

RAPPORT 727-3

**PRÉVISION A COURT TERME DES VARIATIONS D'ORIGINE SOLAIRE
DES CARACTÉRISTIQUES D'EXPLOITATION POUR LA
PROPAGATION IONOSPHERIQUE**

(Programme d'études 27A/6)

(1978-1982-1986-1990)

1. Introduction

Le présent Rapport traite de la prévision à court terme de l'activité solaire et de celle des perturbations magnétiques et ionosphériques ainsi que des perturbations des radiocommunications qui font suite à certaines manifestations de l'activité solaire. Il énumère ensuite les références des services de prévision à court terme actuellement assurés. Les prévisions des variations d'un jour à l'autre des caractéristiques de l'ionosphère, portant principalement sur la foF2 et sur le contenu électronique total, font l'objet du Rapport 888.

2. Relations Soleil-Terre : historique et sources

La documentation dans ce domaine se trouve principalement dans deux séries indépendantes de publications: celles du Comité spécial de Physique Soleil-Terre (SCOSTEP), qui organise tous les quatre ans, en coopération avec le Committee on Space Research (COSPAR), des symposiums consacrés à ce sujet et celles du Service international des Ursigrammes et Jours mondiaux (IUWDS) qui a inauguré une série périodique d'ateliers consacrés plus spécialement aux techniques de prévision de ces relations Soleil-Terre [Simon et autres, 1986; Donnelly, 1979].

3. Prévision à court terme de l'activité solaire

La prévision de l'activité solaire a trois applications dans le domaine de la prévision à court terme des caractéristiques ionosphériques: premièrement, comme signe indicateur de la probabilité d'apparition d'éruptions solaires provoquant un accroissement d'absorption dans la région D; deuxièmement, comme signe indicateur de l'apparition possible des événements et situations solaires susceptibles d'être suivis de perturbations magnétiques et ionosphériques; troisièmement comme signe indicateur de variations à court terme du rayonnement ionisant du Soleil, conduisant à des variations des fréquences critiques ionosphériques et des MUF de référence.

Il faut aussi, à des fins scientifiques et autres, localiser les régions actives qui sont susceptibles de donner naissance à des éruptions à protons, et aussi reconnaître ces éruptions dès leur début.

Les données des émissions de rayonnement optique, radioélectrique et X du Soleil sont collectées journalièrement dans les centres régionaux de l'IUWDS [IUWDS, 1973]. Les observations effectuées et reçues dans ces centres sont utilisées pour la prévision de l'activité solaire et de ses effets connexes sur le comportement des systèmes de radiocommunications.

Les observations solaires permettent de déterminer quelques heures ou quelques jours à l'avance les régions du disque solaire où prendront naissance des éruptions observées dans la raie spectrale H α , ainsi que les effets probables de ces éruptions. Les éléments de base pour ces prévisions sont les spectrohélogrammes solaires (H α , calcium), les magnétogrammes solaires, les cartes radioélectriques établies pour les longueurs d'ondes millimétriques et centimétriques et les rapports quotidiens sur les éruptions observées dans la raie spectrale H α [Simon et autres, 1969; Martres et autres, 1973; Bleiweiss et autres, 1977; Stasiewicz et autres, 1979; Severny et autres, 1979; Cook et Davies, 1979; Heckman, 1979]. Les régions solaires actives susceptibles de produire des éruptions présentent une grande complexité magnétique caractérisée par des gradients magnétiques élevés et des phénomènes de cisaillement [Sawyer et autres, 1986].

Certaines des données relatives aux éruptions $H\alpha$ permettent de prévoir l'apparition d'une absorption de la calotte polaire (PCA) quelques dizaines de minutes à l'avance. Ces données sont les suivantes: position de l'éruption sur le disque solaire par rapport à la position des taches solaires; sursauts sur ondes centimétriques; sursauts dans le spectre radioélectrique et sursauts de rayons X durs [Croom, 1971; Lange-Hesse et Rinnert, 1970; Tanaka et Enome, 1975; Cook et Davies, 1979; Heckman, 1979; Smart et Shea, 1979].

La prévision à court terme de l'activité solaire est en grande partie subjective; elle est en général fondée sur le comportement de régions précédemment actives qui présentaient des caractéristiques semblables [Heckman, 1979]. On met actuellement au point des techniques objectives [Hirman et autres, 1980], mais le succès en est limité. Les sources de renseignements les plus complètes traitant de la question de la prévision de l'activité solaire et des éruptions solaires sont fournies par McIntosh et Dryer [1972], Cook et McCue [1975] et Sawyer et autres [1986].

4. Prévisions à court terme des perturbations magnétiques et ionosphériques

La prévision à court terme des perturbations magnétiques et ionosphériques est étroitement liée aux observations des phénomènes solaires et géophysiques qui se rapportent à ces perturbations ainsi qu'à l'envoi d'avertissements aux centres régionaux.

Ces observations comportent:

- des mesures, par satellite et au sol, des effets des fortes éruptions solaires dans le spectre des rayons X, des ondes optiques et des ondes radioélectriques [Heckman, 1979; Cook et Davies, 1979];
- des mesures au sol, dans le spectre optique et radioélectrique, des trous coronaux solaires [Heckman, 1979; Cook et Davies, 1979; Marubashi et autres, 1979];
- des mesures par satellite et au sol, des flux de protons d'énergie supérieur à 10 MeV [Bailey, 1964; Larsen, 1979];
- des mesures de la scintillation interplanétaire des radiosources, ayant pour objet d'identifier les perturbations qui se propagent à travers le milieu interplanétaire [Hewish, 1972; Coles et autres, 1974; Cronyn et autres, 1975];
- des mesures, à bord d'engins spatiaux, du plasma du vent solaire et du champ magnétique, y compris la valeur de la composante sud du champ interplanétaire ainsi que l'intensité générale de ce champ et sa direction (vers le Soleil ou en sens inverse) [Akasofu et autres, 1973; Foster et autres, 1971; Svalgaard, 1975; Russell et autres, 1975; Tsurutani, 1979].

4.1 Perturbations ionosphériques à début brusque (PIDB)

Le renforcement du flux de rayons X qui accompagne les grandes éruptions peut provoquer des perturbations ionosphériques à début brusque (PIDB). Deux effets des éruptions solaires sont l'augmentation immédiate de la densité d'ionisation dans toute la région D et l'abaissement de la base de cette région. L'augmentation de la densité d'ionisation se traduit par une augmentation de l'absorption des ondes radioélectriques, qui provoque des évènements sur les ondes courtes. L'abaissement de la couche, en revanche, n'est pas important pour les ondes décimétriques mais cause des anomalies de phase soudaines sur les circuits à ondes myriamétriques. Les autres effets immédiats sont notamment l'absorption brusque du bruit cosmique, le renforcement brusque des bruits atmosphériques sur ondes myriamétriques, les augmentations brusques du contenu électronique total et les variations brusques du champ aux grandes longueurs d'onde [Mitra et Goyal, 1984]. Toutes ces questions ont été analysées par Larsen [1979]. Milsom [1986] donne une expression simple pour déterminer la probabilité pour qu'un évènement sur les ondes courtes se produise au cours des prochaines 24 heures.

Il est possible de prévoir avec un certain succès les aspects quantitatifs des PIDB qui résultent d'une éruption donnée en recourant à des modèles de la région D qui tiennent compte en détail des modifications d'ionisation induites par les rayons X d'une amplitude et d'une distribution spectrale données. Une fois qu'on a calculé le profil modifié de la densité électronique dans la Région D, il est relativement facile de déterminer les effets exercés sur certains circuits de télécommunication. Ces méthodes ont été décrites par Kjos et Stasiewicz [1979] et par Argo et Rothmuller [1979].

On a constaté que l'augmentation de la fréquence minimale observée (LOF) à la suite d'une éruption solaire est proportionnelle au renforcement des rayons X et à la distance zénithale du Soleil. [Rose et autres, 1974]. Des mesures du flux de rayons X de 1 à 8 Å, effectuées en temps réel, ont servi à prévoir la durée de l'interruption des communications en ondes décimétriques causée par un évènement des ondes courtes [Argo et autres, 1978a]. L'examen des caractéristiques d'apparition d'un tel évènement a permis d'établir une relation directe entre la durée des évènements des ondes courtes et le maximum de l'évènement solaire à rayons X correspondant. Quant à la pente selon laquelle le phénomène disparaît, on est parvenu à la décrire avec précision en la rattachant à l'une des quatre constantes de temps exponentielles; le choix de la constante est dicté par la valeur du rapport de la variation du flux au temps d'établissement.

4.2 *Absorption dans la calotte polaire (PCA) et événements solaires à protons*

Les événements solaires à protons peuvent donner lieu à des PCA, qui entraînent des interruptions complètes des radiocommunications aux latitudes élevées, en raison du fort accroissement de l'absorption. Les «éruptions à protons» présentent des caractéristiques particulières qui permettent de les prévoir, avec un certain succès, et d'en prévoir aussi les effets terrestres [Cook et Davies, 1979; Heckman, 1979; Smart et Shea, 1979].

Grâce aux enregistrements du bruit radioélectrique solaire et aux mesures in situ des protons à haute énergie, on peut maintenant prévoir:

- si une éruption solaire particulière donnera lieu ou non à une absorption dans la calotte polaire,
- l'absorption maximale à laquelle on peut s'attendre dans le cas d'une perturbation solaire particulière [Castelli et Guidice, 1976].

Cliver [1976], Akinyan et autres [1979] et Akynyan et Chertock [1980] ont imaginé des méthodes permettant de prévoir l'intensité des principaux événements du type PCA; ces méthodes sont fondées sur l'observation du flux solaire sur la longueur d'onde 10,7 cm.

Smart et Shea [1979] ont élaboré une procédure pour établir par ordinateur le profil en fonction du temps de l'intensité des protons solaires arrivant sur la Terre après une éruption solaire importante. La présence de sursauts de type II et de type IV dans le spectre radioélectrique est la caractéristique critique pour l'accélération des protons [Cliver et autres, 1985]. L'association observée entre les sursauts à spectre en U et les éruptions à protons résulte probablement du «Syndrome de la grande éruption» [Kahler, 1982].

En ondes myriamétriques, l'effet peut se manifester sous la forme d'une avance de phase supérieure à la normale dans les systèmes de navigation et de détermination de la position. Un modèle de correction du système de navigation Omega [Argo et Hill, 1976] transforme en corrections d'erreurs de phase les flux de protons de haute énergie ($E > 10$ MeV) mesurés aux altitudes des satellites. Les paramètres de ce modèle sont: le flux de protons intégrés ($E > 10$ MeV), l'heure du jour et la longueur du trajet à travers la calotte polaire.

4.3 *Orages géomagnétiques*

L'activité solaire donne souvent lieu à des perturbations géomagnétiques par suite de l'interaction du vent solaire et du champ magnétique terrestre. Ceci modifie le système des courants ionosphériques et magnétosphériques et provoque un orage géomagnétique et, indirectement, un orage ionosphérique.

La probabilité pour qu'une éruption solaire provoque un orage géomagnétique dépend de la position de l'éruption sur le disque solaire et de son énergie, indiquée par des phénomènes qui l'accompagnent: brillance optique, augmentation du rayonnement X et sursauts radioélectriques sur ondes centimétriques et métriques. L'ampleur de l'importance d'un événement radioélectrique de type IV est également un précurseur important [McNamara, 1980].

Le «Comprehensive Flare Index» est un indicateur utile de la probabilité pour qu'une éruption provoque un orage géomagnétique [Dodson-Prince et autres, 1978]. Il en est de même du flux de rayons X intégré dans le temps entre 1 et 8 Å (mesure de l'énergie de l'éruption) [Heckman, 1979]. L'intervalle qui sépare l'éruption de l'orage est en général de 2 à 3 jours mais il est très difficile de le prévoir exactement en l'absence de mesures in situ par satellites, [Cook et Davies, 1979, Heckman, 1979].

Outre les orages géomagnétiques causés par les éruptions solaires, il existe une classe d'orages appelés orages récurrents en raison de leur tendance marquée à se répéter après une rotation solaire (27 jours). Ces orages sont liés aux caractéristiques de la couronne solaire connues sous le nom de «trous coronaux».

Les trous coronaux sont à l'origine de jets de vents solaires très rapides dont la vitesse est égale à plusieurs fois celle du vent solaire normal [Sheeley et Harvey, 1978; Nolte et autres, 1976]. Lorsque l'un de ces jets de vents solaires souffle au-dessus de la Terre, soit en général 3 ou 4 jours après le passage du trou coronal correspondant par le méridien central, les modifications induites dans la magnétosphère et dans l'ionosphère de la Terre peuvent donner lieu à des orages géomagnétiques et ionosphériques. Ces orages peuvent durer jusqu'à environ 7 jours. On constate que ces jets de vents solaires ne donnent pas tous lieu à des orages, leur influence à cet égard étant liée aux paramètres du vent solaire lui-même et à ceux du champ interplanétaire.

Les orages récurrents sont caractéristiques de la phase décroissante d'un cycle solaire où les trous coronaux et les jets de vents solaires associés peuvent durer jusqu'à 10 rotations solaires [Bohlin, 1977]. Du point de vue historique, les prévisions des orages récurrents ont été fondées sur un schéma de récurrence de 27 jours, dans lequel il est plus ou moins tenu compte des régions actives proches du trou coronal supposé [Cook et Davies, 1979]. On peut améliorer la fiabilité de ces prévisions en observant directement les trous eux-mêmes aux Rayons X, XUV, EUV ou à des longueurs d'ondes radioélectriques [Timothy et autres, 1975; Bohlin, 1977; Neupert et Pizzo, 1974; Dulk et Sheridan, 1974]. Toutefois, les observations les plus intéressantes sont les observations in situ des paramètres pertinents du vent solaire et de leurs modifications lors du passage de jets de vents solaires.

Les orages géomagnétiques ont également été imputés à des éjections du Soleil associées à des filaments à disparition brusque [Joselyn et McIntosh, 1981; McNamara et Wright, 1982]. La durée du temps de propagation est de 4 à 5 jours, et elle est moins grande pour les grands filaments que pour les filaments proches du méridien central [Wright et McNamara, 1983]. Les variations du champ magnétique dans le vent solaire associées aux filaments à disparition brusque qui engendrent directement des orages géomagnétiques peuvent être prévues à partir du champ magnétique solaire dans la région entourant les filaments solaires qui disparaissent. Le filament produit une structure magnétique cylindrique (appelée "tube" ou "corde" de flux magnétique) dont l'axe a la même direction que celui du filament. La configuration du champ magnétique du tube est dextrogyre pour les filaments qui disparaissent dans l'hémisphère sud et lévogyre dans l'hémisphère nord du Soleil [Marubashi, 1986].

Des études de phénomènes héliosphériques transitoires de grande échelle, utilisant la méthode de la scintillation interplanétaire des radiosources, montrent que l'activité géomagnétique non récurrente généralement imputée aux éruptions solaires peut être attribuée à des éruptions intermittentes de vent solaire de grande vitesse provenant de trous coronaux [Hewish et Bravo, 1986; Houminer et Hewish, 1988].

4.4 Orages ionosphériques

L'orage géomagnétique constitue souvent une bonne indication de l'existence simultanée d'un orage ionosphérique, c'est-à-dire de perturbations dans l'ionosphère, plus graves que les fluctuations habituelles d'un jour à l'autre.

Du point de vue des radiocommunications, les effets les plus importants des orages ionosphériques sont ceux intéressant la couche F2 qui est en fait la couche la plus affectée par les orages. Pour ce qui est de la fréquence maximale du plasma dans la couche F2 (foF2), les orages peuvent avoir pour effet soit de l'augmenter (phase positive), soit de la diminuer (phase négative). La phase négative est d'autant plus importante pour les radiocommunications qu'elle diminue la largeur de bande disponible. Evans [1973] et Rishbeth [1975] ont étudié les mécanismes physiques susceptibles d'expliquer le mécanisme des orages ionosphériques.

Aux latitudes moyennes, un orage typique commence par une phase positive de quelques heures, suivie d'une phase négative qui dure un ou deux jours. Cependant, l'amplitude de chaque phase est une fonction compliquée du moment du déclenchement de l'orage, de la latitude et de la saison; un orage donné peut ne présenter qu'un seul type de phase. Mendillo [1973], Matuura [1972], Mendillo et Klobuchar [1980] et Cander [1985] ont décrit les variations des effets des orages ionosphériques en fonction de ces trois derniers paramètres.

Les effets ionosphériques des orages récurrents semblent, pour l'essentiel, être les mêmes que ceux des orages causés par les éruptions, bien qu'ils aient tendance à être moins graves et à durer plus longtemps [McNamara, 1977a, b]. Une étude limitée des orages ionosphériques associés à des filaments à disparition brusque a montré que les effets de ces filaments ne peuvent être distingués de ceux des éruptions et des jets de vents solaires très rapides.

Les variations de la MUF de référence aux basses latitudes au cours des orages magnétiques sont en général plus faibles que les fluctuations de foF2 d'un jour à l'autre observées pendant les jours calmes. Aggarwal et Reddy [1974] ont constaté que l'augmentation de foF2 aux basses latitudes était compensée par une augmentation de hmF2, si bien que les variations réelles de la MUF de référence n'étaient pas significatives.

Aux latitudes élevées, on constate des modifications sensibles de la MUF de référence et de la fréquence minimale utilisable (LUF) pendant les perturbations géomagnétiques. Les modifications de l'absorption associées aux sous-orages magnétiques présentent des variations en longitude et en latitude dans la région de l'ovale auroral [Jelly, 1970]. L'utilisation de l'indice d'électrojet auroral est ———— utile pour l'estimation de certaines caractéristiques de l'absorption aurorale des sous-orages [Elkins, 1972]. Verdile et Puig [1977] ont étudié des effets d'orages qui semblent en corrélation avec les indices magnétiques auroraux (AU, AL) et seraient dus à la propagation de perturbations originaires de l'ovale auroral.

4.5 Méthodes utilisées en pratique pour les prévisions à court et à moyen terme

Les prévisions de la durée et de l'importance d'un orage ionosphérique sont fondées essentiellement sur des modèles climatologiques des effets d'orage, étant donné le peu de succès de la prévision du comportement d'un orage déterminé [Argo et autres, 1978b]. Cependant [Kuleshova et autres [1980] ont, dans une certaine mesure, réussi à prévoir les variations de la MUF de référence pendant les orages, en analysant soigneusement les orages passés en fonction de la présence ou de l'absence de phases positives et négatives, des orages géomagnétiques à début brusque ou progressif et de l'importance des variations de foF2.

Il n'est pas possible d'effectuer des prévisions quantitatives précises des paramètres des circuits en se fondant uniquement sur les prévisions médianes mensuelles et sur la probabilité de perturbations magnétiques [Cook et McCue, 1975]. Ces prévisions présentent toutefois de l'intérêt pour de nombreux utilisateurs, en particulier lorsqu'elles sont confirmées après le début d'une perturbation.

Le comportement de l'ionosphère pendant un orage ionosphérique imputable à un phénomène ou événement solaire (éruption, trou coronal, filament à disparition brusque) peut être considéré comme un cas particulier de la variabilité d'un jour à l'autre de l'ionosphère, et peut être prévu par application des mêmes techniques (§ 2.5 du Rapport 888).

5. Effets des orages géomagnétiques sur le contenu électronique total (CET)

Les variations du CET par rapport aux conditions mensuelles moyennes sont dues avant tout à l'activité géomagnétique. Etant donné que les possibilités d'établissement de modèles théoriques ne sont pas suffisamment élaborées pour permettre la prévision du comportement du CET pendant des orages magnétiques, des programmes de prévision fondés sur la morphologie représentent la seule méthode viable actuellement disponible. Les principaux besoins des milieux dont les activités font appel à la propagation transionosphérique portent sur la période diurne, qui est celle pendant laquelle la valeur absolue de la différence du CET par rapport aux conditions moyennes mensuelles est maximale.

Mendillo et Klobuchar [1980] ont exposé l'état de la technique en matière de possibilités de prévision du CET au cours d'orages magnétiques, tandis que Mendillo [1973] a montré comment on peut prévoir si un orage en cours risque ou non de produire une phase positive aux latitudes moyennes. Mendillo a constaté que le début brusque d'un orage géomagnétique entraîne, aux latitudes moyennes, un accroissement du contenu électronique total au cours de l'après-midi qui suit ce début brusque, à moins qu'une forte dépression du champ géomagnétique ne se produise au cours des premières heures de la journée. En exploitation, on considère qu'il doit s'agir d'une dépression du champ d'au moins 100 gammas aux environs de 03 h 00 (heure locale), donnant une possibilité limitée de prévision avec une période d'anticipation d'environ 12 heures.

La principale incertitude rencontrée lorsque l'on tente d'appliquer au CET, pendant les orages magnétiques, des corrections basées sur la morphologie, porte sur la prévision de l'instant du début de l'orage, que ce début soit brusque ou progressif.

Les régions du monde pour lesquelles font défaut les morphologies et, par conséquent, les possibilités de prévision du comportement du CET au cours d'orages magnétiques sont les régions de basse latitude et les régions équatoriales ainsi que l'ensemble de l'hémisphère austral. Il apparaît que les corrélations entre les variations de l'ionosphère et les divers indices de perturbations géomagnétiques (par exemple, le CET par rapport aux indices K_p ou D_{st}) ne présentent pas beaucoup d'intérêt dans les prévisions des effets des orages magnétiques sur le CET.

6. Utilité et fiabilité des prévisions à court terme

Grâce à des méthodes de vérification, on a analysé le nombre de jours d'orages pour lesquels des prévisions correctes avaient été faites et le nombre des jours calmes pour lesquels on avait fait des prévisions d'orage ou émis de fausses alertes. Aux Etats-Unis d'Amérique, en République fédérale d'Allemagne et au Japon, on a établi, pour certaines zones géographiques, des indices de qualité de la propagation radioélectrique, pour la prévision et sa vérification.

On trouvera des descriptions des différents types de procédures de vérification dans les travaux de Heckman [1979], Marubashi et autres [1979], Minnis [1977] et Sawyer et autres [1986].

7. Systèmes opérationnels pour les prévisions à court terme

On trouvera dans ce paragraphe la liste des administrations et des organismes qui émettent actuellement des prévisions à court terme, avec des indications succinctes sur les services assurés. Il existe des publications qui donnent des renseignements complémentaires sur les Centres régionaux d'avertissement du Service International des Ursigrammes et des Jours Mondiaux [IUWDS, 1973]. On trouvera la description des opérations actuelles de la plupart des Centres régionaux de l'IUWDS dans le Volume I des Solar-Terrestrial Predictions Proceedings [Donnelly, 1979].

7.1 *Australie*

Ionospheric Prediction Service, Department of Science, Sydney (IUWDS-RWC)

Fonctionne tous les jours, prévisions sur demande.

Evanouissements sur ondes courtes et perturbations magnétiques pour trois valeurs de probabilités et trois niveaux d'intensité, avec des indications générales sur l'activité solaire et géophysique.

Fourniture de prévisions supplémentaires aux usagers, selon les latitudes des circuits.

7.2 *France*

7.2.1 *Observatoire de Paris et Centre national d'études des télécommunications, Meudon (IUWDS-RWC)*

Fermé les dimanches et jours fériés.

Prévisions de l'activité solaire et des orages magnétiques.

7.2.2 *CNET, Service des prévisions ionosphériques, Lannion*

Fermé les samedis, dimanches et jours fériés.

Prévisions journalières et hebdomadaires de la LUF et de la MUF d'exploitation.

7.3 *République fédérale d'Allemagne*

Forschungsinstitut der Deutschen Bundespost beim Fernmeldetechnischen Zentralamt (IUWDS-RWC)

Fermé les week-ends et jours fériés.

Analyse sur les 24 heures passées et prévisions pour les 24 heures suivantes de l'activité solaire et magnétique, de foF2, et des conditions de propagation entre l'Allemagne et cinq régions principales.

7.4 *Inde*

National Physical Laboratory, New Delhi (IUWDS Associate RWC)

Fermé les dimanches et jours fériés.

Prévisions pour les circuits établis en Inde.

7.5 *Japon*

Ministry of Post and Telecommunications, Radio Research Laboratories, Koganei and Hiraj Branch (IUWDS-RWC)

Fonctionne tous les jours.

Avertissements journaliers des perturbations radioélectriques (N = normal, U = instable, W = perturbé), radiodiffusés six fois par heure par JJY.

Prévisions hebdomadaires de la propagation pour les 7 jours suivants, distribués par la poste.

Système automatique de diffusion des avertissements concernant les perturbations radioélectriques, (RADWIS).

7.6 *Royaume-Uni*

Marconi Research Centre, Great Baddow

Fermés les week-ends et jours fériés.

Prévisions codées des écarts possibles de la LUF et de la MUF d'exploitation par rapport aux valeurs prévues, pour les 6 heures suivantes dans la Zone européenne, avec une évaluation des facteurs de qualité. Résumé en langage clair des conditions susceptibles de se produire et compte rendu sur les dernières 24 heures.

7.7 *Etats-Unis d'Amérique*

7.7.1 *National Oceanic and Atmospheric Administration, Space Environment Services Center (NOAA-SESC) Boulder*

(IUWDS-RWC et World Warning Agency).

24 heures sur 24, tous les jours.

Deux messages quotidiens sur l'activité solaire et géophysique: observation courante des rayonnements optiques, radioélectriques et X du soleil, du vent solaire et du champ magnétique, et prévisions des tendances de ces phénomènes. Alertes immédiates des événements importants.

7.7.2 United States Air Force Global Weather Center (AFGWC)

Prévisions de l'environnement spatial.

7.8 URSS

Service hydrométéorologique, Institut de géophysique appliquée, Moscou (IUWDS-RWC)

24 heures sur 24, tous les jours.

Prévisions à court terme des perturbations ionosphériques et magnétiques (mensuelles, tous les cinq jours, tous les deux jours et deux fois par jour) pour cinq régions de l'URSS (région polaire, zone aurorale, zone européenne, Asie centrale, Extrême-Orient).

7.9 Les centres IUWDS

Chaque centre régional de l'IUWDS diffuse chaque jour une Alerte géophysique indiquant le niveau d'activité à prévoir dans chaque région active du Soleil pendant la journée faisant l'objet de la prévision; à cela s'ajoute l'indication de l'activité géomagnétique prévue. L'agence mondiale d'avertissement de l'IUWDS (le centre de Boulder, aux Etats-Unis d'Amérique) compile ces avis et publie chaque jour une Alerte géophysique WWA établie sur la base des avis de chaque centre, y compris le sien propre. Cette Alerte géophysique sert principalement à programmer des études scientifiques mais elle est utile également aux centres qui diffusent des prévisions de perturbations de différentes sortes. Ce système fonctionne de façon ininterrompue depuis 1957 [IUWDS, 1973].

8. Coopération internationale

Il y a lieu d'attirer l'attention sur la Recommandation 313 et son Annexe. «Echange de renseignements en vue des prévisions à court terme et transmission des avertissements de perturbations ionosphériques.»

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGGARWAL, S. et REDDY, B. M. [1974] Effects of magnetic and solar activity on HF communications via F2 region. *Indian J. Radio and Space Phys.*, Vol. 3,4, 401-406.
- AKASOFU, S.I., PERREAULT, P. D., YASUHARA, F. et MENG, C. I. [1973] Auroral substorms and the interplanetary magnetic field. *J. Geophys. Res.*, 78, 7490-7508.
- AKINYAN, S. T. et CHERTOCK, I. M. [1980] Determination of PCA values using integral parameters of solar microwave flares. *Geomag. i Aeronom.*, 20, 192-196.
- AKINYAN, S. T., CHERTOCK, Z. M. et ZHULINA, E. M. [1979] Determination of PCA values from the characteristics of solar radio bursts, *STPP**, Vol. III, D27-D33.
- ARGO, P. E. et HILL, J. R. [1976] Omega navigation disturbance correction tables. Naval Electronics Laboratory Centre TD 480, NTIS, Accession No. AD A028 972, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.
- ARGO, P. E., HILL, J. R. et ROTHMULLER, I. J. [1978a] X-ray flare and short-wave fade duration model. Naval Ocean Systems Centre TR 255, NTIS, Accession No. AD A057 284, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.
- ARGO, P. E., HILL, J. R. et ROTHMULLER, I. J. [1978b] Magnetic substorms and ionospheric storms. Naval Ocean Systems Centre TR 256, NTIS, AD A057 975, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.
- ARGO, P. E. et ROTHMULLER, I. J. [1979] PROPHET: An application of propagation forecasting principles. *STPP*, Vol. I, 312-321.
- BAILEY, D. K. [1964] Polar cap absorption. *Planet. and Space Sci.*, 12, 495-541.
- BLEIWEISS, M. P., WEFER, F. L. et KONIGES, A. E. [1977] Emission and absorption at wavelengths of 8.6 mm and 2.0 cm as determining factors of T_e and N_e in the filament. Naval Ocean systems Centre TR 136, NTIS, Accession No. AD A044 559, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.
- BOHLIN, J. D. [1977] Extreme ultraviolet observations of coronal holes. 1. Locations, sizes and evolution of coronal holes, juin 1973-janvier 1974. *Solar Phys.* Vol. 51, 377-398.
- CANDER, L. R. [1985] A morphology-based study of ionospheric storms as seen at Grocka Ionospheric station. Solar-Terrestrial Predictions: proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, 559, 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.

* 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]).

- CASTELLI, J. P. et GUIDICE, D. A. [1976] Impact of current solar radio patrol observations. *Vistas in Astron.*, **19**, 335.
- CLIVER, E. W. [1976] Parent-flare emission at 2.8 GHz as a predictor of the peak observation of polar-cap events. Naval Electronics Laboratory Centre TR 2015, NTIS, Accession N° AD A037 552 1761, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.
- CLIVER, E. W., McNAMARA, L. F. et GENTILE, L. C. [juillet 1985] Peak-flux-density spectra of large solar radio bursts and proton emission from flares. *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, A7, 6251-6266.
- COLES, W. A., RICKETT, B. J. et RUMSEY, V. H. [1974] Interplanetary scintillations. *Solar Wind Three*, 351-367. Ed. C. T. Russell, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, Calif., Etats-Unis d'Amérique.
- COOK, F. E. et DAVIES, P. [1979] A review of the operation of the IUWDS Regional Warning Centre at the Ionospheric Prediction Service, Sydney. *STPP*, Vol. I, 229-238.
- COOK, F. E. et McCUE, C. G. [1975] Solar-terrestrial relations and short-term ionospheric forecasting. *Radio and Electron. Engr.* (Royaume-Uni), Vol. 45, 11-30.
- CRONYN, W. M., ERSKINE, F., SHAWHAN, S. D., GOTWALS, B. L. A. et ROELOF, E. C. [1975] Prediction of ionospheric effects associated with solar wind disturbances using interplanetary scintillation observations at 34.3 MHz, Proc. Symposium on the Effects of the Ionosphere on Space Systems and Communications, Naval Research Laboratory, Arlington, Va., Etats-Unis d'Amérique.
- CROOM, D. L. [1971] Forecasting the intensity of solar proton events from the time characteristics of solar microwave bursts. *Solar Physics*, **19**, 171-185.
- DODSON-PRINCE, H. W., HEDEMAN, E. R. et MOHLER, D. C. [1978] Studies of geomagnetic storms and solar flares in the years of increasing solar activities, cycles 19 and 20 (1955-1957, 1965-1968). Report AFGL-TR-78-0267, Air Force Geophysical Lab., Hanscom AFB, Mass., Etats-Unis d'Amérique.
- DONNELLY, R. F. [1979] Ed. Solar-Terrestrial Predictions Proceedings:
- Vol. I [1979] Prediction Group Reports. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, N° 003-023-00041-9, Washington, DC 20402.
 - Vol. II [1979] Working Group Reports and Reviews US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, N° 003-017-00471-6, Washington, DC 20402.
 - Vol. III [1980] Solar Activity Predictions. US Dept. of Commerce, US Govt. Printing Office, N° 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, N° 003-017-00479-1, Washington, DC 20402.
- DULK, G. A. et SHERIDAN, K. W. [1974] The structure of the middle corona from observations at 80 and 160 MHz. *Solar Physics*, **36**, 191-202.
- ELKINS, T. J. [1972] A model of auroral substorm absorption. AFCRL environmental research paper, N° 404, AFCRL-TR-72-0413. Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Mass., Etats-Unis d'Amérique.
- EVANS, J. V. [1973] The causes of storm-time increases of the F-layer at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 593-616.
- FOSTER, J. C., FAIRFIELD, D. H., OGILVIE, K. W. et ROSENBERG, T. J. [1971] Relationship of interplanetary parameters and occurrence of magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 6971-6975.
- HECKMAN, G. [1979] Predictions of the Space Environment Services Center. *STPP*, Vol. I, 322-349.
- HEWISH, A. [1972] Observations of the solar plasma using radio scattering and scintillation methods *Solar Wind*. Ed. C. P. Sonett et autres. NASA SP-308, 477-485 (et discussion, 485-493).
- HEWISH, A. et BRAVO, S. [1986] - The sources of large-scale heliospheric disturbances. *Solar Phys.*, **106**, 185.
- HIRMAN, J., NEIDIG, D. F., SAGRAVES, P. M., FLOWERS, W. E. et WIBORG, P. M. [1980] The application of multivariate discriminant analysis to solar flare forecasting. *STPP*, Vol. IV, C-64 à C-75.
- HOUMINER, Z. et HEWISH, A. [1988] - The solar origin of the 2-9 August 1972 events. *Planet. Space Sci.*, **36**, 301.
- IUWDS (International Ursigram and World Days Service) [1973] Synoptic Codes for Solar and Geophysical Data, third revised edition, IUWDS Secretariat, Boulder, Colo., Etats-Unis d'Amérique.
- JELLY, D. H. [1970] On the morphology of auroral absorption during substorms. *Can. J. Phys.*, **3**, 48 335-345.
- JOSELYN, J. A. et McINTOSH, P. S. [1981] Disappearing solar filaments: A useful predictor of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, 4555-4564.
- KAHLER, S. W. [1982] The role of the big flare syndrome in correlations of solar energetic proton fluxes and microwave burst parameters. *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 3439-3448.

- KLOS, Z. et STASIEWICZ, K. [1979] Estimation of solar flare influence on radio circuit transmission loss. *STPP*, Vol. I, 67-71.
- KULESHOVA, V. P., LAVROVA, E. V. et LYAKHOVA, L. N. [1980] Forecasting of δf_oF_2 variation for ionospheric disturbance. *STPP*, Vol. IV, C-37 à C-40.
- LANGE-HESSE, G. et RINNERT, K. [1970] The reliability of transpolar VLF measurements as a method to forecast HF propagation disturbances. AGARD Conf. Proc. N° 49, *Ionospheric Forecasting*, Paper N° 30. Ed. V. Agy. NASA Accession No. N70-23112. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, Etats-Unis d'Amérique.
- LARSEN, J. R. [1979] Effects of D-region ionization on radio wave propagation. *STPP*, Vol. II, 617-654.
- MARTRES, M. J., SORU-ESCAUT, I. et RAYROLE, J. [1973] Relationship between some photospheric motions and the evolution of active centres. *Solar Phys.*, **32**, 365-378.
- MARUBASHI, K. [1986] Structure of the interplanetary magnetic clouds and their solar origins, *Adv. Space Res.*, Vol. 6, N° 6, 335-338.
- MARUBASHI, K., MIYAMOTO, Y., KIDOKORO, T. et ISHII, T. [1979] Forecasts of geomagnetic activities and HF radio propagation conditions made at Hiraiso, Japon. *STPP*, Vol. I, 182-204.
- MATUURA, N. [1972] Theoretical models of ionospheric storms. *Space Sci. Rev.*, **13**, 124-189.
- McINTOSH, P. S. et DRYER, M. (Eds.) [1972] Solar Activity Observations and Predictions, Vol. 30, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, MIT Press, Cambridge, Mass., Etats-Unis d'Amérique.
- McNAMARA, L. F. [1977a] Recurrent storms and their effects on HF radio communications. *Monitor-Proc. IREE Australie*, 48-55.
- McNAMARA, L. F. [1977b] Ionospheric storm effects on maximum usable frequencies on circuits around Australia. Ionospheric Prediction Service, Series R reports, IPS-R35, Sydney, Australie.
- McNAMARA, L. F. [1980] Geomagnetic effects of solar flares observed during 1968-1978. Ionospheric Prediction Service Series R reports, IPS-R37, Sydney, Australie.
- McNAMARA, L. F. et WRIGHT, C. S. [1982] Disappearing solar filaments and geomagnetic activity. *Nature*, Vol. 299, **5883**, 537-538.
- MENDILLO, M. [1973] A study of the relationship between geomagnetic storms and ionospheric disturbances at mid-latitudes. *Planet. and Space Sci.*, Vol. 21, 349-358.
- MENDILLO, M. et KLOBUCHAR, J. A. [1980] A morphology based prediction scheme for the coupled latitudinal and local-time development of F-region storms. *STPP*, Vol. IV, C-15 à C-26.
- MILSOM, 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.
- MINNIS, C. M. [1977] La valeur économique des prévisions des perturbations de l'ionosphère. *J. des Télécomm.*, Vol. 44, 328-330.
- MITRA, S. N. et GOYAL, R. K. [1984] Study of solar-terrestrial relationship through SCL. Communication présentée au «Workshop on Solar-Terrestrial Predictions», Meudon, France, 18-22 juin 1984.
- NEUPERT, W. M. et PIZZO, V. [1974] Solar coronal holes as sources of recurrent geomagnetic disturbances. *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, 3701-3709.
- NOLTE, J. T., KRIEGER, A. S., TIMOTHY, A. F., GOLD, R. E., ROELOF, E. C., VAIANA, G., LAZARUS, A. J., SULLIVAN, J. D. et McINTOSH, P. S. [1976] Coronal holes as sources of solar wind. *Solar Phys.* **46**, 303-322.
- RISHBETH, J. [1975] F-region storms and thermospheric circulation. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, 1055-1064.
- ROSE, R. B., HILL, J. R. et BLEIWEISS, M. P. [1974] Sudden ionospheric disturbance grid. Naval Electronics Laboratory Centre Tech. Rep. 1938, NTIS, Accession N° A006567, National Technical Information Service, Springfield, Va., Etats-Unis d'Amérique.
- RUSSELL, C. T., BURTON, R. K. et McPHERRON, R. L. [1975] Some properties of the Svalgaard A/C index. *J. Geophys. Res.*, **80**, 1349-1351.
- SAWYER, C., WARWICK, J. W. et DENNETT, J. T. [1986] "Solar flare prediction". Colorado associated University Press, Boulder, Colorado.
- SEVERNY, A. B., STEPANYAN, N. N. et STESHENKO, N. V. [1979] Soviet short-term forecasts of active region evolution and flare activity. *STPP*, Vol. I, 72-88.
- SHEELEY, N. R., Jr. et HARVEY, J. W. [1978] Coronal holes, solar wind streams and geomagnetic activity during the new sunspot cycle. *Solar Phys.*, **59**, 159-178.
- SIMON, P., HECKMAN, G. et SHEA, M. A. [1986] Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Meudon, France, 18-22 juin 1984, 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.
- SIMON, P., MARTRES, M. J. et LEGRAND, J. P. [1969] Flare forecasting. *Symposium on Solar Flares and Space Research*, North-Holland Publishing Co., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

- SMART, D. F. et SHEA, M. A. [1979] PPS76 — A computerized «event-mode» solar proton forecasting technique. *STPP*, Vol. I, 406-427.
- STASIEWICZ, K., MAKSYMIEŃKO, M. et JAKIMIEC, M. [1979] KAZIA — A computer system for solar-terrestrial data processing and objective prediction. *STPP*, Vol. I, 61-66.
- SVALGAARD, L. [1975] An atlas of interplanetary sector structure, 1957-1974, Stanford University, Institute for Space Research, Report N° 629, Stanford, Calif., Etats-Unis d'Amérique.
- TANAKA, H. et ENOME, S. [1975] The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares. *Solar Phys.*, **40** (1), 123-131.
- TIMOTHY, A. F., KRIEGER, A. S. et VAIANA, G. S. [1975] The structure and evolution of coronal holes. *Solar Phys.*, **42**, 135-156.
- TSURUTANI, B. [1979] Substorm warnings: an ISEE-3 real time data system. *EOS Trans.*, **60**, 702-703.
- VERDILE, J. L. et PUIG, L. I. [1977] Propagación hacia latitudes medias de perturbaciones aurorales. Informe C-30 LIARA Laboratorio Ionosférico de la Armada, République d'Argentine.
- WRIGHT, C. S. et McNAMARA, L. F. [1983] The relationships between disappearing solar filaments, coronal mass ejections, and geomagnetic activity. *Solar Phys.*, Vol. 87, 401-417.

RAPPORT 888-2*

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 décimétriques, 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.