

Modélisation des radiations ionisantes de l'environnement spatial

Joseph LEMAIRE et Lucien BOSSY

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

Abstract

Accurate and up-to-date models for the distribution of energetic particle fluxes trapped in the Earth's magnetosphere are required by space scientists and by aerospace engineers to evaluate the radiation doses to be experienced by future space systems during their orbital mission. Existing trapped radiation models currently used are more than twenty years old; they do not take into account of the secular evolution of the Earth's magnetic field and therefore they have often been misused for radiation dose predictions.

A recent study conducted for ESA by a consortium formed by IASB (Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique), MATRA-ESPACE (Toulouse) and STI (Space Technology Ireland) has recommended a dependable procedure to minimize the errors resulting from the secular variations of the geomagnetic field. This TREND (Terrestrial Radiation Environment Development) study team has also concluded that these old models of the Van Allen radiation Belts should be updated by specialised interdisciplinary Space Environment Modeling and Study Centers using more recent and more comprehensive orbital data sets; TREND recommends also that new measurements of energetic electrons and ions be collected with «standardized minimally intrusive» directional particle detectors and dosimeters incorporated to all future vehicles orbiting in the space environment. Such detectors sampling the whole magnetosphere simultaneously at different locations should be build-in in any future spacecraft, whether it has a magnetospheric, astronomical, meteorological, tele-detection, or commercial mission.

This new strategy would not only help the global modellers community, but it would also be useful for the payload scientists and mission engineers to calculate spacecraft shielding, to secure mission operation against Single Event Upsets, Latchups, dielectric charging, electrostatic discharges, and biologically harmful injections of solar proton events.

Préambule

Il est bien connu que l'environnement spatial est un milieu hostile et dangereux non seulement pour la vie des astronautes mais également pour les composants électroniques de plus en plus sophistiqués que l'Homme sera

amené à y utiliser au cours des années futures. Les missions spatiales seront de plus en plus nombreuses et la présence de l'Homme dans cet environnement hostile sera de plus en plus fréquente et impérative; cette présence de l'Homme dans l'espace est nécessaire non seulement à des fins d'exploration scientifique, mais également pour le contrôle des ressources terrestres ainsi que pour des impératifs commerciaux et militaires.

Il est par conséquent indispensable de bien connaître le milieu dans lequel les futurs véhicules de l'espace vont évoluer. Pour la sécurité des cosmonautes et/ou des systèmes électroniques, il sera nécessaire d'évaluer le plus exactement possible la nature et l'épaisseur des blindages requis pour assurer une protection suffisante contre ces différents dangers de radiation dans l'espace. Or, pour évaluer les risques et ces dangers, il est nécessaire de disposer de modèles aussi précis et détaillés que possible des paramètres physiques caractérisant cet environnement spatial, comme il en est de l'environnement écologique terrestre de l'Homme.

Des modèles de flux de particules énergétiques qui surévalueraient les doses de radiations ionisantes obligerait les ingénieurs à prévoir des blindages inutilement épais, ce qui augmenterait inutilement les coûts de construction et réduirait les charges utiles mises en orbite. Par contre, des modèles de l'environnement spatial qui sous-estimeraient les doses de radiations conduiraient à des protections insuffisantes et, par voie de conséquence, à des aléas et malfonctionnements que nous énumérerons ultérieurement.

En vue d'optimiser le coût d'une mission spatiale et pour en planifier au mieux l'orbite et les opérations de vol, il s'avère donc indispensable de disposer de modèles aussi fiables que possible pour tous les paramètres déterminants du milieu dans lequel celle-ci s'effectuera. Au même titre qu'il faut pour la navigation en mer ou dans les airs des cartes géographiques correctes ou des cartes météorologiques continuellement remises à jour, il faudrait, pour la navigation spatiale, disposer dès maintenant de modèles de l'environnement spatial aussi complets que possible et assurer leur remise à

jour continue. Or, depuis plus de vingt ans, une telle remise à jour est devenue un souci relativement mineur de la communauté scientifique ainsi que des agences spatiales nationales et internationales.

Pour réaliser de manière régulière de telles mises à jour, il serait fort utile d'avoir, comme dans les centres météorologiques, un service de prévision et de modélisation de l'environnement spatial avec comme principale fonction le développement de tels modèles et leur amélioration en vue d'affiner les prévisions du «temps» qu'il fera dans l'environnement spatial lors de la prochaine mission astronautique.

Les modèles existants et leurs lacunes

Au cours des années 60 et jusqu'au milieu des années 70, la NASA avait établi et développé au «National Space Science Data Center» (NSSDC) un groupe spécialisé de scientifiques chargés de la modélisation de l'environnement spatial, principalement de la distribution des flux d'électrons relativistes et de protons énergétiques piégés au sein du champ magnétique de la Terre. C'est dans ce centre qu'ont été développés, il y a plus de vingt ans, la série des modèles empiriques AE-1,...,AE-8 donnant la distribution spatiale des électrons énergétiques des zones de radiation de *Van Allen*. Durant cette même première époque, une série de modèles AP-1,...,AP-8 y furent développés pour les protons de 1 à 100 millions d'électronvolts (MeV). (NB : dans la désignation des modèles, «A» signifie «Aerospace» : c'est en effet à Aerospace Corporation, en Californie, que le Dr J.I. Vette commença le développement de ces premiers modèles; «E» signifie qu'il s'agit de la distribution du flux des Electrons; et «P» pour indiquer qu'il s'agit des Protons). Ce sont ces modèles AE-8 et AP-8 qui sont utilisés à l'heure actuelle pour les prévisions des doses de radiation des missions futures de l'an 2000.

Malheureusement, passé cette première période d'engouement pour l'étude des particules de très haute énergie de la magnétosphère, l'intérêt pour la modélisation de ces zones de *Van Allen*

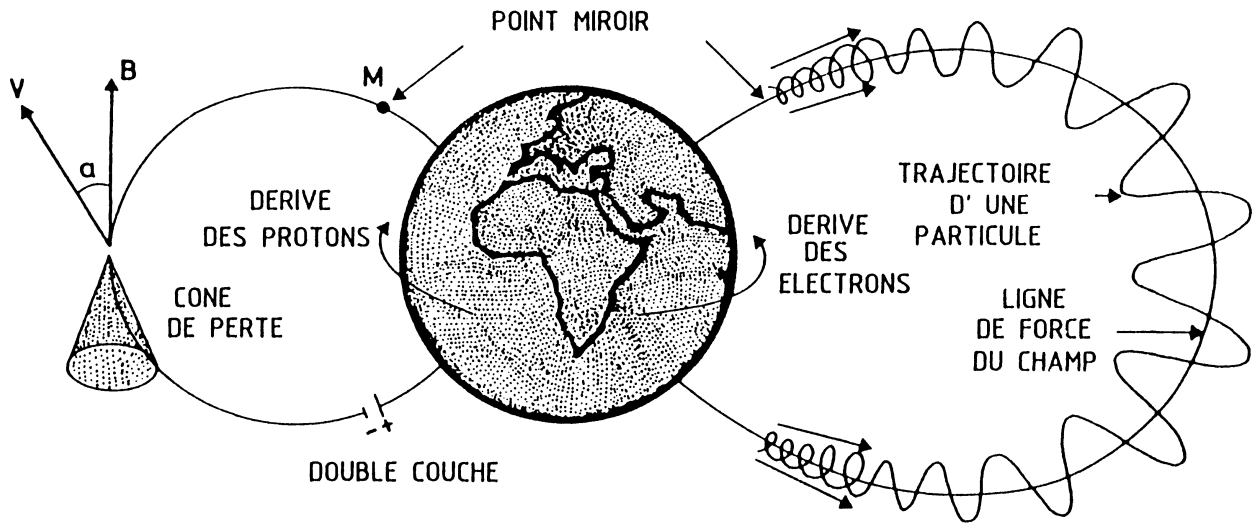


Figure 1. Courbes d'isointensité du flux des protons d'énergie comprise entre 40 et 110 MeV, dans le système de coordonnées dipolaires magnétiques. La ligne horizontale représente l'équateur magnétique.

s'est progressivement estompé au profit d'études plus «modernes» de la distribution de particules moins énergétiques responsables des aurores boréales et des courants électriques qui perturbent de manière variable et irrégulière le champ géomagnétique. Ainsi, en raison de ce changement d'orientation dans les objectifs de la recherche magnétosphérique, aucune nouvelle version de ces modèles n'a plus été développée depuis 1972 et les prévisions des doses de radiation pour les missions spatiales futures continuent à se baser sur des modèles qui datent du début de l'ère spatiale. Il en résulte, par exemple, que c'est sur des modèles empiriques établis à partir de mesures faites avec des détecteurs moins développés que ceux dont on dispose actuellement, que les calculs de blindage pour la navette spatiale *HERMES* sont effectués présentement; d'autre part, comme ces mesures furent effectuées à une époque (1960-72) où la configuration du champ géomagnétique était sensiblement différente de celle d'aujourd'hui et de celle qui existera en l'an 2000, il en résulte que la distribution spatiale de ces zones de Van Allen n'est et ne sera plus celle de l'époque à laquelle ces modèles ont été développés.

Il a été récemment établi par différentes études, dont une réalisée pour l'ESA à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) dans le cadre du projet TREND (Terrestrial Radiation Environment Development), que les flux d'électrons relativistes actuellement mesurés dans l'espace ne correspondent pas aux doses déduites à partir du modèle AE-8. Ce modèle surestime le flux moyen actuel des électrons par un facteur pouvant atteindre la valeur 3 dans certains cas. Un tel exemple démontre en suffisance qu'une remise à jour sur la base

d'observations récentes et plus complètes est nécessaire.

Actuellement, les centres mondiaux de données satellitaires (comme le NSSDC de la NASA) concentrent leurs moyens aux tâches d'archivage et de développement de moyens informatiques de dissémination des données. Les programmes internationaux d'étude de la magnétosphère, comme l'IMS (International Magnetospheric Study) ou maintenant STEP (Solar Terrestrial Physics), sont fondamentalement orientés vers des recherches à caractère exploratoire. Des sommes importantes sont libérées par les agences spatiales pour ce type de missions ainsi que pour les études d'astronomie spatiale, mais peu de moyens sont actuellement en fait consacrés à la modélisation globale de l'environnement spatial.

Le satellite magnétosphérique américain CRRES (Combined Release and Radiation Effects Satellite), en orbite depuis l'été 1990, constitue une exception heureuse à cette règle. Mais il est tombé en panne en automne dernier et, actuellement, il n'est pas prévu de réaliser ou de financer d'autres missions complémentaires susceptibles de poursuivre ces tâches d'observation et de collecte de données au cours des décennies à venir. Bien que partielles, les mesures du flux de particules énergétiques du satellite CRRES pourront servir à une remise à jour - malheureusement incomplète - des modèles AE-8 et AP-8. Mais un effort aussi partiel et ponctuel que CRRES (13 mois de fonctionnement), ne suffira pas pour établir un modèle global couvrant toutes les régions de la magnétosphère et s'étendant sur plus d'un cycle d'activité solaire. La continuité d'une activité de collecte de données caractérisant l'environnement spatial est aussi indispensable

que l'activité de modélisation elle-même. Par ailleurs, la conservation du «savoir faire» acquis par une équipe interdisciplinaire en matière de modélisation est aussi un des atouts importants sur lesquels il faut baser une telle entreprise.

Description de l'environnement spatial et des dommages occasionnés par les particules qui y sont présentes

Les particules ionosphériques

La pression atmosphérique dans l'espace au-delà de 300 km d'altitude est 10 milliards de fois plus faible qu'au niveau du sol; il y règne une pression plus faible que celle réalisée dans les meilleures chambres à vide de nos laboratoires. Un atome neutre y parcourt librement une distance de plus de 2 km avant de subir une collision avec une quelconque des rares particules peuplant ce milieu; à titre de comparaison, rappelons qu'au niveau de la mer le libre parcours moyen des molécules est de $0,05 \mu$ c.-à-d. 20 milliards de fois moins!

Au-dessus de 100 km d'altitude les molécules d'oxygène sont dissociées par le rayonnement ultraviolet; les atomes d'oxygène ainsi formés sont photoionisés et les ions et électrons créés constituent l'ionosphère de la Terre. Les électrons et ions ionosphériques ont des énergies inférieures à 0,5-1 électronvolt (eV); ces énergies correspondent à celles des particules d'un gaz ionisé (c.-à-d. un plasma) dont la température est de 3 000 K (2 727 degrés Celsius). Des particules d'aussi faible énergie sont sans grand danger direct pour les systèmes et les structures mises en orbite.

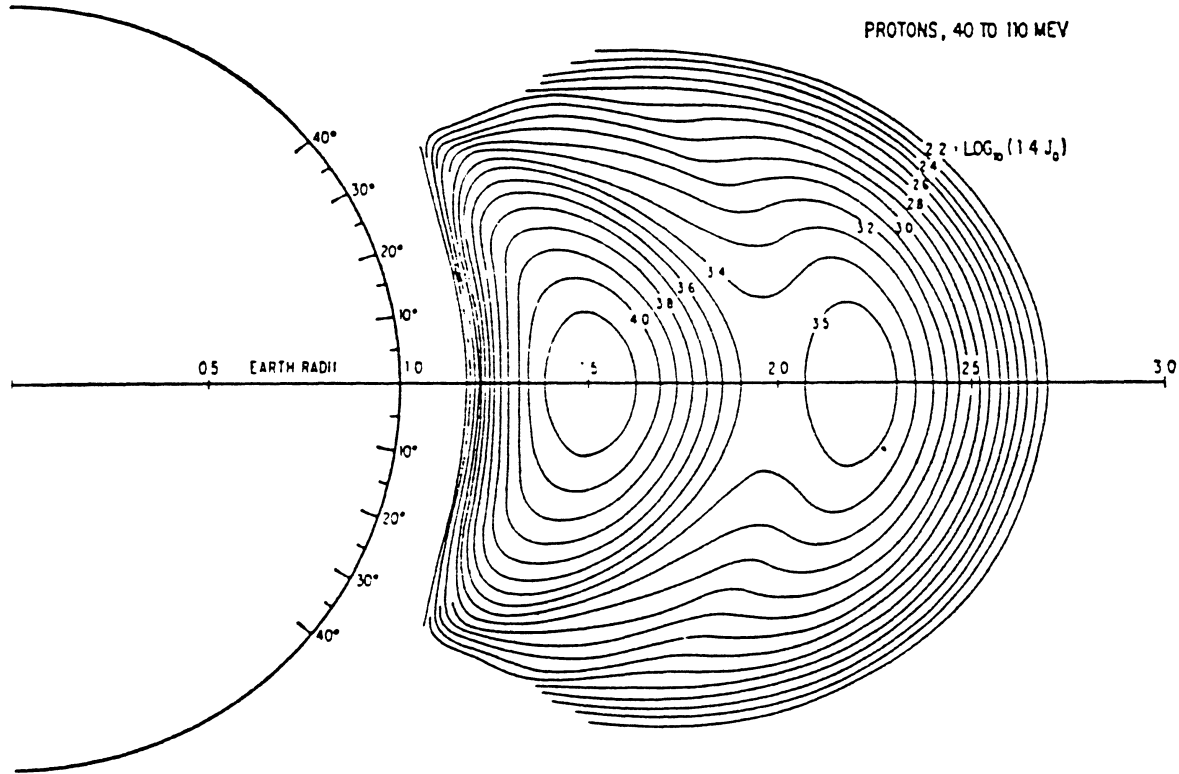


Figure 2. Représentation de la trajectoire hélicoïdale d'une particule chargée piégée dans le champ géomagnétique. Outre une révolution de Larmor autour des lignes de force magnétique et une oscillation le long de celles-ci entre deux «points miroirs», les charges électriques positives subissent une dérive azimutale vers l'ouest; par contre les électrons se déplacent en sens opposé (c.-à-d. vers l'est). Les particules dont l'angle entre la vitesse et la direction du champ magnétique est inférieur à une certaine limite (représentée ici par l'angle solide du «cône de perte»), sont irrémédiablement précipitées dans l'atmosphère de la Terre.

Toutefois, le flux des électrons ionosphériques qui bombardent la surface des engins spatiaux compense en partie le flux des photo-électrons (d'énergie égale à 10-20 eV) arrachés à la surface métallique par les rayons UV du Soleil. La présence du plasma de basse énergie dans l'ionosphère ou dans la plasmasphère réduit par conséquent la charge électrostatique positive de surface qui peut s'accumuler par effet photo-électrique sur les parties de satellite éclairées par le Soleil.

Ces électrons ionosphériques réduisent donc le risque de décharge électrostatique entre des éléments séparés d'un satellite artificiel.

Les particules des Zones de radiation de Van Allen

Outre ces particules ionosphériques, on rencontre dans l'espace extra-atmosphérique des particules chargées dont l'énergie est très grande, bien que leur densité et leur énergie par unité de volume soient relativement faibles. Elles bombardent le blindage des satellites artificiels et peuvent y occasionner de sérieux inconvénients dont il sera question plus loin.

C'est lors de la découverte spectaculaire des zones de radiation de Van Allen au début des années 60, que l'on prit conscience pour la

première fois des dangers potentiels des voyages dans l'espace. A cette époque, en effet, en examinant les taux de comptage des compteurs Geiger transmis depuis l'espace, un des collaborateurs de James Van Allen à l'université d'IOWA s'exclama: « Bon Dieu, mais l'espace est radioactif! »

Ainsi donc, mêlées aux particules ionosphériques de très basse énergie, on venait de découvrir dans l'environnement spatial des particules très énergétiques dont le flux (la densité multipliée par la vitesse moyenne des particules) était considérable: le flux de protons est supérieur à 100 millions de particules par seconde et par centimètre carré. Ces particules chargées (ions et électrons) dont l'énergie dépasse quelques dizaines de millions d'eV, constituent les zones de radiation de Van Allen. La figure 1 montre la distribution du flux des protons dont l'énergie est supérieure à 40 MeV, dans celles-ci.

Ces zones qui encerclent complètement la Terre forment deux gigantesques anneaux distribués autour de l'équateur géomagnétique. Comme indiqué à la figure 2, les trajectoires de ces particules chargées s'enroulent en spirale autour des lignes de force du champ géomagnétique en oscillant entre deux «points

miroirs» (point de réflexion) situés de part et d'autre de l'équateur. En raison du caractère magnétique des forces, ces particules piégées subissent également une dérive en azimut et se déplacent en longitude le long d'une coquille magnétique (magnetic shell); c'est cette dérive azimutale (vers l'est pour les électrons et vers l'ouest pour les ions positifs) qui donne aux zones de Van Allen cette forme d'anneaux concentriques dont l'axe de symétrie est celui du champ géomagnétique.

Comme l'inclinaison du dipôle géomagnétique est actuellement de 11,02 degré (valeur pour l'année 1985) et change de décennie en décennie (0.1 degré, en 10 ans), la direction de l'axe de symétrie des ceintures change également par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Outre cette variation séculaire de son inclinaison, le champ géomagnétique subit une lente diminution de la valeur du moment dipolaire (actuellement de -3,48 % par décennie), ainsi qu'une séparation progressive de son centre de symétrie par rapport au centre de la Terre. Ce décentrage du dipôle géomagnétique est actuellement de 502 km, et augmente à raison de 24,1 km/décennie.

L'étude TREND a notamment montré que l'évolution séculaire de la composante dipole

laire du champ géomagnétique et l'augmentation relativement rapide du décentrage (48 km en 20 ans) ont modifié de manière significative la distribution spatiale du flux des particules depuis les années 60-70, période pendant laquelle les modèles AE-8 et AP-8 ont été établis. Ceci a conduit à faire un certain nombre de recommandations quant à la manière la moins défavorable d'utiliser ces modèles et quant à la nécessité d'une mise à jour de ces modèles, en tenant compte d'observations plus récentes et, bien entendu, de l'évolution séculaire non négligeable du champ géomagnétique.

Les effets néfastes des particules de haute énergie comme celles des zones de *Van Allen* ou les rayons cosmiques solaires et galactiques ont été reconnus dès le début des années 70. McCormack (1988) a décrit en détail les effets biologiques qui résultent de l'irradiation par ces particules, soit en orbite basse, soit en orbite polaire, soit en orbite géostationnaire, ou dans le milieu interplanétaire. Ces effets biologiques sont évidemment cruciaux pour les voyages de l'Homme dans l'environnement spatial et dans un futur éloigné pour les missions vers la Lune et vers Mars. Le lecteur intéressé par ces effets biologiques trouvera dans un numéro spécial de la revue IEEE Trans. Nucl. Sci., publié en 1988, une source supplémentaire d'informations récentes sur ce sujet (Coakley, 1988).

Mentionnons simplement que les effets biologiques des radiations dans l'espace, comme d'ailleurs ceux que subissent les travailleurs au voisinage de réacteurs nucléaires, sont principalement de nature cancérogène et mutagène; les doses d'exposition susceptibles de produire des effets génétiques ont récemment été rappelées dans deux articles de Bodart (1990, 1991).

Les particules du rayonnement cosmique solaire et galactique

Par suite de l'effet du vent solaire sur la magnétosphère, les lignes de forces magnétiques qui s'étirent à des distances supérieures à 6-7 rayons solaires sont fortement déformées par des systèmes de courants électriques qui circulent au sein de la magnétosphère (*Ring Current* et *Magnetotail Current Sheet*) ainsi qu'à sa surface, la magnétopause (Magnetopause Current). Ceci implique notamment que les lignes de force géomagnétiques issues des calottes polaires sont généralement «ouvertes» et interconnectées avec celles du milieu interplanétaire et par conséquent avec celles du Soleil. Pour certaines positions particulières de la Terre sur son orbite, ces lignes de force peuvent même être connectées à celles de la magnétosphère de Jupiter.

Le long de ces lignes de force «ouvertes», il n'est donc pas possible de piéger des particules comme c'est le cas dans les zones de *Van Allen*; par contre, c'est le long de ces lignes de force

magnétique que, lors d'éruptions solaires, les particules de haute énergie peuvent pénétrer dans la magnétosphère. Les électrons et ions accélérés dans ces gigantesques explosions thermiques qui se produisent dans la chromosphère solaire, atteignent l'environnement de la Terre en moins d'une heure. Guidés par les lignes de force géomagnétique polaires, ils trouvent ainsi un canal d'accès direct vers les régions polaires de la Terre. Ces averse passagères dénommées «Solar Proton Event» sont constituées d'électrons relativistes ainsi que de protons et d'autres types d'ions dont les énergies peuvent excéder 100 MeV; elles augmentent l'ionisation dans l'ionosphère polaire avec comme conséquences des perturbations importantes des radiocommunications connues sous le nom de PCA (*Polar Cap Absorption*).

La fréquence des émissions de ces rayons «cosmiques» solaires est une fonction du cycle d'activité solaire: les plus violentes d'entre elles sont observées pendant une période de sept années autour de l'époque du maximum d'activité solaire. La probabilité de subir les effets dévastateurs dus à un «événement à protons solaires» au cours d'une mission spatiale d'une durée déterminée, dépendra donc de l'époque du cycle d'activité solaire au cours de laquelle celle-ci sera effectuée.

Mais le Soleil n'est pas le seul à nous arroser de particules de haute énergie; en effet et, ce d'une manière quasi permanente, des particules d'origine galactique de plus de 100 GeV atteignent la magnétosphère, la traversent et peuplent l'environnement spatial. Ces particules, principalement des protons, sont accélérées dans certaines régions de notre galaxie ou peut-être dans des explosions de supernovae selon des processus encore mal identifiés.

L'existence du champ géomagnétique fait que le flux de rayons cosmiques galactiques et solaires que recevra un engin spatial dépendra de la latitude géomagnétique à laquelle il se trouve: plus l'orbite d'un satellite artificiel sera inclinée, plus longtemps il séjournera au-dessus des régions polaires et plus il sera soumis à des doses d'irradiation importantes.

Depuis 1976, un modèle probabiliste permet de calculer le risque de subir, au cours d'une mission spatiale de durée déterminée, une dose totale d'irradiation supérieure à un seuil donné; ce modèle est connu sous le nom de «modèle de King», appelé également «NASA Model» (King, 1974). Comme les modèles AE-8 et AP-8 mentionnés ci-dessus, le modèle de King, date de plus de 15 ans. Il méritait d'être remis à jour en utilisant des mesures plus récentes et étalées sur un plus grand nombre d'années d'observation. C'est chose faite depuis que J. Feynman (1990) et ses collaborateurs au JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) ont publié un nouveau modèle probabiliste pour ces «solar proton events». Il est basé sur des observations

collectées durant trois cycles d'activité solaire (les cycles 19, 20 et 21), tandis que le modèle de King ne couvrait que le seul cycle numéro 20.

L'étude TREND a introduit ce nouveau modèle de Feynman dans le software UNIRAD utilisé à l'ESA pour le calcul des doses de radiation dans l'espace.

Les particules magnétosphériques d'énergie moyenne.

Les particules de plusieurs MeV injectées dans l'environnement spatial lors des événements à protons solaires, ainsi que les particules piégées dans les ceintures de radiation de *Van Allen*, sont dangereuses en raison de leur grand pouvoir de pénétration au travers du blindage des véhicules en orbite. Mais elles ne jouent qu'un rôle peu important dans l'étude de la dynamique de la magnétosphère dominée par les particules d'énergie inférieure à 100 keV. Les magnétosphéristes ont progressivement abandonné au cours de années 70 la collecte systématique de leurs observations. Si les particules d'énergie inférieure à 100 keV jouent un rôle géophysique important, elles constituent en effet la source des phénomènes auro-raux et des différentes perturbations observées dans la magnétosphère: en particulier les variations rapides de l'intensité du champ géomagnétique mesurées par les observatoires géomagnétiques comme celui de l'IRM à Dourbes; par contre, les particules de haute énergie sont à la base d'effets particulièrement nuisibles pour les systèmes d'exploration spatiale.

Outre ces particules chargées ionosphériques, magnétosphériques ou celles du rayonnement cosmique solaire et galactique, l'environnement spatial est également un milieu hostile à cause de la présence de particules solides: grains de poussière ou de pierre d'origine météorique, et, débris de fusées et de satellites. Le calcul des risques de collision d'un satellite avec ces objets solide en orbite autour de la Terre est une autre préoccupation majeure des ingénieurs et scientifiques associés aux missions spatiales. Mais ceci constitue un autre sujet auquel un article complet pourrait être consacré.

Single Event Upset et Latch Up

Les particules les plus énergétiques sont généralement considérées comme les agents produisant ce que les spécialistes appellent les «Single Event Upsets» (SEU). Il s'agit de changements parasites dans l'état d'un bit à l'intérieur d'un circuit électronique. Un «SEU» n'entraîne pas nécessairement un dommage irréversible du microcircuit; dans certains cas il est possible de restituer le bit dans l'état initial. Par contre dans les cas les plus graves dénommés «Latch Up», le circuit est endommagé de manière permanente; dans des cas plus bénins, le circuit atteint doit être éteint pour être ensuite réinitialisé.

Les mémoires des ordinateurs de bord sont sensibles aux «SEU»; heureusement les ingénieurs ont trouvé des méthodes pour palier ce type d'inconvénients (Adams, 1983). Les récepteurs GPS (*Global Positioning System*) du satellite Landsat-D et d'autres satellites de relais de signaux ont été sujets à de nombreux «SEU» produits par des rayons cosmiques.

Les protons des zones de *Van Allen* ont aussi provoqué des «SEU», notamment dans le cas du satellite astronomique *SMM* (*Solar Maximum Mission*). L'orbite de *SMM* est inclinée de 29 et, de ce fait, passe régulièrement dans la région de l'anomalie magnétique sud (SAA: *South Atlantic Anomaly*) située près de la côte Atlantique du Brésil où le champ géomagnétique présente un minimum. A cet endroit du globe terrestre, le bord inférieur de la zone de piégeage des protons se situe à des altitudes inférieures aux altitudes normales. Il en résulte que, lors de son passage dans cette région, le satellite astronomique *SMM* subit un «SEU» en moyenne deux fois par mois.

Défauts dans les photos de l'espace

Des défauts ont également été observés dans les photos prises par les satellites du programme DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) lors de leur passage au-dessus de la région du SAA; des défauts semblables ont été également observés lors d'une des fameuses injections de protons énergétiques solaires du mois d'août 1972.

Les particules de haute énergie peuvent également engendrer du rayonnement *Cerenkov* dans les systèmes optiques et ainsi des signaux parasites dans les détecteurs d'étoiles faibles ainsi que des erreurs de pointage des instruments astronomiques en orbite (Vampola, 1980).

Cette énumération des dommages et aléas occasionnés par les radiations dans l'environnement spatial pourrait être prolongée. Toutefois, il s'impose pour terminer d'évoquer un contre-exemple rencontré à l'occasion du lancement du satellite astronomique Hiparcos. Celui-ci fut placé sur une orbite située plus profondément au cœur des zones de Van Allen que le prévoyait l'orbite nominale. De ce fait, les ingénieurs ont craint une dégradation très rapide des panneaux solaires ainsi qu'une réduction importante du laps de temps journalier consacré aux observations astronomiques. Or, après une phase initiale de dégradation accélérée, les panneaux solaires de HIPARCOS se détériorent actuellement à un taux plus lent qu'indiqué par les calculs de doses de radiation utilisant les modèles AE-8 et AP-8, qui surévaluent le flux d'électrons de plus d'un facteur 3 dans certaines régions de la magnétosphère. Bien qu'une étude quantitative soit encore nécessaire, il apparaît que la faible dégradation des cellules solaires de Hiparcos confirme les résultats et les conclusions de TREND.

Un tel exemple montre clairement qu'une remise à jour complète des anciens modèles serait bien nécessaire et que le développement de modèles plus complets et plus précis est une tâche importante et urgente.

Stratégies pour l'avenir et conclusions

L'environnement spatial est un milieu hostile à de nombreux points de vue: les électrons et ions énergétiques constituent un danger non seulement pour les astronautes mais également pour le bon fonctionnement des systèmes électroniques, tels que les mémoires d'ordinateur de bord, les photocellules solaires, les instruments astronomiques, les optiques de télédétection et les détecteurs de particules.

Le choix des blindages et des protections, celui des trajectoires nominales ainsi que celui de la séquence des modes opératoires pour les missions spatiales doivent tenir compte de la distribution des particules piégées dans les zones de radiation de *Van Allen* et des flux de particules cosmiques. Le choix de la nature des matériaux de blindage dépend aussi de la distribution spatiale des particules d'énergie plus faible susceptibles d'engendrer des décharges électriques.

On s'est rendu compte que, en particulier, les modèles AE-8 et AP-8, qui décrivent les distributions statistiques moyennes des flux d'électrons et de protons piégés dans le champ géomagnétique datant des années 60-70, ne sont plus adaptés à la situation actuelle, en raison de l'évolution séculaire du champ géomagnétique qui contrôle les trajectoires de ces particules et des effets atmosphériques. Les prévisions des doses de radiation faites à partir de ces anciens modèles ne correspondent plus aux valeurs mesurées actuellement dans l'environnement spatial.

Comme c'est le cas en climatologie ou en océanographie, il faudrait constamment remettre à jour les modèles existants et en développer de plus détaillés sur la base de données d'observations plus récentes, plus fiables et plus complètes. De telles bases de données sont depuis la fin des années 1970 devenues de plus en plus rares.

Pour pallier ce besoin de remise à jour des modèles globaux AE-8 et AP-8, il faudrait ressusciter au sein de la communauté scientifique un nouvel intérêt pour une modélisation améliorée, en insistant sur sa très grande utilité pour l'industrie aérospatiale et pour la communauté scientifique elle-même. Bien des problèmes liés à l'origine de ces particules de haute énergie et aux mécanismes qui contrôlent leur perte sont encore mal compris.

Une nouvelle stratégie devrait également être développée au sein des agences spatiales nationales et internationales en vue d'encourager

et de promouvoir de nouvelles mesures de flux des particules énergétiques dans l'environnement spatial. Un moyen adéquat pour atteindre cet objectif serait d'incorporer systématiquement des dosimètres et des détecteurs de ces particules à bord de tout satellite artificiel appelé à évoluer au sein des zones de radiations dangereuses. Idéalement, chaque satellite magnétosphérique, astronomique, météorologique, de télédétection ou de télécommunication devrait posséder à son bord des dosimètres standardisés, peu encombrants et peu coûteux en comparaison de l'ensemble du projet (détecteurs de faible poids, de faible consommation électrique, ne nécessitant que peu de bits par seconde pour la transmission des données).

De telles mesures dosimétriques systématiques et permanentes seraient non seulement utiles pour la réalisation des modèles empiriques globaux, mais pourraient être exploitées en commun avec les techniciens et chercheurs responsables des projets ou des instruments (astronomiques ou autres) de manière à mettre en évidence les périodes au cours desquelles des défauts de fonctionnement («SEU» ou «Latch up») sont susceptibles de survenir en raison d'augmentations sporadiques du flux de ces particules.

Des dosimètres ou des moniteurs de ces particules susceptibles d'endommager les cellules solaires et les instruments de mesure astronomiques ou autres ne devraient-ils pas être également installés systématiquement à bord de tout satellite afin de modifier d'une manière interactive son mode opérationnel en fonction du flux de ces particules? Une telle stratégie aurait l'avantage d'assurer une meilleure protection des instruments contre des détériorations irréversibles lors de l'entrée du véhicule dans les zones de radiations de *Van Allen*.

Mais la collecte et l'archivage de quantités impressionnantes de données doivent être jumelées avec une stratégie supplémentaire d'analyse systématique de ces données; analyse a priori non porteuse de découvertes sensationnelles, mais d'une utilité dont les voyageurs de l'espace du vingt et unième siècle nous seront certes reconnaissants.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- ADAMS, J.H., *Radiation Effects in Microelectronics for Space Instruments*, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, 481-484, 1983.
- BODART, F., *Ionization Radiations - Basis, Risks and Benefits*, Part I: basis, Physicalia Magazine, 12, 111-122, 1991.
- BODART, F., *Ionization radiations - basis, risks and benefits*, Part II: risks and benefits, Physicalia Magazine, 13, 35-48, 1992.
- COAKLEY, P.G., (ed.), *IEEE Annual Conference on Nuclear and Space Radiation Effects*, IEEE trans. Nucl. Sci., 35, 1129-1687, 1988.