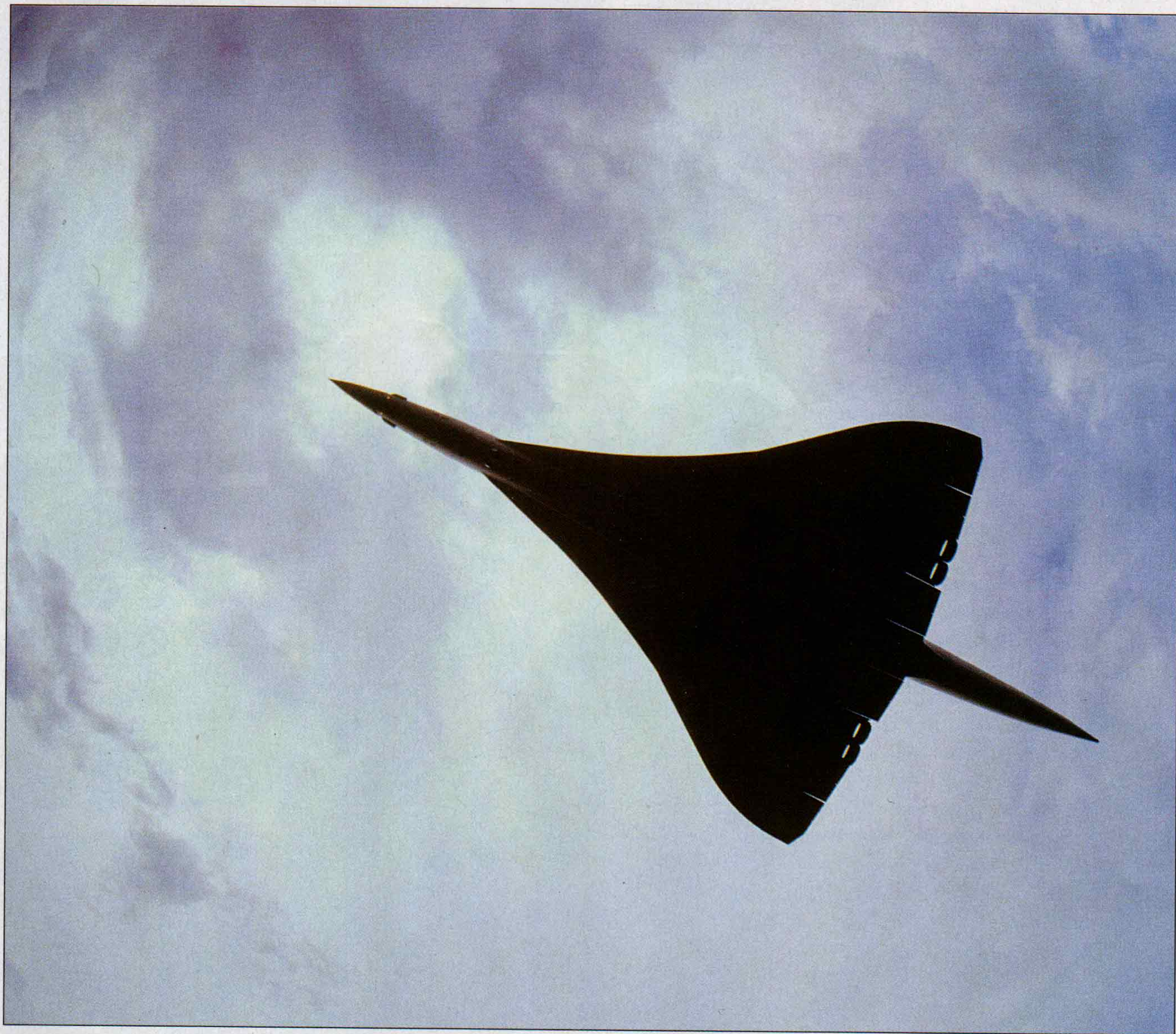


LES RADIATIONS COSMIQUES



En ce mois de mai où tout pilote privé voit le retour des jours plus longs et des cieux moins menaçants et reprend l'air avec un enthousiasme nouveau, un discret texte de loi peut faire froid dans le dos.

Le 13 mai 2000, entrera définitivement en application la directive 96/29 de l'Euratom, la communauté européenne de l'atome, qui range désormais le personnel navigant (pilotes, hôtesse, stewards...) dans la classe très restreinte et peu enviable des travailleurs exposés aux radiations, c'est-à-dire dans la même catégorie que... les travailleurs de l'éner-

gie nucléaire soumis aux effets dangereux des matières radioactives!

Le texte adopté par l'ensemble des pays de l'Euratom spécifie que «l'évolution des connaissances scientifiques en matière de radioprotection a amené le conseil de l'Union Européenne à arrêter la directive 96/29/Euratom du 13 mai 1996 qui fixe les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants que les Etats membres ont l'obligation de transposer en droit national avant le 13 mai 2000»

Pourquoi les pilotes sont-ils concernés? Quel rapport y a-t-il entre l'aéronautique et ces inquiétants rayonnements ionisants, terme technique qui désigne l'ensemble des radiations émises par les matières radioactives telles que le combustible et les déchets nucléaires utilisés dans les centrales du même nom? Comment l'évolution tranquille d'un avion dans un ciel pur peut-il être comparable en quoi que ce soit à l'univers à haut risque des centrales atomiques?

Derrière un texte à la froideur toute technocratique, se cache en réalité une réévaluation complète d'un danger sour-



nois et totalement invisible, celui des rayons cosmiques.

Paradoxalement, ce risque qui menace le personnel navigant en général et jusqu'à chacun de nous lorsqu'il emprunte trop fréquemment les lignes aériennes n'a rien d'une nouvelle bavure écologique. C'est au contraire un phénomène tout ce qu'il y a de plus naturel et même de très

esthétique. Tous ceux qui ont pu visiter le nord du Canada ou les hautes latitudes en général ont pu admirer ce spectacle inoubliable des aurores boréales, nuages colorés qui illuminent la nuit et évoluent lentement comme des draperies colorées en constante agitation. Ces aurores sont la conséquence étonnante d'une pluie incessante de particules de très hautes

énergies qui voyagent dans l'espace à une vitesse souvent proche de celle de la lumière et viennent percuter la haute atmosphère de la Terre de plein fouet. Ce flot de particules qu'on désigne improprement sous le nom de « rayonnement cosmique » (il s'agit en fait majoritairement de particules de matière et non de rayonnement, terme réservé à toutes les



formes de lumière) provient du Soleil mais également de régions incroyablement lointaines de la galaxie. On estime en effet que les particules les plus énergétiques sont produites lors d'explosions d'étoiles qui peuvent être situées à des centaines voire des milliers d'années-lumière! Ce sont ces particules issues des étoiles, auxquelles s'ajoutent également

celles produites par le Soleil, lors de ses plus violentes éruptions, qui constituent un péril absolu pour l'homme. A cause de leur vitesse phénoménale, chacune d'elles est en effet un projectile particulièrement redoutable, capable de traverser jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres d'un blindage métallique!

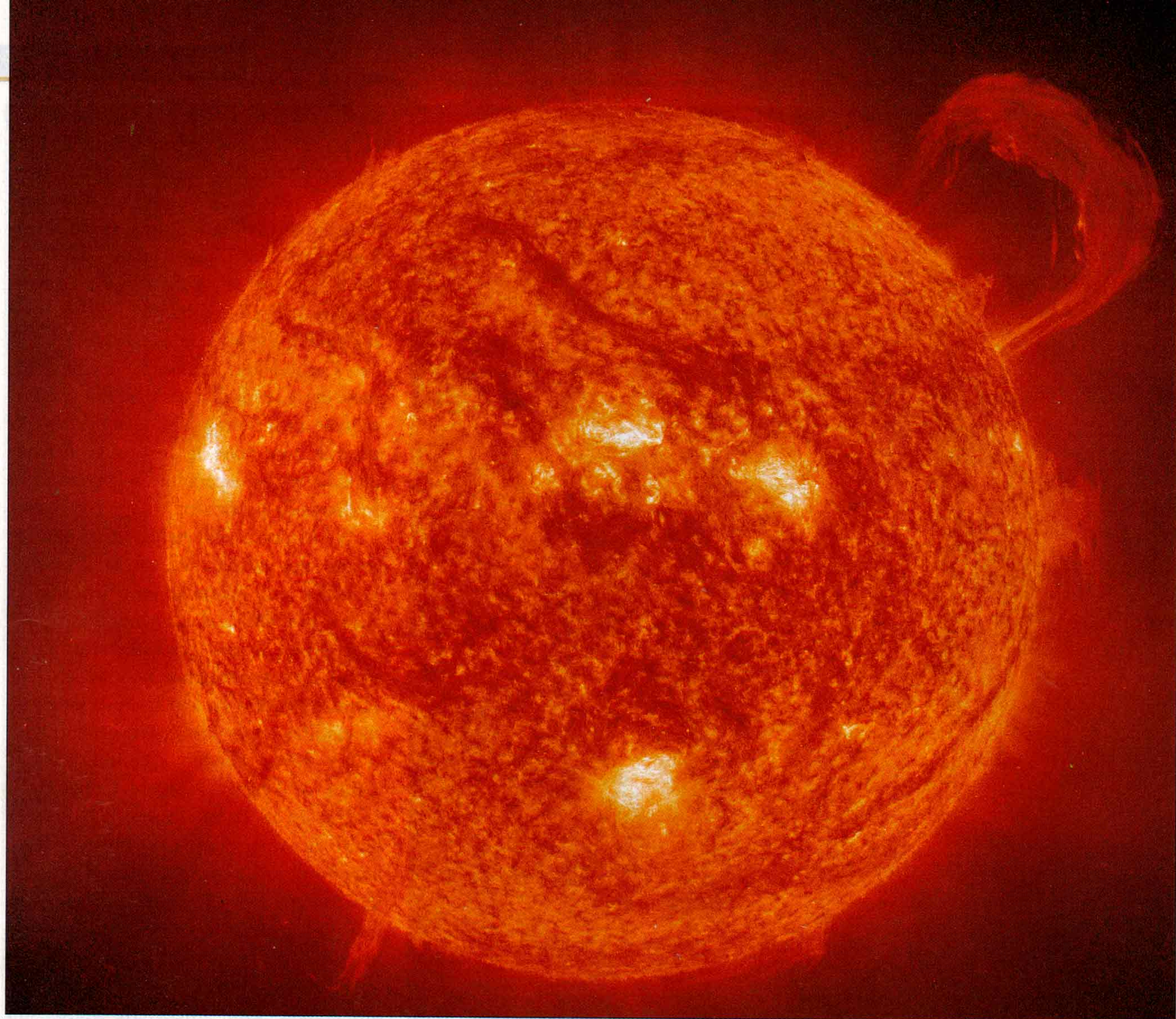
La menace n'est pas nouvelle, elle est

même connue depuis plus de trente ans et aurait pu être à l'origine d'un film catastrophe bien pire qu'Apollo 13. En 1972, eurent lieu les deux dernières missions lunaires durant lesquelles des astronautes ont bondi joyeusement sur le sol de la Lune, protégés du vide de l'espace par leur mince scaphandre. En avril ce fut Apollo 16 puis en décembre, Apollo 17. Cette même année, le 4 août, soit juste entre les deux missions, une phénoménale éruption solaire comme il s'en produit une tous les dix ans environ, expédia dans l'espace interplanétaire des milliards de particules.

Si l'éruption avait eu lieu lors d'une des sorties des astronautes sur la Lune, ils auraient été mortellement irradiés et même à l'intérieur de leur capsule spatiale, l'exposition à ces particules cosmiques aurait eu une influence notable sur leur santé, transformant leur formule sanguine et modifiant leur patrimoine génétique.

Le même danger a conduit dès le début de l'exploitation de Concorde à mettre en place un dispositif d'alerte à bord du supersonique. Depuis son premier vol, un compteur Geiger-Müller, instrument du même type que celui utilisé pour évaluer la radioactivité, mesure en permanence le taux de particules qui traverse la carlingue. Si ce taux dépasse un certain seuil, une alerte orange ou rouge est déclenchée selon le niveau mesuré et une procédure spéciale est appliquée pour ramener au plus vite l'avion à une altitude moins élevée

On l'aura compris, l'altitude joue un rôle primordial dans l'exposition aux risques des rayons cosmiques. Sous les averses de particules, la planète Terre est en effet particulièrement bien protégée par un rempart naturel, son atmosphère. Cette couche d'air d'une épaisseur de plusieurs dizaines de kilomètres qui entoure notre planète nous fournit l'oxygène que nous respirons mais nous sert aussi de bouclier. La masse d'air qui est au-dessus de nos têtes est en effet équivalente à un mur d'eau de dix mètres d'épaisseur! Voilà de quoi amplement faire barrage à la pluie cosmique. Grâce à cela, au niveau du sol nous restons bien à l'abri. La dose de rayons cosmiques est réduite par 4 000 et c'est heureux sinon la vie aurait probablement disparue depuis longtemps



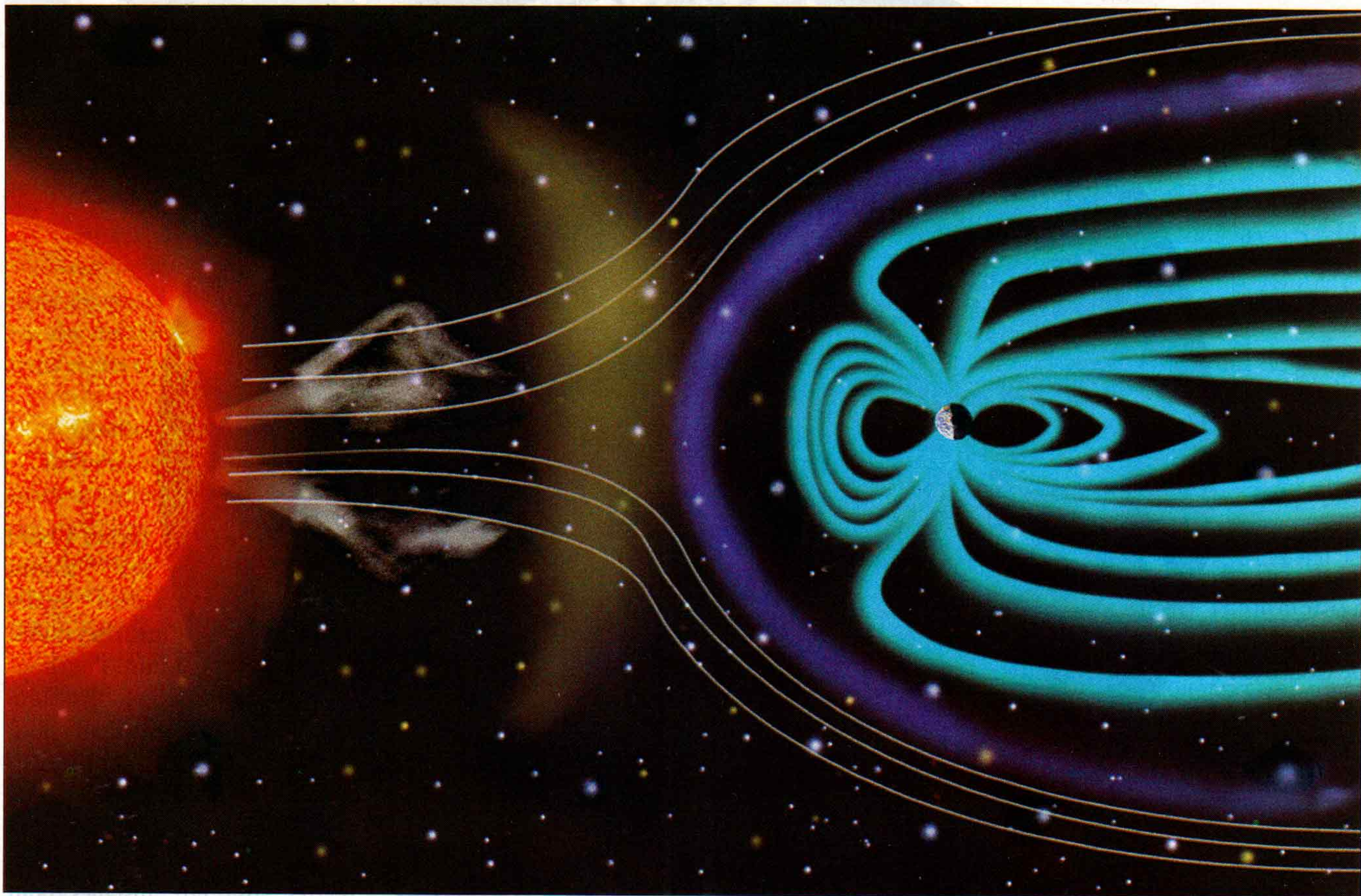
Tout change en revanche lorsqu'on prend l'air. Progressivement avec l'altitude, le matelas d'air au-dessus de nos têtes diminue et la douche des particules cosmiques devient de plus en plus torrentielle. L'aggravation est d'abord très lente puis de plus en plus rapide car l'atmosphère est de moins en moins dense lorsque l'altitude augmente. Dans les basses couches, l'augmentation est faible, la dose est tout juste doublée pour un avion de tourisme évoluant au niveau 65. A plus hautes altitudes, on considère approximativement que la masse d'air diminue de moitié tous les 5000 m (16500 pieds) et que la dose d'irradiation cosmique correspondante est multipliée par dix à chaque fois. Un avion au niveau de vol 165 (5000 m) reçoit donc une dose dix fois plus élevée que celle reçue au niveau de la mer et arrivé au niveau 330 (10000 m), la dose est multipliée par 100. Au delà, l'augmentation est un peu plus lente et au niveau 500 (15000 m), celui de Concorde, la dose

est trois cent fois plus élevée que sur Terre. L'exposition est bien sûr similaire pour les lieux de haute altitude de la planète comme la ville de La Paz (3700 m), le Mont-Blanc ou l'Everest. Les sommets du Mont-Blanc et du Pic du Midi dans les Pyrénées ont d'ailleurs hébergé dans la première moitié du 20^e siècle, des observatoires astronomiques en grande partie consacrés à l'étude des rayons cosmiques sous la direction des physiciens français Louis Leprince-Ringuet et Pierre Auger.

Rayons cosmiques. Quels sont donc les véritables risques que l'on prend à évoluer à haute altitude? Depuis plusieurs dizaines d'années on s'interroge sur les effets à long terme de cette exposition à des radiations aussi agressives. A la différence des rayonnements ultraviolets UV dont on peut se protéger facilement grâce à des verres filtrants ou des couches protectrices, les rayons cosmiques qui incluent particules et rayonnement de très hautes énergies X et gamma, sont

incroyablement pénétrants. Verrière ou carlingue, rien n'y fait, ces particules sont tellement énergétiques qu'elles traversent aisément ces protections illusoires. Le corps humain est donc particulièrement exposé. Alors que le rayonnement UV a une action superficielle et peut être à l'origine de cancers de la peau, les rayons cosmiques ont une action profonde qui affecte l'organisme en entier et irradie les organes les plus sensibles.

Leurs effets sont similaires à ceux de la radioactivité. Des matières radioactives, comme l'uranium ou le radium par exemple, émettent spontanément des radiations également sous forme de particules et de rayonnement X et gamma. Une exposition à une dose concentrée très forte est évidemment mortelle. Les exemples de mort radioactive restent heureusement limités aux victimes des bombes atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki et aux 31 pompiers qui ont été contaminés lors de leur intervention sur le cœur radioactif de la centrale de



Tchernobyl. Les effets de doses plus faibles et plus réparties dans le temps sont en revanche beaucoup moins connus. Les études en laboratoire sur des animaux et des victimes d'expositions accidentelles laissent néanmoins présager une augmentation notable des cancers et des modifications génétiques. Les radiations parviennent en général à briser la molécule d'ADN, porteuse du message génétique. L'organisme est capable de réparer certaines lésions mais si la dose atteint un seuil ou si elle est répétitive, les capacités de défense de l'organisme sont saturées et les lésions persistent, entraînant une reproduction anormale des cellules.

Evaluer les doses. A quels niveaux ces radiations deviennent-elles dangereuses pour l'homme? C'est la question à laquelle tente de répondre aujourd'hui la nouvelle directive européenne de l'Euratom. Pour cela, il fallait tout d'abord évaluer les doses reçues en fonction de leurs effets physiologiques. L'unité retenue a été baptisée Sievert, du nom d'un célèbre radiologiste suédois. Elle tient compte non seulement de l'énergie des radiations reçues mais également de leur

faculté de pénétration et de la manière dont elle dépose leur énergie dans les différents organes du corps humain. La directive européenne fixe la norme en matière de dose limite à la fois pour le grand public et pour les travailleurs dits «exposés». Sa nouveauté est d'avoir réduit considérablement la dose limite cumulée en la fixant à 1 millisievert par an (1 mSv/an) pour le grand public (au lieu de 5 mSv/an auparavant) et à 100 mSv sur cinq ans, soit une moyenne de 20 mSv/an (au lieu de 50 mSv/an) pour les travailleurs exposés.

Le principe qui a guidé ces recommandations est un principe de précaution appelé par les Anglo-Saxons ALARA pour «As Low As Reasonably Achievable», soit «aussi bas que raisonnablement possible» c'est-à-dire un souci de maintenir les risques à un niveau minimal acceptable économiquement.

La surprise vient de la comparaison de ces chiffres avec les doses mesurées en altitude à bord des avions de ligne. Ces mesures ont été réalisées sur les appareils de plusieurs compagnies et sur différentes routes aériennes depuis une dizaine d'années. En France, les relevés ont été effectués par le service de dosimétrie du Com-

missariat à l'énergie atomique (CEA) sur les avions d'Air France lors de deux campagnes en 1991-1992 et 1996-1998. L'instrument utilisé, baptisé NAUSICAA avait été développé en collaboration avec le Centre national d'études spatiales (Cnes), initialement pour mesurer les risques encourus par les spationautes en orbite. Il était placé dans le pont supérieur des Boeing 747 et dans la cabine du Concorde et enregistrait les doses reçues tout au long de vols longs courriers.

Vols tests. Parmi les vols tests retenus le Paris-New York du Concorde et les vols Paris-Tokyo par la route sibérienne, Paris-San Francisco et Buenos Aires-Paris. Les différents vols étaient représentatifs de routes à hautes latitudes près des pôles (Tokyo) aussi bien que proches de l'équateur (Buenos Aires). A cause du phénomène d'aurores boréales qui trahit une concentration des particules cosmiques par le champ magnétique terrestre autour des pôles, une différence notable des doses est attendue selon la latitude. La dose enregistrée est effectivement de 4,3 microsievert par heure ($\mu\text{Sv/h}$) pour le vol Buenos Aires alors qu'elle atteint 6,6 $\mu\text{Sv/h}$ pour celui de



Tokyo. Le maximum est évidemment atteint à bord de Concorde qui croisant à une altitude moyenne de 15 000 à 15 400 m reçoit environ 9,7 $\mu\text{Sv/h}$. Néanmoins, en raison des durées de vols très différentes, la dose totale par voyage est plus faible pour Concorde (35 μSv pour 3,6 h de vol) et maximale pour Tokyo (76 μSv pour 11,5 h de vol).

Avec tous ces chiffres, il n'est pas besoin d'avoir fait les Olympiades de mathématiques pour se rendre compte que pour le personnel navigant qui peut effectuer 700 h par an sur des avions subsoniques, la dose annuelle reçue atteint alors de 3 à 5 millisievert et pour 300 h de vol sur le Concorde, elle est de 2,8 millisievert. Ces doses sont supérieures à la dose limite (1 millisievert) admise pour le grand public par la directive européenne. Le personnel navigant, mais aussi les passagers assidus des lignes aériennes qui effectuent un nombre élevé d'heures de vol, passent donc de facto dans la catégorie des personnes « exposées ». La fameuse dose limite est dépassée au bout de 100 h de vol sur Concorde soit 14 aller-retours Paris-New York dans l'année ou de 150 h sur le vol Paris-Tokyo soit 13 aller-retours. Pour le pilote privé en revanche, il lui faudrait pour accumuler la dose fatidique passer plus de 10 000 h de vol par an à 6 500 pieds, soit plus d'heures qu'il n'y a dans une année!

Quelles vont être les conséquences du dépassement de cette dose limite? Il faut

se garder d'être inutilement alarmiste. En dehors du rayonnement cosmique, nous sommes tous également soumis à des radiations d'origine terrestre, naturelles ou artificielles. Les principales sources sont les examens médicaux que nous sommes amenés à passer (radiographies ou scanners) et également la faible radioactivité naturelle des sols. Ces sources nous imposent une dose annuelle évaluée à environ 2 millisievert par an. Le vol à altitude revient donc à doubler cette dose moyenne.

Surveillance régulière. Les dangers réels et les conséquences de l'augmentation de la dose n'ont pas encore été évalués mais des dangers potentiels existent et imposent une surveillance régulière étant donné le développement important du transport aérien. La commission internationale de la protection radiologique (CIPR) a donc émis des recommandations pour que désormais les compagnies aériennes portent clairement à la connaissance du public l'existence de ce risque des radiations et que les doses

reçues à bord des avions soient également évaluées. Mais l'enthousiasme est loin d'être grand pour ce genre un peu particulier de campagne de communication. Dans un premier temps, des dosimètres vont être installés pour effectuer des mesures dans les carlingues, mais à terme ces doses pourraient être calculées précisément à l'aide d'un modèle mathématique.

Un grand programme international baptisé « Sievert » est en cours de signature entre des laboratoires de recherche et la Direction générale de l'Aviation civile (DGAC). Il a pour objectif de calculer le plus exactement possible la répartition des radiations cosmiques selon l'altitude et la position sur le globe. Il devrait permettre alors une évaluation réaliste des doses sur n'importe quelle route. Les données réelles sur le flot des particules cosmiques seront actualisées en temps réel et accessibles à partir d'un terminal d'ordinateur.

Dans un proche avenir, les commandants de bord seront donc en mesure, en plus de leur dossier météo classique, de recueillir ainsi avant leur vol les paramètres importants de la météo cosmique, évitant le cas échéant de décoller lors d'une éruption solaire. Nous sommes ainsi petit à petit en train de découvrir cette interaction complexe de la Terre avec l'espace.

J-M. BONNET-BIDAUD
(Photos Alain Ernoult et Nasa)