

# DAPNIA

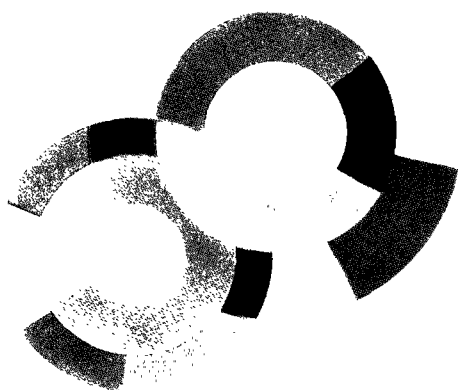
A paraître dans "Ciel & Espace", Juin 2000

JM, BONNET-BIDAUD

RADIATION COSMIQUE :  
DANGER DANS L'ESPACE

JUN 2000

SAP 2000/17



CEA-DAPNIA-SAP-00-17

<b>Gestion INIS</b>
Doc. Enreg. <b>14/1900</b>
N. TRN <b>0.18</b>
FR <b>0.58.16</b>

CEA  
CEA/SACLAY  
DSM

FR0005816



## **"Radiations cosmiques : danger dans l'espace"**

par Jean Marc Bonnet-Bidaud et Hervé Dzitko

a paraître dans Ciel & Espace (juin 2000)

C'est aujourd'hui, le nouveau grand défi spatial. Celui que les scientifiques devront absolument relever si les missions habitées de longue durée dans l'espace et les explorations planétaires prennent corps. Qu'on se souvienne : c'était le 16 avril 1972, le vaisseau Apollo 16 s'envolait de Cap Kennedy pour une mission de trois semaines vers la Lune durant laquelle les deux astronautes John Young et Charles Duke allaient circuler librement à la surface lunaire, protégés seulement de l'espace interplanétaire par la mince épaisseur de leur scaphandre. Quelques mois plus tard, en décembre 1972, c'était le tour d'Apollo 17, avec Cernan et Schmitt, les derniers hommes à s'être posés sur la Lune. Tous ces astronautes sont revenus indemnes de leur aventure spatiale. Ils ont eu beaucoup de chance ! En effet, le 4 août 1972, entre ces deux missions, une fantastique explosion solaire comme il ne s'en produit une que tous les dix ans environ eut lieu. Durant seize heures, un flot intense de particules issues du Soleil à des vitesses très élevées allait balayer l'espace interplanétaire. Comme autant de minuscules balles de fusil, elles peuvent pénétrer des épaisseurs de plusieurs centimètres de blindage métallique. Si l'éruption avait eu lieu lors d'une sortie sur la Lune, les astronautes auraient très probablement été mortellement irradiés. Même à l'intérieur de leur capsule spatiale, ils auraient subi des doses entraînant des dégâts dans leur formule sanguine et leur patrimoine génétique.

C'est cet épisode qui a fait prendre conscience aux grandes agences spatiales qu'en dehors des accidents technologiques, l'espace restait en lui-même un milieu hostile qui pouvait devenir mortel. Aujourd'hui, alors que sont envisagés de très longs voyages humains vers Mars et une occupation quasi-continue de l'espace à bord de stations internationales en orbite, les scientifiques et ingénieurs sont face à une évidence. Les limitations majeures des missions spatiales ne seront pas les ressources énergétiques ou les moyens de propulsion, mais bien la protection de ces voyageurs qui vont s'engager dans des aventures de plusieurs années.

Peut-on espérer un jour réellement vivre dans l'espace en toute sécurité ? Le risque des radiations cosmiques commence seulement à être évalué. Et actuellement, il n'existe aucune protection facile à mettre en oeuvre.

Pour se rendre compte des dangers qui environnent la Terre et de notre situation très protégée à sa surface, il suffit de suivre le voyage vers notre planète d'une particule en provenance de la Galaxie. A encore quelques dizaines de milliards de kilomètres de la Terre, soit plus de cent fois la distance Terre-Soleil, nous sommes dans le vide interstellaire. Mais ce vide est loin d'être vide car c'est le royaume du rayonnement cosmique, un flot de particules redoutables qui voyagent à une vitesse proche de celle de la lumière (voir CE n°300, mars 1995). Ce sont des noyaux d'atomes, constitués à 87% de protons (noyaux d'hydrogène), 12% de particules alpha (noyaux d'hélium) et de 1% de noyaux plus lourds allant jusqu'à l'uranium ! Leur origine : l'explosion des étoiles à la fin de leur vie. Un mécanisme qui n'est pas encore totalement élucidé est capable d'accélérer une faible fraction de la matière rejetée par l'étoile à une vitesse très proche de celle de la lumière. L'ensemble de la Galaxie est ainsi baigné dans cette pluie de noyaux rapides dont l'énergie est phénoménale puisqu'elle peut largement dépasser un

milliard d'électron-volts (1GeV), soit un milliard de fois plus élevée que celle de la lumière visible. A ces énergies, ces particules sont de véritables projectiles qui peuvent traverser un blindage d'aluminium d'un mètre cinquante d'épaisseur !

Face à cette pluie continue et pénétrante, la Terre est heureusement protégée par un premier rempart, la bulle solaire. Le Soleil comme la plupart des étoiles perd une partie de son atmosphère dans l'espace. Plusieurs millions de tonnes par seconde s'échappent ainsi, constituant un intense vent de particules qui emprisonnent un champ magnétique. Ces particules, essentiellement des protons, ont une énergie moyenne relativement faible de quelques milliers d'électron-volts (keV), ce qui les rend peu dangereuses. En revanche, ce "vent solaire" et son champ magnétique qui balaye l'espace interplanétaire, constitue un véritable cocon protecteur dans laquelle les particules galactiques ont plus de mal à pénétrer. C'est ainsi que le vent solaire parvient à chasser une partie de la pluie galactique.

L'efficacité de cette barrière varie fortement avec l'activité du Soleil qui suit un cycle périodique de 11 ans (voir C&E n°360 Mai 2000). C'est au maximum de l'activité solaire, comme en ce moment que nous sommes le mieux protégés car le vent solaire est alors le plus dense. Et par rapport au minimum solaire, le flux cosmique est divisé par un facteur de 2 à 10 selon l'énergie des particules. Malheureusement pour nous, c'est durant cette même période que le Soleil protecteur peut aussi être un Soleil dangereux. Car avec la montée de l'activité solaire la fréquence des éruptions solaires violentes, augmente. C'est l'une d'entre elles qui aurait mis en danger la vie des astronautes d'Apollo en 1972. Ces brusques orages qui se superposent au vent solaire, sont souvent déclenchés par la rupture de tubes de champs magnétiques à la surface du Soleil et libèrent une énergie colossale, équivalente à plusieurs milliards de fois la bombe d'Hiroshima. Mais s'il se produit des éruptions presque quotidiennes sur le Soleil, seule une dizaine par an injecte temporairement dans la bulle solaire une dose intense de particules dont l'énergie moyenne peut atteindre plusieurs centaines de millions d'électron-volts (MeV). Une fois tous les dix ans, comme celle de 1956, 1972 ou 1989, atteint des énergies du GeV similaires à celles du rayonnement galactique. Ces véritables raz de marée peuvent durer plusieurs dizaines d'heures. Dans la météo cosmique, ce sont ces événements, extrêmement violents et encore largement imprévisibles, qui représentent des dangers quasi mortels.

Heureusement, ce torrent de particules galactiques et solaires va encore rencontrer sur sa route vers la Terre deux boucliers supplémentaires, la magnétosphère et l'atmosphère terrestres. La première est délimitée par les lignes du champ magnétique de la Terre qui, du pôle Nord au pôle Sud, dessine une figure en aile de papillon qui s'étend au niveau de l'équateur jusqu'à 60 000 km dans la direction du Soleil et près de 600 000 km à l'opposé. Sur cette vaste structure magnétique, les particules électriquement chargées du rayonnement cosmique, particulièrement sensibles aux champs magnétiques, viennent littéralement rebondir. Dans les régions de l'équateur, la magnétosphère est donc un bouclier presque parfaitement étanche que seul un très petit nombre de particules de très hautes énergies peut franchir. En revanche, comme un parapluie qui laisse l'eau s'écouler sur ses bords, cette magnétosphère est impuissante à arrêter les particules dans toute la région des pôles. Tout au contraire, en les canalisant, elle en augmente la concentration. Cette brèche ouverte dans le bouclier magnétique terrestre est nettement visible dans le ciel lorsqu'on se trouve assez proche des pôles. C'est là que se forment les aurores boréales et australes, illuminations colorées produites par cette pluie concentrée de particules sur la haute atmosphère.

Cette dernière est le tout dernier rempart des hommes contre la pluie cosmique et un des

plus efficaces. La mince couche d'air de quelques dizaines de kilomètres d'épaisseur qui nous sépare de l'espace est tout de même équivalente en masse à un mur d'eau d'environ dix mètres de haut. Un barrage largement suffisant pour arrêter la plupart des rayonnements nocifs. C'est ainsi que même avec le fameux "trou d'ozone" dans l'atmosphère, nous restons presque complètement à l'abri des rayonnements ultraviolet, X ou gamma et également de la majorité des particules à grande vitesse qui circulent dans le cosmos.

C'est pour cette raison que le problème de l'irradiation par les particules cosmiques ne se pose pratiquement pas sur le sol de notre planète. A elles seules, la magnétosphère et l'atmosphère terrestres divisent par plus de 4 000 la dose que nous devrions recevoir ! L'irradiation qui est la conséquence de l'exposition à des rayonnements dits ionisants, c'est à dire suffisamment énergétiques pour pénétrer la matière et détruire la structure des atomes en leur arrachant leurs électrons existe néanmoins sur Terre mais elle est la conséquence de phénomènes purement terrestres, naturels ou artificiels. Elle commence dès que nous sommes en contact avec des sources de rayons X, gamma ou radioactives c'est à dire plus souvent que nous le pensons, lorsque nous subissons une radiographie, un examen de scanner ou que nous vivons ...dans un environnement de granit ! La dose moyenne de radiations à laquelle nous sommes exposés à la surface du globe est estimée à environ 2 à 3 millisieverts (mSv) par an, exprimée dans une unité qui tient compte à la fois de l'énergie des rayonnements et de leurs effets physiologiques (voir encadré). Un peu moins de la moitié de cette dose (40%) résulte de notre exposition à des examens médicaux, à égalité avec des sources naturelles de radioactivité parmi lesquelles la principale est le radon, un gaz radioactif qui s'échappe naturellement de roches riches en uranium comme le granit. Dans ce bilan, les particules cosmiques qui ont réussi à franchir tous les obstacles ont une part très modeste – de moins de 10%-. Le reste est fourni par des matières radioactives naturelles contenues dans les sols, les eaux et dans l'air à la suite des essais atmosphériques d'armes atomiques ou d'accidents comme celui de Tchernobyl.

Mais la formidable protection dont nous bénéficions sur Terre diminue très rapidement dès que nous prenons de la hauteur. Ainsi le passager d'un avion de ligne croisant à l'altitude moyenne de 10 km a traversé près des 3/4 de l'atmosphère. Et la dose qu'il reçoit est multipliée par plus de 100.

Là haut, dans l'atmosphère, le danger vient d'abord principalement des particules secondaires. Elles sont créées lorsque les protons du rayonnement cosmique viennent percuter les atomes d'oxygène et d'azote de l'atmosphère. Parmi la cascade des particules secondaires engendrées, ce sont les neutrons, d'une énergie moyenne d'environ 10 MeV qui sont responsables de 50 à 80% de la dose de radiation. Cette exposition varie fortement lorsque la protection de la magnétosphère ou de l'atmosphère diminue, c'est à dire lorsqu'on se rapproche des pôles ou lorsque l'altitude dépasse 15 km, comme dans le cas du Concorde. En fonction du nombre d'heures passées en altitude, notamment pour le personnel naviguant, la dose moyenne accumulée ainsi peut approcher près de 5mSv par an, soit plus du double du niveau atteint sur Terre.

La haute atmosphère n'est donc pas un lieu très hospitalier. Mais si l'on s'éloigne encore plus de notre cher plancher des vaches, la situation devient nettement plus préoccupante comme c'est le cas en orbite. Cette fois-ci, à quelques 400km d'altitude les spationautes sont très au-dessus de l'atmosphère bien qu'encore sous le parapluie de la magnétosphère. Les détecteurs qui ont été placés à bord du laboratoire spatial américain Skylab en 1972 ou lors des missions Aragatz (1988), Antares (1992) ou Altair (1993) sur

la station russe MIR, enregistrent des taux de radiations cosmiques 1000 fois supérieurs à ceux reçus sur Terre, avec des pics pouvant atteindre 50 000 fois ! La principale cause reste les particules secondaires créées lors de l'impact des particules cosmiques sur l'atmosphère. Une partie d'entre elles, principalement protons et électrons, remonte vers le haut mais elles se trouvent bloquées par la magnétosphère au dessus d'elle. Elles s'accumulent alors autour de la Terre dans ce que les spécialistes appellent les ceintures de radiations. Ces zones sont à éviter à tout prix car il s'agit d'un véritable piège à radiations. Les satellites en orbite basse restent assez bien protégés au dessous d'elles mais ils viennent néanmoins frôler un point chaud de l'irradiation. En effet, comme les pôles magnétiques terrestres sont décalés par rapport aux pôles géographiques, il existe une région critique, qui correspond à un affaissement des ceintures de radiations et qui est située au large des côtes brésiliennes dans une zone baptisée anomalie de l'Atlantique Sud, un véritable triangle des Bermudes pour les radiations. Dans cette région, que la station MIR traverse en quelques minutes seulement, les cosmonautes reçoivent environ 30% de leur dose journalière. Dans l'espace proche, à quelques centaines de kilomètres de la Terre, les conditions sont donc particulièrement rudes puisque la dose maximale admissible sur Terre pour une année entière est atteinte en orbite en ...un jour ! Pour ces hommes qui consentent librement à s'exposer à ces périls invisibles, la norme maximale de référence est actuellement fixée à 500mSv par an, soit...500 fois la norme pour le grand public. Les cosmonautes peuvent donc être considérés comme de véritables cobayes humains, exposés à des risques dont les conséquences à long terme sont encore mal évaluées. Ils ont d'ailleurs été les premiers à signaler un des effets directement sensibles de ces radiations: les yeux fermés, ils enregistrent des éclairs lorsqu'une particule ionisante traverse leur globe oculaire. Les sorties dans l'espace sont des moments où ils sont particulièrement exposés, car leurs scaphandres leur apportent une faible protection. La construction la station spatiale internationale ( ISS International Space Station) qui a commencé en 1998 et qui doit s'achever en 2004 va impliquer 43 vols de navettes avec plus de 1500 heures de sorties extravéhiculaires au moment du maximum du cycle solaire. Le Conseil National de la Recherche américain vient de publier en décembre 1999, un volumineux rapport sur les dangers encourus par les astronautes durant ces sorties dans l'espace. Et il a émis des recommandations précises pour l'installation de dosimètres à l'extérieur de l'ISS afin de prévenir les astronautes en cas d'augmentation significative du niveau de radiations. Le meilleur remède pour limiter les dégâts physiologiques consiste bien sûr à contrôler soigneusement la longueur des missions, ce qui ne pourra pas toujours être fait.

Alors quelle solution choisir lorsque des explorations planétaires humaines vont être envisagées ? Lors d'une mission vers Mars, il faudra rester en continu dans l'espace interplanétaire au moins 2 à 3 ans. Et cette fois-ci en dehors de la magnétosphère. Dans cet environnement, l'augmentation de l'effet des rayons cosmiques est en partie compensée par l'absence des ceintures de radiations mais la dose moyenne attendue est de 500 à 900 mSv par an, selon les estimations, soit pour la durée du voyage l'équivalent de la dose reçue sur Terre en... plus de 400 ans. Comme l'influence de la protection de la bulle solaire s'étend au delà de Mars, cette exposition peut être réduite de 30 à 40% si le voyage a lieu lors du maximum d'activité du Soleil. Mais les doses restent très élevées. Le danger absolu s'appelle ici HZE, pour particules "High Z high Energy". Dans le flux galactique qui traverse le Système solaire, ce sont les protons qui représentent 87 % des particules, mais ils ne sont responsables que de 7 % de l'irradiation. Les noyaux lourds comme le fer, bien que 10000 fois moins abondant, contribuent eux pour plus de 25 % à la

dose totale. Tous les noyaux lourds sont caractérisés par un nombre  $Z$  élevé qui marque le nombre de protons contenus dans le noyau. Plus il est élevé et plus l'énergie déposée est grande, plus les dégâts créés deviennent redoutables. La pénétration d'un de ces noyaux lourds galactiques dans la matière se traduit par une véritable tranchée à l'échelle atomique.

Ces "obus" cosmiques rendent actuellement très difficile la recherche de protections efficaces. Et pour l'instant, ils enferment les ingénieurs dans une quadrature du cercle. Les parois habituelles des satellites sont aussi inefficaces qu'une feuille de papier, mais si on augmente leur épaisseur dans l'espoir de créer un écran, on peut aboutir à une... augmentation de l'irradiation. L'enveloppe atténuée effectivement le flux primaire de particules galactique mais elle constitue également une cible que les particules viennent percuter, bousculant ainsi d'autres noyaux qui produisent des particules supplémentaires. Derrière un écran d'aluminium de 15 mm, la dose est ainsi augmentée de 10% !

Dans l'espace une épaisseur minimale de 30cm d'un métal léger comme l'aluminium est nécessaire pour diminuer au moins de moitié la dose reçue. Un vaisseau spatial d'un volume habitable comparable à celui d'une station orbitale serait alors revêtu d'un blindage dont le poids dépasserait 240 tonnes ! Un chiffre tout à fait astronomique dans un domaine où chaque kilogramme embarqué vaut de l'or. Les agences spatiales essaient donc de réduire cette note prohibitive, donc de diminuer les poids. La Nasa a étudié des blindages actifs à base d'aimants supra conducteurs mais leur efficacité n'a pas pu être démontrée et ils constituent des systèmes complexes dont la fiabilité est incertaine. Comme l'efficacité d'un blindage augmente avec la légèreté du matériau, le composant idéal apparaît l'hydrogène liquide, quatre fois plus efficace que l'aluminium et dix fois plus que le plomb. Or l'hydrogène est également un combustible. La meilleure solution semble donc être un vaisseau interplanétaire où l'espace habitable serait entouré par les réservoirs de carburants et d'eau jouant le rôle d'écrans passifs.

Une fois dans l'espace interplanétaire, les équipages auront à faire face à un danger supplémentaire : les imprévisibles colères du Soleil. Bien que les éruptions majeures capables de produire des doses mettant en danger la vie humaine restent rares, leur probabilité sur plusieurs dizaines de mois n'est plus négligeable. Comme leur durée dépasse rarement un ou deux jours, peut-être faudra-t-il alors concevoir à bord un véritable caisson de survie, espace réduit encore plus fortement blindé dans lequel l'équipage pourra se réfugier à l'annonce de la tempête de radiations.

Cette perspective peu réjouissante nous laisse mieux goûter la situation privilégiée que nous vivons sur Terre. Il est amplement prouvé que l'exposition d'organismes vivants aux radiations intenses entraîne de profonds changements génétiques. La Terre jouit d'une protection renforcée. C'est grâce à elle probablement que notre planète a pu voir s'installer et se développer des formes de vie stables. Mais en a-t-il toujours été ainsi ? Une simple variation dans l'activité solaire, l'intensité des éruptions ou les changements attestés dans l'intensité du champ magnétique terrestre ont pu dans le passé aboutir à des périodes de forte irradiation, sans commune mesure avec ce que nous connaissons aujourd'hui. De tels épisodes ont-ils favorisé la mutation des espèces ? Est-ce là une des clefs cachées de l'évolution ? Dans ce cas, par l'intermédiaire du rayonnement cosmique, la vie devrait aux étoiles non seulement son existence même mais aussi son évolution et sa diversité.

## Le dossier chaud de l'irradiation aéronautique

Tout passager d'un avion de ligne est soumis à une exposition aux radiations cosmiques. A des altitudes allant de 10 à 15 000 m, le niveau des doses d'irradiation par des particules cosmiques est de 100 à 300 fois plus élevé qu'au niveau du sol. Pour les personnels navigants (pilotes, hôtesses, etc...) aussi bien que pour des voyageurs aériens fréquents, la dose cumulée reçue en quelques centaines d'heures de vol peut alors dépasser la moyenne annuelle sur Terre.

Cette situation est connue depuis plusieurs dizaines d'années. Aujourd'hui, elle fait l'objet d'un débat sur les risques réels encourus. Pour évaluer ces risques, une série d'études a été menée, sur des routes très différentes, à bord d'appareils de diverses compagnies aériennes. L'équipe de Jean-François Bottollier-Depois du Département de dosimétrie de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire de Fontenay-aux-Roses a fait des mesures à bord des avions d'Air France grâce à un détecteur baptisé Nausicaa, préalablement développé avec le Centre national d'études spatiales (CNES) pour estimer l'exposition des spationautes. L'appareil est capable de mesurer la dose reçue à l'échelle d'une cellule sous environ un centimètre de tissu biologique. Leurs résultats, en cours de publication dans la revue *Radiation Research*, donne un aperçu très détaillé des doses reçues à l'intérieur d'un avion. "Les routes les plus critiques sont bien sûr les routes transcontinentales polaires et à hautes latitudes telles que le Paris-Tokyo (6,6 microSv/h) et les routes à très haute altitude comme celle du supersonique Concorde (9,2 microSv/h). Pour le personnel aérien ayant une activité annuelle de 700 h de vol transcontinental ou de 300 h sur Concorde, ceci correspond à une dose annuelle totale qui est du même ordre, de 2 à 5 milliSv/an", résume J.-F. Bottollier-Depois. Ces dernières mesures ont été réalisées de 1996 à 1998 en période de minimum solaire qui correspond à un maximum de radiations. Mais elles ne tiennent pas compte des éruptions solaires. Une éruption comme celle de 1956, rare mais violente, aurait à elle seule été responsable d'une irradiation de 10mSv à 10 km d'altitude.

Ces chiffres sont bien sûr à comparer aux nouvelles normes de la Commission internationale de la protection radiologique (CIPR) qui fixe désormais les doses maximales admissibles à 1 mSv/an pour le public et à 100 mSv sur cinq ans pour les travailleurs exposés (jusqu'ici les limites étaient établies à 5mSv/an pour le public et 50mSv/an pour les travailleurs). Une directive européenne de 1996 a fixé au 13 mai 2000 la date limite d'application de ces nouvelles normes. Selon ces chiffres, le personnel navigant doit donc désormais être considéré comme exposés aux mêmes risques que les travailleurs du nucléaire ainsi que... les passagers fréquents. "Nous avons eu le cas extrême d'un passager qui faisait 2000 heures par an !" indique J.-F. Bottollier-Depois. Jusqu'ici, les résultats de ces études ont été peu diffusés auprès du grand public. Mais la situation risque de devenir sensible puisque toute personne amenée par son activité à se déplacer fréquemment en avion est en droit de demander à son employeur indemnités et examens de santé réguliers.

En raison des grandes variations observées selon les routes aériennes et l'activité solaire, la directive européenne et la CIPR recommandent désormais la surveillance systématique de l'exposition aux doses de radiations à bord des avions. Depuis son premier vol, le Concorde est déjà équipé d'un compteur Geiger-Muller qui lui permet de déclencher une alerte orange ou rouge selon que la dose dépasse 0.2mSv ou 0.5mSv par heure. L'avion est alors amené à rejoindre au plus vite une altitude moins élevée. Des détecteurs du

même type que le NAUSICAA devraient être installés périodiquement dans les avions de ligne afin d'estimer les doses réelles reçues.

Selon J.-F. Bottollier-Depois, "un très grand programme baptisé "Sievert" est en projet entre des laboratoires de recherche et la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Il a pour objectif de modéliser le plus exactement possible la répartition des radiations cosmiques selon l'altitude et la position sur le globe. Il devrait permettre une évaluation réaliste sur n'importe quelle route". Les commandants de bord, en plus des prévisions nuageuses, seront alors en mesure de connaître avant leur vol la " météo " des radiations sur leur trajet.

Pour l'instant, l'CIPR a recommandé aux compagnies aériennes d'évaluer l'exposition à bord des avions et d'informer clairement leurs passagers sur les risques encourus. Ce nouvel aspect de santé publique est pris désormais très au sérieux.



## Le dangereux cumul des doses

Les rayons cosmiques et la radioactivité sont cousins germains. Tous deux se manifestent par la production de rayonnement de hautes énergies (X et gamma) et de particules énergétiques qui peuvent traverser plusieurs centimètres de matière et venir déposer une énergie importante au cœur même des cellules. Ils agissent à l'échelle atomique et l'irradiation qu'ils provoquent est totalement invisible et indolore. Leurs effets sur les organismes vivants sont similaires. Les meilleurs éléments disponibles actuellement pour apprécier ces effets sont les études épidémiologiques effectuées sur les survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki et sur les populations exposées lors d'accidents nucléaires comme celui de Tchernobyl.

Les dégâts de l'irradiation dépendent fortement de l'énergie et du type de rayonnement. La mesure de l'effet biologique est obtenue en multipliant la dose reçue par un facteur de "qualité". Il caractérise la nocivité de chaque rayonnement et il va de 1 pour les rayons X et gamma, à 10 pour les neutrons, et 20 pour les noyaux d'hélium. Il est encore plus élevé et très mal évalué pour les noyaux lourds. La dose équivalente reçue est alors exprimée en Sievert (du nom d'un médecin radiologiste suédois).

Pour un être humain, les doses cumulées peuvent varier de 2 millisievert (mSv) par an à la surface du globe, à 50mSv/an en altitude, 500mSv en orbite et atteindre jusqu'à 1000mSv dans l'espace interplanétaire. Une dose de 4000mSv, délivrée en moins de quelques heures, est considérée comme mortelle dans 50% des cas (dose létale 50). 2500 à 3500mSv entraîne la stérilité et 1000mSv une modification majeure de la formule sanguine.

Les conséquences physiologiques de l'irradiation sont néanmoins très différentes selon la répartition de la dose. Une dose unique concentrée est plus nocive qu'une dose répartie dans le temps. L'effet de l'énergie déposée dans le corps humain est principalement une rupture des liaisons chimiques avec notamment des lésions importantes de l'ADN, la molécule en double hélice porteuse au sein des cellules du message génétique. Lorsqu'elle se brise, il peut se produire alors une transformation maligne des cellules, l'apparition de cancers et des perturbations génétiques graves. Les doses élevées entraînent la mort rapide des cellules. En revanche l'effet des faibles doses est encore très mal évalué. Dans certains cas, l'organisme est capable de réparer une partie des dégâts mais si la dose est répétitive ses capacités de réparation deviennent rapidement saturées.

L'absence de statistiques fiables sur les effets à long terme des irradiations cosmiques ou terrestres a conduit la Communauté Européenne à adopter un principe de précaution dit ALARA (As Low as Reasonably Achievable ou aussi bas que raisonnablement possible). La directive 96/29/Euratom applicable le 13 mai 2000 a ainsi divisé par 2.5 la dose annuelle considérée comme admissible pour les personnes directement affectées aux travaux sous rayonnements (industrie nucléaire, radiologie médicale) et par 5 pour le grand public.

### **A l'abri en sous-sol**

Le danger de l'exposition aux radiations est maximal pour un vaisseau cosmique exposé sur toutes ses faces durant un voyage interplanétaire. Il ne disparaît pas par miracle une fois arrivé sur des astres comme la Lune ou sur Mars mais il est au moins divisé par deux grâce à l'écran que constitue vers le bas la planète elle-même. En revanche, comme ni Mars, ni la Lune n'ont de magnétosphère notable, il n'existe aucun autre bouclier naturel. La planète rouge a tout de même une atmosphère ténue, mais celle-ci constitue un écran environ cinquante fois moins épais que l'atmosphère terrestre, tout juste équivalent à environ 20cm d'eau.

En l'absence de protections naturelles aussi efficaces que sur Terre, les doses de radiation restent très élevées. Pour construire des bases aux parois suffisamment épaisses afin d'arrêter ces radiations nécessiterait des quantités très importantes de matériaux. La meilleure solution est donc de s'enterrer et d'utiliser les roches comme bouclier. Des scientifiques du National Research Laboratory de Washington (USA) ont évalué que pour ramener l'exposition à des niveaux encore 2 à 3 fois plus élevés que sur Terre, il faudra enterrer les bases permanentes sous une épaisseur d'au moins trois mètres de sol lunaire ou martien et de plus de dix mètres pour retrouver une dose comparable à celle reçue sur Terre. Une solution absolument indispensable pour une villégiature de longue durée où on ne risquera pas d'apprécier le paysage !.

### **Les satellites vulnérables**

L'irradiation cosmique peut induire des pannes dans les satellites qui évoluent pendant des années hors de la protection atmosphérique. De plus, la miniaturisation croissante des circuits électroniques les rend de plus en plus sensibles. Résultat : Les ingénieurs qui construisent les véhicules spatiaux sont obligés de prendre en compte dès leur conception la contrainte due aux radiations. Depuis le début des années 70, les incidents liés aux particules cosmiques sont bien connus. La sonde Pioneer 10 a, par exemple, été perturbée par les radiations autour de Jupiter. Un des instruments mesurant le plasma jovien a eu un fonctionnement anormal, ce qui laissait imaginer qu'une série de mauvaises commandes avait été passée depuis la Terre alors que le problème a été provoqué dans un composant électronique particulièrement sensible aux radiations. Cela n'a cependant pas empêché cette sonde de fonctionner pendant encore 25 ans, jusqu'au 31 mars 1997, date à laquelle son dernier message a été reçu. Plus récemment le satellite d'observation X Chandra, mis en orbite le 22 juillet 1999 a vu la sensibilité de ses caméras de type CCD diminuer sensiblement en quelques jours par l'impact des protons des ceintures de van Allen dont les effets avaient été sous-estimés. L'observatoire solaire Soho (Solar and Heliospheric Observatory) qui a été lancé le 2 décembre 1995 observe quant à lui le Soleil en continue à 1,5 millions de kilomètres de la Terre dans la direction du Soleil. Hors de la magnétosphère terrestre, il subit de plein fouet le bombardement du rayonnement cosmique galactique et des éruptions solaires comme celles du 5 février dernier ou du 6 novembre 1997. Durant de tels événements les données scientifiques sont fortement perturbées et les systèmes électroniques soumis à rude épreuve. Ces systèmes ont subi un traitement spécial pour les rendre moins sensibles aux radiations, les "durcir". S'ils étaient conçus comme nos ordinateurs de bureau, leur durée de vie n'excéderait pas quelques jours !