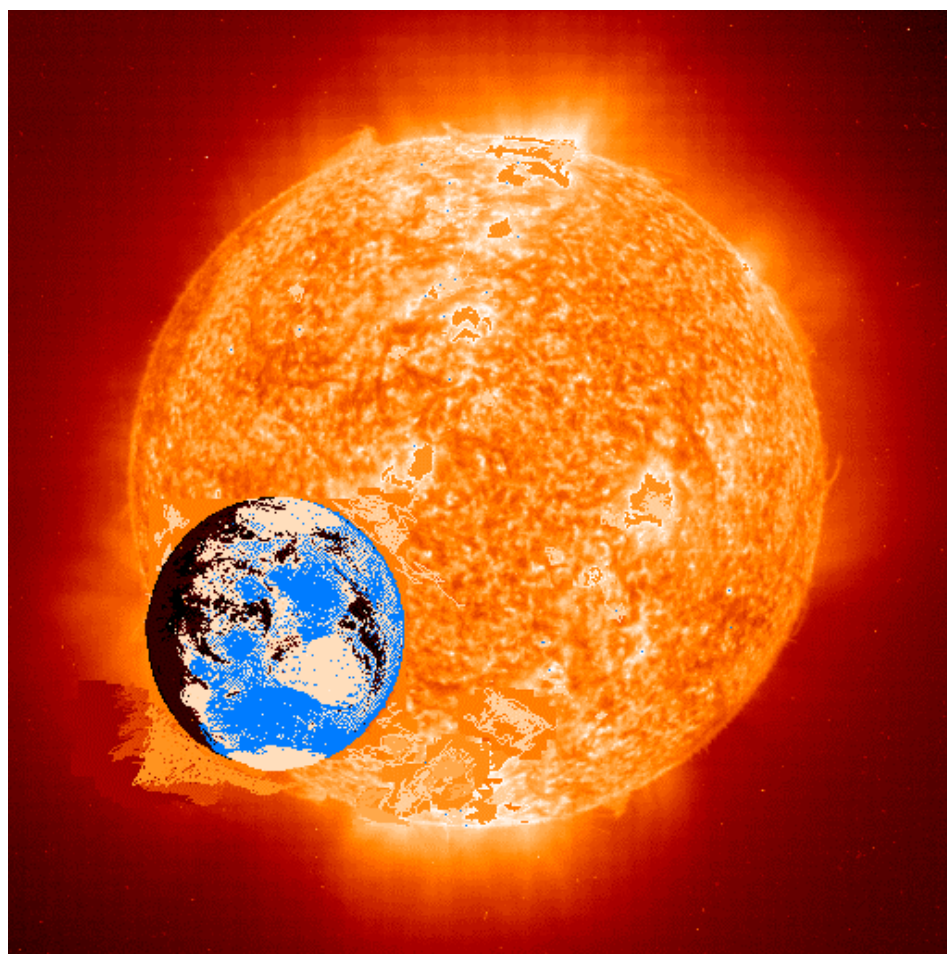


METEOROLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT SPATIAL

**RAPPORT FINAL DU
GROUPE D'EVALUATION DES BESOINS**



OCTOBRE 1998

METEOROLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT SPATIAL

« METEO DE L'ESPACE »

Préparé par :

Daniel	BOSCHER	(ONERA)
Jean-Louis	BOUGERET	(Obs. de Paris-Meudon)
Jacques	BRETON	(CNES)
Pierre	LANTOS	(Obs. de Paris-Meudon)
Jean-Yves	PRADO	(CNES)
Manola	ROMERO	(ONERA)

et avec la participation de Monique ORRU (CNES)

Illustration de couverture :
Montage à partir d'images d'EIT /SOHO

SOMMAIRE

	<i>Page</i>
OBJET DU DOCUMENT	4
1 LES PHENOMENES PHYSIQUES OBSERVES	5
1.1 Le Soleil	5
1.2 La Terre et son environnement	6
1.3 Les perturbations de l'environnement	9
2 EFFETS DE CES PERTURBATIONS, PREJUDICES CAUSES, BESOINS DE LA SOCIETE	12
Effets de ces phénomènes sur nos sociétés	12
Préjudices causés et attente des opérationnels	13
2.1 Lancements	13
2.2 Satellites en orbite	14
2.3 Contrôle d'orbite	19
2.4 Homme dans l'espace	22
2.5 Propagation Espace-Terre	24
2.6 Propagation Terre-Terre	27
2.7 Personnels navigants	32
2.8 Effets sur les réseaux électriques	34
2.9 Effets sur les canalisations	35
2.10 Prospection minière et pétrolière	36
2.11 Effets sur le climat terrestre	36
2.12 Besoin en données pour la recherche scientifique	38
3 LES SERVICES ACTUELLEMENT EXISTANT	39
3.1 Les centres de prévision existant	39
3.2 Le Centre de Paris-Meudon	40
3.3 Le Centre de prévision de la NOAA à Boulder	42
3.4 Intérêt du travail en réseau	42
3.5 Les limitations du réseau actuel	44
4 EVOLUTION DE LA DEMANDE ET DE L'OFFRE	45
5 DIFFERENTS NIVEAUX DE SERVICES ENVISAGEABLES ET MOYENS NECESSAIRES	48
6 CADRE DE DEVELOPPEMENT ET SCENARIOS POUR DES INITIATIVES EN EUROPE	56
7 PROPOSITIONS D'INITIATIVES	60
REFERENCES	61
GLOSSAIRE	62

OBJET DU DOCUMENT

Après l'intérêt suscité par l'atelier "Surveillance de l'activité solaire" tenu à Toulouse les 20 et 21 Octobre 1997 et par le colloque sur la "Météo de l'Espace" du PNST (Programme National Soleil-Terre) qui s'est également déroulé à Toulouse les 1, 2 et 3 Décembre 1997, le CNES a décidé, lors de son séminaire de programmation des 15 et 16 Janvier 1998, de mettre en place un groupe de travail pour préciser les enjeux, en France et en Europe, de la "Météo de l'Espace". Ce groupe de travail comprend des représentants de la communauté scientifique, de l'ONERA et du CNES.

Le présent rapport fait la synthèse des informations recueillies par ce groupe auprès de nombreux interlocuteurs, en France et à l'étranger. Il se concentre d'abord sur l'évaluation des besoins, c'est-à-dire sur les problèmes qui se manifestent actuellement.

Les principales conclusions ont été présentées pour commentaire le 17 septembre lors d'un séminaire rassemblant scientifiques et utilisateurs français en présence d'observateurs de l'ESA/ESTEC. Le présent rapport tient compte des avis qui ont été recueillis à cette occasion.

Le groupe de travail a le sentiment, après cette première phase, que, au-delà de l'intérêt scientifique, il existe de réels enjeux économiques et stratégiques associés à la question de la météo de l'espace (c'est-à-dire à la prévision et à la restitution de l'activité solaire et des situations géomagnétiques, ionosphériques et thermosphériques). Il importe donc de poursuivre l'instruction de ce dossier.

Ce document tiendra lieu de contribution française au colloque européen organisé par l'ESA les 11, 12 et 13 Novembre à Noordwijk, car tout indique que c'est bien au niveau européen qu'il faudra rechercher une prise de conscience et des initiatives en vue d'assurer l'existence d'un service répondant aux besoins ainsi mis en évidence.



1 - LES PHENOMENES PHYSIQUES OBSERVES.

1.1 LE SOLEIL

Le Soleil est une étoile moyenne, située sur la branche principale du diagramme de Hertzsprung-Russell. Il émet des ondes dans toute la gamme de fréquences, depuis les rayons gammas jusqu'aux ondes radio. Il émet également un champ magnétique et des particules.

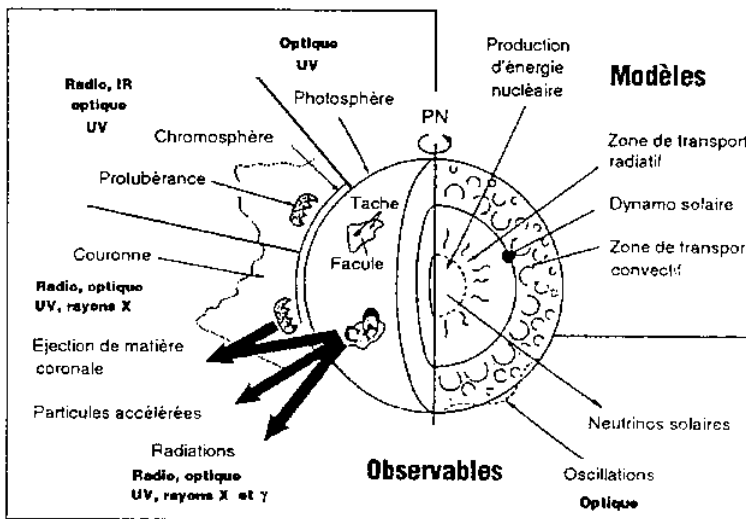


Fig. 1 :
Schéma des régions et
des phénomènes solaires

Ce sont ces trois composantes (ondes, champs et particules) qui interagissent avec la Terre, et peuvent provoquer des perturbations sur son environnement (fig. 1).

Le Soleil émet donc des ondes, comme un corps noir à une température d'environ 5700°K, dont le maximum du spectre est situé dans le visible. Le flux total de ces ondes est peu variable dans le temps. Il l'est essentiellement du côté des hautes fréquences (rayons UV et au delà) et des basses fréquences (flux radio). Cette variabilité est liée aux taches solaires, centres magnétiques actifs dus aux mouvements fluides près de sa surface, et qui peuvent dégénérer en une éruption. Les taches solaires suivent un cycle d'environ 11 ans (ou de 22 ans, si l'on tient compte de la polarité du champ magnétique), étant plus nombreuses pendant une période de 5 ans (maximum solaire), et moins nombreuses après (minimum solaire). Le dernier maximum solaire (cycle 22) remonte à mai 1989 (fig. 2).

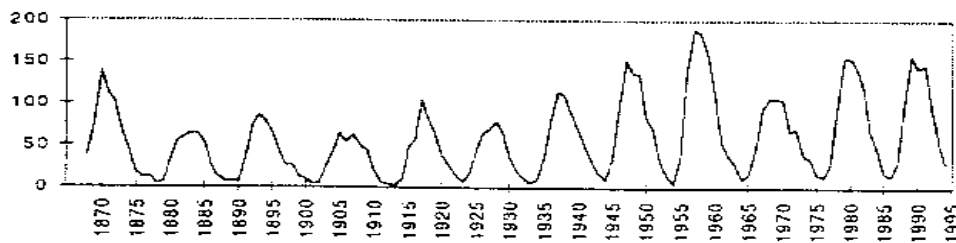


Fig. 2 : Moyenne annuelle du nombre de taches solaires (1870-1995)

Le champ magnétique du Soleil est quasiment dipolaire près de sa surface. Il s'étire petit à petit du fait de la rotation et de l'émission de particules et forme deux hémisphères, séparés par une lame neutre : la "jupe de ballerine" dénommée ainsi du fait de sa forme (fig. 3). Dans un hémisphère, le champ est dirigé vers le Soleil, il s'en éloigne dans l'autre. Il est entraîné par la rotation du Soleil, formant au niveau de la Terre un angle de l'ordre de 45° avec la direction Terre Soleil

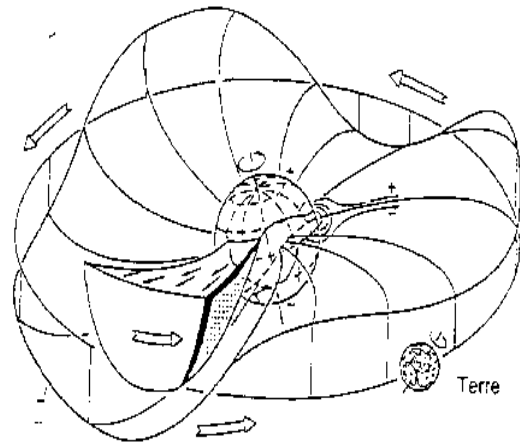


Fig. 3 :
Configuration du champ magnétique
solaire en "jupe de ballerine"

Enfin, des particules sont éjectées en permanence du Soleil. La plupart de ces particules sont de faible énergie, formant un plasma appelé vent solaire qui s'éloigne du soleil à la vitesse moyenne de 400 km/s dans les régions équatoriales et 800 km/s ailleurs. En fait, le champ magnétique et les particules sont intimement liés, le champ étant "gelé" dans le plasma. Les perturbations du flux de particules sont liées aux modifications du champ. Pendant les éruptions, une partie de l'énergie du Soleil peut s'échapper de la banlieue proche du Soleil, la couronne. Elles sont reliées à des éjections de masse coronale (CME-Coronal Mass Ejection) qui, si elles se dirigent vers la Terre, peuvent y produire des orages magnétiques violents. Pendant ces éruptions, des particules plus énergétiques, atteignant plusieurs centaines de MeV peuvent également être éjectées du Soleil, formant les événements à protons (SPE-Solar Proton Event). D'autre part, les trous coronaux, qui sont à l'origine du vent solaire rapide, peuvent atteindre des régions équatoriales, en particulier pendant la décroissance du cycle et interagir avec la Terre, induisant également des orages magnétiques. Ces deux types de perturbation (CME et trous coronaux) donnent naissance à des chocs qui peuvent également se propager librement dans toute l'héliosphère.

1.2 LA TERRE ET SON ENVIRONNEMENT

La Terre est une planète gravitant autour du Soleil, à la distance d'environ 150 millions de kilomètres. Du fait de sa taille, elle est entourée d'une atmosphère, formée principalement d'oxygène et d'azote, et d'un champ magnétique, quasiment dipolaire. Son atmosphère est principalement chauffée par le rayonnement solaire. La partie haute fréquence du spectre d'ondes (les rayons UV et au-delà), composée de photons très énergétiques, dissocie les atomes à haute altitude et les ionise, formant l'ionosphère dont le maximum de densité électronique est situé vers 250 km d'altitude. Cette ionosphère est formée de différentes couches, d'après sa composition principale (couches D, E, F). Du fait de son mode de chauffage, elle est très dépendante de l'éclairement solaire, étant beaucoup plus chaude et plus dense le jour que la nuit et différente dans les régions équatoriales et polaires.

Le champ magnétique de la Terre interagit avec le champ interplanétaire pour former la magnétosphère, une cavité fermée par la magnétopause où les particules du vent solaire ne peuvent pénétrer directement et qui s'étend à environ 60000 km du côté jour et plus de 1 million de km du côté nuit (queue de la magnétosphère). Cette magnétosphère forme un obstacle au vent solaire supersonique et superalfvénique, créant un choc en amont à quelques 100000 km, cette région s'appelant la magnétogaine (fig. 4).

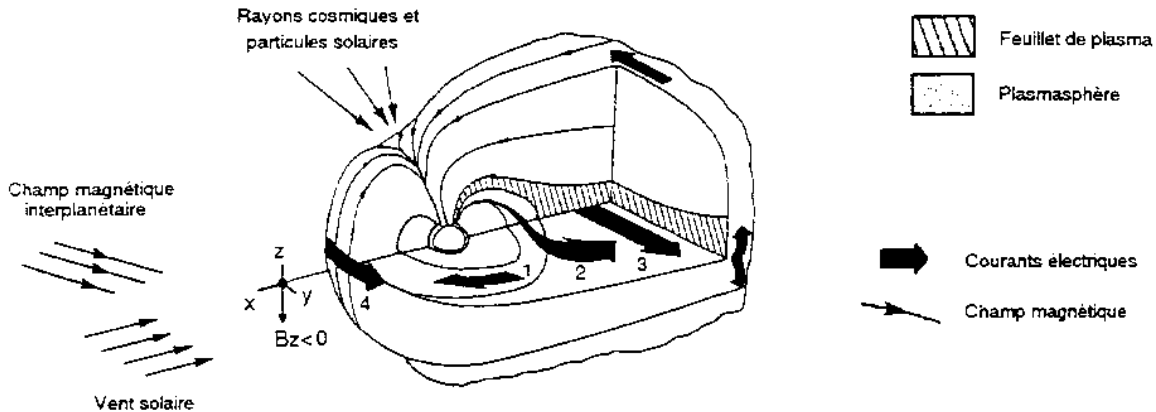
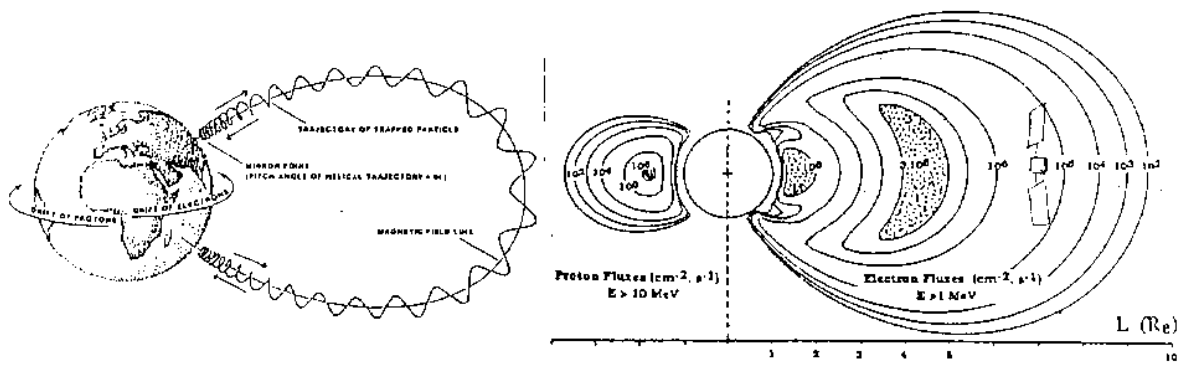


Fig. 4 : La magnétosphère

- (1) courant annulaire (2) courants alignés avec le champ magnétique
 (3) courant de la couche neutre (4) courant de la magnétopause

Un système de courants maintient ce système : courants de magnétopause et courants de queue. Dans la queue de la magnétosphère, les courants impliquent la présence d'un feuillet neutre, débutant vers 60000 km. Dans la partie interne de la magnétosphère, le champ dipolaire contrôle le mouvement des particules, qui y restent piégées (ceintures de radiation).

En fait, la magnétosphère n'est pas complètement imperméable aux particules extérieures. D'une part, les particules de très hautes énergies (supérieures à 1 MeV pour les protons) peuvent directement rentrer dans la magnétosphère, en ne faisant généralement qu'y passer. D'autre part, pendant les phases de reconnexion, quand la composante du champ magnétique interplanétaire le long de l'axe du dipôle terrestre est dans le sens du moment magnétique terrestre, une partie de l'énergie emmagasinée dans le vent solaire peut pénétrer dans la magnétosphère. Les particules du vent solaire peuvent alors en partie rentrer dans la queue de la magnétosphère, augmentant les courants de queue qui dans des phases impulsives peuvent être en partie dirigés vers la Terre, créant des courants alignés qui se referment dans l'ionosphère au niveau des zones aurorales, et le courant en anneau, à la plasmopause (fig. 5). Ces phases impulsives sont nommées sous-orages, elles peuvent se produire plusieurs fois par jour et donner lieu à des perturbations localisées de l'ionosphère, en particulier près de l'ovale auroral.



Mouvement des particules piégées

Cartographie des ceintures
(coupe polaire)

Fig. 5 : Piégeage des particules

Au total, du point de vue des particules chargées situées à l'intérieur de la magnétosphère, on distingue donc trois populations (voir la figure 6 donnant l'énergie des protons en fonction du paramètre de McIlwain, paramètre lié aux lignes de champ de la Terre). La première est d'origine interne (plasma ionosphérique), elle est formée d'ions (y compris des protons) et des électrons de faible énergie, de l'ordre de l'eV. Elle s'étend jusqu'à la plasmopause. La seconde est d'origine externe (plasma froid, plasma chaud), elle est liée à l'entrée de particules du vent solaire. Ces particules, venant de la queue de la magnétosphère, sont chauffées par divers processus et peuvent arriver dans la magnétosphère interne avec des énergies beaucoup plus fortes, supérieures à 100 keV, participant donc aux ceintures de radiation. De plus, les neutrons d'albédo (issus de l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère) peuvent se désintégrer dans la magnétosphère, créant des protons de haute énergie (supérieure à 10 MeV) participant à la ceinture de radiation. Enfin, la troisième population correspond à des ions de très haute énergie (supérieure à 100 MeV), traversant la magnétosphère. Ces différentes populations ne peuvent arriver au niveau de la Terre, elles sont irrémédiablement perdues au niveau de la haute atmosphère.

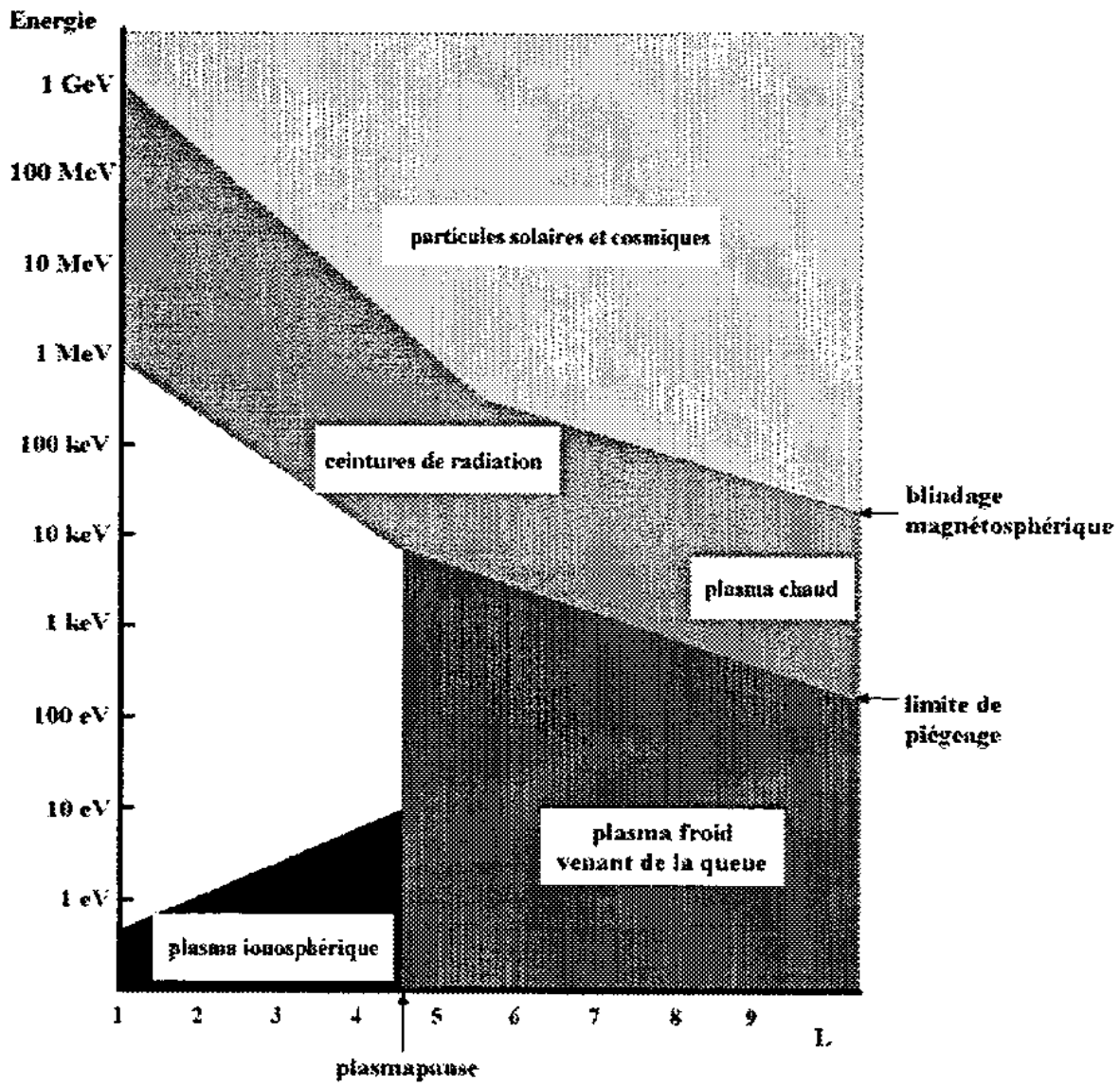


Fig. 6 : Energie des protons en fonction du paramètre de McIlwain

En revanche, les neutrons cosmiques n'étant pas déviés par le champ magnétique, et interagissant peu avec les neutres de l'atmosphère, arrivent eux au niveau du sol, ayant un effet de dose bien connu des spécialistes (35 mrem/an au niveau de la mer). Leur taux est légèrement dépendant du cycle solaire.

La plupart des composantes de l'environnement terrestre sont bien connues en moyenne. Pour leurs effets à long terme, certains modèles sont actuellement disponibles (MSIS-90, DTM-94 pour l'atmosphère par exemple, tenant compte du cycle solaire, AP8-AE8 pour les ceintures de radiation, IRI90 pour l'ionosphère). En revanche, à court terme, ces modèles sont incertains et l'influence de grosses perturbations de l'environnement est mal reproduite bien que certains de ces modèles prennent en compte l'activité magnétique.

1.3 Les perturbations de l'environnement

Deux types de grosses perturbations peuvent modifier de façon notable les populations de particules chargées autour de la Terre : les événements à protons (Solar Proton Event : SPE) et les orages magnétiques. Ces deux types d'événements sont a priori indépendants. Des orages ont lieu en période de minimum solaire quand aucun événement à protons n'est enregistré. Durant un événement à protons, les protons solaires énergétiques arrivent au niveau de la Terre bien avant (quelques jours) que l'orage associé (s'il existe) ne se déclenche.

Les événements à protons sont nettement liés aux éruptions solaires (fig. 7). Ils se produisent préférentiellement en maximum solaire et un peu après (-2 ans, +4 ans). Les protons énergétiques (jusqu'à quelques centaines de MeV) arrivent en moins d'un jour au voisinage de la Terre, modifiant par un facteur important la population la plus énergétique, celle traversant la magnétosphère et ce pendant plusieurs jours, au maximum 15 jours du fait de la rotation solaire (en fait un centre actif, source des émissions sporadiques de protons, peut être de nouveau visible environ 15 jours après, mais c'est un événement rare). Des électrons énergétiques sont également détectés durant ces périodes, mais la population de plus haute énergie est absente de la magnétosphère. A l'extérieur de la magnétosphère, ces ions très énergétiques sont évidemment présents ; ce sont eux qui peuvent mettre en danger une mission lointaine, en route vers d'autres planètes ou vers la Lune. Du fait de la configuration du champ terrestre, ces ions énergétiques peuvent également pénétrer dans les zones polaires, pouvant perturber les engins spatiaux traversant les hautes latitudes (station MIR, ISS, satellites LEO, SSO) et même par effet indirect les vols aériens réguliers passant dans les régions polaires.

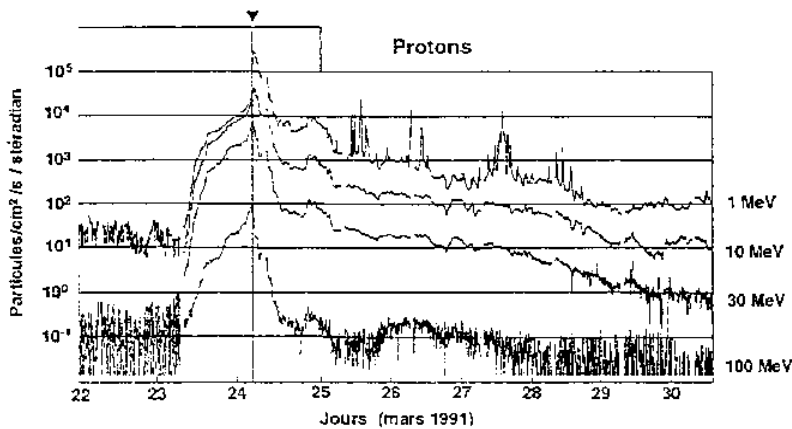


Fig. 7 :
Événement à protons vu par
le satellite GOES en Mars
1991

Les orages magnétiques, quant à eux, ont plusieurs origines. Ils sont dans tous les cas reliés aux variations du vent solaire : éjections de masse coronale, chocs interplanétaires, trous coronaux en conjonction avec la Terre. La pression dynamique du vent solaire détermine en particulier la force de l'orage et l'importance de ses effets. Ceci est d'autant plus vrai que sur la durée d'un orage (quelques jours), la composante du champ interplanétaire a forcément de nombreuses fois le sens favorable à la reconnexion. Le paramètre clef de ces orages est donc la pression du vent solaire, qui peut être très importante dans le cas du trou coronal et de l'éjection de masse coronale, cependant dans ce dernier cas, l'orage dure moins longtemps, de l'ordre de la journée (certains trous coronaux se maintiennent même pendant des mois à basse latitude héliosphérique, amenant des orages récurrents à 27 jours dans la magnétosphère). L'effet des orages magnétosphériques est observé sur les populations de plasma froid ionosphérique et chaud (protons et électrons jusqu'à 1 MeV). Ces populations peuvent être grandement perturbées pendant et à la suite des orages. Les courants alignés augmentent en intensité et en section. Par conséquent, l'ovale auroral est fortement élargi et descend à basse latitude (magnétique). L'ionosphère est très perturbée. Des courants induits sont créés dans la Terre. Le plasma ionosphérique est chauffé et des ions d'origine terrestre peuvent être accélérés et injectés à haute altitude, qui peuvent participer au courant en anneau. La plasmasphère diminue en extension (la plasmopause descend en altitude-L), mais des bulles de plasma peuvent subsister à haute altitude. La population de plasma chaud croît, ce qui augmente le courant en anneau (l'indice Dst diminue fortement). Des électrons de haute énergie (plusieurs centaines de keV), sont créés près de la plasmopause Ils diffusent ensuite relativement lentement vers des altitudes plus élevées, remplissant toute la partie externe de la ceinture d'électrons. Pendant les orages magnétiques, l'atmosphère s'étend en altitude.

Enfin, les événements à protons sont souvent associés à des éjections de masse coronale (éruptions bien connectées à la Terre), ceci se produisant près du maximum solaire. Pour le dernier cycle, on peut rappeler simplement les orages de mars 1989, octobre 1989 et mars 1991, le premier étant associé à la coupure électrique générale du Québec. Dans ce cas, outre les effets individuels des deux processus, des électrons et des protons d'éruption (les particules solaires et cosmiques de la fig. 6) peuvent pénétrer à l'intérieur de la magnétosphère et y être accélérées. De plus, à cause de l'orage, la limite correspondant au blindage magnétosphérique peut être abaissée. On peut ainsi créer une deuxième ceinture de protons (vers 30 MeV) et une ceinture d'électrons de 10 MeV environ.



2 - EFFETS DE CES PERTURBATIONS, PREJUDICES CAUSES ET BESOINS DE LA SOCIETE

EFFETS DE CES PHENOMENES SUR NOS SOCIETES



Fig. 8 : Aurore boréale observée en 1839 en Norvège

Les phénomènes physiques décrits au chapitre précédent ont existé de tout temps (fig. 8) et rien ne laisse prévoir (à la différence de la situation du climat de notre planète) que nous allions vers des modifications importantes de leurs caractéristiques dans les prochaines décennies. Alors, si nos ancêtres ont pu s'en accommoder pendant des millénaires, ne peut-on pas faire le pari que nous saurons en faire autant ? La réponse est négative, car si notre environnement reste égal à lui-même, il faut bien constater que notre civilisation technique a pris de nouvelles voies. La nouveauté, ici, c'est que notre société, par ses activités et par ses systèmes, devient de plus en plus vulnérable à ces perturbations de caractère parfois agressif.

Pourquoi ?

- a) Nous utilisons de plus en plus l'espace. Des centaines de satellites, désormais sur des orbites plus "sensibles", sont aujourd'hui en fonctionnement, fréquemment en situation clé au cœur de grands réseaux de recueil ou de distribution d'informations. De plus, ils sont fabriqués avec des composants de plus en plus miniaturisés, ce qui les rend vulnérables comme jamais auparavant.
- b) Nous "tutoyons" de plus en plus l'ionosphère. En transmission (télécoms, télédiffusion, navigation, ...), en réflexion (radars, télécoms sol-sol, ...) ; on fait même de la métrologie fine au travers de l'ionosphère (navigation, altimétrie, ...). Toute modification ionosphérique de nature accidentelle peut perturber ou même interrompre provisoirement le fonctionnement de ces grands systèmes. On cite souvent le cas de l'avion présidentiel américain, AF1, qui s'est trouvé privé de tout contact radio pendant une période assez longue.
- c) La coopération planétaire et la mondialisation des informations et des échanges conduisent à une interconnexion croissante et à des étendues considérables attachées à des réseaux. Une perturbation unique est de nature à se propager très loin (on l'a vu dans le cas des réseaux de distribution électrique).
- d) Cette situation est d'autant plus grave que dans certains domaines, la logique de la dérégulation et de la compétition mondialisée a conduit les opérateurs à faire travailler les réseaux très près de leurs limites de saturation ou de tolérance. Le moindre écart crée une panne dont on ne sait plus bien enrayer la propagation.

PREJUDICES CAUSES ET ATTENTE DES OPERATIONNELS

2.1 LANCEMENTS

a) L'évaluation de la probabilité d'échec (exprimée en millièmes) d'ARIANE 5 liée à l'environnement particulière est estimée, suivant le type d'orbite, aux valeurs suivantes (source : direction des Lanceurs du CNES)

Type d'orbite	Hors éruption	Eruption du type Août 1972
GTO Référence 2360 s	0,3/0,4	0,3/0,4
SSO Référence 2100 s	0,02	0,6/0,8
Celestri prolongée 6500 s	0,1/0,3	0,8/1,5
XMM prolongée 6500 s	0,2/0,4	1,3/2
GTO + 19000 s	0,6/1,3	6/10

L'orbite GTO + va jusqu'à 35.000 km d'altitude. Par ailleurs, les perspectives de "versatilité" peuvent conduire à avoir un lanceur encore actif après un bon nombre d'heures. D'où des doses cumulées qui peuvent être fortes pour certains types de lancement.

Pour simplifier :

- en GTO normal, la prévision n'apporte rien. La probabilité d'échec est la même en éruption et hors éruption (effet du bouclier du champ magnétique).
- en SSO, on passe de $2 \cdot 10^{-5}$ à 10^{-3}
- pour les orbites "prolongées" (Celestri, XMM), on passe de $2 / 3 \cdot 10^{-4}$ à $1 / 2 \cdot 10^{-3}$
- enfin, pour GTO + (19.000 s) on passe de 10^{-3} à 10^{-2} .

L'éruption d'août 1972 sans être nécessairement un maximum indépassable est pourtant un point haut dans l'histoire récente ... On pense qu'en moyenne il peut exister un tel point une fois par cycle, soit une fois tous les 11 ans. La durée est de l'ordre de quelques jours (3 à 5 typiquement).

Il existe une certaine abondance d'éruptions de niveau immédiatement inférieur. Par exemple, l'éruption de début avril 1998 étant sans doute de valeur crête 1/10 de 89 et 1/20 de 72.

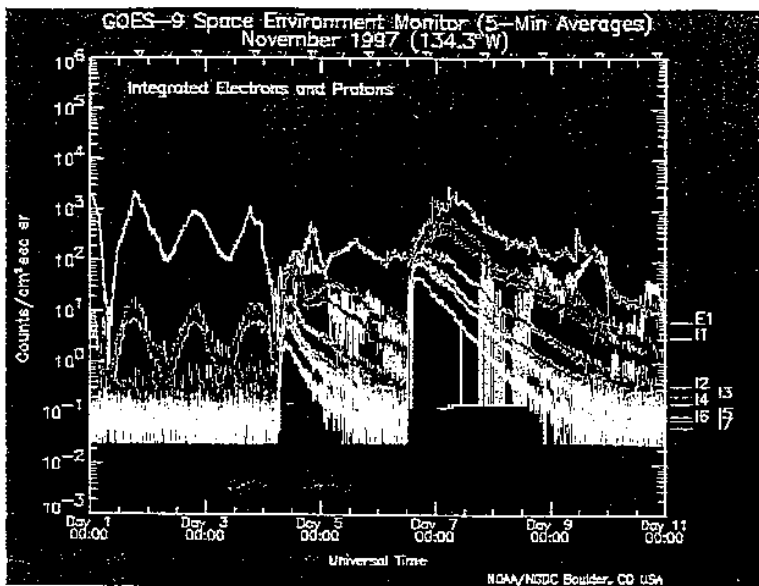


Fig. 9 : Evènements à protons de Novembre 1997

Rappelons que, les 4 et 6 novembre 1997, soit quelques jours après le tir ARIANE 502 (30 octobre 1997), ont eu lieu des événements à protons (fig. 9) dont l'intensité aurait pu perturber gravement le contrôle de vol du lanceur par leur impact sur les circuits intégrés.

Il y a un risque réel, tout à fait analogue au risque foudre. Faut-il s'en protéger ?

b) Pour un lanceur dont le défaut de fiabilité global visé doit être contenu en dessous de 20 à $30 \cdot 10^{-3}$, les chiffres ci-dessus, même s'ils sont appréciables, ne sont pas, en première approximation, dramatiques. Pourtant, il n'est pas inutile de rappeler que si l'on estime la "valeur" d'un lancement par AR 5 à 3 milliards de francs (lanceur + C.U.), le coût en probabilité quand on tire en phase d'éruption est donc de $3 \times 10^9 \times 10^{-3} = 3 \text{ MF}$ pour chaque tir SSO comme pour chaque tir à orbite "prolongée", et $3 \times 10^9 \times 10^{-2} = 30 \text{ MF}$ pour chaque tir en GTO +. On peut donc penser qu'un service dans le domaine "Météo de l'Espace" a une réelle valeur économique (et stratégique).

c) Il n'y a pas que le risque financier. On peut aussi utiliser la " Météo de l'Espace " pour optimiser les performances des missions spatiales.

C'est ainsi que pour certains lanceurs américains, le compte à rebours comporte, 6h avant le lancement, la prise en compte des prévisions de températures exosphériques (donc de profil vertical de densité atmosphérique - fig. 10) pour programmer au plus tôt l'ouverture et le largage de la coiffe, et donc gagner en masse finale injectée sur orbite.

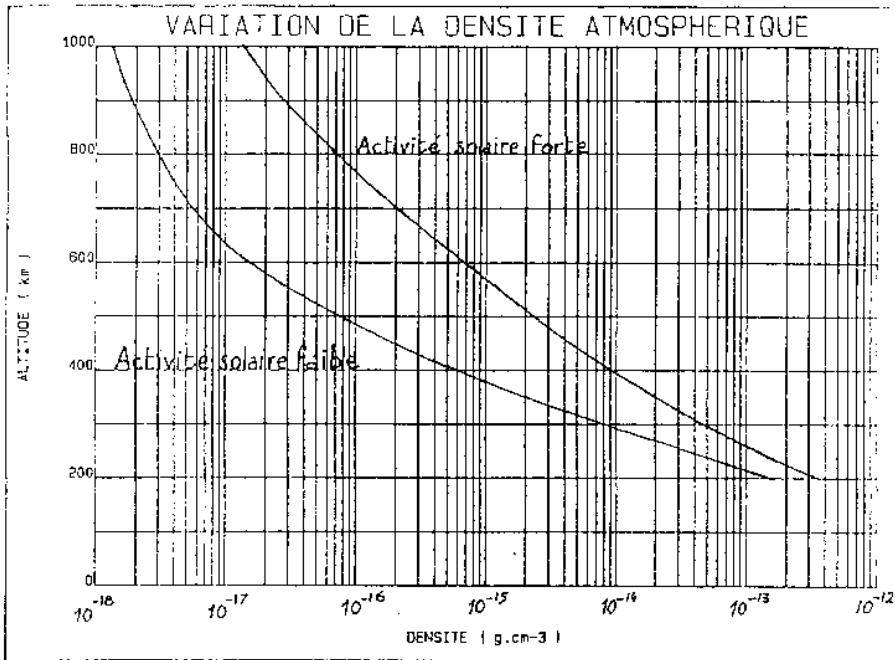


Fig. 10 :
Profils verticaux de
densité atmosphérique

d) Aujourd'hui, il n'y a aucune prise en compte de données de prévision d'activité solaire ou d'état magnétosphérique ou thermosphérique dans les opérations de lancement d'Ariane. Une ébauche de procédure d'alerte a été étudiée par l'Aérospatiale (sur le principe d'un seuil en énergie), mais rien n'est encore validé ou implanté. La Direction des Lanceurs au CNES (DLA) pense d'abord à des solutions de durcissement (par hard, ou par architecture tolérante aux fautes) avant d'envisager des solutions contraignant les chronologies de lancement par prise en compte d'alarmes. Mais les études et développements correspondants ne sont pas chiffrés ni, a fortiori, proposés dans les prochaines évolutions d'Ariane 5.

e) Si un service était proposé, il serait utile qu'il fournisse des informations en correspondance avec les grands moments du compte à rebours. Les représentants de DLA indiquent comme moments clés :

- 24/48 H avant lancement, répondre à la question : y a-t-il un risque de niveau dangereux ? On accepte à ce moment quelques imprécisions et imperfections.
- 6 H avant : début du remplissage. C'est sans doute là que doit être connue la prévision la plus rigoureuse
- 10 mn avant : démarrage de la séquence synchronisée.

f) Enfin, y a t il un intérêt à la restitution des doses reçues ? C'est sans doute intéressant, mais il ne semble pas nécessaire de placer un capteur particulier à cet effet sur le lanceur. Il est admis qu'une information suffisante sera obtenue à partir des observations globales.

2.2 SATELLITES EN ORBITE

Les effets des particules chargées sur les satellites (voir Réf.1) se répartissent en deux grandes classes :

- effets cumulatifs pour lesquels une amélioration des modèles est nécessaire mais qui ne requièrent pas une prévision de type “ météo ”
- effets sporadiques pour lesquels la nécessité de prévision pourrait apparaître.

Les effets sporadiques sont essentiellement dus aux décharges électrostatiques ou aux événements singuliers. Dans le premier cas ces décharges se produisent entre des éléments du satellite qui ont atteint une certaine différence de potentiel du fait de leur exposition aux plasmas d'orage, ou à des particules de plus forte énergie qui se sont accumulées. Le rayonnement et les champs produits, à la suite de couplage avec les structures et les circuits, sont susceptibles de générer des signaux parasites interprétables comme des fausses commandes. Dans les années soixante dix ce phénomène est devenu préoccupant du fait de l'accroissement de sensibilité des circuits électroniques. Dans un premier temps la principale source de décharge était les revêtements de contrôle thermique directement exposés aux plasmas d'injection entre 0 et 6h locales. Cet inconvénient a été petit à petit maîtrisé par des règles de conception et de qualité adéquates et la source principale est maintenant les structures hétérogènes (câbles, empilements diélectriques/conducteurs...) exposés à des rayonnements moins denses mais plus pénétrants. La mise en œuvre croissante d'équipements de type "micro technologies" devrait entraîner une vigilance accrue envers ces phénomènes. Un autre facteur de préoccupation pour l'avenir concerne les conséquences de l'accroissement prévisible de la tension des générateurs solaires et les couplages de ces tensions avec les plasmas.

Les "événements singuliers" sont des basculements d'états logiques produits par les charges déposées par les ions lourds le long de leur trajectoire lorsqu'ils impactent des composants électroniques très intégrés. Les progrès de l'intégration des VLSI ont fait que, initialement sensibles aux seuls ions les plus lourds et les plus rapides - donc à une composante minoritaire du spectre - les VLSI sont maintenant susceptibles d'être sensibles à pratiquement toute la gamme du rayonnement cosmique (et solaire dans le cas d'éruption à ions lourds) mais aussi aux rayonnements secondaires produits dans le matériau même du circuit par les protons rapides. Ils deviennent donc sensibles aux éruptions solaires et aux plus fortes énergies de la ceinture de protons de la magnétosphère. Les tendances préoccupantes pour l'avenir sont d'une part la forte croissance du nombre et de la variété de composants électroniques embarqués, d'autre part l'intérêt que présentent les composants “ commerciaux ” qui ne sont pas développés spécifiquement pour l'usage spatial.

Pour ces deux types d'effet, les orbites d'altitude moyenne (MEO) fréquentées par les constellations, sont des lieux dangereux d'autant que, pour une constellation, une panne due à l'environnement pourrait éventuellement concerner l'ensemble de la flotte.

On peut assimiler aux effets sporadiques les bruits créés dans les détecteurs (CCD, channeltrons...) et les optiques (effet Cerenkov dans les milieux réfracteurs) par les radiations, bruits pouvant dans certains cas couvrir le signal, voire aller jusqu'à entraîner une réduction de durée de vie.

Trois domaines d'activités concernant les satellites sont susceptibles de bénéficier de la mise en place d'un système de prévision de l'environnement spatial :

- la conception des satellites,
- leur opération,
- le traitement des anomalies.

1. En ce qui concerne le premier point, la réaction est unanime : la tenue en dose cumulée est parfois un facteur limitatif du choix des composants, des flux "extrêmes" peuvent parfois être pris en compte dans des calculs de potentiels limites induits (calcul de type "NASCAP") ou de taux d'événements singuliers, mais l'environnement n'apparaît pas à l'heure actuelle comme le facteur dimensionnant dont on pourrait relâcher la contrainte par une meilleure alerte en vol. Une réflexion plus approfondie serait nécessaire si des événements en vol devaient apparaître avec les nouvelles technologies (générateurs solaires haute tension, micro technologies) mais l'idée de base est plutôt de concevoir le dispositif résistant au cas extrême que de prendre des mesures de protection en fonction d'une alerte.
2. Pour ce qui est des opérations, les avis sont plus partagés. Ils vont de la position selon laquelle l'environnement n'est pas non plus le facteur dimensionnant de l'équipe d'opérations à celle selon laquelle avec un préavis de l'ordre d'une dizaine d'heures et une fiabilité de prédiction de l'ordre de 80% on pourrait arriver à une réduction des coûts d'opération. Dans tous les cas ces avis sont donnés comme des réactions "qualitatives" immédiates qui demanderaient à être développées si un service de prévision existait.

On peut ranger dans cette catégorie d'intervention les actions déjà utilisées sur des missions scientifiques (D2B, XMM...) consistant à couper des détecteurs dans les zones de flux intenses pour éviter leur usure prématurée. Pour cette finalité, l'existence de prévision de délais compris entre l'heure et 2 ou 3 jours selon les missions permettraient d'améliorer la programmation et l'autonomie; par exemple, on pourrait choisir les objectifs visés en fonction du niveau attendu de bruit lié à l'environnement spatial.

3. L'existence d'anomalies de fonctionnement en vol est une réalité d'aujourd'hui évaluée aux USA à une trentaine de millions de dollars de coûts annuels pour la part due à l'environnement spatial. Un problème important est d'identifier le plus rapidement possible si une anomalie constatée est due ou non à l'environnement. La restitution rapide (~ 1 journée) est donc un besoin avéré. Des données peuvent être trouvées sur la "toile", mais deux caractéristiques doivent être améliorées :

- la fiabilité de ces données (calibration, sûreté de l'accès...),
- leur exhaustivité (nature des particules, gammes d'énergie, possibilité de reconstruire un environnement local à partir de mesures effectuées en d'autres points...).

C'est donc là où se situe le besoin le plus immédiat et le mieux établi pour les satellites en orbite, le traitement des autres besoins étant ressenti à l'heure actuelle comme matière à réflexion pour quand existera un système de prévision fiable.

Les compagnies d'assurance souhaitent connaître a posteriori l'environnement spatial, non pas pour en tenir compte dans l'indemnisation des dommages constatés mais pour apprécier la part de risque lié à l'environnement comparée aux risques d'autre nature (conception, qualité de réalisation, professionnalisme des entités opérationnelles).

Remarque commune aux § 2.1 et 2.2 :

Dans le contexte général de réduction des coûts et de compétition farouche, il faut peut-être se garder de solutions trop radicales ; il y a une tendance manifeste du concepteur à dimensionner « très haut » les lanceurs et les satellites de façon à ce qu'ils puissent ne pas être affectés par la perturbation la pire à laquelle on puisse s'attendre. Ce dimensionnement est onéreux. On peut se demander si c'est la seule voie. L'acceptation d'une contrainte opérationnelle qui s'appliquerait peut-être, pendant deux à trois jours une fois tous les dix ans permettrait peut-être d'abaisser les coûts. Après tout, on accepte bien que certains services terrestres soient dégradés pendant les cyclones ou les tremblements de terre...

2.3 CONTROLE D'ORBITE

2.3.1 Perturbations

On peut connaître la densité de l'atmosphère terrestre, à une altitude donnée, si l'on connaît la température exosphérique (Température à l'infini, T_{∞}). Cette température T_{∞} dépend, entre autres, de l'activité solaire et géomagnétique.

L'activité solaire (Réf. 2) en UV a pour effet d'exciter les différentes molécules de l'atmosphère donc d'augmenter leur température (effet sur T_{∞}) et de dilater globalement l'atmosphère (effet sur la densité).

L'influence du rayonnement ultraviolet du Soleil sur l'atmosphère est mesurée à l'aide des flux décimétriques $F_{10.7}$ (plus pour des raisons historiques que physiques). La dynamique de ce flux est de l'ordre de 5, entre le minimum et le maximum d'un cycle. A l'échelle de la journée, le flux peut être considéré comme constant mais sur plusieurs jours, il peut être très variable. On peut observer une forte corrélation sur 28 jours, période de rotation du Soleil.

L'activité géomagnétique, c'est à dire la réponse de la magnétosphère à l'arrivée du vent solaire, est évaluée au moyen de l'indice K_p obtenu à partir de 11 observatoires du champ magnétique répartis sur le globe. On utilise des moyennes de K_p sur 3 heures. Un orage magnétique peut faire varier K_p dans un rapport 5 en quelques heures.

Depuis peu et grâce au programme international INTERMAGNET, il est possible d'accéder, dans un délai de une heure, aux données magnétiques (brutes) enregistrées dans une quarantaine d'observatoires dont un grand nombre sont situés dans les régions de haute latitude. Ces données sont accessibles sur la «toile» auprès de quatre «Geomagnetic Information Nodes» ; Édimbourg, Ottawa et Paris (Réf. 8).

2.3.2 Manœuvres orbitales

Le frottement atmosphérique engendre une décroissance du demi grand axe qui oblige à effectuer des corrections d'orbite pour assurer le maintien du phasage et de l'altitude du satellite. D'autre part, la prévision précise d'orbite est nécessaire pour la programmation de certaines charges utiles (sur 24 à 48 heures).

En période calme, la décroissance du demi grand axe sur une orbite héliosynchrone de type SPOT est inférieure à 1 mètre/jour, mais elle atteint 6 m/j lors d'activité moyenne et peut s'élever jusqu'à 50 m/j lors d'évènements violents (fig. 11), ce qui correspond à un écart de quelques 8 km de la position du satellite le long de l'orbite au bout d'une journée.

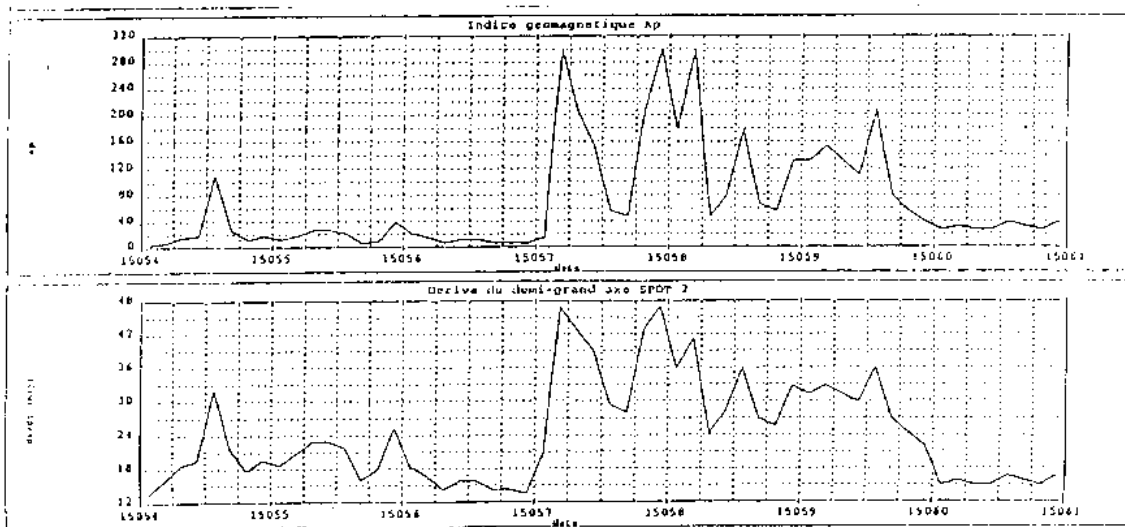


Fig. 11 : Décroissance du $1/2$ grand axe de Spot 2 en forte activité solaire (20-21 octobre 1997)

La tendance à embarquer des navigateurs autonomes (type Diode) ne retirera rien du besoin de prédiction à des fins de programmation (plate-forme et instruments). L'horizon de prédiction de la densité atmosphérique recherché est 36-48 heures.

Il serait appréciable de disposer plus rapidement des données de mesure du flux en 10.7 cm et des indices géomagnétiques.

Le maillon faible de la chaîne de prévision est la modélisation de l'atmosphère, qui a insuffisamment progressé depuis les années 70 (Jacchia 77, DTM de F. Barlier) : ils sont certes susceptibles de donner une description statistiquement correcte de l'atmosphère, mais en aucun cas, ils ne peuvent prétendre représenter celle-ci à un instant donné, ni décrire sa dynamique, que ce soit à court ou à long terme. De plus, leur caractère empirique, fondé sur des données acquises sur deux ou trois cycles solaires ne les rend aptes qu'à décrire des situations de cycles équivalents, négligeant toute variation séculaire éventuelle.

Les études nécessaires à la réalisation des missions utilisant des techniques de freinage atmosphérique peuvent être l'occasion de relancer des travaux de modélisation dans ce domaine (par exemple au GRGS et au LIS).

A noter des tentatives de relier plus finement la densité de la haute atmosphère aux orages magnétiques en supposant le déclenchement d'ondes se propageant autour de la Terre (Travelling Atmospheric Disturbances) et se superposant dans les zones équatoriales (Réf. 3).

2.3.3 Freinage atmosphérique

Les missions spatiales faisant appel à un freinage atmosphérique auront besoin d'informations précises et actualisées. Le couloir autour du périhélie pour un satellite faisant de l'aérofreinage se situe aux alentours de 120 kilomètres et est très étroit: quelques centaines de mètres. En cas d'augmentation importante de la densité atmosphérique, il faut être capable, au voisinage de l'apogée donc plusieurs heures à l'avance, de rehausser l'altitude du périhélie suivant de manière à éviter un freinage trop brutal.

2.3.4 Prévisions de rentrée atmosphérique

La prévision de rentrée atmosphérique, à l'horizon de plusieurs mois, s'appuie sur l'estimation de l'activité solaire. Si on analyse l'évolution des prédictions de rentrée du satellite MAGSAT (Ref. 4), on constate (fig. 12) un écart de plusieurs mois entre une première prévision (en novembre 1979) basée sur l'estimation d'un nombre de Wolf de 200 et la réalité (nombre de Wolf de 160). La rentrée à venir de MIR (correspondant à un maximum d'activité solaire) pourrait être une nouvelle occasion de se pencher sur ces problèmes de prévision de rentrée de satellites.

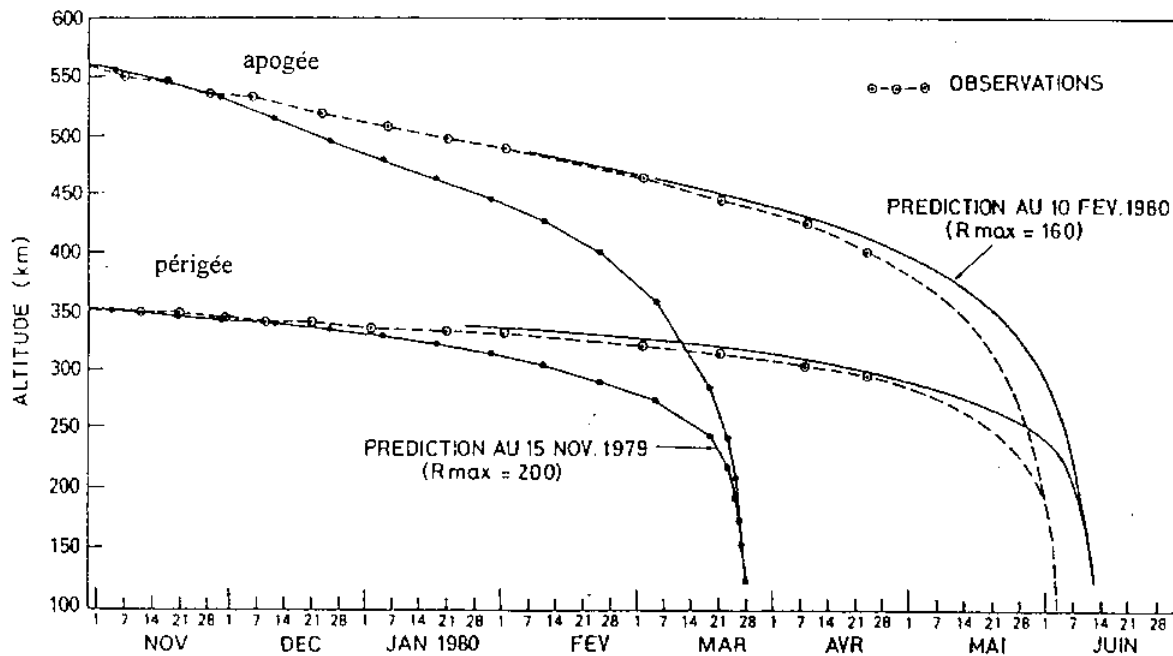


Fig. 12 : Prévision de descente orbitale de Magsat en fonction du temps

2.3.5 Surveillance des débris

En cas d'éruptions majeures, le chauffage de l'atmosphère modifie l'orbite de centaines voire de milliers de débris donc oblige à procéder à des ré acquisitions radar et à recalculer les orbites correspondantes et les repreciser les risques de collision. A titre d'illustration, lors d'un événement violent, le NORAD a perdu la trace de 1300 débris.

2.4 HOMME DANS L'ESPACE

2.4.1 Rappel des risques encourus.

L'enjeu est de déterminer l'utilité de la prévision et de la restitution de certaines situations " à risque", c'est à dire de situations où les normes admises de préjudice subi par un équipage sont en passe d'être transgressées. Que les normes actuelles soient à revoir (un ordre de grandeur aussi élevé qu'un facteur 10 est parfois mentionné), c'est un problème qui relève de la recherche et que nous ne pouvons pas prendre en compte dans la phase actuelle des travaux, totalement centrée sur un service opérationnel.

Pour des astronautes, la NASA semble considérer aujourd'hui que la dose limite "acceptable" d'exposition au risque est de 250 mSv en 1 mois, 500mSv en 1 an, 1500 mSv en une carrière. Or, les ordres de grandeur suivants sont avancés:

	Normal	Eruption
Orbite basse type ISS	1 mSv/jour 360 mSv/an	≅ 140mSv/éruption en IVA ≅ 100mSv/6h en EVA

Rappelons que la construction de la station (sur orbite de 51 degrés d'inclinaison) demandera beaucoup d'EVA et qu'elle se déroulera en plein maximum du cycle solaire.

Terre-Lune : on peut avoir 1 ou plusieurs Sv par jour en cas d'éruption. Donc il faut un "sarcophage" dans le véhicule et une alerte au moins une heure avant les flux les plus forts pour permettre à l'équipage de se mettre dans la configuration la plus "protégée".

Base lunaire : Le "masque " du sol lunaire peut réduire parfois le flux, mais il faut dimensionner sur le cas le plus défavorable, c'est à dire le cas précédent. Il faudra une météo de l'espace à une base lunaire, capable de donner un signal d'alerte quelques dizaines de minutes avant les situations les plus dangereuses.

A propos des expéditions lunaires, rappelons que, entre les missions Apollo 16 et Apollo 17, très exactement le 4 Août 1972 , eut lieu une très importante éruption de protons solaires. La dose reçue (au niveau de la Lune) s'élevait à 7 Sv/ heure, à son maximum. Malgré le blindage du module lunaire, les astronautes qui se seraient trouvés malencontreusement en mission à ce moment auraient reçu une dose intégrée de 15 Sv, dose très probablement mortelle.

Voyage vers Mars : Le risque "instantané" est le même que pour le voyage Terre-Lune. Mais la durée du voyage est 100 fois plus longue. Le risque total est en proportion. Il doit y avoir à bord une zone blindée sous une épaisseur d'au moins 50 g/cm² d'équivalent Aluminium (fig. 13).

Blindage : coquille sphérique en Al

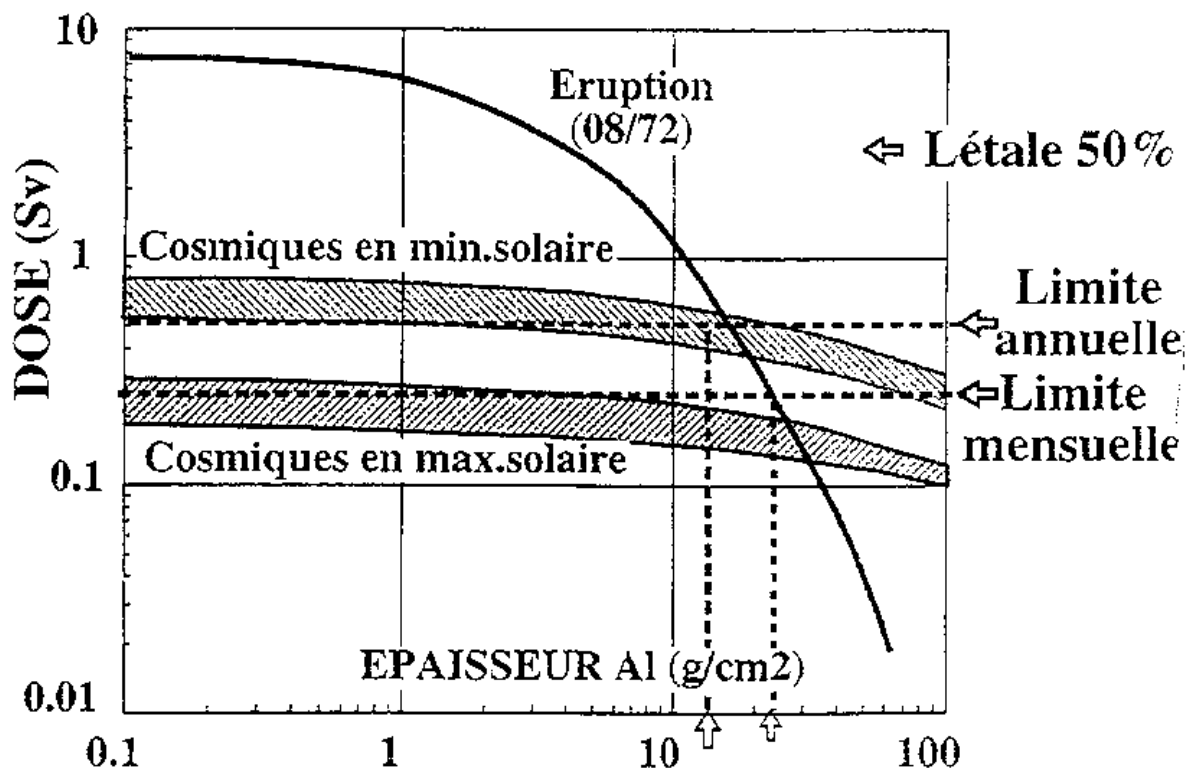


Fig. 13 : Vols habités vers Mars : risque radio biologique

Base Martienne : On peut estimer en gros, que l'écran de l'atmosphère procure une réduction de 20 à 30 % des flux reçus. Qualitativement, les conclusions sur le besoin d'un abri et d'une alerte sont les mêmes que pour la base lunaire.

2.4.2 Pour les opérations de vols habités, USA et Russie s'appuient sur les mêmes sources de prévision et restitution: Le SEC (Space Environment Center de la NOAA à BOULDER).

A ce jour, il n'y a jamais eu de report de tir ou de changement opérationnel important répertorié en relation avec un risque d'irradiation d'équipage. Cela tient largement au fait que les orbites utilisées étaient toutes bien protégées par le bouclier magnétosphérique.

Pour l'avenir, et dans le cas général, avec des orbites qui peuvent être plus exposées, on peut distinguer trois perspectives créant une demande :

- a) Risque mortel à court terme (sur ISS, Respons. : USA)
- b) Besoin d'un suivi cumulé par personne pour gérer à moyen terme la "carrière" individuelle (sur ISS, Respons.: médecin personnel - national- de chacun)
- c) Nécessité de reprogrammation d'activité (ex: EVA, ...) (sur ISS: USA)

2.4.3 Que faire ? Rien de pressant dans les vols habités des 10 prochaines années. Il faut poursuivre l'effort de recherche pour :

- savoir
- être partie prenante à l'établissement des normes

Il faut aussi contribuer à l'effort mondial de fourniture de données brutes.

2.5 PROPAGATION ESPACE-TERRE

2.5.1 Les perturbations

Les ondes radio, de 30 MHz jusqu'à une fréquence de 2 GHz environ, peuvent être perturbées lors de leur traversée de l'ionosphère, de différentes manières :

- atténuation du signal,
- absorption quasi totale,
- réflexions,
- changement de la direction de propagation, d'où modification du trajet de propagation,
- variation de phase du signal.

La variabilité de l'ionosphère résulte de :

- la variabilité du flux solaire entrant (essentiellement dans la partie UV lointain du spectre),
- la variabilité du plasma d'origine solaire pénétrant dans la magnétosphère,
- les marées atmosphériques produites par le Soleil et la Lune,
- son chauffage par le Soleil qui provoque un cycle quotidien de dilatation / rétraction.

Les deux premières causes, les seules qui soient aléatoires, relèvent de la Météorologie de l'Espace.

2.5.2 Orbitographie et localisation

La société CLS, filiale du CNES, utilise les données en provenance de Meudon pour ARGOS (orbitographie et localisation à quelques centaines de mètres) et pour DORIS (restitution précise d'orbite). Pour l'orbitographie précise (DORIS), la détermination des biais d'horloges oblige à effectuer une correction ionosphérique précise.

Pour ARGOS, qui est monofréquence (400 MHz) le besoin est de disposer du CET oblique (Contenu Electronique Total) pour les corrections iono (voir par exemple fig. 14). La remontée du cycle solaire va renforcer l'importance de ces informations. Le modèle de Bent fournit le CET. Ses paramètres ont été déterminés empiriquement à l'aide de données correspondant à des périodes d'activité solaire faible et moyenne. Il n'est donc pas très efficace pour les années à venir. Sa seule entrée (mis à part les positions de la balise et du satellite) est le coefficient R12 du mois courant. Le R12 représente le nombre de tâches solaires moyennés sur les 12 derniers mois. En forte activité solaire, l'effet ionosphérique sur la localisation est de l'ordre de 200 mètres. Il est donc important de le prendre en compte. Le modèle de Bent est efficace à 40%. C'est un résultat statistique. Les plus grandes instabilités du CET ont lieu au coucher du Soleil. L'amélioration dépend de la géométrie du passage en visibilité (passage haut ou bas). Ce modèle n'est pas la panacée (à part l'efficacité, il faut prendre en compte le temps de calcul, la lourdeur de la mise en œuvre dans un contexte opérationnel) mais pour l'instant CLS n'en connaît pas d'autre. Des contacts avec le CNET de Lannion sont intéressants pour une future mise en place.

TEC - UNITED STATES

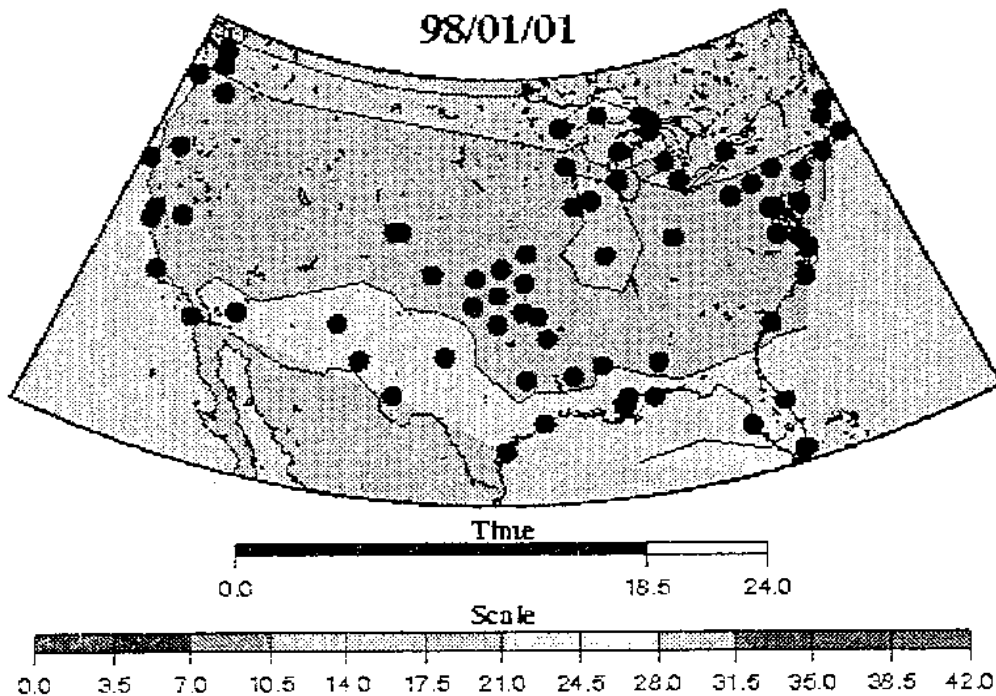


Fig. 14 : Contenu électronique total au-dessus du continent Nord-Américain
(doc serveur JPL)

2.5.3 Systèmes de navigation

Deux effets ionosphériques peuvent gravement perturber le positionnement précis de type GPS :

- une perte complète de la réception des données, due à la scintillation de l'ionosphère qui peut provoquer une atténuation jusqu'à 20 dB du signal. Les zones polaires et équatoriales sont particulièrement sensibles à ces phénomènes.
- dans le cas de l'utilisation en monofréquence (utilisation civile), les variations de propagation peuvent conduire à une erreur de positionnement de l'ordre de 30 mètres.

L'Europe progresse dans sa volonté de se doter d'un système de navigation complémentaire voire alternatif au système Américain GPS (Réf. 5).

Pour l'intégrité du système, il est prévu de déployer en Europe un réseau d'une quarantaine de stations (RIMS: Ranging and Integrity Monitoring Stations). Ces stations collecteront les mesures, entre elles mêmes et un satellite GPS/GLONASS ou géostationnaire, données transmises à des MCC (Mission Control Centre) qui diffuseront en permanence les corrections à effectuer. 4 MCC sont prévus (Francfort, Londres, Madrid, Rome), exploitées sous la responsabilité des agences de navigation nationale. Une agence Européenne GNSS est envisageable dans les 5 ans qui viennent.

Les données diffusées seront une prévision à très court terme (2 minutes), obtenue en utilisant un filtrage sommaire. La précision de mesure avion - satellite visée in fine est de 50 centimètres. Une question importante est l'homogénéité de l'ionosphère et l'existence de « bulles » de taille inférieure à la maille du réseau de station RIMS : les bulles « vues » par TOPEX-POSEIDON sont d'environ 150 kilomètres de diamètre (dans les zones équatoriales ou à haute latitude).

Un groupe scientifique spécialiste de l'ionosphère suit ces études (coté Français, M. Lassudrie, du CNET Lannion).

THOMSON-CSF (établissement de Toulouse) est chargé de l'implantation de ce réseau RIMS (une quarantaine de stations réparties sur toute l'Europe continentale + Islande).

Ce système RIMS pourrait être utilisé par un service de Météo de l'Espace comme fournisseur de données. En retour, il pourrait être intéressé à disposer de prédictions sur un horizon plus long que les 2 minutes actuellement envisagées.

Un banc de test sous responsabilité ESA sera disponible fin 99. Le déploiement du système opérationnel European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS) est prévu pour 2003.

2.5.4 Altimétrie

Les missions d'altimétrie océanique utilisent des altimètres bi-fréquence pour corriger la mesure altimétrique d'un terme en $1/f^2$ proportionnel au contenu électronique total de l'ionosphère au nadir du satellite. L'utilisation de deux fréquences permet d'identifier le CET et de rendre négligeable ce terme d'erreur dans le bilan global.

Ce besoin d'identification est la raison unique d'utilisation d'un système bi-fréquence pour l'altimétrie au dessus des océans. Pour l'altimétrie au dessus des glaces ou du couvert végétal, le bi-fréquence est aussi justifié par le besoin de caractérisation de l'état de surface.

D'autres missions d'altimétrie sont monofréquence (ERS2, GFO) et se basent sur des modèles pour la correction ionosphérique.

Les besoins opérationnels futurs de répétitivité de couverture inciteront à mettre en œuvre des systèmes multi-satellites. Un scénario raisonnable serait d'avoir un seul d'entre eux en bi-fréquence, qui permettrait de caractériser l'état de l'ionosphère, et les autres en mono, ce qui suppose que les modèles d'évolution court terme de l'ionosphère soient suffisants.

A plus long terme, en supposant modélisable la variabilité temporelle de l'ionosphère, un système opérationnel à plusieurs satellites monofréquence est envisageable.

L'expression du besoin en terme de longueur d'onde spatiale reste à préciser.

Des besoins autres que ceux jusqu'ici identifiés (altimétrie, localisation) pourraient apparaître dans l'imagerie radar.

JASON fournira des données TEC avec un délai de 3 heures seulement en continu sur les océans (précision millimétrique). La diffusion de ces données se fera via CLS.

2.5.5 Services commerciaux de communication

Les futures constellations de satellites de communication (IRIDIUM, Global Star, Teledesic, Skybridge...) seront affectées par la scintillation ionosphérique.

Les liaisons satellite-avion se font à 1.6 GHz (INMARSAT). Des atténuations importantes (> 20 dB en région équatoriale, 10 dB en région polaire) sont observées vers minuit local sous l'effet de scintillation ionosphérique, liée à l'activité du Soleil.

2.6 LIAISONS TERRE-TERRE

Les activités potentiellement utilisatrices d'un service opérationnel de météorologie de l'Espace sont les suivantes :

2.6.1 La radiodiffusion

Ce besoin émane de TDF principalement pour Radio France Internationale.

Les communications dans la bande HF (aussi appelée bande décamétrique - longueurs d'ondes de 10 m à 100 m- ou parfois improprement Ondes Courtes, cette dernière appellation correspondant aux longueurs d'ondes plus courtes que 80 m, donc aux fréquences supérieures à 3.75 MHz) dépend fortement de la réflexion des signaux par l'ionosphère terrestre. Les ondes électromagnétiques sont atténuées en traversant l'ionosphère basse (sous 100 km d'altitude), là où les collisions entre les électrons et les molécules d'air sont fréquentes. Cette atténuation affecte les différentes fréquences radio utilisables de façon différente; elle peut devenir importante à la suite d'une augmentation de la densité électronique locale, au point de causer un black-out. Les causes de cette augmentation peuvent être aussi variées qu'un accroissement du flux solaire UV à la suite d'une éruption solaire, d'un sursaut solaire en rayons-X, d'un événement solaire à particules énergétiques (électrons et protons) ou d'une aurore boréale intense. Les événements à particules énergétiques produisent un type de perturbation particulière appelée PCA (Polar Cap Absorption) qui peut durer plusieurs jours.

Le Département Fréquences de TDF possède un "Service Ondes Décamétriques" dont le client principal est RFI (Radio France International). La bande gérée va de 3950 kHz à 26100 kHz. Le service utilise des indices IR5 (moyenne du nombre de tâches sur cinq mois) communiqués par le CNET. La tâche de gestion des fréquences peut se découper en :

- planification des fréquences
- choix de la bande la plus appropriée pour une heure donnée
- état de l'occupation de la bande.

Les indices solaires à court terme ne sont pas utilisés, ne permettant pas de suivre à court terme les effets de l'activité solaire, et l'aspect prévision n'est pas clairement marqué. Par contre, les effets du cycle solaire, moyennes sur plusieurs mois, sont bien décrits par les indices IR5.

2.6.2 Aspect militaire de l'étude de l'environnement perturbé post-nucléaire

Un besoin pour les communications sol-sol n'a pu être identifié. Par contre, la météo de l'espace peut avoir des retombées indirectes sur l'étude de l'environnement perturbé post-nucléaire. Ce thème comporte bien sûr un aspect de confidentialité fort, mais on peut dégager les points suivants :

A la suite d'une explosion nucléaire, l'impulsion électromagnétique (IEM, ou EMP en anglais) perturbe l'ionosphère jusqu'à 20 à 40 km d'altitude, principalement par l'effet des photo-électrons. On a besoin de caractériser l'évolution du milieu, qui peut dépendre des perturbations autres et en particulier des perturbations d'origine solaire. En gros il s'agit de corréler les effets de l'IEM avec l'environnement naturel dont il faut avoir la meilleure connaissance possible.

Ceci a également des retombées sur la vulnérabilité des satellites aux menaces d'explosions nucléaires, et sur les communications satellites sol.

L'intérêt de la météo de l'espace dans ce domaine peut être considéré au même titre que celui des autres phénomènes naturels (foudre, etc..) et demande à être actualisé.

2.6.3 Utilisateurs de systèmes de communication longues distances en HF

Le service mobile aéronautique utilise des liaisons HF entre 2.8 et 22 MHz. Des PIDB (Perturbations Ionosphériques à Début Brusque) sont rencontrées lors d'éruptions solaires. Elles se traduisent par une brusque absorption des ondes par la couche D de l'ionosphère, le retour à la normale s'effectuant en quelques dizaines de minutes. Des PCA (Polar Cap Absorption) perturbent également les liaisons dans les régions polaires pendant plusieurs jours.

Le besoin de communications longues distances en HF (1.6-30 MHz) avait été un peu vite jugé en voie d'extinction à cause de l'arrivée des systèmes de communication par satellites. Néanmoins, il apparaît que les services gouvernementaux et militaires continuent d'en être demandeurs, soit pour pallier des indisponibilités de communications via satellites soit pour des questions de coût. Un système de communication de 1 kW de puissance tient maintenant dans un volume acceptable, une antenne de surface modeste (cadre de 1.5 mètres suffit) et la mise en œuvre du système est devenue plus simple, ne requérant plus l'intervention d'un spécialiste ès communications, tout en présentant une fiabilité acceptable: par exemple, avec un tel système, des liaisons Rabat-Riad sont disponibles 90% du temps. Des lots de fréquences (100 Hz d'espacement) à l'intérieur de la bande HF sont attribuées à des pays par le CCIR. A l'autorité nationale de répartir ensuite le lot entre ses administrations gouvernementales. Les bandes passantes sont de 300 à 3100 Hz. Les chevauchements sont résolus en attribuant des fréquences proches à des utilisateurs géographiquement éloignés.

Pour la France une bonne dizaine d'organisations utilisent des réseaux HF de façon régulière (armées, services paramilitaires, réseaux d'ambassades).

En plus du maintien de l'intérêt des utilisateurs traditionnels, l'aéronautique civile pourrait redonner une nouvelle jeunesse aux systèmes HF en en faisant le système redondant des liaisons par satellite (INMARSAT Aéro H) dans le cadre du système ATN (Air Traffic Network) en cours de définition. Le système ATN vise à étendre la capacité de communications de service entre les avions et les services au sol (centre de contrôle, services techniques et commerciaux des compagnies). Un système SATCOM sur avion complètement redondant est évalué à 500 k\$. Il n'offre qu'une disponibilité d'environ 95% (Sudden Ionospheric Disturbances, Polar Cap Absorption, système satellite lui-même). Redondé par un système HF totalement indépendant, s'appuyant sur un réseau de quelques stations réparties sur le globe (8 stations prévues, 2 sont déjà en place), l'ATN présenterait une disponibilité de 99.9%, les liaisons se faisant en un ou deux bonds. Le coût serait réduit puisque les systèmes HF sont aujourd'hui obligatoires sur tous les gros porteurs long courrier. Rockwell-Collins a développé un kit de modification à coût réduit permettant de réutiliser les équipements radio HF actuellement à bord des aéronefs pour le futur système ATN.

Le besoin des utilisateurs de système HF

L'établissement d'une communication HF entre deux terminaux se fait à l'aide d'un protocole normalisé ALE (Automatic Link Establishment) sur le principe suivant :

- l'appelant choisit une fréquence selon ce qu'il pense être la meilleure à l'instant présent (tables figées ou mises à jour sur des bases plus ou moins empiriques en fonction des résultats de liaisons antérieures, tables LQA Link Quality Analysis) et émet son appel,
- le récepteur de l'appelé écoute en permanence un ensemble de fréquences (paliers de 2, 5 ou 10 fréquences par seconde),
- lorsque le récepteur de l'appelé détecte le signal de l'émetteur appelant, l'appelé répond, à la fin de l'appel, sur le même canal. Sinon l'appelant essaye une nouvelle tentative sur une autre fréquence. La durée d'établissement d'une liaison est d'environ 15 secondes pour chacune des tentatives.

Réduire le nombre de paliers balayés en disposant de meilleurs modèles de propagation fait gagner du temps et contribue à désencombrer le spectre. D'autre part effectuer la première tentative sur la fréquence offrant la meilleure propagation augmente la probabilité de connexion et réduit le nombre de tentatives.

Rockwell Collins a développé un logiciel de prévision de propagation, PROPMAN, basé sur IONSCAP et offrant une interface avec les données de prévision issues du SEC ou d'autres senseurs.

Un service français ou européen offrant aux utilisateurs de liaison HF les paramètres d'entrée à un logiciel de ce type (prévisions de bouffées de rayons X, orages magnétiques...avec un horizon de l'ordre de l'heure) serait fort apprécié. L'interface entre un tel service et un réseau d'utilisateurs pourrait se faire en un point unique, la mise à jour des paramètres s'effectuant par des liaisons HF de service (voir par exemple la fig. 15).

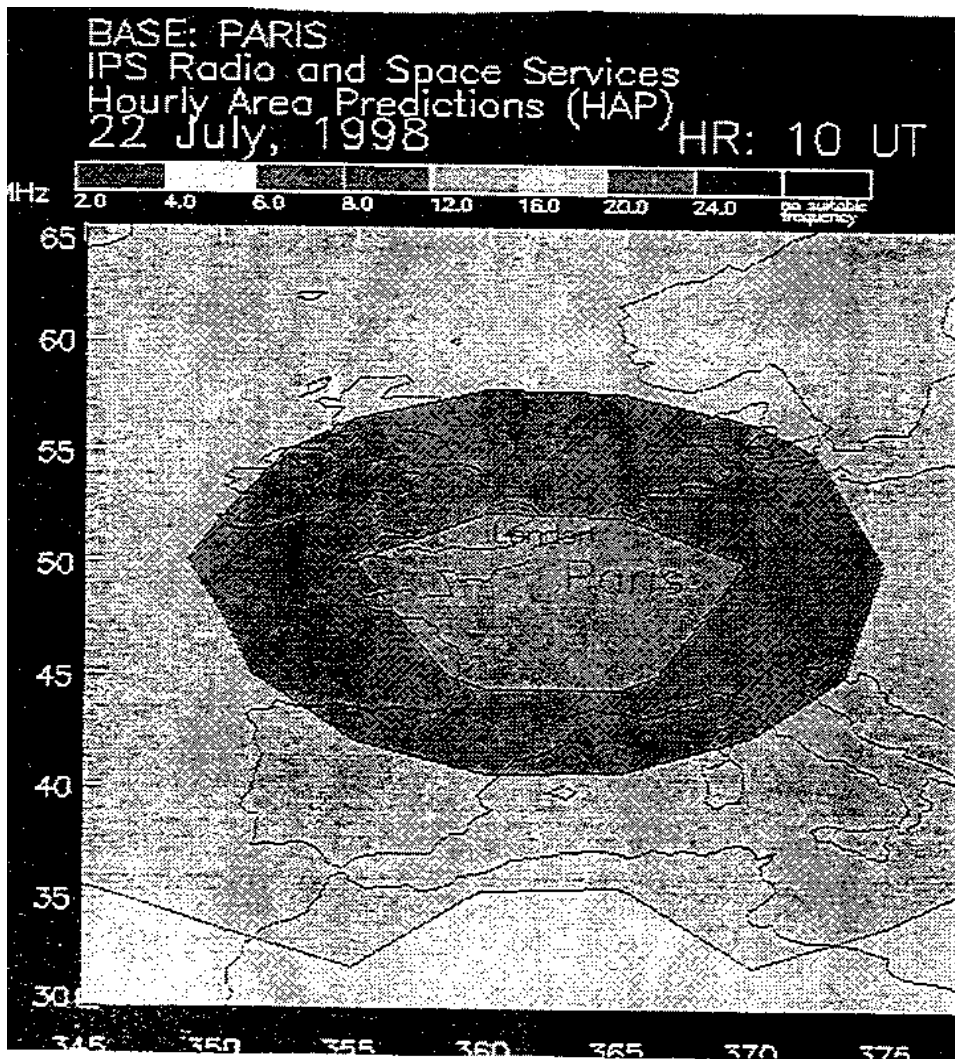


Fig. 15 : Carte de prévision des fréquences optimales. Mise à jour horaire

2.6.4 Radar transhorizon militaire

Le radar transhorizon est un dispositif de détection lointaine (jusqu'à 4000 km). Des réalisations ou des études existent en Australie, CEI, au Japon, aux USA, au Royaume-uni,...

a) Principe

Les couches de l'ionosphère sont utilisées comme réflecteurs pour des rayonnements de fréquence comprises entre 3 et 30 MHz. Les couches concernées peuvent aller de E (150 km) à F (250 à 700 km).

L'objectif de détection ? Essentiellement des missiles balistiques au départ (après, ils sont au-dessus de l'ionosphère), mais aussi des avions et, pourquoi pas, des bateaux. Les missiles sont discriminés par leur forte vitesse radiale, car ils suivent une trajectoire qui devient rapidement quasi horizontale. La zone de détection peut atteindre un rayon de 4000 km. Il y a une zone aveugle centrale d'environ 600 à 800 km de rayon.

Dans les cas "favorables", il y a 15 à 20 minutes entre la détection du missile au départ et son arrivée sur l'objectif.

Le milieu réflecteur est très variable et de nombreux ajustements sont nécessaires (avec l'aide d'amers) pour établir une liaison aller et retour convenable pour l'observation ; ajustements de fréquences et ajustements de direction d'émission.

b) Préjudices liés à l'environnement

Dues à des fortes activités solaire et magnétique, les perturbations ionosphériques induites peuvent donner un black -out complet ou une déviation de faisceau. Même si la conception du radar présente une certaine souplesse pour le choix des fréquences et l'orientation du faisceau, il pourra subsister des périodes d'indisponibilité totale du système.

La question se pose de déterminer les statistiques d'indisponibilité en prenant en compte les situations ionosphériques observées et la conception du radar. Le choix de conception relève de questions de physique, d'opérations, et de coût-efficacité.

Le service souhaitable à rendre à de telles installations devrait comprendre :

Prévision de fréquence critique, densité électronique, hauteur de couche. Formulée 3 jours à l'avance et recalée 24 H à l'avance.

Comme il est inacceptable d'avoir une capacité nulle de détection et d'alarme (l'ennemi pouvant d'ailleurs en tirer avantage puisqu'il est au courant), l'Etat-Major doit, d'un point de vue opérationnel, mettre en place des solutions de substitution (AWACS, ...). Or on peut estimer qu'il faut 1 à 2 jours pour en préparer le déploiement.

c) Conclusion

- Soit on fabrique un système suffisamment sophistiqué pour n'avoir aucune période aveugle, mais c'est probablement d'un coût très élevé ;
- Soit on fait plus simple en maintenant une solution de substitution et en mettant en place une "alarme "à 36 heures.

Enfin, l'étude attentive d'informations environnementales de qualité permettra, en temps réel et en restitution, de déterminer si des incapacités temporaires du système sont dues à un problème matériel, à l'environnement naturel, ou à une perturbation délibérée de celui-ci.

2.6.5 Radar transhorizon météorologique

Des études récentes ont montré qu'un radar transhorizon pourrait constituer une aide à la surveillance de l'état de la mer. Si un tel projet se décidait, il serait nécessaire de disposer d'informations complémentaires sur l'état de l'ionosphère (altitude et vitesse verticale des couches).

2.6.6 Systèmes de navigation

Systèmes LORAN et OMEGA : pour la navigation, le système OMEGA est très affecté par des PIDB ou PCA (plusieurs dizaines de kilomètres) mais ce système est appelé à être retiré du service. Néanmoins, l'utilisation du LORAN pour transporter des signaux de type GPS est en cours d'évaluation par les Coast Guards américains (système EUROFIX de l'Université de Delft).

2.7 PERSONNELS NAVIGANTS

La directive européenne 96/29/EURATOM du 13 mai 1996 (Réf. 6) doit être appliquée par chaque pays de l'Union à partir du 13 mai 2000. L'article 9 y stipule que le personnel navigant, classé parmi les personnes exposées pour raison professionnelle, ne doit pas dépasser "une dose de 100 mSv sur cinq années consécutives, à condition que la dose efficace ne dépasse pas 50 mSv au cours d'une année quelconque. Les Etats membres peuvent fixer une dose annuelle." D'après l'article 42 les entreprises exploitant des avions "prennent en compte l'exposition au rayonnement cosmique du personnel navigant susceptible de subir une exposition supérieure à 1 mSv par an." et ces entreprises doivent appliquer des mesures afin, entre autre, d'évaluer l'exposition individuelle, pour ne pas dépasser les doses mentionnées ci-dessus dont la moyenne est de 20 mSv par an. Le cas des femmes enceintes est particulier car la législation prévoit que le fœtus ne doit pas recevoir plus de 1 mSv durant sa gestation.

Les compagnies aériennes seront amenées à changer de ligne ou à maintenir au sol les personnels approchant la dose critique. Au cours du Workshop de Dublin (juillet 1998) il a été précisé par un représentant de la Communauté Européenne que la législation doit s'appliquer au personnel militaire aussi bien qu'aux civils.

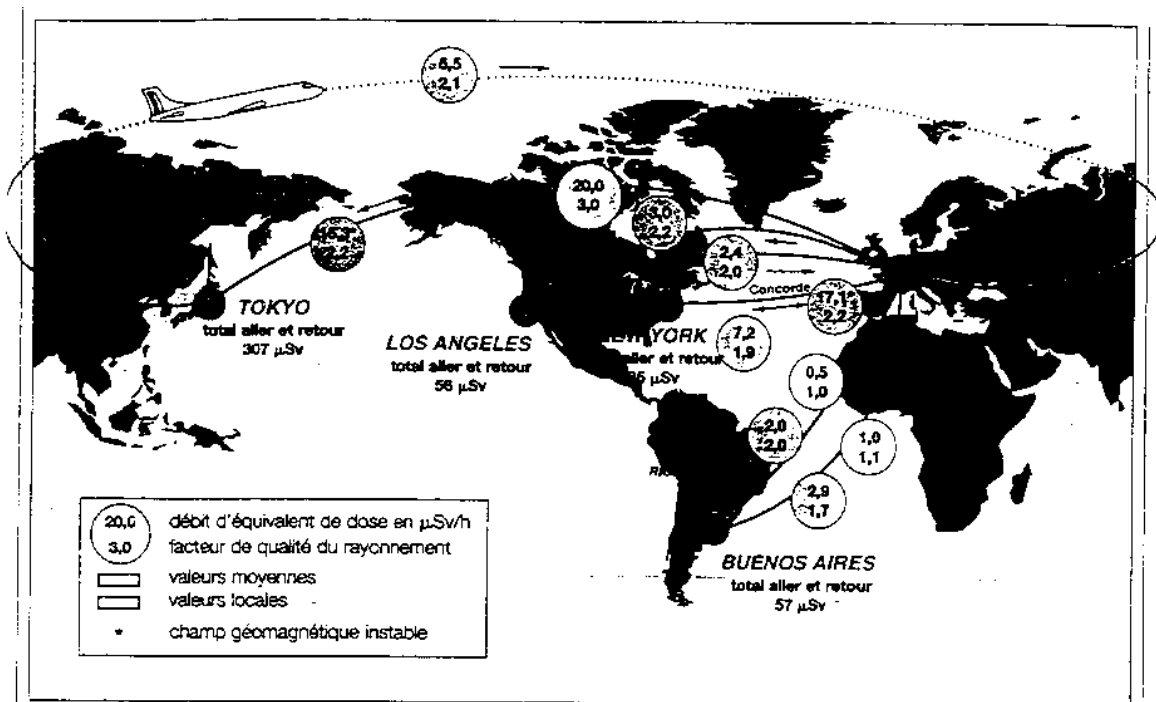


Fig. 16 : Dose horaire et facteur de qualité des rayonnements reçus à bord des longs courriers

Les vols à une altitude supérieure à 8000 mètres sont concernés par un risque de dépassement de la dose de seuil de la surveillance de 1 mSv par an (fig. 16). Les doses moyennes sur certaines lignes long-courrier sont de l'ordre de 2 à 5 mSv par an (Réf. 7). Trois solutions sont a priori envisageables :

1. des dosimètres à bord des avions donnant une alerte si la dose instantanée dépasse certaines limites, comme cela est fait pour Concorde (vert de 1 à 100 μ Sv à l'heure, orange de 100 à 500 μ Sv à l'heure, rouge de 0,5 à 10 mSv à l'heure),
2. des films de dosimétrie individuelle portés par le personnel,
3. une estimation des doses reçues sur chaque vol, compte tenu du plan de vol (trajet et altitudes).

Les deux premières solutions sont coûteuses compte tenu du nombre d'avions et de PN concernés. Les mesures effectuées par films sont complexes à gérer et d'ailleurs moins précises que celles effectuées lors de certains vols par l'IPSN avec des détecteurs sophistiqués, semblables à ceux utilisés par les expériences françaises à bord de MIR. L'utilisation des badges est sujette à des incertitudes supplémentaires : badges oubliés durant un vol ou, au contraire, badges passés dans les bagages aux contrôles d'aéroport par rayons X.

Sans que des décisions définitives soient prises, la préférence, aux niveaux français et allemand et très probablement au niveau européen, s'oriente vers la mise au point d'une base de données qui, à partir des éléments de chaque vol permettrait d'estimer la dose reçue. Le rapprochement de cette donnée avec l'emploi du temps de chaque navigant permettrait de surveiller la dose reçue et de fournir annuellement un justificatif. Les résultats pourraient être comparés à ceux de badges portés d'une manière non-systématique par certains PN et à ceux de campagnes de mesures à bord des avions à l'aide de détecteurs perfectionnés. Les expériences mentionnées plus haut (dosimétrie précise à bord de certains vols) permettraient d'estimer la dose reçue au bord d'un avion à partir des données de rayons cosmiques observés, au sol, par les moniteurs à neutrons qui fournissent en permanence une mesure des rayons cosmiques et observent les protons les plus énergétiques issus des éruptions solaires.

La principale variation du flux des rayons cosmiques est liée à l'activité solaire : ce flux est 20% supérieur durant le minimum du cycle de onze ans par rapport au maximum du cycle, durant lequel la structure complexe du milieu interplanétaire fait écran. Par contre, les éruptions solaires peuvent correspondre à des doses non-négligeables. Le cas de l'événement à protons du 23 février 1956 est le pire observé depuis 1942 avec un niveau de 4500 % de celui habituel des cosmiques. La dose aurait été pour les vols subsoniques à 12000 mètres et à haute latitude de 10 mSv ; en extrapolant pour Concorde cette estimation à 17000 mètres, on trouve une dose de 30 mSv, dose beaucoup plus critique.

Les moniteurs à neutrons sont des instruments scientifiques fonctionnant en permanence. Leur latitude géographique doit être semblable à celle des vols exposés (Scandinavie, Nord Atlantique, Canada, Sibérie), leur réponse étant identique qu'ils soient dans l'hémisphère Nord ou Sud. La figure 17 donne les moniteurs qui pourraient être bien localisés pour cette application. L'un des moniteurs européens est finlandais et les deux autres sont français. Le fonctionnement des moniteurs français, celui de Port-aux-Français (Iles Kerguelen) et celui de Dumont d'Urville (Terre Adélie) est assuré par l'IFRTP (Institut Français de Recherche et Technologie Polaire) de Brest. La transmission de leurs données vers le Centre de Prévision de Meudon, via Brest, se fait sur une base quotidienne, mais elle pourrait être accélérée s'il en était besoin.

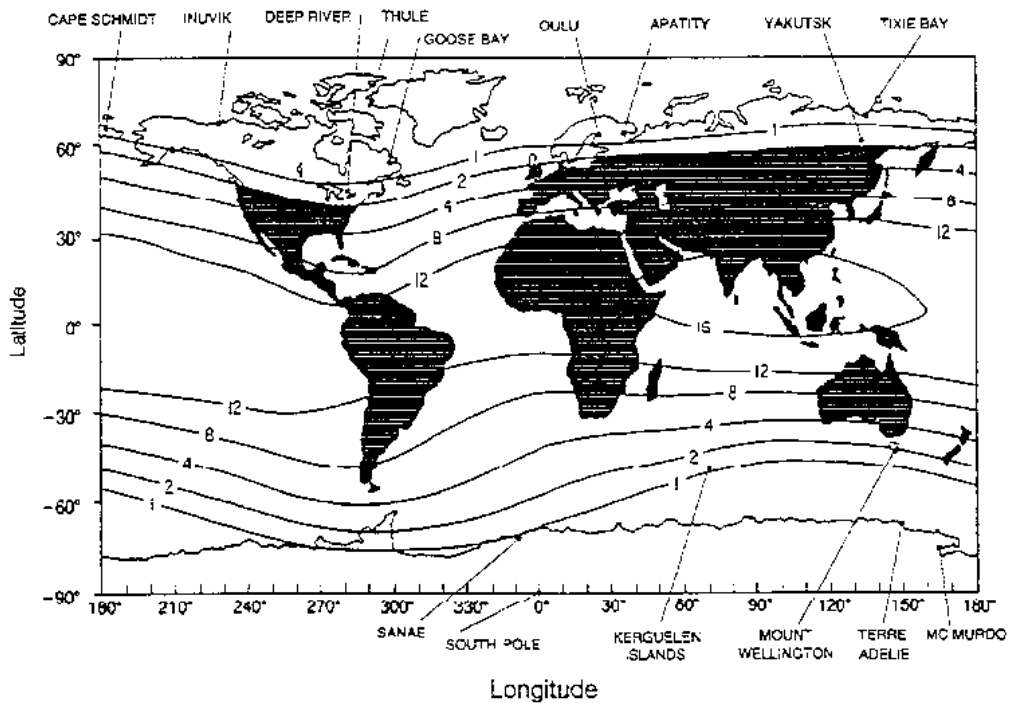


Fig. 17 : Répartition des moniteurs à neutrons
 Les courbes sont des iso rigidités magnétiques (GeV/c)

Les passagers ne sont pas pris en compte dans la législation actuelle, sauf s'ils voyagent pour des raisons professionnelles (auquel cas ils peuvent demander à leur employeur le bénéfice d'un suivi de radioprotection). Si une législation devait protéger les passagers ou si, dans le futur, les vols supersoniques devenaient la règle, il pourrait être nécessaire d'avoir une prévision du risque pour chaque vol. Il serait envisageable de donner, pour la préparation de chaque plan de vol, des prévisions en terme de probabilité d'occurrence d'éruption et/ou un état en temps réel du niveau des cosmiques (*nowcasting*).

2.8 EFFETS SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

Les réseaux modernes de distribution électriques sont extrêmement complexes et étendus. Les lignes à grande distance sont parcourues par des courants électriques induits par les perturbations de l'ionosphère durant les tempêtes géomagnétiques. L'élévation du courant dans les lignes peut provoquer des incidents dans les transformateurs, des pannes de réseau, et, in fine, un chaos complet dans le tissu social et économique d'une région.

Les responsables américains, très concernés par ce risque, évoquent un "cas pire", qui n'est pas à écarter totalement, celui d'une panne générale d'électricité atteignant 72 heures et touchant Boston, New-York, Washington, ... S'il est vrai que le Nord-Est Américain, au sol peu conducteur, favorise l'écoulement des charges en surface, il n'en reste pas moins vrai qu'il existe d'autres raisons, beaucoup plus générales, qui expliquent la vulnérabilité croissante des réseaux: Les interconnexions à grande échelle, les transferts de forte puissance entre régions, la guerre économique entre opérateurs privés qui incite chacun à utiliser ses moyens très près du maximum admissible, l'absence de sanctions (une panne de ce type est considérée comme cas de force majeure et le client n'est pas indemnisé) ...

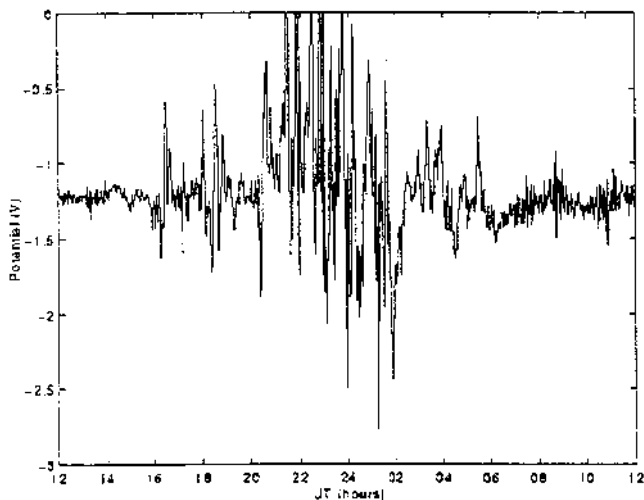
Il n'est pas nécessaire d'insister sur l'importance des enjeux économiques, sociaux et stratégiques considérables qui sont associés à ces incidents.

La situation européenne n'est pas de même nature que la situation américaine. Mais elle mérite un examen attentif, surtout en ce qui concerne la Scandinavie, pour que soient mises en évidence ses vulnérabilités. Les différences concernent :

- le type de sol
- l'étendue interconnectée
- le maillage très resserré du réseau en France (et de manière générale en Europe)
- l'importance du nucléaire parmi les centrales

La connaissance des situations extrêmes d'activités solaires et géomagnétiques est importante pour le dimensionnement du réseau et de ses conditions d'utilisation ; une prévision de qualité aurait un intérêt considérable pour permettre les délestages et les reconfigurations rendues nécessaires pendant la phase perturbée. Les délais de préavis vont de 2 jours à 10 minutes. Mais, attention, les alertes abusives coûtent très cher.

2.9 EFFETS SUR LES CANALISATIONS



*Fig. 18 : Potentiels induits dans les oléoducs
(Lund, Suède, 8-9 Nov. 1991)*

L'activité géomagnétique induit dans les oléoducs des courants importants qui érodent (fig. 18). Prévus pour une durée de vie de cinquante ans les parois des conduits peuvent perdre 10% de leur épaisseur en 15 ans, si aucun palliatif n'est mis en œuvre. Le problème ne concerne pas seulement le matériel dans les régions aurorales mais aussi l'ensemble du globe. La solution utilisée met en jeu l'application de courants opposés aux courants induits.

On maintient ainsi un faible écart de potentiel entre l'oléoduc et le terrain l'entourant. La prévision d'événement géomagnétique permet alors de programmer le passage du courant donc de limiter la corrosion et ainsi d'allonger la durée de vie des oléoducs.

2.10 PROSPECTION MINIERE ET PETROLIERE

La prévision de l'activité géomagnétique à court (quelques jours) et moyen terme (quelques semaines) intéresse les sociétés prospectant, par moyens aéroportés. L'activité géomagnétique perturbe les campagnes de mesure. La fiabilité des prévisions est un point important à cet égard. Rappelons que la qualité des prévisions actuelles est très différente suivant que l'on se situe en montée ou maximum du cycle des taches (les orages géomagnétiques sont majoritairement déclenchés par les éruptions et les éjections coronales) ou en phase de décroissance du cycle (les orages récurrents sont déclenchés régulièrement, à chaque rotation solaire d'environ 27 jours, par des trous coronaux assez stables).

Pour ces applications il est aussi important de remarquer que c'est le champ géomagnétique local qui importe. A cet effet, une station de référence est installée dans la zone de prospection. La situation diffère donc suivant que la prospection se fait en métropole (dans ce cas le champ local reste proche des indices géomagnétiques globaux -Ap ou aa), dans les régions aurorales (indices AE-*auroral electrojet*) ou équatoriales (indice équatorial Dst). Le centre de prévision de l'ISES situé à Ottawa est spécialisé dans la prévision des zones aurorales. Il ne semble pas qu'il y ait actuellement de prévision opérationnelle de l'indice Dst. C'est, particulièrement pour la prospection pétrolière, une application potentiellement importante qui serait certainement à analyser et à développer.

2.11 EFFETS SUR LE CLIMAT TERRESTRE

2.11.1 Le climat terrestre est soumis à l'environnement spatial

Dans tout bilan énergétique décrivant l'équilibre de l'atmosphère terrestre, l'énergie solaire est la source d'énergie principale - et de loin-. Il paraît donc logique d'étudier si d'éventuelles fluctuations de l'apport énergétique du soleil peuvent avoir des répercussions sur le climat terrestre à long terme, comme à moyen et court terme.

De fait, la théorie de Milankovitch -maintenant couramment admise- relie les grandes glaciations à des caractéristiques de l'orbite et de l'attitude terrestres par rapport au Soleil (demi grand axe, excentricité, inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique) qui induisent des variations du flux d'énergie solaire intercepté par la Terre. Le flux solaire doit donc être mesuré avec une très grande précision relative et absolue, et ce dans une large gamme de longueurs d'ondes. Par exemple les fluctuations du spectre UV sont importantes à connaître. Ces mesures sont délicates et doivent de surcroît être consistantes sur des périodes nettement supérieures au cycle solaire.

Récemment une corrélation a été observée entre l'enneigement et le niveau de rayons cosmiques. On sait que ceux-ci arrivent en nombre sur la Terre en période de minimum solaire. Cette observation, bien qu'établie sur une durée courte, a l'avantage d'être compréhensible en terme de cause à effet.

Pour mémoire nous citons des variations climatiques possibles dues au flux de météorites, et à plus long terme à la traversée de bras galactiques par le système solaire.

2.11.2 La mise en évidence objective est très difficile.

Le climat terrestre est sensible à d'autres paramètres, souvent négligeables (dans l'absolu) devant l'irradiance solaire, mais à fluctuations beaucoup plus importantes, ou à effet régulateur dominant. Océans, aérosols d'origine volcanique, activités biologiques et humaines sont loin d'être négligeables.

Les modèles sont donc extrêmement complexes, et les liens de cause à effet souvent difficiles à établir (ex. la grande éruption du El Chichon ; cas d'école annoncé pour les modèles d'atmosphère, mais qui n'a pu conduire à des résultats vraiment conclusifs à la suite de l'action exceptionnelle du courant El Niño durant la même période).

2.11.3 Les méthodes

a) Sur le plan de l'analyse

Dans le cas de phénomènes déterminés par de très nombreux paramètres, les corrélations fortuites sont courantes et peuvent conduire à des interprétations et théories dénuées de tout fondement scientifique, où le lien de cause à effet ne peut être établi.

b) Sur le plan de la mesure :

On doit remonter dans le temps aussi loin que possible pour reconstituer à la fois le climat terrestre et l'activité solaire. (fig. 19) Les méthodes semblant à ce jour les plus efficaces consistent au carottage des dépôts glaciaires ou autres et à l'étude des isotopes du deutérium et du béryllium. La comparaison des concentrations relatives du deutérium (sensible à la température) et de l'abondance du béryllium (considéré comme indicateur de l'activité solaire) ont ainsi pu être menées sur une période d'environ 3000 ans. Les résultats ne mettent pas en évidence de corrélation évidentes, sauf sur de courtes périodes, éliminant donc la possibilité d'un effet systématique, mais laissant tout de même le problème ouvert ; on peut également se poser le problème de la validité des indicateurs isotopiques deutérium et béryllium..

Il existe aussi plusieurs autres méthodes demandant une expertise approfondie, chacune étant entachée de problèmes propres (cercles de croissance des arbres, varves, documents historiques, etc.).

On commence maintenant à disposer des mesures globales et systématiques, principalement des mesures satellitaires (mesures de la constante solaire, du spectre solaire et du flux de particules cosmiques, mesures globales de l'enneuagement, etc.)

On s'oriente maintenant vers des modèles d'interactions permettant des modélisations globales (voir par exemple les expériences TIMED, Multiscale, etc.).

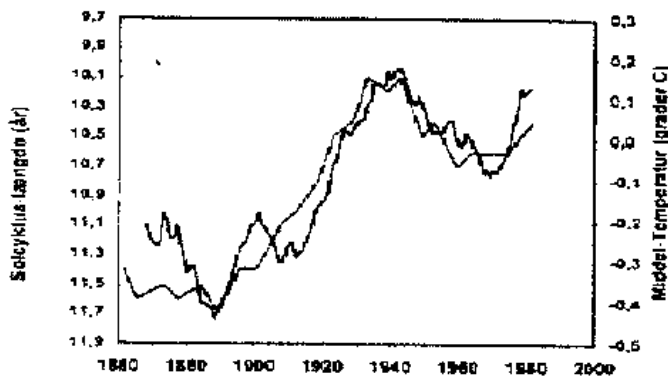


Fig. 19 : Courbes d'activité solaire et de température moyenne terrestre entre 1860 et 1990

En conclusion l'étude de l'effet de l'environnement spatial sur le climat terrestre, et en particulier des fluctuations de l'activité solaire à toutes les échelles est certainement un domaine digne d'intérêt qui peut être abordé rigoureusement en essayant de comprendre les liens de cause à effet . Le besoin de mesures à long terme enregistrées et archivées de façon cohérente est essentiel. Plusieurs mesures et méthodes récentes permettent d'espérer des progrès dans un proche avenir.

2.12 BESOIN EN DONNEES POUR LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Les données et les indices collectés dans le cadre de la surveillance et la prévision des relations Soleil-Terre doivent être sauvegardées et rester accessibles. La recherche scientifique fondamentale en a besoin comme données complémentaires permettant de situer les observations nouvelles dans un contexte général. La mise au point de modèles empiriques, destinés par exemple à la prévision, les utilisent systématiquement. Ils sont aussi indispensables pour tester, sur un temps suffisamment long, la qualité de nouvelles méthodes. Les modèles théoriques, qui devraient remplacer les méthodes plus empiriques pour la prévision, nécessitent également une grande quantité de données pour leur validation.

Ces données et indices recouvrent l'activité solaire, l'état du milieu interplanétaire (paramètres mesurés in situ), l'état de la magnétosphère et l'activité géomagnétique ainsi que la mesure du rayonnement cosmique. La majorité de ces phénomènes étant modulés par le cycle solaire de onze ans et ces cycles différant souvent les uns des autres, c'est sur des périodes de plusieurs dizaines d'années que cette collecte doit se faire.

On note enfin que la qualité des calibrations et l'homogénéité des mesures sont essentiels. C'est sur ce dernier point que les indices jouent un rôle important puisqu'ils permettent d'avoir une vue restreinte mais cohérente des phénomènes sur plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines d'années.

Exemple de Demeter : Il faut également citer l'intérêt d'une prévision et d'une restitution de l'environnement ionosphérique pour des missions s'intéressant à l'analyse des signaux naturels terrestres, tels que ceux éventuellement produits lors des séismes (mission Demeter).



3 LES SERVICES ACTUELLEMENT EXISTANT

3.1 LES CENTRES DE PREVISION EXISTANT

Le travail scientifique d'astrophysique solaire et de géophysique a suscité depuis la fin du siècle dernier, la création de nombreux observatoires solaires et géomagnétiques auxquels se sont depuis ajoutées de nombreuses stations ionosphériques ainsi que des stations observant les rayons cosmiques. Bien que des messages d'alerte aient déjà été diffusés dans les années vingt pour les besoins des communications radio utilisant la propagation ionosphérique, l'échange systématique des données entre les laboratoires n'a réellement commencé qu'en 1957 avec l'Année Géophysique Internationale, destinée justement à permettre la synthèse des données recueillies tout en multipliant les sites d'observation. Le réseau actuel des centres de prévision (ISES : International Space Environment Service) fonctionnant dans le cadre des unions scientifiques (ICSU) est en grande partie issu de cette action qui était destinée, en premier lieu, à la recherche scientifique.

Le développement des applications, en particulier des applications liées à l'environnement spatial et aux télécommunications a trouvé là une organisation capable de collecter les données dans les différents observatoires, à les distribuer et à faire des prévisions de l'activité solaire, géomagnétique et ionosphérique. La distribution de données sol et spatiales s'est fortement développée dans les années récentes puisque l'on compte aujourd'hui presque 200 sites Web par le monde (dont une cinquantaine en Europe) référencés par exemple sur le site <http://www.geo.fmi.fi/links.html>.

En comparaison avec ce grand nombre de sites diffusant des données intéressant les relations Soleil-Terre, peu nombreux sont les centres qui fournissent régulièrement des prévisions. Outre ceux de l'ISES (centres d'Ottawa, Boulder, Tokyo, Sydney, Pékin, New-Delhi, Moscou, Varsovie, Prague et Paris) quelques centres fournissent au public leurs prévisions, souvent ionosphériques (Rutherford-Appleton Laboratory, Northwest Research Associates), mais aussi aurorales (Université d'Alaska), généralement sur une base hebdomadaire. Pour des raisons stratégiques, de nombreux pays ont leur propre centre de prévision ionosphérique, comme c'est le cas, en France, pour celui de France Telecom-CNET à Lannion : le département Transmission et Systèmes Ionosphériques (TSI) mesure et modélise la propagation, principalement dans l'ionosphère, pour les communications sol-sol et les communications par satellites dans les domaines de longueurs d'onde allant des ondes centimétriques aux ondes VLF et prévoit les caractéristiques des canaux de propagation en fonction de l'environnement solaire et géomagnétique.

Pour cela, des logiciels de prévisions de propagation développés par le CNET sont mis en service par les utilisateurs (armées, services gouvernementaux, industriels, radiodiffuseurs). Ces logiciels font appel aux indices d'activité solaire élaborés par les observatoires solaires, en particulier par le Centre de Paris-Meudon. Des données complémentaires sur l'état de l'ionosphère sont obtenues à l'aide d'instruments de mesures spécifiques, tels le sondeur numérique SCIPION, de technologie récente, qui équipe les stations de sondage françaises ainsi qu'un sondeur à rétrodiffusion (sondeur de l'île Losquet) qui permet de mesurer les caractéristiques de l'ionosphère dans une zone d'environ 3000 km de diamètre centrée sur la France. Le CNET assure la présidence du COST 251 (Improved Quality of Telecommunication System Planning and Operations).

Le réseau de l'ISES est quant à lui organisé pour fournir des données et des prévisions quotidiennes. Ses centres sont des centres régionaux, bien qu'ils soient financés au niveau national. Leurs prévisions sont liées aux besoins de leur région : le centre d'Ottawa est principalement concerné par le géomagnétisme nord-américain, ceux de Sydney et New-Delhi par l'activité ionosphérique de leurs régions, celui de Paris par les besoins des agences spatiales.

3.2 LE CENTRE DE PARIS-MEUDON

Le centre de Meudon est centre régional de l'ISES pour l'Europe de l'Ouest. Il fait partie du département de physique solaire et du service scientifique COMPAS de l'Observatoire. C'est, par rapport au centre de Boulder (section 3.3), un petit centre composé de cinq personnes. (deux du CNRS, dont un chercheur, deux scientifiques du contingent et un ingénieur informaticien financé par le CNES). Il fournit quotidiennement des données et des prévisions standard à une cinquantaine d'utilisateurs, gratuitement, par courrier électronique et des prévisions particulières aux agences spatiales, sous contrats.

Les premiers sont principalement des laboratoires de recherche (dont le sondeur européen EISCAT) et des utilisateurs de télécommunications (CNET-France Telecom, Deutsche Welle, Marconi, radioamateurs). Un effort est également fait pour répondre aux questions générales du public et aux questions plus spécifiques des ingénieurs, en ce qui concerne les relations Soleil-Terre. Le site Web (<http://www.dasop.obspm.fr>) permettant à d'autres utilisateurs d'accéder aux prévisions, a eu 2700 connexions extérieures du 1er décembre 1997 au 31 juillet 1998.

Les activités du centre pour les agences spatiales sont indiquées dans la liste page suivante (les astérisques indiquent les projets).

1. ORBITOGRAPHIE SPATIALE

Prévisions quotidiennes particulières pour :

SPOT2 Doris (1989-)	CNES
SPOT3 Doris (1993-)	CNES
TOPEX-POSEIDON Doris (1992-)	CNES-NASA
ERS-1 (1990-)	ESA
ERS-2 (1995-)	ESA
HELIOS-1 (1995-)	CNES - DGA
SPOT4 (1998-)	CNES
* HELIOS-2	CNES - DGA

Fourniture régulière de données au Service d'Orbitographie du CNES
à la Canadian Space Agency
à l'ISRO (Indian Space Agency)

2. ALTIMETRIE

Prévisions particulières pour :

* ENVISAT (1999-)	ESA
* JASON-1 (2000-)	CNES-NASA

3. ETUDES TECHNIQUES

- Participation à l'étude de l'ESA (Dassault, Onera...) : "Protection Against Radiations in Space" (1987).
- Etude CNES pour *Hermès*: "Prévision des éruptions solaires" (1988).
- Etude CNES pour *SPOT4-HELIOS* "Prévision du flux centimétrique et de l'activité géomagnétique" (1992-93).

4. CAMPAGNES DE RENTREES DE SATELLITES

Pour le CNES :	- Skylab (1979)
	- Cosmos 1402 (1983)
	- Cosmos 1900 (1988)
	* Mir (1999)
Pour L'Agence Spatiale Indienne :	- SROSSC (1992)

5. RECHERCHE D'ANOMALIES

Pour le CNES (Toulouse et Kourou), l'ESA (ESOC) et les industriels (Matra, Aérospatiale...)

6. SURVEILLANCE ENVIRONNEMENT SPATIAL DURANT LE LANCEMENT

SPOT2 (1989)	CNES-Toulouse
TDF2 (1990)	CNES-Toulouse

7. VALIDATION D'EXPERIENCES SCIENTIFIQUES

PHOBOS (1988-89)	CESR-Toulouse
HIPPARCOS (1989-93)	ESA

D'autre part le chercheur dirigeant le centre, P. Lantos, est responsable scientifique du programme d'observation des rayons cosmiques de l'IFRTP (Institut Polaire) : le centre diffuse les résultats des moniteurs de rayons cosmiques de Terre Adélie et des îles Kerguelen.

3.3 LE CENTRE DE PREVISION DE LA NOAA A BOULDER

Situé à Boulder (Colorado, USA), le *Space Environment Center* dépend d'une part de l'*Oceanic and Atmospheric Research*, d'autre part du *National Weather Service* de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Au total, il comporte 73 personnes dont 20 stagiaires post-doctoraux. Sa mission est triple :

- il fait la synthèse et la dissémination des informations concernant l'environnement spatial, aussi bien passé que présent ou prédit, pour les utilisateurs et les industries de services ajoutés,
- il effectue des recherches et développe des techniques pour améliorer la connaissance de l'environnement et sa prévision,
- il joue le rôle d'expert pour les opérateurs affectés par les perturbations de l'environnement spatial et a également un rôle d'éducation général au niveau du public.

Une partie du *Space Environment Center* est un service opérationnel, fonctionnant nuit et jour 7 jours sur 7 pour recueillir les données intéressantes pour la connaissance de l'environnement spatial :

- mesures au sol du type indices d'activité magnétique, images du Soleil à plusieurs longueurs d'ondes, par l'intermédiaire de l'ISES
- mesures données par les satellites météorologiques (TIROS, GOES), le satellite ACE et les satellites scientifiques (flux de particules, images du Soleil, mesures du vent solaire).
- résultats de modèles (*Magnetospheric Specification Model*)

Il délivre, grâce à la présence quasi permanente des deux personnes (un *solar technician* et un *forecaster*), des bulletins d'environnement spatial. Ces personnes sont soit des personnels de la NOAA, soit appartenant au *NOAA corps* ou à l'*US Air Force*. Pendant le minimum solaire (jusqu'en 1997), le technicien est présent 24 heures sur 24 (3 par jour) et le prévisionniste 10 heures sur 24 (1 prévisionniste). A partir de 1998 (montée du cycle solaire), le service est augmenté pour être assuré complètement (24 heures sur 24) par 3 techniciens et 3 prévisionnistes à la fin de 1998.

3.4 INTERET DU TRAVAIL EN RESEAU

Le réseau de l'ISES (fig. 20) est d'abord un organisme bénéficiant de l'aval de la communauté scientifique internationale par le biais des Unions Scientifiques. Doté d'un *Steering Committee* regroupant les responsables de tous les centres de prévision, il permet de coordonner les projets, de soutenir auprès de leurs propres instances nationales les observatoires qui en ont besoin et d'organiser les *Solar-Terrestrial Prediction Workshops*, largement ouverts, principaux lieux où sont confrontés les méthodes et les résultats ayant trait à la Météo de l'Espace. Un programme d'échange de prévisionnistes entre les centres est également l'un des points à mentionner.



Fig. 20 : Localisation des centres du réseau ISES

Avant que ne soient mis en service, ces toutes dernières années, les nombreux sites Web dont nous avons parlé plus haut, l'un des rôles essentiels du réseau de l'ISES était la collecte et la distribution des données. Ainsi le réseau de l'ISES a fortement bénéficié de deux actions américaines : l'installation sur des bases de l'USAF réparties autour du globe d'un réseau d'observatoires optiques pour surveiller le Soleil (réseau SOON) et d'un réseau identique de surveillance radio du Soleil, d'une part, et d'autre part de satellites météorologiques américains, les satellites GOES de la NOAA, sur orbite géostationnaire, sur lesquels ont été placés très tôt des détecteurs de rayons X et de protons interplanétaires. De même les données en rayons X du satellite japonais Yohkoh ont été disponibles, uniquement pour les besoins de prévision, plusieurs années avant qu'elles ne deviennent publiques sur le Web. Le réseau permet de mieux organiser ce type de collaboration tout en sauvegardant les intérêts des scientifiques impliqués dans les opérations du satellite.

Chaque centre de prévision du réseau ISES a, comme nous l'avons vu, ses centres d'intérêt, liés aux besoins de ses propres utilisateurs. Aussi chaque centre développe-t-il ses méthodes et choisit-il ses "produits". Le réseau fournit une possibilité de comparer les méthodes dans le détail (comparaison des programmes informatiques par exemple) et de valider les prévisions communes.

On remarquera enfin qu'un réseau du type de celui de l'ISES a l'avantage de faire collaborer des centres de prévision dont la taille, les moyens financiers et les types d'utilisateurs diffèrent énormément. Ceci est possible car, en ce qui concerne les prévisions, si le nombre de "produits" est directement lié à la taille des centres, leur qualité en est un paramètre indépendant. Finalement chaque centre garde son autonomie (ce qui est important compte tenu des différences culturelles) tout en bénéficiant d'une collaboration cordiale.

3.5 LES LIMITATIONS DU RESEAU ACTUEL

A l'exception du centre de Boulder qui nous l'avons vu est très développé, les autres centres sont de relativement petite taille : une vingtaine de personnes pour Sydney et Tokyo, quelques personnes pour les autres ; cela suffit pour émettre des messages quotidiens, mais ils ne peuvent pas assurer un travail 24H sur 24 et ils n'émettent des alertes (dites messages PRESTO) qu'à leurs heures et pour certains, fermés le week-end, leurs jours d'ouverture.

Une seconde limitation tient au fait qu'à l'exception de Boulder, Tokyo et Sydney, les centres de l'ISES n'ont pas d'instruments propres. Ils dépendent donc de la pérennité des observatoires de leur zone (ces données sol sont pour chaque centre les plus récentes disponibles) bien que le Web et les données spatiales fournies aient profondément modifié cet aspect.

Enfin troisième limitation du réseau : à l'exception de Boulder, les centres n'ont pas les budgets permettant de faire développer sous contrat, par des labos scientifiques ou des firmes privées, des méthodes de prévision. Chaque centre s'en charge lui même. Si pour le moment, au vu de la qualité des prévisions communes- prévision des éruptions, prévision du flux centimétrique et prévision de l'activité géomagnétique-, cela ne représente pas un handicap, il ne fait pas de doute que lorsqu'une prévision basée sur des modèles complexes et des moyens de calculs puissants se développera (c'est l'ambition du programme *Space Weather* - Réf. 10), il y aura là, pour l'ensemble des autres centres, un sérieux problème. Il est clair également que dans l'état actuel des choses, seul le centre de Boulder, parce qu'il appartient à la NOAA, peut envisager d'avoir ses propres données spatiales.



4. EVOLUTION DE LA DEMANDE ET DE L'OFFRE

Une demande existe. Elle justifie qu'actuellement près d'une centaine de personnes travaillent au Space Environment Center et encore davantage à son homologue militaire, le 55th Space Weather Squadron. Comment va évoluer cette demande ? Et qu'en est-il pour nous en Europe ? Quelle va être l'évolution de l'offre publique américaine et quelle offre devons-nous garantir dans un périmètre européen ?

LA DEMANDE

Diminution de la demande ?

1. Mesures palliatives : on peut imaginer que le bouillonnement actuel sur ces questions d'activité solaire se calme simplement parce qu'on aura su trouver des mesures palliatives aux préjudices causés :

- lanceurs et satellites en orbite : technologies insensibles aux radiations (optronique ?)
- manœuvres orbitales : développement de l'autonomie à bord pour la navigation, la programmation des charges utiles...
- homme dans l'Espace : abandon aux seuls USA du soin de gérer l'exposition des astronautes Européens aux radiations
- propagation des ondes : utilisation systématique de systèmes bi-fréquences permettant d'effectuer les corrections nécessaires pour les systèmes espace-sol, disparition des communications à grande distance en HF.
- personnels navigant : il s'agit d'un processus de nature réglementaire donc qui ne peut que se renforcer dans le sens de l'augmentation des précautions à prendre. Ces précautions pourraient cependant se traduire par des mesures de suivi individuel (badge) ne justifiant pas l'existence d'un service centralisé.
- effets terrestres : le seul domaine d'activité concerné est la distribution d'énergie électrique. Des systèmes automatiques de sécurité peuvent apparaître, rendant superflu un service de prévision.

Il est vraisemblable que certains des utilisateurs identifiés aujourd'hui puissent s'affranchir des préjudices causés par les effets de l'activité solaire sur l'environnement terrestre. Qu'aucun utilisateur ne subsiste reste cependant hautement improbable.

De plus, dans la compétition dérégulée qui se dessine partout, la tendance des opérateurs sera de réduire les coûts de fonctionnement du système en mode courant en renonçant aux onéreuses solutions palliatives et en acceptant le risque de quelques incidents de temps à autres. Un service d'alerte sera alors précieux.

2) Progression de la connaissance : on peut aussi imaginer que des avancées décisives soient réalisées dans la compréhension des mécanismes reliant le Soleil à l'environnement terrestre.

Rien aujourd'hui ne permet d'espérer que la complexité des phénomènes en jeu soit déblayée rapidement. Au fur et à mesure que la science progresse, de nouveaux phénomènes sont découverts et de nouvelles questions s'ouvrent. Il est très invraisemblable que l'intelligence des relations Soleil-Terre atteigne dans un avenir proche un niveau tel que les efforts de suivi de ses différentes manifestations deviennent superflus. Au contraire, c'est l'accumulation d'observations qui sera la base de la progression des théories de ces relations Soleil-Terre.

Augmentation de la demande ?

1. Croissance en volume: multiplication des opérateurs de constellation de satellites, extension à d'autres pays de directives calquées sur la Directive Européenne relative à la protection des équipages, regain d'intérêt pour les communications HF sur grandes distances.
2. Emergence de nouveaux types d'utilisateurs. L'entrée dans un nouveau cycle solaire devrait rapidement permettre de mieux cerner les perspectives de croissance de ce secteur.

Un des premiers futurs utilisateurs auxquels on peut penser est la météorologie. Il n'y a pas, aujourd'hui, de connexion entre météorologie de l'Espace et météorologie classique. Néanmoins, des phénomènes nouvellement identifiés tels que 'sprites' et 'jets' témoignent de l'existence de phénomènes majeurs d'interaction entre l'ionosphère et l'atmosphère (réf: doc. Sun-Earth Connection Roadmap, NASA).

Lorsque ces processus seront mieux compris, ce qui est actuellement programmé par la NASA au travers de son Sun-Earth Connection Roadmap (missions TIMED, Magnetospheric Multiscale, Global Electrodynamics, ITM Dynamics...), il est logique d'envisager que la prédiction d'activité géomagnétique sera alors une entrée de la prévision météorologique.

Evolution de l'offre ?

La progression de la compréhension scientifique des relations Soleil-Terre permettra d'enrichir potentiellement l'offre : prévisions plus précises et variées, préavis plus grands, ... Simultanément, l'évolution de la société américaine (le rôle des Etats-Unis est prédominant dans la fourniture du service actuel) suggère que deux comportements vont restreindre l'offre publique civile qui nous vient de là-bas:

a) Les militaires ont argumenté leur activité sur des questions de sécurité nationale. Ils tiennent à l'intitulé "National Space Weather Programme" ! Il est dans leur logique de camper sur des positions de moins en moins coopératives vis-à-vis de l'étranger.

b) Des personnes, ou des entreprises privées, envisagent de développer et de commercialiser des produits à valeur ajoutée et des services ciblés à partir des données d'observation recueillies. Le SEC sera certainement invité à ne pas porter ombrage à ces entrepreneurs et, donc, à rester en amont, assez loin des services appliqués.

La demande ayant tendance à s'élargir et l'offre publique ayant vocation à se restreindre, une initiative est donc à envisager en Europe.



5 DIFFERENTS NIVEAUX DE SERVICE ENVISAGEABLES - LES MOYENS NECESSAIRES

L'enquête à laquelle nous avons procédé nous permet de synthétiser un certain nombre de besoins exprimés.

SYNTHESE DES BESOINS

Les besoins utilisateurs identifiés (la colonne n° renvoie au paragraphe du chapitre précédent) sont récapitulés dans le Tableau 1. La dernière colonne « observable source » indique la donnée observée à partir de laquelle, dans l'état actuel de la connaissance et des modèles disponibles, on élabore le produit recherché par l'utilisateur.

Une classification de ces mêmes besoins est présentée dans le Tableau 2, selon deux axes: le domaine concerné et le temps caractéristique du besoin considéré. Les temps de référence (mois, jour, heure, seconde) sont des ordres de grandeur. Il faut remarquer que les besoins identifiés demandent, en restitution ou prévision, des délais inférieurs à la journée. On peut considérer que les demandes exprimées en jours ou mois sont déjà satisfaites par les moyens existant, pour ce qui concerne la restitution mais pas la prévision.

Le Tableau 3 est une tentative de classification des besoins exprimés vis à vis de la communauté scientifique. La classification par domaine est celle adoptée dans le Plan Stratégique du Space Weather Programme Américain.

De nombreux produits scientifiques ne sont pas demandés en tant que tels par des utilisateurs finaux mais ils sont nécessaires en entrée d'autres domaines scientifiques. Les utilisateurs finaux sont soulignés.

TABLEAU 1 : SYNTHESE PRELIMINAIRE DES BESOINS UTILISATEURS

N°	Utilisateur	Besoin	Type	Information produite par le service	Observables source
1	Lanceur Ariane V	Risque de latch-up	p/h	Protons >10 MeV	Flux X
1	Lanceurs	Optimisation de programmation vol (altitude de largage coiffe),	p/h	Profil de densité atmosphérique	Flux UV (F10.7) Indices géomagnétiques
2	Satellites en orbite	Aide à l'analyse d'anomalies	r/h	environnement particulaire	Flux de particules
3	Contrôle d'orbite de satellites LEO	programmation des manoeuvres et des instruments	p/j	densité atmosphérique	Flux UV (F10.7) Indices géomagnétiques
3	Freinage atmosphérique	correction d'altitude du périégée	p/h	densité atmosphérique	Flux UV (F10.7) Indices géomagnétiques
3	Surveillance des débris	continuité du suivi	p/h	densité atmosphérique	Flux UV (F10.7) Indices géomagnétiques
3	Rentrée atmosphérique	date de rentrée	p/m	densité atmosphérique	Nombre de Wolf
4	Homme dans l'Espace	programmation EVA	p/h	Doses / heure	Flux de protons Flux du rayonnement cosmique
5	Systèmes de localisation ARGOS	correction ionosphérique	r/h	terme de correction	Contenu Electronique Total local
5	Systèmes de navigation par satellites	correction ionosphérique	p/s	Carte des corrections de propagation	Contenu Electronique Total régional
5	Altimétrie	correction ionosphérique	r/h	terme de correction	Contenu Electronique Total local
5	Détection de signaux géophysiques	correction ionosphérique	r/j	terme de correction	Contenu Electronique Total local
5	COMSATs	prévision PIDB et PCA	p/h	avis de perturbations	activité solaire activité géomagnétique

Convention utilisée pour la colonne 'Type':

p=prévision r=restitution

m= mois, j=jour, h=heure, s=seconde

N°	Utilisateur	Besoin	Type	Information produite par le service	Observables source
6	Radiodiffusion HF	planification des fréquences	p/m	fréquences optimales	caractéristiques de l'ionosphère
6	Environnement post-nucléaire	distinction des phénomènes naturels	r/h		
6	Communications HF (ALE)	optimisation de l'utilisation de fréquences HF	p/h	fréquences optimales	caractéristiques de l'ionosphère
6	Radar transhorizon militaire	connaissance fine du trajet d'échos particuliers	r/s	caractéristiques de l'environnement de propagation	caractéristiques de l'ionosphère
6	Radar transhorizon météorologique	connaissance statistique du trajet des échos	r/h	caractéristiques de l'environnement de propagation	caractéristiques de l'ionosphère
7	Personnel Commercial Navigant	connaissance des doses reçues	r/j	doses	moniteurs de neutrons
8	Réseaux électriques	gestion des risques d'effondrement	p/h	alarmes	activité géomagnétique
9	Canalisations	prévention de la corrosion	p/h	avis	activité géomagnétique
10	Prospection géophysique	programmation des campagnes	p/h	avis	activité géomagnétique
11	Météorologie	AD			à établir
12	Recherche scientifique	AD			tout paramètre

Convention utilisée pour la colonne 'Type':

p=prévision r=restitution

m= mois, j=jour, h=heure, s=seconde

TABLEAU 2 : CLASSIFICATION PAR DOMAINE D'INTERET ET TEMPS TYPIQUE

	PREVISION				RESTITUTION			
	MOIS	JOUR	HEURE	SECONDE	SECONDE	HEURE	JOUR	MOIS
AT MOS PHE RE	<ul style="list-style-type: none"> • Rentrée atmosphérique de satellites 	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle d'orbite de satellites en orbite basse • Rentrée atmosphérique de satellites 	<ul style="list-style-type: none"> • Opérations de freinage atmosphérique • Suivi des débris orbitaux • Lanceurs 				<ul style="list-style-type: none"> • Orbitographie • <i>Météorologie</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche scientifique
PAR TI CU LES		<ul style="list-style-type: none"> • Homme dans l'espace • Personnel navigant 	<ul style="list-style-type: none"> • Lanceurs • Satellites 	<ul style="list-style-type: none"> • Satellites 		<ul style="list-style-type: none"> • Aide à l'analyse d'anomalies de fonctionnement des satellites • Environnement post-nucléaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Personnel navigant 	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche scientifique
IO NOS PHE RE	<ul style="list-style-type: none"> • Radiodiffusion HF 		<ul style="list-style-type: none"> • Satellites de communication • Comms HF grande distance • Réseaux électriques • Oléoducs • Prospection 	<ul style="list-style-type: none"> • Navigation par satellites (GPS) 	<ul style="list-style-type: none"> • Radars militaires transhorizon 	<ul style="list-style-type: none"> • Localisation (ARGOS) • Altimétrie monofréquence par satellite • Radars météorologiques transhorizon 	<ul style="list-style-type: none"> • Géophysique par satellite • Prospection minière et pétrolière 	<ul style="list-style-type: none"> • Recherche scientifique • Altimétrie bi-fréquence par satellite
Ser- vice	Publications	Service normal en horaires administratifs	Service permanent 24/24	Service automatique	Service automatique	Service permanent 24/24	Service normal en horaires administratifs	Publications

TABLEAU 3 : RELATIONS : PHENOMENES PHYSIQUES – THEMES DE RECHERCHE - UTILISATEURS
(référence: National Space Weather Programme - Implementation Plan - janvier 1997)

Domaine	Thèmes de recherche	Produits attendus	Thèmes ou utilisateurs concernés
CME	Physique des CMEs Facteurs de déclenchement	Occurrence Magnitude Durée	Perturbations géomagnétiques
Activité solaire, éruptions	Dynamo du Soleil Précurseurs	Occurrence Magnitude Durée	Ionosphère Atmosphère
Particules solaires et galactiques	Origine et propagation Rayons cosmiques	Flux aux altitudes orbitales	<u>Homme dans l'Espace</u> <u>Personnel navigant</u>
Rayonnement solaire UV/EUV/Xmou	Variabilité du Soleil dans ces longueurs d'onde Interaction avec l'ionosphère et la thermosphère	Intensité Variations	<u>Météorologie</u>
Bruit radio solaire	Emission radio de la haute couronne Processus de déclenchement	Intensité Variations	<u>Communications</u> <u>Radars</u>
Vent solaire	Processus de chauffage et d'accélération Propagation	Densité et vitesse Champ magnétique	Conditions d'interaction avec la magnétosphère
Particules et champ magnétique de la magnétosphère	Couplage vent solaire / magnétosphère Début, expansion et disparition des sous orages Transport et énergisation du plasma magnétosphérique	Champ magnétique et électrique Ions et électrons Courants alignés et électrojet	Perturbations géomagnétiques <u>Satellites</u>
Perturbations géomagnétiques	Mécanismes physiques des perturbations Induction de courants de surface	Indices géo- magnétiques Début d'orages magnétiques, intensité et durée	<u>Courants induits dans les réseaux terrestres</u> <u>(distribution électrique, oléoducs)</u>
Ceintures de radiation	Dynamique des ceintures de radiation	Ions et électrons piégés	<u>Opérateurs de satellites et de lanceurs</u>
Aurores	Accélération des particules en zones aurorales	Limites géographiques Energie	Ionosphère Ceintures de radiation

Domaine	Thèmes de recherche	Produits attendus	Thèmes ou utilisateurs concernés
Propriétés de l'ionosphère	Distribution de densité électronique Réponse aux orages et sous orages Production, de transport et de disparition de structures de densité	Densité électronique Température de plasma Vitesse de dérive	<u>Systèmes de communication et de navigation</u> Atmosphère
Champs électriques de l'ionosphère	Structure et réponse aux variations de la magnétosphère Variabilité produite par les interactions en zone équatoriale	Champ électrique global Courant électrojet	Atmosphère
Perturbations ionosphériques	Variabilité globale Irrégularités locales	Début de perturbations Caractéristiques de propagation	<u>Systèmes de communication</u> <u>Propagation des ondes</u>
Scintillations ionosphériques	Mécanisme de production des scintillations	Occurrence entre 200 et 600 km	<u>Systèmes de communication et de navigation</u> Atmosphère
Atmosphère neutre	Processus chimiques, radiatifs et dynamiques dans la haute atmosphère	Densité, composition, température et vitesse	<u>Orbitographie</u>

Priorités

Le tableau 4 ci-dessous esquisse une classification des enjeux associés à la fourniture de quelques uns des principaux paramètres de l'environnement géomagnétique terrestre, selon 3 rubriques : la maturité de la spécification du service demandé (R1), la maturité des moyens nécessaires pour offrir le service considéré (R2), l'importance des enjeux (R3). La faisabilité et l'opportunité d'une initiative croissent avec les notes de 1 à 5.

Produit demandé	Utilisateur	R1	R2	R3
Flux X	Lanceurs	2	3	5
	Satellites	5	3	5
Flux UV	Orbitographie	3	3	4
Flux de particules énergétiques	Personnel navigant	5	5	5
	Homme dans l'Espace	5	5	4
	Satellites	3	3	4
Indices géomagnétiques	Prospection minière et pétrolière	1	3	2
	Réseaux électriques	2	4	2
Contenu Electronique Total local	Altimétrie	5	3	3
Contenu Electronique Total régional	Systèmes de navigation	5	4	5
Caractéristiques de l'ionosphère	Communications	5	4	5
	Radars	2	2	3
Densité atmosphérique locale	Lanceurs	5	4	3
Densité atmosphérique globale	Orbitographie	5	4	4
	Rentrée atmosphérique	4	4	4
	Débris	4	4	4

Les priorités de service à offrir qui apparaissent ainsi sont le suivi des personnels navigant, la navigation par satellites, l'orbitographie, l'environnement des satellites.

Les éléments physiques clés et le "facteur-temps" les concernant semblent être :

- densité atmosphérique et température exosphérique (prévision à quelques heures, à quelques jours, à quelques semaines)
- contenu électronique total (prévision à quelques minutes, restitution à quelques heures)
- flux de protons (prévision à quelques heures, à quelques jours).

Une initiative est donc à envisager en Europe, portant au minimum sur la couverture de ces besoins prioritaires.

Aujourd'hui, un service portant sur ces paramètres fait usage des capteurs embarqués, de capteurs au sol, de modèles, ... De nouvelles idées suggèrent qu'une amélioration des services pourrait être obtenue, soit avec des microsattellites dédiés, soit avec l'emport d'instruments embarqués sur des satellites plus importants.

La consolidation ou la mise en place progressive de la capacité correspondante en Europe (modélisation/prévision, mais aussi mesures physiques correspondantes) peuvent faire l'objet de différents scénarios.



6 CADRE DE DEVELOPPEMENT ET SCENARIOS POUR DES INITIATIVES EN EUROPE

S'il nous semble prématuré de proposer une stratégie de développement d'un service opérationnel, il est cependant utile de présenter les principaux critères que la stratégie décidée aura à satisfaire et de donner quelques indications sur la voie à suivre.

• Européenne, forcément Européenne

Les phénomènes physiques en jeu sont à l'échelle planétaire, les moyens d'observation et les communautés d'utilisateurs sont pour l'essentiel à l'échelle Européenne (aviation civile, navigation par satellite...) ou mondiale. Les intérêts strictement nationaux sont réels (orbitographie, communications, radar transhorizon), mais ne justifient pas un traitement hors du contexte européen.

• Un minimum d'indépendance dans des secteurs stratégiques

Le service offert actuellement est largement dominé par le SEC. Cette prééminence du centre national Américain de l'ISES est certes un atout quant à la qualité du service offert mais l'ambiguïté de son statut (responsabilité à la fois nationale et internationale) laisse ouverte la possibilité d'un certain favoritisme national, voulu par le pouvoir politique Américain, en cas, par exemple, de conflits d'intérêts commerciaux ou industriels. Il est donc nécessaire d'identifier les secteurs 'stratégiques' que l'on souhaite, au niveau Européen, prémunir d'un éventuel tarissement de données.

• Un service public Européen

Cette notion de service public n'est pas redondante de la notion d'indépendance. Un service public Européen pourrait s'appuyer exclusivement sur les moyens Américains, éventuellement sur un mode commercial et réciproquement un service indépendant des données Américaines pourrait être commercial ou réservé à une catégorie particulière d'utilisateurs. Il nous semble que le service envisagé doit être essentiellement public, sans s'interdire la fourniture, sur une base commerciale ou contractuelle, de services ou de produits individualisés, à l'instar de la Météorologie Nationale. Le service actuellement offert par le SEC peut être considéré comme la référence de ce que pourrait être ce service public Européen.

• Valorisation des travaux scientifiques

Il est utile de signaler que :

- un programme national (PNST) est particulièrement intéressé par le développement de cette thématique ;

- deux TGE internationaux (THEMIS et EISCAT) et des TGE spatiaux (SOHO, ...) concourent à approvisionner la communauté scientifique en données de première importance dans ce domaine ;
- des centres d'archivage (CDPP, BASS 2000, MEDOC), co-financés CNES-CNRS, répondent à la préoccupation d'archivage à long-terme ;
- des compétences scientifiques nationale sur la physique de l'ionosphère et de la thermosphère existent depuis plus de trente ans dans des laboratoires connus de la discipline : CESR, CETP et LIS, et se sont développées plus récemment avec une activité de modélisation et de simulation numérique des couplages vents solaire/magnétosphère/ionosphère/thermosphère ;
- des modèles opérationnels (par exemple SALAMMBO de l'ONERA).

• Aide à l'émergence d'un nouveau secteur d'activité commerciale

En aval des activités de collecte, traitement et diffusion de données, d'intérêt général, peuvent se profiler des activités dédiées susceptibles de profits commerciaux. Une douzaine d'entrepreneurs Américains ('vendors') sont déjà présents sur ce marché balbutiant.

Il en découle les quelques propositions d'actions suivantes:

- **Coopérer** avec les USA (NOAA, NASA), le Japon, la Russie, ... : stations sol, futurs projets spatiaux, modèles. Coopérer est un moyen d'une part de combler le retard déjà existant et d'autre part se positionner comme partenaire crédible pour l'avenir. A court terme, l'emport d'instruments (du type ERME ou COMRAD) sur des satellites géostationnaires est à encourager. A plus long terme, une coopération au projet GEOSTORM de la NOAA est envisageable.
- **S'assurer l'appui de la communauté scientifique Européenne** pour contribuer à l'avancement de ce programme en réponse aux besoins exprimés.

Ce peut être fait en s'appuyant sur les structures existantes (European Science Foundation, ISES, ESA...) et en organisant des colloques dédiés. Une des difficultés rencontrés par le SEC est de transposer dans des outils opérationnels utilisables (robustes, stables, faciles d'utilisation...) la connaissance scientifique disponible. Il faudra inciter les scientifiques à mener ce genre de travaux qui se conjuguent avec leurs objectifs habituels.

• Rechercher un cadre Européen

Des initiatives sont en cours en Europe. Il faut les coordonner. Cette responsabilité ne peut être assurée dans un cadre strictement national.

Le cadre naturel pour assurer la tutelle d'un service de météo spatiale serait un organisme de météorologie. Il se trouve qu'il n'existe pas d'organisation Européenne comparable à la NOAA. Les institutions qui pourraient parrainer cette initiative sont :

- l'AEST (Assemblée Européenne des Sciences et des Technologies), créée en 1994, dont le rôle est d'émettre des avis et recommandations à destination de la Commission Européenne.
- l'European Science Foundation, association des principaux organismes de recherche Européens, qui émet également des avis et recommandations dans le domaine scientifique vers la Commission
- l'ESA, qu'on ne présente pas,
- EUMETSAT qui opère les satellites Européens de météorologie.

• **Démarcher les utilisateurs** identifiés (administrations d'aviation civile, compagnies aériennes, opérateurs de satellites...) pour les sensibiliser à ces questions et aussi affiner la spécification de services spécifiques, dans la perspective de favoriser l'émergence d'une offre commerciale de produits à valeur ajoutée.

SCENARIOS POUR DES INITIATIVES EN EUROPE

Même en supposant qu'une initiative de création en Europe d'un service de Météorologie de l'Espace de niveau comparable à celui existant aux USA rencontre un soutien suffisant, se pose la question de son organisation et de ses relations avec les diverses organisations et administrations existantes, nationales ou Européennes.

L'entreprise consistant à tenter de mettre sur pied un service Européen opérationnel de Météorologie de l'Espace est originale sous plusieurs aspects:

- elle précède la demande, puisque dans l'état actuel une partie de la demande existante est satisfaite par l'utilisation des services du Space Environment Centre de la NOAA, situation dont la persistance n'est pas garantie ;
- les moyens spatiaux y seront certes présents mais non exclusifs (observatoires terrestres, modèles scientifiques, bases de données) mais il ne peut s'agir d'un programme strictement spatial ;
- des initiatives, partielles mais pertinentes, ont été prises ou sont en cours en Europe (Centre HELIOS de l'université de Lund, en Suède, système de stations RIMS pour EGNOS...);
- des moyens importants existent déjà et peuvent jouer un rôle important vis à vis d'un service de Météorologie Spatiale: sans ordre de priorité, citons pour les moyens nationaux ou Européens : THEMIS, EISCAT, les bases de données BASS 2000 et MEDOC, le CDPP,...et dans un cadre international INTERMAGNET (Réseau de stations magnétiques) ;
- ses bénéficiaires forment un ensemble assez hétéroclite, allant des compagnies aériennes aux opérateurs de constellations de satellites en passant par les opérateurs de systèmes terrestres (distribution électrique, communications HF) ;
- comme il a déjà été dit, il ne s'agit pas d'un programme scientifique pour lequel les modes de fonctionnement sont bien spécifiés.

Le modèle dont il faut s'inspirer n'est donc pas celui où un donneur d'ordre rassemble des partenaires autour d'un objectif clair et unique mais plutôt celui d'un syndicat d'entreprises et d'administrations qui, après avoir identifié un domaine d'activité d'intérêt commun, autorise et soutient la mise en place d'un service opérationnel.

Toutes ces questions et interrogations s'appliquent bien sûr plus ou moins de l'autre côté de l'Atlantique. Il est donc utile d'analyser le Space Weather Américain, même s'il n'est pas nécessairement immédiatement transposable en Europe.

Le programme Space Weather Américain [ref 10] est l'aboutissement d'une initiative de scientifiques qui se sont appuyés sur la National Science Foundation pour faire adhérer à une charte commune, non contraignante, des administrations telles que NASA et NOAA, le DoD et d'autres encore. La philosophie du Space Weather Programme peut être résumée par une analogie: il s'agit d'un « permis de chasse » délivré par le Programme à tout projet dont les objectifs sont identifiés dans le programme. Chaque agence soutient les projets qu'elle veut et les montages inter-agences se font au coup par coup.

Pour une initiative Européenne, un tel modèle est-il applicable? entre quels partenaires?

Les intervenants institutionnels dans le domaine pourraient être :

- la Commission Européenne, initiatrice de la Directive sur le Personnel Navigant et du système EGNOS (en association avec EUROCONTROL et l'ESA)
- les agences et industries spatiales Européenne et nationales, à la fois en tant que clients potentiels (satellites et lanceurs) et en tant que pourvoyeurs de moyens spatiaux et terrestres,
- les organismes de recherche nationaux (CNRS, Max Planck,...), indispensables à la sensibilisation de la communauté scientifique
- dans un deuxième cercle, des agences gouvernementales spécialisées (pour la France, le CNET, l'ONERA, l'IPSN, l'OPRI par exemple).

Le chef d'orchestre reste à trouver. A terme, une fois établi un service Européen, il faudra songer à fédérer ces efforts sous le couvert d'un organisme International qui pourrait assez naturellement être le WMO (World Meteorological Organization).



7 PROPOSITIONS D'INITIATIVES

A court terme, au niveau français :

- Poursuivre la sensibilisation des concepteurs et opérateurs (télécoms, lancements, satellites, ...) notamment à l'approche du prochain maximum solaire. Collecter les informations concernant les incidents et les données physiques concernant les perturbations associées de l'environnement terrestre.
- S'affirmer comme partenaire du SEC en fournissant du support réseau à ACE. Le satellite ACE de la NASA (Advanced Composition Explorer) emporte une charge utile (RTSW Real Time Solar Wind) transmettant en permanence les paramètres du vent solaire intercepté au point de Lagrange L1, environ 30 minutes avant son arrivée dans le voisinage terrestre. La télémessure de RTSW est reçue principalement par une station en Angleterre et une autre au Japon. Une demande du SEC de compléter cette couverture par l'utilisation de stations du réseau CNES est en cours d'instruction.
- Proposer rapidement un service basé sur celui offert par le centre de Meudon, en l'installant dans un contexte opérationnel déjà validé.
- Encourager les communautés scientifiques, en France et en Europe, dans la dynamique des progrès actuels dans la compréhension des relations Soleil-terre, à réfléchir à l'apport qui peut-être fait à un service opérationnel, à structurer un plan d'implantation de l'application de ces progrès et à approcher les agences en mettant en évidence les outils désormais envisageables pour un service amélioré.
- Etablir, avec nos partenaires européens une initiative « European Space Weather », par exemple en constituant rapidement un « Groupe Européen d'Initiative », qui serait chargé de faire un travail de recensement des besoins (déjà largement entamé par notre groupe, en particulier) des moyens nationaux existants et de la problématique scientifique. Un rapport préliminaire de sensibilisation pourrait être préparé pour mi-1999. Il serait utile également d'informer et de sensibiliser les scientifiques, les opérateurs et les concepteurs par un colloque spécialisé tous les deux ans (le premier en 2000).



REFERENCES

- 1) Bourrieau, J.-P. David, L. Lévy - Cours d'environnement spatial, Edition Supaéro, Toulouse 1996.
- 2) Cours du CNES de Mécanique Spatiale 1995 - Tome 1 Les Perturbations d'orbite, C. Valorge
- 3) M. Ocko - Propagation of upper atmospheric storm effects towards lower latitudes COSPAR 98 (à paraître)
- 4) Environnement Terrestre et Planétaire – La Recherche n° 125, 1981 - Roger Gendrin
- 5) GNSS & WAAS architectures sept 96, ION-GPS-96, S. Loddo et al. Thomson-CSF
- 6) Journal officiel des Communautés européennes L159 du 29 juin 1996
- 7) Radiation Exposure of Civil Aircrew - Proceedings of Luxembourg CEC Workshop, Radiation Protection Dosimetry, 48, n°1, 1993
- 8) <http://www.intermagnet.org>
- 9) « Le Soleil en face » Pierre Lantos, 1997, Masson
- 10) The National Space Weather Program, FCM-P31 – 1997, Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research

GLOSSAIRE

ACE	Advanced Composition Explorer
ALE	Automatic Link Establishment
ATN	Air Traffic Network
CET	Contenu Electronique total (TEC)
CLS	Collecte Localisation Sauvetage
CME	Coronal Mass Ejection
CNET	Centre National d'Etude des Télécommunications
DLA	Direction des Lanceurs (CNES)
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay System
ESF	European Science Foundation
EVA	Extra Vehicular Activity
GNSS	Global Navigation Satellites Systems
GPS	Global Positioning System
GRGS	Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale
GTO	Geostationary Transfer Orbit
IEM	Impulsion Electro magnetique
IFRTP	Institut Français pour la Recherche et la Technologie Polaires
IPSN	Institut pour la Protection et la Sûreté Nucléaires
ISES	International Space Environment Service
ISS	International Space Station
LEO	Low Earth Orbit
LIS	Laboratoire Image Signal
MCC	Mission Control Center
MEO	Medium Earth Orbit
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PCA	Polar Cap Absortion
PN	Personnel Naviguant
RFI	Radio France International
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Stations
SEC	Space Environment Center
SPE	Solar Proton Event
SSO	Sun Synchronous Orbit
TDF	Télédiffusion de France
TGE	Très Grand Equipement
TEC	Total Electron Contact (CET)
VLSI	Very Large Scale Integration