

Climat chaud et aride du Permo-Trias

Durant cette période qui s'étend de 290 à 210 millions d'années, le Gondwana est intégré au supercontinent de la Pangée, qui regroupe l'ensemble des continents et qui est entouré par un océan unique dénommé Panthalassa. La croûte continentale conduisant mal la chaleur géothermique, celle-ci s'accumule à sa base. La Pangée est soulevée, les zones côtières y sont étroites, les mers intérieures sont rares. Cette massivité engendre un climat aride, sauf dans les zones côtières baignées par l'océan périphérique. À côté des charbons, qui persistent jusqu'au Permien inférieur, les roches caractéristiques du Permo-Trias sont des grès éoliens qui conservent parfois des structures d'anciennes dunes, des grès ou argilites rouges et des évaporites.

Les superficies occupées par les évaporites du Permo-Trias sont les plus importantes de toute l'histoire de la terre. Les évaporites se déposent lorsque le taux d'évaporation est supérieur à la hauteur des précipitations, conditions que l'on rencontre dans les déserts chauds, mais aussi dans certains déserts froids, ces derniers étant toutefois rares. Ce sont des roches exceptionnelles. Elles ne nécessitent aucun apport détritique extérieur, ne font appel à aucune intervention biologique ; en général, elles précipitent directement à partir de l'eau de mer. Il faut évaporer 80 pour cent de l'eau de mer pour précipiter du gypse (sulfate de calcium), 90 pour cent pour l'halite (chlorure de sodium), qui est de loin le sel marin le plus abondant, et quasi 100 pour cent pour les sels de magnésium et de potassium. Dans certains bassins sédimentaires, les évaporites du Permo-Trias, avec de minces intercalations d'argilites noires, atteignent 1 500 mètres d'épaisseur. Pour précipiter une telle épaisseur d'évaporites, il faudrait imaginer des bassins profonds de 1 500 kilomètres entièrement remplis d'une eau contenant 35 grammes de sel au litre. Cela est bien sûr impossible. Il faut faire intervenir une recharge en eau salée assurée par des entrées marines périodiques.

Les grès et les argilites rouges sont des faciès continentaux colorés par de très petites quantités (0,1 pour cent) d'oxyde de fer ferrique (Fe^{+++}). Ce fer provient de l'altération de minéraux comme des amphiboles et des pyroxènes ferrifères ou de la biotite. Les

couches rouges se forment en abondance sous des climats tropicaux à saisons contrastées et dans les zones semi-désertique à désertique où les oxydes de fer sont libérés. Dans le Permo-Trias, l'association couches rouges-grès éoliens-évaporites est caractéristique d'un climat chaud et semi-aride. L'abondance des évaporites atteste de précipitations, réduites mais non nulles.

À la limite Permien et Trias se situe l'une des crises biologiques les plus dramatiques de l'histoire du Globe : 75 à 80 pour cent des espèces vont disparaître. En mer, trilobites, tétracoraliaires, fusulines, entre autres, disparaissent à jamais, alors que les brachiopodes, les bryozoaires et les crinoïdes sont décimés.

Extrême stabilité du Gondwana

La séquence type du Gondwana que nous venons d'examiner est, pour le géologue européen, surprenante. Elle dure longtemps, environ 200 millions d'années (360-150 millions d'années), est essentiellement continentale et peut être identifiée sur cinq continents, où elle couvre de vastes surfaces. Elle traduit une durable stabilité du Gondwana. On est loin de la stratigraphie européenne complexe et rythmée par les incessants va et vient de la mer et par les échos des déformations successives qui conduisent à la surrection de la chaîne hercynienne.

Le méga-continent du Gondwana est né autour de 600 millions d'années, alors que la séquence sédimentaire gondwanienne qui le caractérise s'est déposée entre 360 et 150 millions d'années. Que se passe-t-il durant la période 600-360 millions d'années ? De vastes bassins cratoniques stables se forment. Les caractères de la sédimentation y dépendent d'une compétition entre la lente montée du méga-continent et les variations du niveau marin. Les hauts niveaux marins déposent des séquences marines peu profondes. Lors des bas niveaux s'accumulent des séquences continentales. La vitesse de sédimentation reste faible (un peu plus de dix mètres par million d'années pour le Paléozoïque inférieur du bassin africain de Taoudeni), traduisant un relief arasé, une subsidence réduite. La longévité du Gondwana contredit quelque peu la notion de cycle des supercontinents, qui prédit qu'une

masse continentale étendue ne peut survivre plus de 100 millions d'années, l'accumulation de chaleur à sa base aboutissant à l'ouverture de rifts précurseurs des océans. Le Gondwana traverse, quasi intouché, 400 millions d'années. Il constitue un méga-continent surélevé où les sédiments continentaux abondent. En position polaire durant le Carbonifère supérieur et le Permien inférieur, il va être le cadre idéal pour le développement de la plus grande glaciation continentale que le Globe ait connue.

Localisation des coupures ?

La localisation des zones précises des coupures, lors de la fragmentation du Gondwana à partir de 170 millions d'années, reste énigmatique. Les zones d'ouverture océanique recoupent indifféremment les chaînes panafricaines et les cratons précambriens, sauf dans le cas de l'Atlantique Sud, dont l'ouverture est guidée par l'orientation d'un chapelet de chaînes panafricaines. Dans la dispersion du Gondwana, l'héritage tectonique semble peu important : l'orientation des dorsales des océans actuels paraît souvent indépendante des structures montagneuses panafricaines.

Roland TROMPETTE est chercheur CNRS au CEREGE (Centre Européen de Recherches et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement), Université d'Aix-Marseille III, Europôle méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence Cedex 04.

A. BLIECK, J. FERRIÈRE et M. WATERLOT, *Une mise au point sur la géologie des continents issus du Gondwana*, in *Ann. Soc. Géol. du Nord*, 3, 2^e série., pp. 41-63, 1994.

J.C. CROWELL, *Gondwana Glaciation, Cyclothem, Continental Positioning and Climate Change*, in *American Jour. Sci.*, 278, pp. 1345-1372, 1978.

R. TROMPETTE, *Geology of Western Gondwana (2 000-500 Ma)*, Balkema, 350 pages, 1996.

R. UNRUG, *Geodynamic Map of Gondwana Supercontinent Assembly*, Publ. Council for Geoscience, Pretoria, South Africa and Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 1996.

M. de WIT, M. JEFFERY, H. BERGH et L. NICOLAYSEN, *Geological Map of Sectors of Gondwana Reconstructed to their Position ~150 Ma*, Publ. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, USA, 1988.

La pollution spatiale

NICHOLAS JOHNSON

Les nombreux objets mis en orbite autour de la Terre, en même temps que des satellites, menacent aujourd'hui la sécurité des missions spatiales.

En juillet 1996, le mâât du satellite militaire français *Cerise* a été percuté à près de 54 000 kilomètres-heure par un fragment d'une fusée européenne qui avait explosé dix ans plus tôt. Les contrôleurs du satellite ont heureusement réussi à le conserver en état de marche. C'était la première collision accidentelle connue entre deux gros objets envoyés par l'homme en orbite autour de la Terre.

En février 1997, lors de la deuxième mission de maintenance du *Télescope spatial Hubble*, la navette *Discovery* a manœuvré pour éviter un fragment de fusée dont la trajectoire s'approchait à moins de 1,5 kilomètre. Les astronautes ont aussi remarqué des perforations sur l'équipement de *Hubble* et un trou dans l'une de ses antennes, qui aurait été percé lors d'une collision avec un débris spatial avant 1993.

Depuis 40 ans, plus de 20 000 tonnes de matériaux ont été mis en orbite autour de la Terre. Il en reste aujourd'hui 4 500, réparties surtout entre près de 10 000 objets détectables par les radars et par les télescopes militaires ; seulement cinq pour cent de cette masse correspondent aux satellites opérationnels. Des millions de débris plus petits circulent aussi entre quelques centaines de kilomètres et plus de 40 000 kilomètres d'altitude.

S'ils se déplaçaient en ordre, comme les cailloux et les glaçons qui tournent à peu près tous à la même vitesse dans les anneaux de Jupiter et de Saturne, ces satellites artificiels de la Terre formeraient un bel ensemble, mais ils semblent plutôt se mouvoir dans des directions aléatoires, telles des abeilles dont on aurait dérangé la ruche. Leur densité est encore assez faible selon les normes terrestres, mais leurs mouvements désordonnés conduisent à des vitesses relatives qui peuvent atteindre 60 000 kilomètres-heure. À ces vitesses, un satellite serait détruit par une collision avec un caillou de un centimètre

de diamètre, et même un grain de un millimètre l'endommagerait gravement.

Les débris en orbite sont variés : satellites hors d'usage, étages de fusées abandonnés, déchets de lancements, morceaux de satellites disloqués, rejets de fusées à combustible solide, matériaux de surface arrachés et, même, gouttelettes issues de réacteurs nucléaires. Des objets ont aussi été délibérément lâchés dans l'espace : en mai 1963, une expérience de télécommunications du ministère américain de la Défense consistait à larguer 80 paquets d'épingles ; la pression de radiation exercée par la lumière solaire devait étaler les 400 millions de minuscules épingles, mais une défaillance du système de déploiement eut pour résultat de les regrouper sur des orbites jusqu'à 6 000 kilomètres d'altitude.

Pendant les 25 premières années de l'ère spatiale, les responsables du lancement des satellites se sont peu occupés de ces débris. Aujourd'hui, les incidents se multiplient. Ainsi, la navette spatiale manœuvre de temps en temps, nous l'avons vu, pour esquiver de gros débris et, en moyenne, une fenêtre sur huit doit être remplacée après chaque mission en raison des impacts de poussières. Les ingénieurs qui programment les missions tiennent désormais compte des risques d'impacts : comme les débris frappent plutôt dans le plan de l'orbite de la navette, de 30 à 45 degrés à gauche et à droite de la direction du mouvement, les surfaces les plus sensibles de la navette sont placées dans d'autres directions chaque fois que les opérations à réaliser le permettent.

Tous les engins spatiaux sont aussi à la merci d'objets de un à dix centimètres de large, assez grands pour en perforer les parois, mais indécélérables pour les systèmes terrestres de surveillance, car trop petits. Le risque qu'un satellite soit ainsi percuté pendant sa durée de fonctionnement est encore

faible, mais il augmente inexorablement. La collision de *Cerise* a créé très peu de débris supplémentaires, mais une collision de ce type pourrait produire des milliers de fragments assez grands pour pulvériser d'autres satellites qui produiraient à leur tour des fragments, et ainsi de suite. Ce type de réaction en chaîne pourrait devenir la principale source de débris en orbite terrestre.

Des débris variés

Les déchets spatiaux les plus gros sont d'anciens satellites : sur les 4 800 satellites placés en orbite, environ 2 400 y sont encore. Les autres sont retombés dans l'atmosphère terrestre, car celle-ci est assez dense jusqu'à 1 500 kilomètres d'altitude pour ralentir les objets en orbite : perdant de l'énergie, ceux-ci retombent vers la Terre selon une spirale décrite de plus en plus vite (le frottement augmente avec la vitesse et avec la densité de l'atmosphère). Sur ces 2 400 satellites restants, 75 pour cent ont terminé leur mission et ont été abandonnés. La plupart pèsent entre un kilogramme et 20 tonnes.

Ensuite, la mise sur orbite d'un satellite est accompagnée de celle de un ou de plusieurs étages de propulsion vides : au début de 1998, environ 1 500 de ces objets inutiles tournaient au-dessus de nos têtes. Ainsi, le lancement du satellite météorologique japonais *Himawari 3*, en 1984, a mis en orbite trois étages de fusée : un en orbite basse, entre 170 et 535 kilomètres d'altitude ; un près de la destination du satellite, l'orbite géosynchrone circulaire, à 35 785 kilomètres ; et un sur une orbite intermédiaire très

1. DES ÉCROUS, DES BOULONS, DES COLLIERS ET DES BOUTS DE FILS sont aujourd'hui sur les mêmes orbites que les satellites. Des radars et des télescopes militaires surveillent les objets les plus gros (dans le cartouche de droite, les points blancs qui représentent ces objets ne sont pas à l'échelle).



NTT Kanam Sciences Corporation



elliptique entre 175 et 36 720 kilomètres. Deux de ces morceaux de fusée sont heureusement retombés sur la Terre depuis, en 1984 et en 1994, se consumant dans l'atmosphère.

En plus des satellites et des étages de fusées, des petites pièces ont régulièrement été éjectées dans l'espace : boulons explosifs, colliers de serrage et ressorts libérés lors de la séparation des satellites et de leurs lanceurs, couvercles de capteurs ou dispositifs de contrôle d'attitude largués après l'arrivée sur l'orbite. Une série de missions spatiales russes ont ainsi rejeté chacune plus de 60 objets sur diverses orbites.

Les vols habités produisent aussi des débris. En 1965, au cours de la première sortie dans l'espace d'un Américain, l'astronaute de *Gemini 4* Edward White a perdu un gant, qui a ensuite dérivé à 28 000 kilomètres-heure. Plus de 200 objets, principalement des sacs-poubelle, ont aussi été

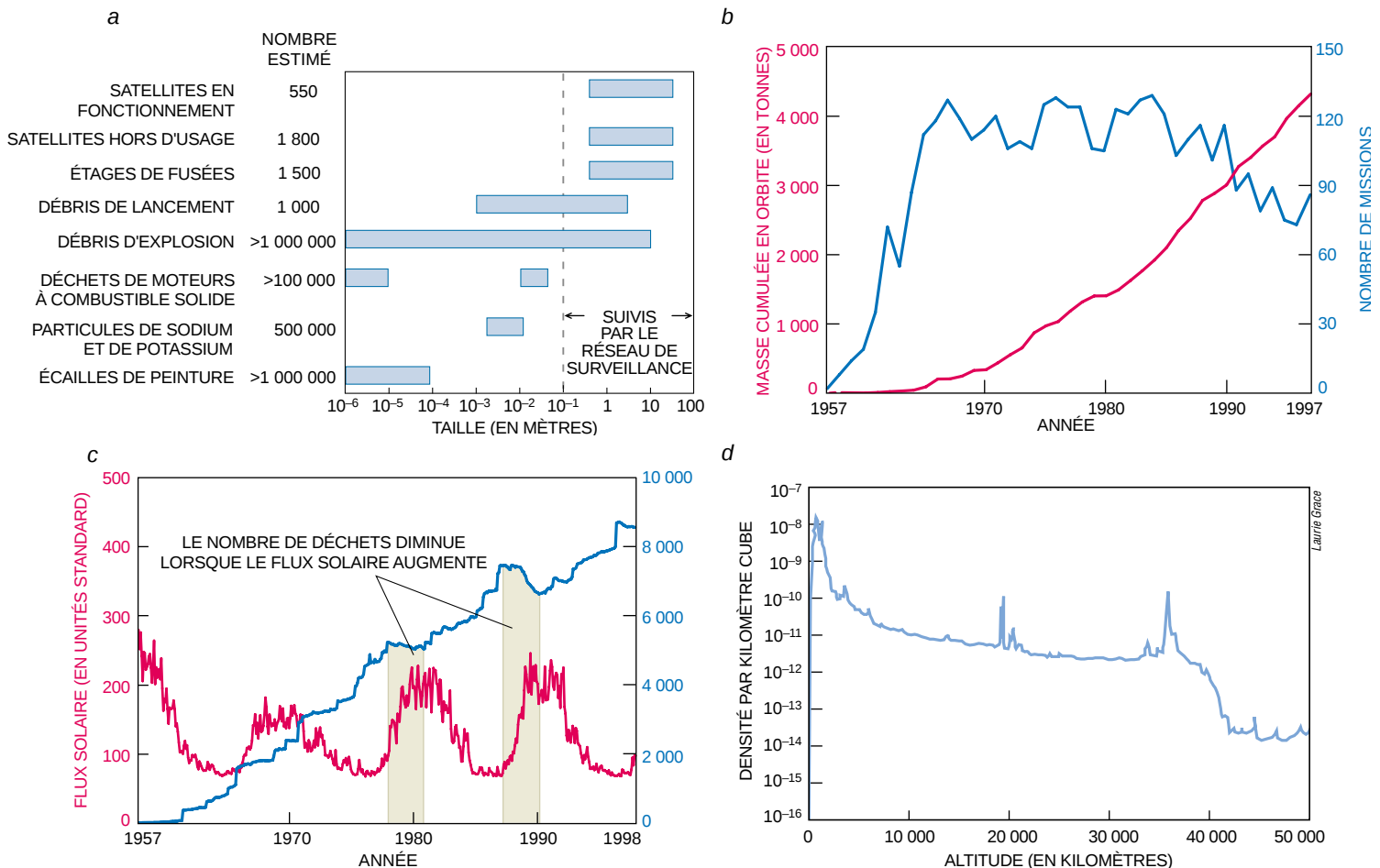
largués par la station *Mir* pendant ses dix premières années en orbite.

Des satellites disloqués

La principale source de débris plus petits est, de loin, la dislocation de satellites et de fusées. Depuis 1961, plus de 150 satellites ont explosé ou se sont disloqués, accidentellement ou délibérément. Toutes les épaves de fusées peuvent exploser : les résidus de carburant qu'elles contiennent peuvent s'enflammer lors d'une surpression ou d'un allumage intempestif, jusqu'à plus de 20 ans après le lancement. Ainsi, l'étage supérieur d'une fusée *Pégase* lancée en 1994 a explosé le 3 juin 1996, engendrant le plus grand nuage de débris recensé : plus de 700 objets d'au moins dix centimètres de diamètre, qui tournent aujourd'hui entre 250 et 2 500 kilomètres d'altitude (voir la figure 3). Cette seule explosion a doublé le risque de collision

du télescope spatial *Hubble*, qui gravite à peine 25 kilomètres plus bas.

En 1989, le Laboratoire de propulsion spatiale (JPL) de la NASA a détecté au radar un grand nuage de gouttelettes de sodium et de potassium, vers 900 kilomètres d'altitude. Ces observations ont été confirmées par l'Institut de technologie du Massachusetts, qui a compté plus de 70 000 sphères de un centimètre de diamètre, contenant du sodium et du potassium. Ces matériaux, utilisés comme fluides réfrigérants dans les réacteurs nucléaires qui équipaient des satellites soviétiques, avaient fui lors de l'éjection du combustible nucléaire à la fin de la vie des satellites. Cette éjection avait été décidée après la chute accidentelle en 1978, dans le Nord du Canada, du satellite *Kosmos 954*, qui contenait 30 kilogrammes d'uranium enrichi : au lieu de tomber en un seul bloc, le combustible devait ainsi être incinéré en entrant dans l'atmosphère.



2. DES OBJETS VARIÉS sont en orbite autour de la Terre. Leur taille varie de un millième de millimètre, pour des écailles de peinture, à 30 mètres, pour la station spatiale *Mir* (a). La fréquence des lancements spatiaux a diminué depuis une dizaine d'années, mais la masse cumulée des matériaux en orbite a continué de croître, parce que les satellites modernes sont plus gros (b). Les systèmes militaires de surveillance ne suivent que les objets de plus de dix centimètres

de diamètre aux orbites basses et de plus d'un mètre de diamètre aux orbites élevées. Le nombre de ces objets augmente chaque année, sauf lors des maxima d'activité solaire, responsables de la chute de nombreux débris (c). La densité de ces objets visibles présente trois maxima autour des orbites les plus fréquentées, à 850, 1 000 et 1 500 kilomètres d'altitude, ainsi qu'aux orbites semi-synchrone (20 000 kilomètres) et géosynchrone (36 000 kilomètres) (d).

Aucun satellite nucléaire ne fonctionne plus en orbite depuis 1988, mais les goutelettes sont toujours là.

Les objets de moins de 0,1 millimètre de diamètre ne sont pas aussi dangereux que les débris plus grands, mais ils sont si nombreux qu'ils endommagent fréquemment des engins spatiaux. Ils sont principalement issus des fusées à combustible solide : les moteurs à combustible solide engendrent une quantité considérable de particules microscopiques d'oxyde d'aluminium (jusqu'à 100 milliards de milliards). Bien que l'on utilise de moins en moins ces moteurs, la quantité totale de déchets engendrés annuellement a augmenté : les engins spatiaux modernes, plus lourds, nécessitent des moteurs plus puissants qui rejettent plus de particules.

Enfin, les matériaux des engins spatiaux se dégradent naturellement : le voisinage de la Terre est maintenant envahi de millions de minuscules écailles de peinture, et des traînées de flocons minuscules accompagnent la plupart des satellites et des débris de fusées. Des éléments plus gros sont parfois observables, tels des fragments de boucliers thermiques et des composants à base de carbone. Par exemple, le satellite *COBE* de la NASA a inexplicablement rejeté au moins 80 objets.

Entrevu dans les années 1960 et 1970, le risque associé à la croissance du nombre d'objets en orbite avait initialement été négligé. Ainsi, dès 1966, la NASA avait évalué les risques de collision orbitale pour les vols habités, mais ces calculs ne prenaient en compte que les objets assez gros. La question n'a été abordée dans son ensemble qu'au début des années 1980.

Plus de 100 000 objets de un à dix centimètres graviteraient autour de la Terre, en compagnie de dizaines de millions de particules de un millimètre à un centimètre. Ces objets artificiels sont plus nombreux que les météorites de même taille. Dans la gamme de taille comprise entre 0,01 et un millimètre, les nombres de météorites et de débris de satellites sont égaux. Aux tailles inférieures, les débris artificiels redeviennent plus nombreux.

Les débris espionnés

Les plus grands débris spatiaux (de plus de dix centimètres à basse altitude et de plus de un mètre à l'altitude géosynchrone) sont observables grâce aux systèmes de détection de missiles et de

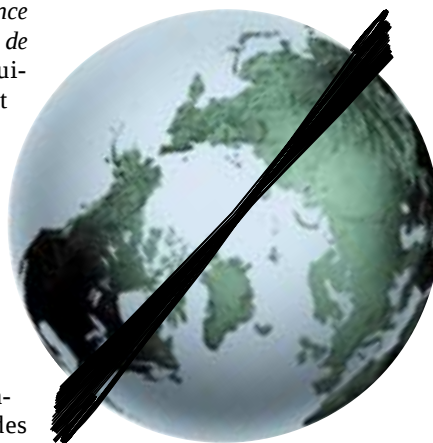
satellites espions construits pendant la guerre froide : le *Réseau de surveillance spatiale* des États-Unis et le *Système de surveillance spatiale* de l'ex-URSS, équipés de détecteurs radar, optiques et opto-électroniques, réalisent 150 000 observations quotidiennes, en moyenne, de 10 000 objets spatiaux officiellement répertoriés.

La densité de ces débris varie avec l'altitude : elle est maximale autour de 850, 1 000 et 1 500 kilomètres avec, en moyenne, un objet par 100 millions de kilomètres cubes. Au-dessus de 1 500 kilomètres, la densité décroît avec l'altitude, sauf près des altitudes semi-synchrone (20 000 kilomètres) et géosynchrone, où elle est localement supérieure. Les débris s'accumulent à ces altitudes, car elles sont les plus fréquentées par les satellites : le danger est d'autant plus grand pour les engins en fonctionnement.

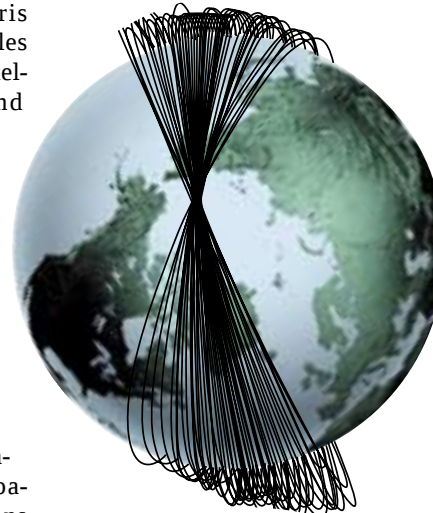
Depuis 20 ans, le nombre d'objets suivis en orbite terrestre a augmenté en moyenne de 175 par an, soit une croissance totale de 70 pour cent. Plus du quart de cette augmentation résulte de la dislocation de satellites, et le reste de nouveaux lancements : depuis 1957, 120 satellites ont été lancés chaque année en moyenne, avec un maximum de 129 en 1984. La disparition de l'URSS a réduit l'activité spatiale : la Russie n'a lancé que 28 missions spatiales en 1997, contre 95 en 1987 pour l'URSS. Toutefois, cette diminution concerne surtout les orbites basses, et elle a donc peu de répercussions sur le nombre de débris à long terme. En 1996, 73 lancements seulement ont été effectués, le plus petit nombre depuis 1963, mais 86 en 1997, dont dix rien que pour la constitution d'ensembles de satellites de télécommunications.

Jusqu'en 1984, les objets de moins de dix centimètres de diamètre sont restés invisibles : ils sont indétectables au télescope, car ils brillent trop peu, et ils échappent aussi aux radars militaires de surveillance, car ils sont plus petits que les longueurs d'onde

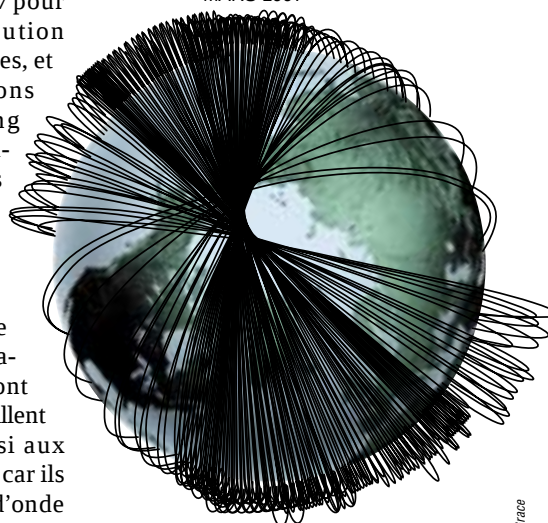
JUIN 1996



SEPTEMBRE 1996

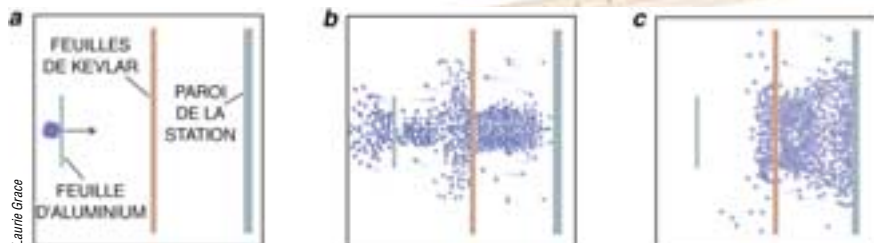


MARS 1997



Laurie Grace

3. LES ORBITES DES DÉBRIS se dispersent rapidement après la dislocation d'un satellite. Trois semaines après l'explosion d'une fusée *Pégase*, en juin 1996, les débris étaient concentrés dans une bande étroite (*en haut*). Après trois mois, la légère asymétrie du champ gravitationnel de la Terre avait déjà commencé à séparer les orbites (*au centre*). Après neuf mois, les orbites se répartissaient tout autour de la Terre (*en bas*). Simultanément, les objets se sont dispersés sur chaque orbite. Les spécialistes des débris doivent prendre en compte ce processus quand ils évaluent les risques pour un engin spatial tel que la navette : tant que les débris sont groupés, il suffit de suivre leur position ; lorsqu'ils sont dispersés, le risque d'impact dans différentes directions doit être évalué statistiquement.



Laurie Grace

4. DES BOUCLERS protégeront les éléments principaux de la *Station spatiale internationale* contre la plupart des objets trop petits pour être suivis, mais assez grands pour perforer les parois de la station. Quand le projectile approchera, il rencontrera d'abord une feuille d'aluminium de deux millimètres d'épaisseur, qui le fera éclater (a). Les fragments seront ralentis par une ou plusieurs couches de Kevlar (b), puis rebondiront sur la paroi de la station (c). Des essais (photographies en haut) où l'on envoie une sphère d'aluminium de 0,95 centimètre de diamètre sur un bouclier à 25 000 kilomètres-heure montrent que quatre feuilles de céramique (à gauche) protègent mieux qu'une seule feuille d'aluminium (à droite).

utilisées. Aujourd'hui, les objets d'au moins deux millimètres sont dénombrés pendant des centaines d'heures chaque année, avec des radars scientifiques en mode bistatique : une antenne envoie des signaux dont les échos sont recueillis par une autre antenne, très grande et très sensible. Le calibrage de ces capteurs a été réalisé avec des cibles spéciales en forme de sphères et d'épingles déployées en 1994 et en 1995 à partir de la navette spatiale. Puis ces observations ont révélé la présence de 300 000 objets de plus de quatre millimètres.

Les objets plus petits sont étudiés par l'inspection des surfaces érodées et perforées des engins spatiaux rapportés sur Terre dans la soute de la navette. L'*Installation pour les expositions de longue durée* (LDEF) de la NASA a ainsi été percutée par des dizaines de milliers de débris artificiels et de météorites, entre 1984 et 1990. D'autres cibles

intéressantes ont été le *Transporteur européen récupérable* (EuReCa), l'*Élément de vol spatial* (SFU) japonais, des éléments du *Télescope spatial Hubble* et de la *Mission maximum solaire* (SolarMax), ainsi que, naturellement, la navette spatiale elle-même. En raison du rayon d'action limité de la navette, toutes ces cibles étaient toutefois à des altitudes inférieures à 620 kilomètres. Pour les altitudes supérieures, les chercheurs doivent faire des modèles théoriques. Comme les petites particules restent peu longtemps aux basses altitudes, le fait qu'il y en ait beaucoup implique que ces orbites sont alimentées par de grands réservoirs à plus haute altitude.

Nettoyage de l'espace

Comment éliminer les déchets spatiaux ? Les satellites situés sur des orbites basses (jusqu'à 1 500 kilomètres d'altitude) peu-

vent être dirigés en fin de vie vers l'atmosphère, où ils se consomment en grande partie, ou être récupérés par la navette spatiale. De toute façon, les objets situés à ces altitudes retombent assez vite sur la Terre. À moins de 600 kilomètres d'altitude, les satellites ne sont maintenus en orbite que par de fréquentes corrections de leur trajectoire à l'aide de leurs moteurs. Ainsi, tous les objets rejetés par les missions habitées, qui restent entre 250 et 500 kilomètres d'altitude, tombent rapidement et se consomment dans l'atmosphère : le gant d'E. White n'est resté qu'un mois en orbite.

Pendant les maxima d'activité solaire, tous les 11 ans, l'atmosphère reçoit plus d'énergie et se dilate, ce qui augmente la résistance aérodynamique. Lors du dernier maximum solaire, en 1989 et 1990, trois objets en moyenne sont retombés sur Terre chaque jour (contre seulement un par jour habituellement) : plus de 560 tonnes de matériel ont ainsi été éliminées des orbites basses en un an, parmi lesquelles la station spatiale *Saliout 7*, prédécesseur de *Mir*, retombée au début de 1991. En 1979 et 1980, le précédent maximum d'activité solaire avait provoqué la chute prématurée de la station spatiale américaine *Skylab*.

Cette chute naturelle des débris en orbite n'empêche toutefois pas la croissance de leur nombre : le frottement atmosphérique est négligeable sur les orbites supérieures. Aussi, les nations spatiales ont-elles, depuis une dizaine d'années, commencé à se concerter : le Comité de coordination inter-agences sur les débris spatiaux rassemble aujour-

d'hui des représentants des États-Unis, de la Russie, de la Chine, du Japon, de l'Inde, de l'Agence spatiale européenne, de la France, de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne. En 1994, le Sous-Comité scientifique et technique des Nations unies pour les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique a finalement inscrit les débris spatiaux à son ordre du jour, avec la volonté d'en achever l'évaluation pour 1999. Ces comités doivent encore décider du type d'actions à entreprendre, de leur mise en œuvre, et trouver un compromis entre les risques et les coûts de ces actions.

En attendant, les agences spatiales tentent de produire moins de débris. En France, le Centre national d'études spatiales a mis en place, depuis 1992, un groupe de travail chargé de mener les études techniques d'évaluation du risque et de déterminer des mesures préventives. De telles mesures sont d'ores et déjà appliquées. Par exemple, après l'injection des satellites en orbite, le dernier étage des fusées Ariane est passivé pour éliminer tout risque d'explosion ultérieure : les réservoirs de carburant sont vidangés et la pression est réduite dans tous les circuits. À l'altitude géosynchrone, les dangers de collision sont moindres, mais la place commence à manquer : afin d'éviter les collisions éventuelles avec les satellites opérationnels, les satellites dont la mission se termine sont transférés sur une orbite cimetière située à environ 300 kilomètres au-dessus de l'orbite géostationnaire.

La NASA et la NASDA, l'agence spatiale japonaise, ont utilisé des pièges à boulons et des attaches spéciales ; elles vidangent aussi le carburant et éteignent les systèmes électriques des satellites hors service ; et elles recommandent que les nouveaux satellites et les étages de fusées laissés à basse altitude soient guidés vers l'atmosphère moins de 25 ans après la fin de leur mission.

Après l'explosion de la fusée Pégase, en 1996, la Société *Orbital Sciences*,

concepteur et opérateur de cet engin, a redessiné l'étage supérieur avant de reprendre les missions en décembre 1997. Certains des nouveaux réseaux de téléphonie par satellite prévoient de faire retomber dans l'atmosphère des satellites devenus inutiles. En janvier 1998, le gouvernement américain a présenté à l'industrie aérospatiale, pour commentaires, un projet de norme de limitation des débris.

Ces procédures, toutefois, ne concernent pas les débris déjà en orbite. La seule protection possible aujourd'hui contre les collisions, en particulier avec les multiples objets de moins de un centimètre de diamètre, est l'ajout sur les satellites de boucliers qui limitent les conséquences des collisions et réduisent le nombre de débris secondaires. La *Station spatiale internationale* sera équipée de tels boucliers autour des compartiments d'habitation, des conduits de carburant, des gyroscopes de contrôle et d'autres zones vitales (voir la figure 4). Pour les éléments impossibles à protéger, tels les panneaux solaires, les concepteurs d'engins spatiaux doivent tenir compte de leur détérioration progressive sous l'effet de petites collisions.

L'élimination des débris reste un défi technique et économique. Certains ont pensé utiliser la navette spatiale, mais cette opération serait trop complexe et trop dangereuse. La NASA et les ministères américains de la Défense et de l'Énergie ont étudié le projet *Orion*, qui utiliserait des lasers au sol pour vaporiser certains matériaux : ils détourneraient ainsi les débris de leur trajectoire et accéléreraient leur chute. D'autres projets sont à l'étude, telles des balles de mousse géantes : une particule pénétrant la mousse perdrait de l'énergie et retomberait plus tôt sur Terre.

Verrons-nous un jour des robots nettoyeurs autour de la Terre ? Si nous ne réduisons pas rapidement le nombre de débris en orbite, nous manquerons bientôt d'espace... dans l'espace.

Nicholas JOHNSON travaille au Centre spatial Johnson de la NASA, à Houston.

N.L. JOHNSON et D.S. MCKNIGHT, *Artificial Space Debris*, Orbit Books, 1991.

Preservation of Near Earth Space for Future Generations, sous la direction de J.A. Simpson, Cambridge University Press, 1994.

Orbital Debris : A Technological Assess-

ment, Committee on Space Debris, Aeronautics and Space Engineering Board, National Research Council, National Academy Press, 1995.

Protecting the Space Station from Meteoroids and Orbital Debris, Committee on International Space Station Meteoroid / Orbital Debris Risk Management, Aeronautics and Space Engineering Board, National Research Council, National Academy Press, 1997.
