade des rotations solaires précédentes. Comme les prévisions portent principalement sur des circuits faisant déjà l'objet de surveillance, on élimine ainsi l'influence des anomalies spatiales, et la méthode est entachée des mêmes incertitudes que les méthodes mentionnées précédemment. La méthode de la Deutsche Bundespost constitue une extrapolation des procédés plus anciens décrits par Ochs [1970]. Une méthode de prévision fondée sur des données solaires et géophysiques et sur les champs mesurés en temps réel d'émetteurs à ondes décimétriques éloignés fonctionnant sur 26 fréquences a été décrite par Dambolt [1979]. La particularité de cette méthode est que les prévisions se présentent sous forme d'un indice de qualité qui est en relation avec le champ journalier attendu.

Quelques méthodes de prévision sont basées sur des modèles particuliers. Par exemple, le modèle de Obayashi et Matuura [1972] qui décrit la distribution des variations de la densité électronique avec la hauteur, la latitude et la saison durant la phase moyenne d'un orage magnétique a été utilisé par Barclay [1976].

Dans la méthode de prévision à court terme décrite par Barclay [1976], on compare les valeurs horaires de foF2 fournies par deux stations d'Europe occidentale avec les valeurs prévues correspondantes. On fait ensuite la prévision des MUF d'exploitation: celles-ci sont considérées comme basses pour la période à venir s'il existe une perturbation magnétique ayant un niveau supérieur à une valeur donnée; dans le cas contraire, les MUF sont considérées comme normales, sauf si le nombre de taches solaires et le flux radioélectrique ont des valeurs très différentes des valeurs prévues. On fait aussi la prévision des LUF: celles-ci sont considérées comme élevées en hiver si l'activité magnétique est forte; elles sont considérées comme élevées ou basses, ici encore, selon les écarts accusés par les nombres de taches solaires et les niveaux du flux radioélectrique. Cette façon de procéder permet à des personnes non expérimentées de faire des prévisions d'une certaine utilité, notamment pendant les périodes calmes.

En URSS, des études statistiques portant sur les variations de foF2 ont mis en évidence des intervalles de temps «interdits» pour les débuts des orages, pour les stations ionosphériques de ce pays [URSS, 1957]. En URSS également, on a pu prévoir, en effectuant une surveillance en temps réel, des communications relativement stables dans la zone aurorale; on a observé en effet que foF2 ne subit pas de fluctuations importantes pendant des périodes de 15 à 30 minutes lorsque les réflexions s'effectuent sur la couche F2. Aux Etats-Unis d'Amérique, on a étudié, pour toutes les stations et pour certains mois de 1958, les écarts de la valeur journalière de foF2 par rapport à la médiane mensuelle calculée. On a observé des tendances systématiques mondiales de ces écarts, notamment en période de perturbations ionosphériques [Jones et autres, 1973]. Zevakina [1986] passe en revue les principaux progrès accomplis en URSS en matière de prévision à court terme des perturbations ionosphériques.

La méthode de prévision à moyen terme (une semaine à l'avance) utilisée par l'Administration française fait appel à des modèles mathématiques établis par application de la théorie des systèmes, des modèles et de leur identification [Le Roux, 1980]. De par leurs performances, ces modèles, qui prennent en compte les indices géomagnétiques  $A_k$  et solaires  $\Phi$ , permettent d'établir la prévision hebdomadaire des MUF de référence horaires pour diverses régions géographiques. Des messages hebdomadaires donnent pour la semaine suivante des pourcentages d'écart des MUF de référence par rapport aux prévisions mensuelles publiées antérieurement. Une prévision journalière des niveaux prévus de la MUF et de la LUF pour les prochaines 24 heures, divisées en période de 6 heures, est aussi faite pour une zone de l'Europe septentrionale et pour une zone d'Europe sur la base d'observations effectuées à Uppsala et à Lannion [Bourdila et autres, 1984].

### 3. Prévision à court terme du contenu électronique total (CET)

Des méthodes générales de prévision des effets transionosphériques sur les ondes radioélectriques a fait l'objet d'un rapport dans les Solar-Terrestrial Predictions Proceedings [Klobuchar, 1979]. ont et sont également étudiées dans le Rapport 263, alors que les paramètres ionosphériques appropriés sont décrits dans le Rapport 725.

Les moyennes mensuelles du contenu électronique total (CET) sont normalement obtenues à partir de profils de densité électronique établis d'après des modèles de la foF2 et de la M(3000)F2 [Jones et autres, 1969; Jones et Obitts, 1970]. Ces prévisions comportent donc les erreurs inhérentes à ces deux modèles empiriques.

Des comparaisons entre les médianes observées et prévues du CET dans des stations de latitudes moyennes et basses [McNamara et Wilkinson, 1983; McNamara, 1984] ont montré qu'une erreur de 10% n'est pas inhabituelle aux latitudes moyennes et qu'une erreur de 20 à 30% se produit souvent aux latitudes basses.

La variabilité à court terme du CET par rapport aux moyennes mensuelles est d'environ 25% en valeur moyenne quadratique et elle suit une distribution quasi normale [Johanson et autres, 1978; Soicher et autres, 1982]. Aux latitudes moyennes, cela correspond à plusieurs fois l'erreur sur les valeurs médianes prévues. On peut admettre que la contribution de la plasmasphère (ou photonosphère) au CET est de 15% du CET pendant le jour [Donnelly, 1979 et 1980].

### 3.1 *Effets des orages géomagnétiques sur le CET*

Les variations du CET par rapport aux conditions moyennes sont principalement dues à l'activité géomagnétique associée à des phénomènes solaires. Cette question est traitée dans le Rapport 727.

### 3.2 *Recours à des mesures du CET en temps quasi réel pour améliorer les prévisions à court terme*

Les valeurs du retard moyen mensuel, même corrigées pour tenir compte des variations moyennes du CET dues aux effets des orages magnétiques, peuvent ne pas être suffisamment précises pour certains systèmes ou certaines catégories d'utilisateurs de systèmes. Pour la mise à jour des modèles médians, il y aurait plutôt lieu d'effectuer des mesures en temps quasi réel de l'ionosphère locale, qui porteraient soit sur la foF2 soit sur le contenu électronique total. Il conviendrait aussi d'envisager une autre solution qui consiste à utiliser deux fréquences très espacées pour mesurer et corriger en temps réel l'erreur sur le retard ionosphérique de premier ordre. Les techniques de mise à jour impliquent l'établissement de médianes mensuelles ou hebdomadaires améliorées, qui serviraient de base à la prévision des valeurs pour les prochaines heures.

Des études de techniques adaptatives qui utilisent des observations en temps réel afin de réduire les erreurs de prévision (moyenne quadratique mensuelle) ont été effectuées à partir de données sur la foF2 [Wilkinson, 1979] et sur le CET [Donatelli et Allen, 1978, 1981; Leitinger et autres, 1978]. Pour que l'on puisse réduire sensiblement (c'est-à-dire d'environ 50%) l'erreur résiduelle quand on utilise des observations faites en un même lieu, il faut que les intervalles de prévision soient inférieurs aux valeurs suivantes:

- en période d'activité solaire maximale
  - de jour: 3 h
  - de nuit: 1 h
- en période d'activité solaire minimale
  - de jour: 1 h
  - de nuit: 30 min.

Les intervalles à respecter pour une mise à jour utile en période d'activité solaire minimale doivent être plus courts pour obtenir le même pourcentage de réduction. L'erreur résiduelle est beaucoup plus faible pendant de telles périodes.

### 3.3 *Projections spatiales des mesures en temps quasi réel*

La projection spatiale des observations a été examinée dans des études de corrélation portant sur la foF2 [Rush, 1976] et sur le CET [Klobuchar et Johanson, 1977; Soicher, 1978, 1979]. Les travaux de Klobuchar et Johanson [1977] montrent l'existence d'une distance de corrélation en latitude à peu près égale à la moitié de la distance de corrélation en longitude. Ce fait doit être pris en considération en même temps que les effets temporels de toute technique adaptative dans laquelle on se sert d'observations en temps réel pour la mise à jour des données en un emplacement autre que le point d'observation. On a procédé à un tel examen en utilisant des données relatives au CET relevées dans des stations de latitudes moyennes [Allen et autres, 1977]. L'accroissement du taux d'augmentation des erreurs représente une superposition des fluctuations spatiales et temporelles. En ramenant l'intervalle espace-temps à un intervalle de temps équivalent, on peut avoir une estimation de l'intervalle de mise à jour utile. Pour les stations de latitudes moyennes, une bonne approximation peut être obtenue au moyen de la formule [Klobuchar, 1979]:

$$\Delta ET = \frac{1}{15} \left[ (\Delta LON)^2 + (2\Delta LAT)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left\{ \begin{array}{c} \Delta T \\ \text{ou} \\ |\Delta T - \Delta LT| \end{array} \right\} \quad (1)$$

dans laquelle:

$\Delta LON$ : différence de longitude, (degrés)

$\Delta LAT$ : différence de latitude, (degrés)

$\Delta T$ : intervalle de temps entre l'observation et la mise à jour (heures)

$\Delta LT$ :  $\Delta LON/15$ , (heures)

$\Delta ET$ : intervalle de temps équivalent, (heures)

{ } : choix entre la direction est ou ouest du point d'observation au point de mise à jour; on prend  $\Delta T$  si on va de l'ouest vers l'est et  $|\Delta T - \Delta LT|$  si on va de l'est vers l'ouest.

#### 4. Prévision d'autres paramètres

La prévision à court terme de la MUF d'exploitation sur un circuit est généralement la seule qui soit nécessaire pour les circuits téléphoniques et les circuits télégraphiques à débit réduit. Pour les liaisons de données à débit binaire moyen, d'autres paramètres, tels que les périodes d'évanouissement et l'étalement de fréquence par effet Doppler, deviennent importants, étant donné leur influence sur le taux d'erreur. La prévision à court terme de ces paramètres est certes possible, mais il est généralement admis que la gestion des fréquences en temps réel est indispensable à l'exploitation des liaisons de données à débit moyen [Clarke, 1979]. L'ionisation sporadique de la couche E est particulièrement importante à cet égard car, si elle ne peut faire l'objet de prévisions satisfaisantes, elle peut par contre assurer des communications de haute stabilité.

En raison du caractère très variable de l'apparition et de l'intensité de l'ionisation E sporadique, ses prévisions devraient être établies sous une forme statistique.

Harnischmacher et Rawer [1970] ont évoqué la possibilité de prévoir les «ouvertures» E sporadique, sur la base de la mesure de vents dans la région E; ils décrivent une série de mesures de Es apparaissant jour après jour à la même heure locale plus une heure par jour, l'absorption se trouvant accrue à la fin de cette séquence. Zevakina et autres [1967a] tiennent compte des variations saisonnières de Es dans le Manuel de l'URSS.

Une étude effectuée en Amérique du Sud par Giráldez et Mesterman [1973] pour un cycle solaire a montré que l'apparition de E sporadique pendant la journée dépend de la hauteur virtuelle de E sporadique au lever du Soleil.

Il semble que les conditions qui règnent dans la magnétosphère (densité et température électroniques) soient les facteurs dont dépendent essentiellement la configuration des champs électriques et de la concentration des particules. Dans ces conditions, le moyen le plus efficace pour prévoir l'ionisation E sporadique aurorale pourrait bien être l'emploi de satellites servant à étudier la magnétosphère.

L'ionosphère aux latitudes élevées pose des problèmes particuliers en raison de sa variabilité et de sa complexité (voir le Rapport 886). Besprozvannaya et autres [1979] estiment que les méthodes utilisées pour la prévision aux latitudes moyennes ne conviennent pas aux latitudes élevées et qu'il serait préférable d'utiliser une méthode fondée sur le contrôle des caractéristiques à grande échelle de la distribution de l'ionisation, qui soient les projections sur la haute ionosphère des caractéristiques structurelles à grande échelle du plasma magnétosphérique. Cela pourrait se faire grâce à des ionosondes au sol disposées à des emplacements appropriés, ou grâce à des satellites.

On peut faire des mesures en temps réel du creux de latitude élevée et de ses effets sur les communications en utilisant par exemple des photographies aurorales DMSP (Defense Meteorological Satellite Programme) pour localiser le bord du creux situé du côté du Pôle et en se servant ensuite du modèle de creux décrit par Halcrow et Nisbet [1977].

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN, R. S., DONATELLI, D. E., HARTMANN, G. K. et LEITINGER, R. [1977] Adaptive mapping of mid-latitude ionosphere. AFGL-TR-77-0176, Air Force geophysical Lab., Hanscom AFB, Mass., Etats-Unis d'Amérique.
- AMES, J. W. et EGAN, R. D. [1967] Digital recording and short-term prediction of oblique ionospheric propagation, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-15, 3, 382-389.
- AMES, J. W., EGAN, R. D. et MCGINTIE, G. F. [1970] Short-term prediction of HF communication circuit performance. *Ionospheric Forecasting*. Ed. V. Agy. AGARD Conf. Proc. N° 49, Paper N° 22.
- BARCLAY, L. W. [1976] An ionospheric storm model used for forecasting. AGARD Conf. Proc., 173. Radio Systems and the Ionosphere, Athènes, Grèce.

- BENNETT, S. M. et FRIEDLAN, A. B. [1970] Prediction of daily fluctuation of the F-region plasma frequency. *Ionospheric forecasting*. Ed. V. Agy. AGARD Conf. Proc. N° 49, Paper N° 31.
- BERTIN, F., TESTUD, J., KERSLEY, L. et REES, P. R. [1978] The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere: an experimental study. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 40, 1161-1184.
- BESPROZVANNAYA, A. S., SHIROCHKOV, A. V. et SHOHUKA, T. I. [1979] On the approach to forecasting ionospheric problems. *STPP\**, Vol. II, 528-542.
- BIBL, K. et REINISCH, B. W. [1978] The universal digital ionosonde. *Radio Sci.*, Vol. 13, 519-530.
- BOURDILA, A. M., FLEURY, R. et LE ROUX, Y. M. [1984] Short-term radio propagation predictions in the HF range. Communication présentée au «Workshop on Solar-Terrestrial Predictions», Meudon, France, 18-22 juin 1984.
- CLARKE, R. H. [1979] Influence of ionospheric irregularities on HF skywave communications. *Abstracts of the Sydney Ionospheric Propagation Conference of May 14-17, 1979*. Eds D. G. Cole and L. F. McNamara. Ionospheric Prediction Service Series X Reports IPS-X9, Sydney, Australie.
- D'ACCARDI, R. J. [1978] Time-series modelling and analysis of high frequency (HF) vertical and short-path oblique incidence ionospheric soundings. US Army Communications R&D Command Research and Development Tech. Rep. CORADCOM 78-7, NTIS Accession N° AD A058 630. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- DAMBOLDT, T. [1979] HF short-term field strength predictions and their agreement with observations. AGARD Conf. Proc. No. 238, Vol. 1, *Operational Modelling of the Aerospace Propagation Environment*. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N79-18094. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- DA ROSA, A. V., WALDMAN, H., BENDITO, J. et GARRIOTT, O. K. [1973] Response of the ionospheric electron content to fluctuations in solar activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 1429-1442.
- DONATELLI, D. E. et ALLEN, R. S. [1978] Temporal variability of ionospheric refraction correction. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 490-496. Ed. J. M. Goodman, US Govt. Printing Office, Stock N° 008-051-00069-1, Washington, DC 20402.
- DONATELLI, D. E. et ALLEN, R. S. [1981] Time cells for adaptive prediction of total electron content. *Radio Sci.*, Vol. 16, 2, 261-270.
- DONNELLY, R. F. Ed. *Solar-Terrestrial Predictions Proceedings*:
- Vol. I [1979] Prediction Group Reports. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-023-00041-9, Washington, DC 20402.
- Vol. II [1979] Working Group Reports and Reviews. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.
- Vol. III [1980] Solar Activity Predictions. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00473-2, Washington, DC 20402.
- Vol. IV [1980] Predictions of Terrestrial Effects of Solar Activity. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, No. 003-017-00479-1, Washington, DC 20402.
- FOUGERE, P. F. [1974] Dependence of inferred magnetic sector structure upon geomagnetic and solar activity. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 22, 8, 1173-1184.
- FRANCIS, S. [1975] Global properties of atmospheric gravity waves: A review. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1011-1054.
- GAUTIER, T. N. et ZACHARISEN, D. H. [1965] Use of space and time correlation in short-term ionospheric predictions. Conference Record First IEEE Annual Communications Convention, 7-9 juin, Boulder, Colo., Etats-Unis d'Amérique, Conf. Record, 671-676.
- GIRALDEZ, A. E. et MESTERMAN, I. [1973] Procesos físicos y guías para las predicciones de la Es (en espagnol). LIARA Rapport C-21, Laboratorio Ionosférico de la Armada, República Argentina.
- HALCROW, B. W. et NISBET, J. S. [1977] A model of F2 peak electron densities in the main trough of the ionosphere. *Radio Sci.*, Vol. 12, 5, 815-820.
- HALL, L. A., HIGGINS, J. E., CHAGNON, C. W. et HINTEREGGER, H. E. [1969] Solar cycle variation of extreme ultraviolet radiation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 4181-4183.
- HALL, L. A. et HINTEREGGER, H. E. [1970] Solar radiation in the extreme ultraviolet and its variation with solar rotation. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 6959-6965.
- HARNISCHMACHER, E. et RAWER, K. [1970] Precursor events for possible forecasting of sporadic-E increased absorption. *Ionospheric Forecasting*. E. V. Agy, AGARD Conf. Proc. N° 49, Paper N° 32.
- HINES, C. O. [1974] *The Upper Atmosphere in Motion*. American Geophysical Union, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.
- ICHINOSE, M., MAEDA, R. et ITO, S. [1980] Short-term prediction of maximum usable frequency for radio communications over the Japan area. *J. Radio Res. Labs. (Japon)*, Vol. 27, 124, 179-185.
- JOHANSON, J. M., BUONSANTO, M. J. et KLOBUCHAR, J. A. [1978] The variability of Ionospheric time delay. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 479-485. Ed. J. M. Goodman, US Govt. Printing Office, Stock No. 008-051-00069-1, Washington, DC 20402.

\* L'abréviation STPP signifie «Solar-Terrestrial Predictions Proceedings», 4 volumes publiés par la «National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)», US Dept. of Commerce, édités par R. F. Donnelly (voir Donnelly, 1979 et 1980)

- JONES, W. B., GALLET, R. M., LEFTIN, M. et STEWART, F. G. [1973] Analysis and representation of the daily departures of the foF2 from the monthly median. Office of Telecommunications, Report 73-12, US Dept. of Commerce, Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- JONES, W. B., GRAHAM, R. P. et LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Technical Report ERL 107-ITS-75, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- JONES, W. B. et OBITTS, D. L. [1970] Global representation and solar cycle variation of foF2 monthly median 1954-1958. Telecomm. Res. Rep. OT/ITS/TRR3. Office of Telecommunications, Supt. of Documents, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- KING, J. W. et SLATER, A. J. [1973] Erreurs dans la prévision des valeurs de foF2 et hmF2 par rapport aux valeurs journalières observées. *J. des Télécomm*, Vol. 40, 766-770.
- KISELIOVA, M. V. et ZEVAKINA, R. A. [1985] Forecasting of positive ionospheric disturbances. Communication présentée au «Workshop on Solar-Terrestrial Predictions», Meudon, France, 18-22 juin 1984.
- KLOBUCHAR, J. A. [1979] Transionospheric propagation predictions. *STPP*, Vol. II, 213-245.
- KLOBUCHAR, J. A. et JOHANSON, J. M. [1977] Correlation distance of mean daytime electron content. AFGL-TR-77-0185, DCA ADA 048117. Air Force Geophysical Lab., Hanscom AFB, Mass., Etats-Unis d'Amérique.
- KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. et ROSWELL, E. L. [1970] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (60 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-3345.
- KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. et ROSWELL, E. L. [1973a] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (200 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-4144.
- KRAUSE, G. E., D'ACCARDI, R. J. et ROSWELL, E. L. [1973b] Field test of a near-real-time ionospheric forecasting scheme (500 km). US Army Electronics Command Research and Development Tech. Rep. ECOM-4145.
- LEITINGER, R., ALLEN, R. S., DONATELLI, D. E. et HARTMANN, G. K. [1978] Adaptive mapping of ionospheric features. *Effect of the Ionosphere on Space and Terrestrial Systems*, 530-537. Ed. J. M. Goodman, US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- LE ROUX, Y. M. [1980] Prévisions ionosphériques à court terme par modélisation mathématique prédictive. *Ann. de Géophys.*, Vol. 36, 251-261.
- LYAKHOVA, L. N. [1960] Short-range forecasting of the state of the ionosphere. *Trudy IZMIRAN*, 17, 240-281.
- LYAKHOVA, L. N. et KOSTINA, L. I. [1973] On quantitative ionospheric forecasting, *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 13, 1, 50-53.
- McNAMARA, L. F. [1976a] The correlation of individual values of foF2 and M(3000)F2 with the solar 10.7 cm flux under magnetically quieted conditions, Ionospheric prediction service Series R Reports, IPS-R30, Sydney, Australie.
- McNAMARA, L. F. [1976b] Short-term forecasting of foF2. Ionospheric Prediction Service Series R Reports, IPS-R33, Sydney, Australie.
- McNAMARA, L. F. [1979] The use of ionospheric indices to make real- and near-real-time predictions of foF2 around Australia. *STPP*, Vol. I, 249-258.
- McNAMARA, L. F. [1984] Prediction of total electron content using international reference ionosphere. *Adv. Space Res.*, 4, 25-50.
- McNAMARA, L. F. et WILKINSON, P. J. [1983] Prediction of total electron content using the international reference ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 45, 169-174.
- 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, 18-22 juin 1984*, 529, Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.
- MILSON, J. D. [1986] Towards improving a short-term ionospheric forecasting service. *Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984*, 524 Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.
- OBAYASHI, T. et MATUURA, N. [1972] Theoretical model of F-region storm. *Solar-terrestrial Physics*, 1970, Part IV, 199-211.
- OCHS, A. [1970] The forecasting system of the Fernmeldetechnisches Zentralamt. AGARD Conf. Proc. No. 49, *Ionospheric Forecasting*, Paper No. 43. Ed. V. Agy. NASA Accession No. N70-23112. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- PIGGOTT, W. R. [1970] The use of satellite data for prediction purposes. AGARD Conf. Proc. No. 49, *Ionospheric Forecasting*, Paper No. 19, Ed. V. Agy. NASA Accession No. N70-23112. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.

- RADINOV, Ya. S. [1963] Autocorrelative characteristics of critical frequency and ionization-density fluctuations. *Geomag. i Aeronom.*, Vol. 3, 985-990.
- REILLY, M.H., DAEHLER, M. [1986] - Sounder updates for statistical model predictions of maximum usable frequencies on HF sky wave paths. *Radio Science*, Vol. 21, No. 6, 1001-1008.
- REINISCH, B.W. et HUANG, X. [1982] Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms, 3. Processing of bottomside ionograms. *Radio Sci.*, Vol. 17, 837-844.
- RICHMOND, A. D. et ROBLE, R. G. [1979] Dynamic effects of aurora-generated gravity waves on the mid-latitude ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 41, 7-8, 841-852.
- RUSH, C.M. [1972] Improvements in ionospheric forecasting capability. Report AFCRL-72-0138. Air Force Cambridge Research Labs, Bedford, Mass., Etats-Unis d'Amérique.
- RUSH, C.M. [1976] Un réseau des stations d'observation de l'ionosphère destiné aux prévisions à court terme de la propagation. *J. des Télécomm.*, Vol. 43, 544-548.
- RUSH, C.M. et GIBBS, J. [1973] Predicting the day-to-day variability of the mid-latitude ionosphere for application to HF propagation predictions. Rep. AFCRL-TR-73-0335. Air Force Cambridge Research Labs, Bedford, Mass., Etats-Unis d'Amérique. Air Force Surveys in Geophysics, N° 268.
- RUSH, C.M., MILLER, D. et GIBBS, J. [1974] The relative daily variability of foF2 and hmF2 and their implications of HF radio propagation. *Radio Sci.*, Vol. 9, 749-756.
- SOICHER, H. [1978] Spatial correlation of transionospheric signal time delays. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-26, 311-314.
- SOICHER, H. [1979] Correlation of satellite signal time delays at widely separated locations. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-27, 888-890.
- SOICHER, H., HOUMINER, Z. et SHUVAL, A. [1982] Total electron content structure in the Middle East. *Radio Sci.*, Vol. 17, 1623-1631.
- SVALGAARD, L. [1972] Interplanetary magnetic-sector structure 1926-1971. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 4027-4034.
- TASCIONE, T. F., FLATTERY, T. W., PATTERSON, V. G., SEGAN, J. A. et TAYLOR, J. W. Jr. [1979] Ionospheric modeling at Air Force Global Weather Central. *STPP*, Vol. I, 367-377.
- THOMPSON, R. L. et SECAN, J. A. [1979] Geophysical forecasting at AFGWC. *STPP*, Vol. I, 350-366.
- UFFELMAN, D. R. [1982] HF propagation assessment studies over paths in the Atlantic. IES 1981, *Effects of the Ionosphere on Radiowave Systems*. Eds. J. M. Goodman, F. D. Clarke and J. Aarons. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402.
- UFFELMAN, D. R., HARNISH, L. O. et GOODMAN, J. M. [1982] The application of real-time model update by oblique ionospheric sounders to frequency sharing. AGARD Conf. Proc. No. 332, *Propagation Aspects of Frequency Sharing. Interference and System Diversity*, 12-1 à 12-11. Ed. H. Soicher. NASA Accession No. N83-30873. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- URSS [1957] Annales de la Conférence corpusculaire de l'Académie des Sciences d'URSS (en russe), Moscou, URSS.
- WILCOX, J. M. [1972] Inferring the interplanetary magnetic field by observing the polar geomagnetic field. *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 10, 1003-1014.
- WILKINSON, P. J. [1979] Prediction limits for foF2. *STPP*, Vol. I, 259-278.
- WILKINSON, P. J. [1986] Short-term forecasting using daily ionospheric indices. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, 509, Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.
- WRIGHT, J. W. [1981] Global real-time ionospheric monitoring. *Effects of the Ionosphere on Radiowave Systems*. Ed. J. M. Goodman. US Govt. Printing Office, Library of Congress, Catalog No. 82-600510.
- WRIGTH, J. W. et PITTEWAY, M. L. [1982] Application of dopplionograms and goniogram to atmospheric gravity wave disturbances in the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 1719.
- ZACHARISEN, D. H. [1965] Space-time correlation coefficients for use in short-term ionospheric predictions. NBS Report 8811. National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- ZEVAKINA, R. A. [1986] Development of short-term ionospheric predictions. A review. Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, 519, Ed. P. A. Simon, G. Heckman et M. A. Shea, publié par National Oceanic and Atmospheric Administration, 325 Broadway, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique et Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Bedford, MA 01731, Etats-Unis d'Amérique.
- ZEVAKINA, R. A. et LAVROVA, E. V. [1980] On the possibility of predicting variations in the F2-region parameters as a function of the IMF direction. *STPP*, Vol. IV, C-27 à C-36.
- ZEVAKINA, R. A., LAVROVA, E. V. et LYAKHOVA, L. N. [1967a] Manual on short-term prediction of ionospheric geomagnetic storms and radio-propagation forecasting service. Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.
- ZEVAKINA, R. A., LAVROVA, E. V. et LYAKHOVA, L. N. [1967b] *Principes pour la Prévision des Perturbations Ionosphériques et Magnétiques* (en russe). Naouka Maison d'édition, Moscou, URSS.

## BIBLIOGRAPHIE

TCHERNOV, Y. A. [1971] *Sondages ionosphériques par rétrodiffusion* (en russe). Sviaz, Moscou, URSS.