

Les conséquences des activités spatiales sur le milieu périplanétaire

Jacques BRETON

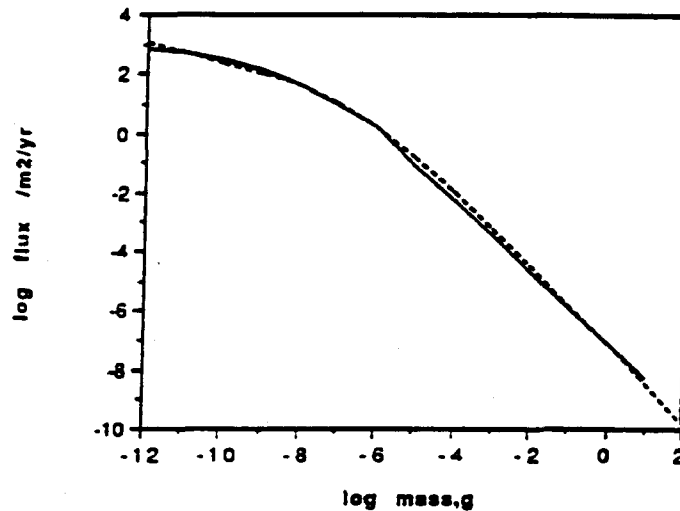
L'espace périplanétaire

Au-delà des couches denses de l'atmosphère et de l'ionosphère terrestres s'étend un domaine correspondant à des altitudes de quelques centaines à quelques centaines de milliers de kilomètres, que l'on appelle espace périplanétaire, par analogie avec l'espace interplanétaire.

La configuration naturelle de cet espace de transition est un vide poussé, parcouru par des rayonnements naturels (spectre solaire, spectre terrestre, rayonnements particuliers solaire et cosmique), et traversé par de petites quantités de matière (météorides, évaporation de l'atmosphère terrestre,...).

Depuis 1957, et avec une intensité qui s'accroît d'année en année, cet espace est le domaine d'exercice de notre activité spatiale (ou pour être plus précis, de notre activité spatiale circumterrestre, qui représente plus de 95% de l'activité totale).

Cette intervention des machines créées par l'homme, et quelquefois de l'homme lui-même, est susceptible de provoquer des modifications importantes qu'il faut analyser.



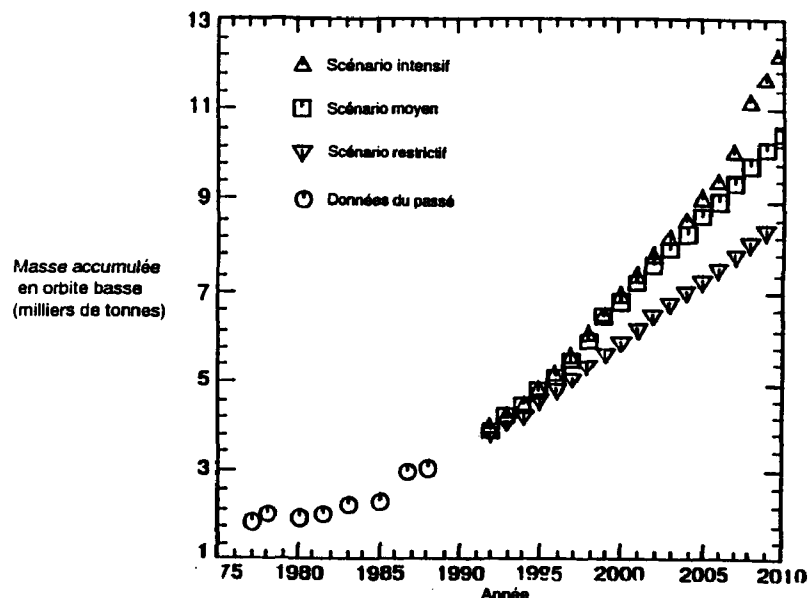
Distribution en masse des météorides dans le voisinage de la Terre

L'occupation de l'espace

Près de 3500 injections orbitales ont été effectuées depuis 1957. Avec le temps, la complexité des missions s'est accrue, et les objets mis en orbite ont, pour la plupart, une masse élémentaire de plusieurs tonnes. Souvent, les étages supérieurs vides des lanceurs accompagnent le satellite sur son orbite finale, ainsi que de nombreux fragments ou objets divers. On estime que le nombre d'objets en orbite "significatifs" (c'est-à-dire d'une dimension supérieure à quelques dizaines de centimètres) est aujourd'hui d'une dizaine de milliers. Près de 400 véhicules ont été placés à 36.000 km, sur l'orbite des satellites géostationnaires. En orbite basse, une masse totale de 4000 tonnes provient des satellites et de certains éléments associés à leur lancement. Cette accumulation d'objets divers s'accélère et pourrait créer de sérieux problèmes.

Il y a plus. Tant qu'ils sont actifs et utiles, ces satellites communiquent avec le sol, ou entre eux. Or, ils vivent de plus en plus longtemps (couramment 10 ans pour un satellite de télécommunications, et 4 ans pour un satellite en orbite basse), ils acheminent de plus en plus de données (d'où le recours à d'importantes largeurs de bande), et ils communiquent souvent avec des utilisateurs très dispersés et d'équipement modeste (si bien que des puissances d'émission importantes sont utilisées).

Toutes ces caractéristiques montrent que le spectre électromagnétique naturel va être surchargé et masqué par les émissions liées aux activités spatiales.



Le spectre électromagnétique

Limitées en valeur inférieure de fréquence à 100 MHz environ, en raison de l'écran ionosphérique, les communications spatiales pourront atteindre des fréquences de 30 GHz, en raison de la recherche constante de bande passante. Tout ce domaine de fréquence est donc susceptible d'être utilisé, avec pour conséquence une menace sur l'observation de l'univers dans cette gamme d'ondes radioélectriques, qui comporte des raies très intéressantes et qui approche, du côté des hautes fréquences, du pic d'émission des objets les plus froids de notre univers.

Ce risque, connu depuis longtemps, est actuellement convenablement traité.

Il existe des accords internationaux sur l'utilisation des fréquences qui protègent et réservent aux astronomes les fréquences les plus susceptibles de les intéresser.

Par ailleurs, la perturbation est liée à l'émission du satellite, qui peut être arrêtée par télécommande si c'est nécessaire, et qui, de toutes façons s'arrête à la fin de vie utile du satellite.

Enfin, à moyen terme, l'existence de satellite relais et le recours plus fréquent

aux télécommunications optiques restreindront sans doute ce problème de brouillage radioélectrique.

Par contre, il est clair que, à très long terme, si l'activité spatiale devait conduire à d'énormes centrales solaires en orbite (ce qui paraît très douteux actuellement), transmettant vers le sol plusieurs GW à une fréquence de 2 GHz, alors nous irions vers une situation extrêmement difficile.

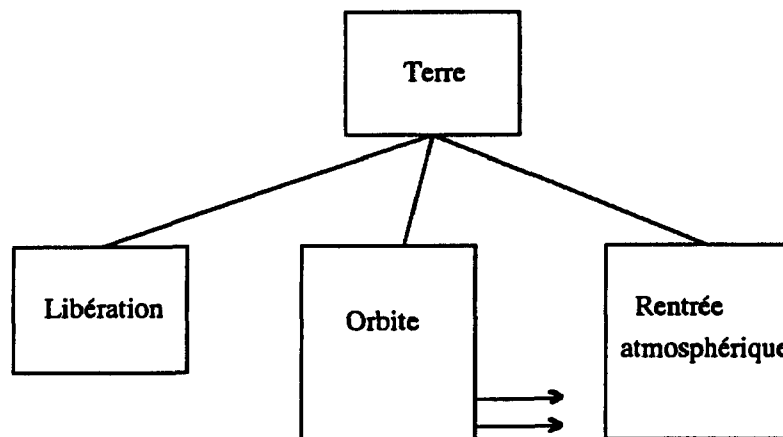
Les débris

Répartition et durée de vie

Des milliers de tonnes s'accumulent dans l'espace périplanétaire. Il s'agit de satellites, actifs ou en fin de vie, d'étages (vides) de propulsion, de fragments divers (éclats, fragments de peinture, objets éjectés de stations orbitales...).

Naturellement, toutes les orbites ne sont pas d'un intérêt égal, et l'accumulation est forte surtout sur les orbites géosynchrones, héliosynchrones, ainsi que sur l'orbite de la station MIR et l'orbite classique des navettes spatiales américaines.

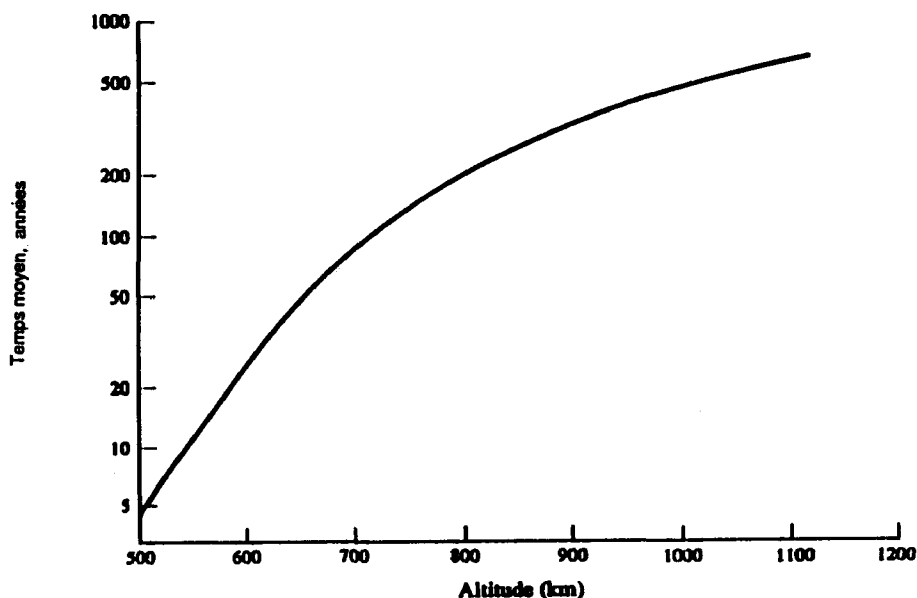
Qu'advient-il de ces masses lancées dans l'espace ?



Environ 99% de la masse du départ (ergols, étages inférieurs) se retrouve sur terre dans les minutes qui suivent le lancement. Le reste, suivant les cas, va sur une trajectoire de libération, ou va à haute altitude (ex : 36.000 km, géostationnaire), ou bien se trouve placé en orbite basse. Dans les deux premiers cas, la durée de vie dans l'espace de ces débris n'a pas de limite à priori. Il faut néanmoins remarquer

que les ergols des étages supérieurs ou des moteurs d'apogée, éjectés à grande vitesse, ont leur trajectoire propre, et peuvent, ou non, retomber vers l'atmosphère terrestre. Il s'agit, chaque année, de dizaines de tonnes.

Dans le troisième cas (l'orbite basse, jusqu'à mille kilomètres environ) le freinage de la haute atmosphère peut conduire à une rentrée au tout d'un temps variable. D'autres forces, telles que la pression de radiation solaire, peuvent aussi déformer l'orbite et provoquer des contacts avec les hautes couches, d'où des rentrées.



Temps moyen de rentrée terrestre pour des fragments de 10 cm

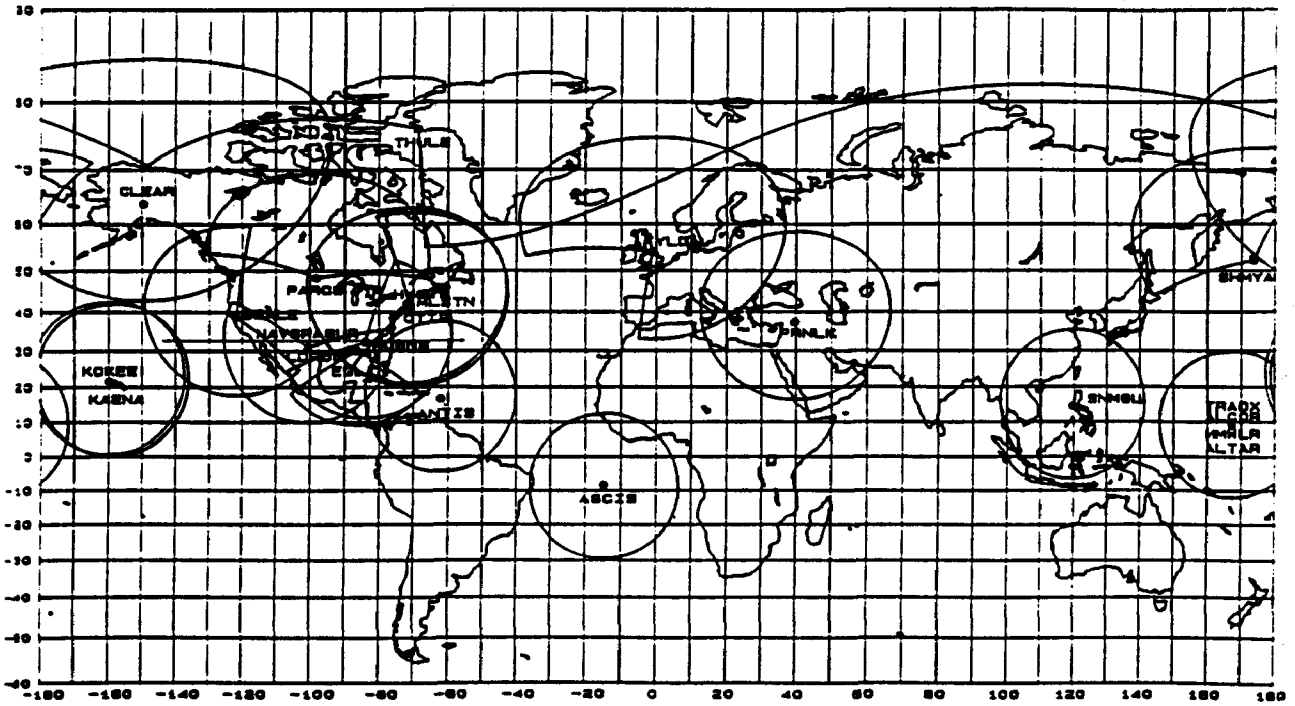
Remarquons que :

a) le freinage est d'autant plus énergique que la densité atmosphérique est forte. Les débris sont dégagés rapidement à basse altitude, et ont une grande durée de vie à haute altitude.

b) la montée de la densité atmosphérique liée à l'activité solaire (cycle de 11 ans) intervient directement sur ce processus, si bien que l'on observe un nettoyage périodique de l'espace en phase avec cette activité.

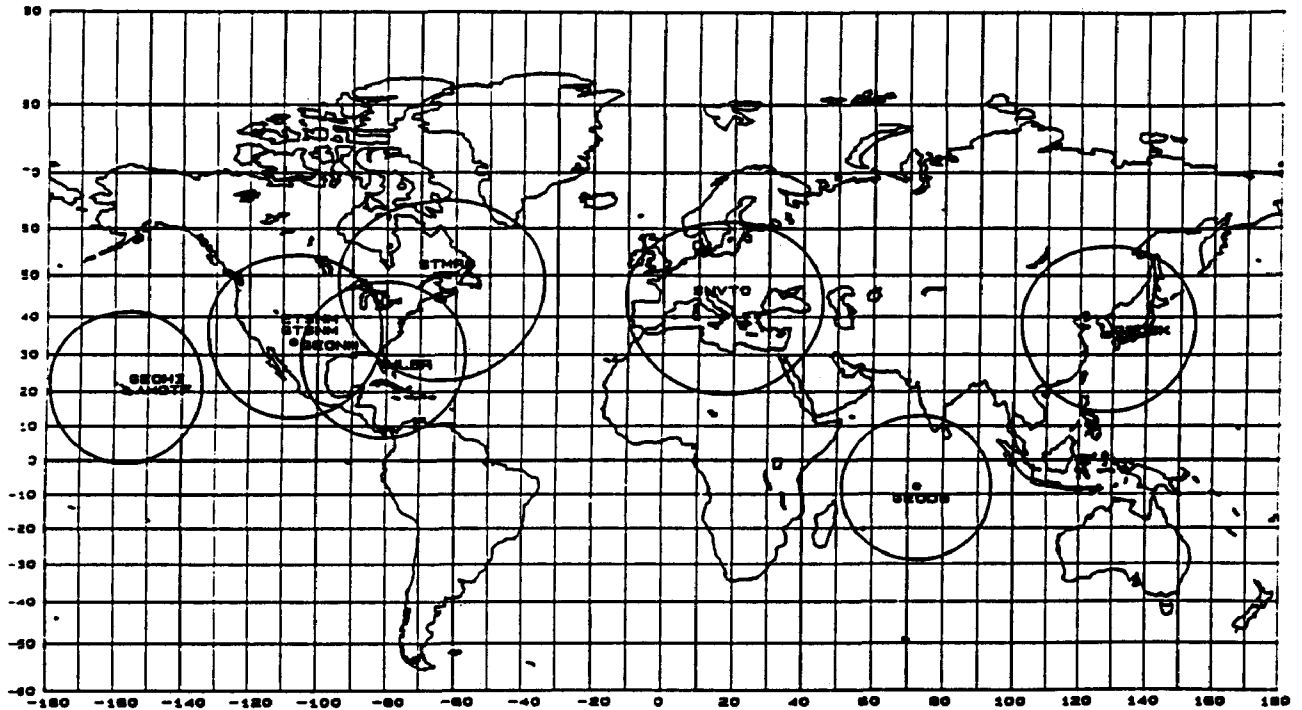
c) les forces de freinage sont proportionnelles à la surface, la masse est proportionnelle au volume. La décélération est donc, en gros, proportionnelle à $1/R$, R étant le rayon moyen du débris. Les débris de petite taille sont donc éliminés avant les gros. On aurait pu souhaiter le contraire.

Altitude de référence : 500 km



Réseau US de surveillance radar

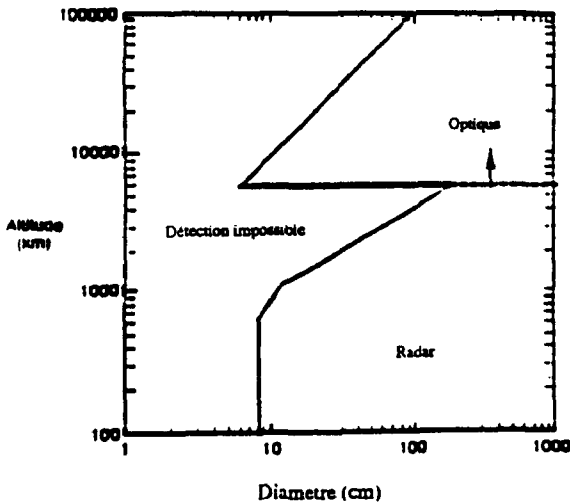
Altitude de référence : 500 km



Réseau US de surveillance optique

Méthodes d'observation

Il existe un réseau de stations capable de suivre les trajectoires des objets les plus gros. La capacité de détection dépend, bien entendu, de l'altitude de l'orbite parcourue par le débris. Les techniques radar sont les plus performantes pour des altitudes faibles ou moyennes, les techniques optiques pour des altitudes fortes (supérieures à quelques milliers de kilomètres).



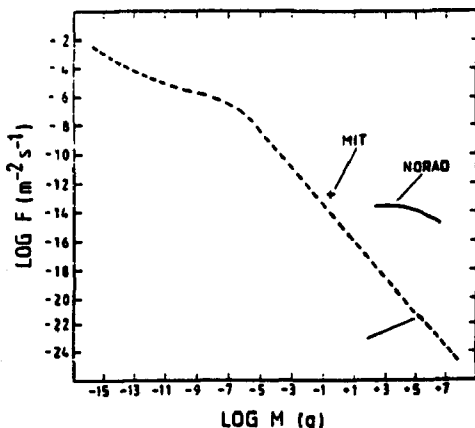
Capacité de détection du réseau US

La limite de détection est atteinte pour des objets dont l'envergure est de quelques dizaines de centimètres.

Naturellement, ce n'est pas l'intérêt pour les débris qui a justifié la mise en place de ce réseau très performant, mais la nécessité d'avoir une alerte avancée en cas d'irruption d'objets intercontinentaux mal intentionnés. D'où le rôle du "Radar Ballistic Missile Early Warning" dans ce dispositif. Aujourd'hui plusieurs milliers d'objets sont répertoriés et suivis avec précision.

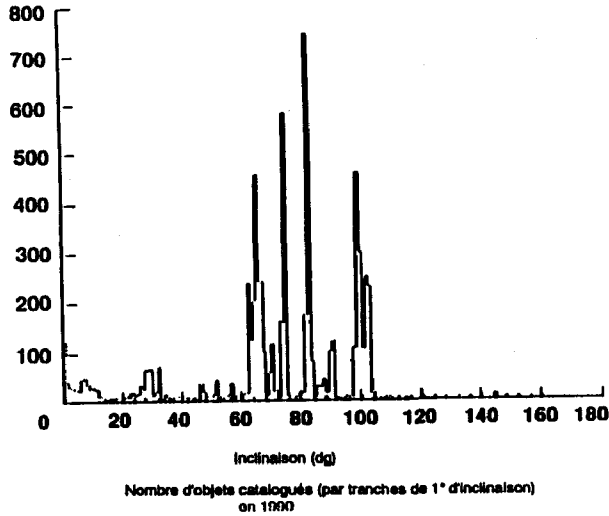
La situation actuelle

Toutes ces observations conduisent à une situation actuelle que l'on peut décrire de la façon suivante :



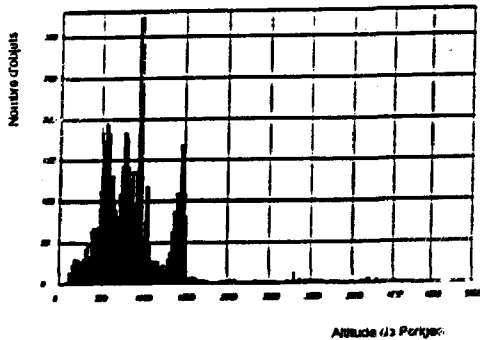
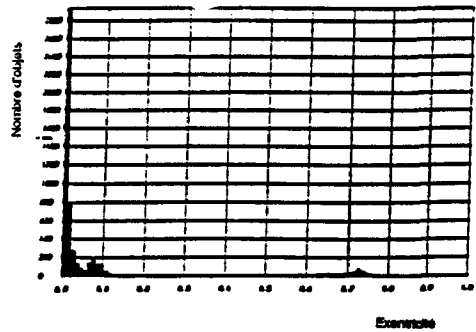
Flux de particules de masse supérieure à m par m² et par an

- pour des dimensions supérieures au centimètre, les débris spatiaux prennent désormais une part prépondérante par rapport aux météorides naturels. Par exemple, d'un facteur 1000 pour les objets de masse proche d'un kilogramme.



- l'abondance des débris est évidemment la plus forte sur les orbites les plus fréquentées (27°, 60°, 98°...).

- les trajectoires sont, pour l'essentiel quasiment circulaires.



- la répartition en altitude est conforme, comme c'est normal, à la fréquentation des différentes orbites, à ceci près que l'on voit apparaître un appauvrissement des orbites basses (300 à 450 km) dû à un nettoyage plus énergique par le freinage atmosphérique.

Tous ces éléments concernent seulement les éléments détectables, c'est-à-dire, en gros, ceux dont la masse est supérieure à une cinquantaine de grammes.

La vitesse de ces débris est tout simplement la vitesse orbitale (entre 7 et 8km/s pour les orbites basses).

On voit donc que dans un choc "moyen", l'énergie cinétique à dissiper est supérieure à 1 mégajoule, soit l'équivalent d'un kg de TNT.

Densité critique

Ces débris, menaçants pour les objets conçus par l'homme, sont susceptibles d'avoir des collisions entre eux, créant, de cette façon de nouveaux objets. S'il arrive, à une certaine altitude que le taux de production de ces nouveaux objets soit plus élevé que le taux de vidage, alors on se trouve dans une situation divergente qui aboutit à une prolifération de débris que l'on risque de ne pouvoir suivre.

Exemple : pour schématiser, considérons une population de débris cubiques qui se fragmentent en une population 8 fois plus nombreuse de cubes de dimension moitié des précédents.

Les probabilités de collision auront baissé d'un facteur 4, alors que le nombre de débris aura augmenté d'un facteur 8... on double le nombre de collisions.

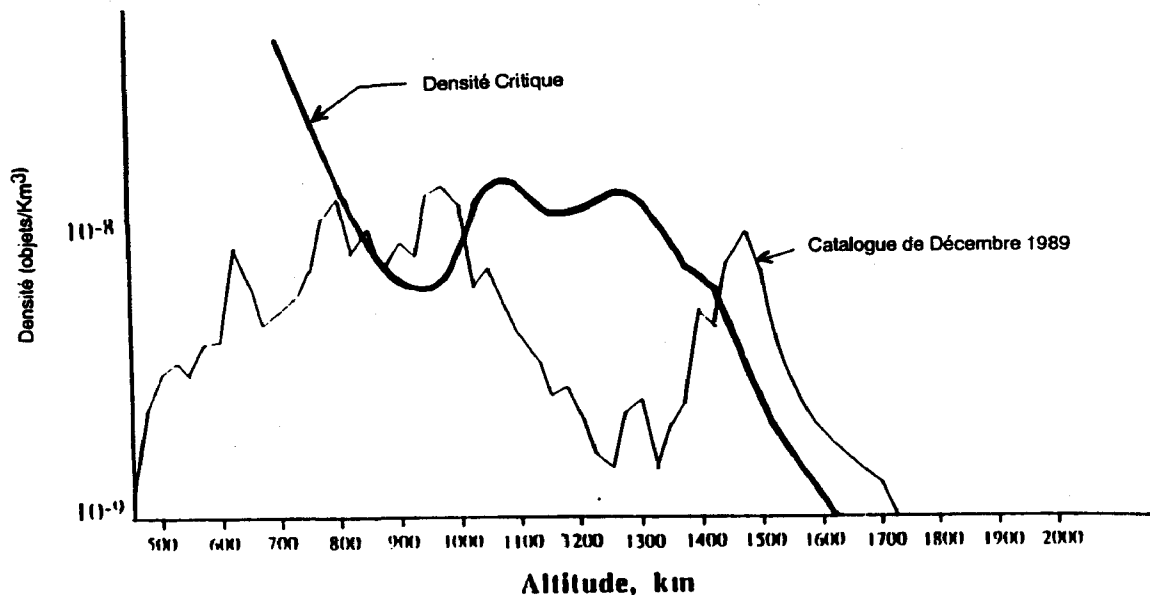
Cette notion de densité critique pour une certaine altitude n'est pas facile à évaluer pour un certain nombre de raisons :

- après choc, les objets changent d'orbite et ne sont pas maintenus nécessairement à la même altitude.

- les forces tendant à "vider" un niveau d'altitude ne sont pas aisément modélisables (effets lunisolaires, pression de radiation, freinage atmosphérique...).

Néanmoins, d'après certaines évaluations récentes, le seuil de densité critique pourrait être dépassé dans plusieurs gammes d'altitude.

Mais nous n'en sommes pas encore à un nuage épais de poussières autour de la terre, ni à un anneau, car la dynamique du processus est très lente. Le temps de doublement de la population de débris par collision se compte dans la situation actuelle en millions d'années plus qu'en siècles.



Densité critique comparée à l'état actuel (1989)

Les risques

Mentionnons pour mémoire, un risque de nature non scientifique, mais substantiel, c'est celui de la fausse alerte. Des débris spatiaux à basse altitude ont des caractéristiques (section efficace radar, vitesse...) qui les rendent assez semblables à d'autres objets moins inoffensifs. D'où, dans les temps de grande tension entre les blocs, un risque de confusion extrêmement dangereux. C'est ce risque qui a incité les grandes puissances à l'établissement d'un catalogue extrêmement détaillé des objets détectables et de leurs éphémérides.

Risques pour l'observation astronomique

Les satellites, ou les débris, sont des corps célestes comme les autres, et en tant que tels, ils apparaissent dans le champ de visée des instruments astronomiques (au sol, ou dans l'espace), soit par la lumière solaire qu'il diffusent, soit en infra-rouge, par leur rayonnement thermique propre.

Quelques ordres de grandeur :

Supposons un objet (diffusant, de réflectivité 0,3) en orbite autour de la terre, éclairé par le soleil, et observé à 1000 km de distance par un spectateur terrestre. Quelle sera sa magnitude apparente (en ordre de grandeur).

Surface de l'objet	1 m ²	1 dm ²	1 cm ²	1 mm ²
Magnitude apparente	+ 9	+ 14	+ 19	+ 24

Magnitude d'un objet en orbite autour de la Terre

La perturbation est réelle, mais tempérée par le fait que ces objets ont une vitesse angulaire importante (quelques dixièmes de degré-seconde) qui les distingue radicalement des objets naturels de la voûte céleste.

La situation est un peu différente pour l'orbite des satellites géostationnaires (36.000 km) où sont placés des engins de grande taille (mêmes hypothèses de diffusion et de réflectivité).

Surface de l'objet	100 m ²	10 m ²	1 m ²
Magnitude apparente	+ 12	+ 14,5	+ 17

Magnitude d'un objet en orbite géostationnaire

En effet, pour un observateur terrestre, la vitesse angulaire de ces sources n'est que de 4/1000 de degré par seconde par rapport aux sources de l'espace lointain.

Le risque de confusion est réel, surtout si l'observation est faite à partir d'un satellite en orbite basse. Le satellite IRAS a ainsi détecté l'émission infra-rouge d'un grand nombre d'objets qui se sont révélés être des satellites de télécommunications.

Le lever de doute est facile à faire a posteriori, car tous ces satellites ont des caractéristiques et une position parfaitement connues.

Les risques de collision

La vitesse moyenne d'impact dans la collision de deux objets en orbite est de 10 km/s environ. On voit donc que même des masses faibles peuvent avoir un effet dévastateur sur un satellite automatique ou une station habitée :

J. BRETON

- destruction d'une fonction vitale,
- mise en rotation non récupérable par le contrôle d'altitude du satellite,
- pour les stations habitées, perte de pressurisation,
- etc...

Mentionnons aussi qu'il y a actuellement dans l'espace des réacteurs nucléaires (32 soviétiques, 1 américain) et qu'une collision aboutissant à une désorbitation serait un problème sérieux.

Les ordres de grandeur actuels sont les suivants :
en 10 ans de vie en orbite, la station spatiale Freedom aura :

- une probabilité de 1,7% de recevoir l'impact d'un débris de plus de 1 cm au niveau des modules habités,
- une probabilité de 10% environ de recevoir l'impact d'un débris de plus de 1 mm au niveau des modules habités.

Un satellite d'observation d'envergure 20m² à 800 km d'altitude a, durant les 4 ans de sa vie utile, une probabilité de $2 \cdot 10^{-4}$ de recevoir un débris de plus de 1 cm, et 10^{-3} un débris de plus de 1mm.

Pour les particules plus petites, l'abondance n'est pas bien connue, car les mesures depuis le sol sont impossibles. Il se trouve que certains véhicules spatiaux ont été rapportés sur terre :

- LDEF après 4 ans d'exposition à l'environnement spatial
- Solar Max.

Des examens minutieux ont mis en évidence les impacts et les dégâts occasionnés sur ces véhicules, confirmant les distributions de masses et de vitesses attendues.

Protection contre les collisions

On peut d'abord penser à des manoeuvres d'évitement à effectuer par des véhicules spatiaux. Cela s'est déjà vu, mais il y a de fortes chances que ce soit une impasse. Si l'on considère un objet aussi imposant que la station spatiale, il est

vraisemblable qu'il y a dans la gamme d'altitudes envisagées des centaines d'objets catalogués (c'est-à-dire d'au moins quelques centimètres d'envergure). Il n'est pas sûr qu'il existe une stratégie réaliste de manoeuvre compte tenu des dépenses d'ergols auxquelles il faudrait consentir pour modifier la trajectoire, et compte tenu de l'incertitude sur la prédiction de trajectoire des débris. Cette stratégie d'évitement devra être réservée aux débris les plus manifestement dangereux (et ceux à l'orbite la moins perturbée), c'est-à-dire les plus lourds (masse supérieure à quelques dizaines de kilogrammes). Pour le reste, il faut imaginer une protection contre l'effet des impacts, et accepter le risque résiduel (spécifié aujourd'hui à moins de 0,5% de chances d'avoir un impact catastrophique dans les dix premières années de durée de vie de la station).

La protection contre l'effet des impacts est une sorte de bouclier comportant plusieurs couches d'amortissement du choc (par exemple 1ère couche : aluminium et kevlar, 2ème couche : tissu de kevlar, 3ème couche : identique). Il s'agit, et pour cause, d'une sorte de gilet pare-balles.

Outre le fait qu'il est très coûteux en masse, car il doit recouvrir l'ensemble du véhicule spatial, un tel dispositif a une efficacité limitée. Très vite, quand la masse percutante s'accroît, apparaissent les dégâts structuraux. L'ambition que l'on peut donner à ce bouclier, s'il est mis en place, est d'absorber les chocs des petits débris, jusqu'à 2 à 3 centimètres d'envergure, étant entendu qu'une paroi "normale" pourrait absorber les chocs des petits débris jusqu'à 2 à 3 mm. Il reste à savoir si la mise en place de ce bouclier se justifie face au risque résiduel.

Elimination des débris ?

Malheureusement, l'idée, qui réurgit ici et là, d'un satellite balayeur ayant pour mission de ramasser tous ces objets inopportuns, est irréalisable. La variété des orbites et les vitesses en jeu, interdisent toute approche réaliste de ce côté.

Elimination à distance ?

Certains ont imaginé que des lasers de très forte puissance au sol, dont les faisceaux pourraient être très concentrés sur les objets à volatiliser, seraient en mesure de fragmenter la partie la plus gênante de la population des débris. Ce n'est pas impossible, en théorie, mais c'est une visée à très long terme que l'on ne voit pas

mise en oeuvre avant un certain nombre de décennies.

En attendant, l'important est de rechercher des moyens de prévention, c'est-à-dire des modes de conception et des modes d'opération des engins spatiaux qui restreignent les causes de fragmentation.

Les voies à explorer sont :

- la non-éjection d'un certain nombre de dispositifs lors de la mise en orbite (boulons explosifs, sangles, ressorts, couvertures isolantes etc...)

- purge des ergols résiduels dans le dernier étage du lanceur après la fin de propulsion. Si cette mesure n'est pas prise, il peut se produire une montée en pression, puis une explosion. C'est ce qui s'est passé une centaine de fois entre 1965 et 1987. Les explosions fortes de ce genre créent quelques centaines de fragments de plus de quelques centimètres, et plus de mille fragments de plus de quelques millimètres. C'est notamment ce qui est arrivé au lancement V16 d'Ariane en 1986. Depuis, des mesures préventives ont été prises pour la filière Ariane. Il reste à les généraliser à tous les pays effectuant des lancements spatiaux.

- prévention des explosions de batteries

- étude soigneuse des revêtements de surface pour éviter que des fragments se détachent.

- réglementer les expérimentations antisatellites, dont la conséquence évidente est de créer des débris. Imposer notamment qu'elles se déroulent à basse altitude pour donner lieu à un nettoyage rapide.

- étudier tout particulièrement les stations habitées, dont la construction et les opérations créent de nombreux risques à cet égard. Faire de la création de débris un poste à spécifier et à gérer en tant que tel.

Enfin, l'idée a été émise d'évacuer les satellites en fin de vie utile, soit vers les très hautes altitudes, soit vers une rentrée atmosphérique. C'est une idée intéressante, mais très coûteuse, et, dans beaucoup de cas, inapplicable car si le satellite est en

fin d'exploitation, c'est bien souvent qu'il est en panne, et on ne saurait lui demander alors la manoeuvrabilité voulue.

Evolution à long terme

Le problème que nous décrivons est naissant aujourd'hui ; il peut devenir grave dans quelques dizaines d'années. "Grave" pour l'activité spatiale signifierait que, pour une mission donnée, la probabilité d'un impact destructeur deviendrait commensurable avec la probabilité d'un échec au lancement ou d'une panne technique en orbite pendant la vie active prévue du satellite. En ce cas, tous les efforts de technologie, de méthodologie, de sûreté de fonctionnement qui ont fait que l'espace est aujourd'hui un moyen sûr de fournir des services à la collectivité, tous ces efforts deviendraient inutiles.

Pour chercher un ordre de grandeur, supposons que le seuil "inacceptable" soit une probabilité d'impact destructeur de 1% pour un satellite de 30m² d'envergure, ayant une durée de vie de 5 ans à 800 km d'altitude, et imaginons, pour simplifier, que l'impact destructeur corresponde à un débris d'au moins 5 mm de diamètre. On trouve que l'abondance de débris qui ferait atteindre ce seuil "inacceptable" n'est que trois fois l'abondance actuelle.

Or, l'activité spatiale en orbite basse va beaucoup augmenter. MIR 2 va se substituer à MIR 1 avec toutes les activités et les dessertes correspondantes.

La station spatiale FREEDOM va être construite au cours de nombreux vols d'ici l'an 2000, puis dessertes, activités extra-véhiculaires...

Les orbites fortement inclinées (98° environ) verront la suite de la filière SPOT, la filière HELIOS, la filière des plates-formes polaires de la NOAA, de la NASA, de l'ASE... soit peut-être 10 à 12 satellites de grandes dimensions d'ici la fin du siècle.

Le débit de masses sur ces orbites très fréquentées sera beaucoup plus grand qu'il n'a jamais été.

A quelles conditions l'activité spatiale peut-elle échapper à cet auto-étouffement ?

Par analogie avec les scénarios étudiés dans le problème du climat par la commission internationale sur le changement climatique, on peut envisager trois attitudes :

A) "Business as usual" . Les impératifs de rentabilité et de politique à court terme l'emportent. Aucun accord n'est trouvé entre les promoteurs de lancements spatiaux pour adopter des mesures préventives.

On peut alors estimer que dans 20 à 30 ans les impacts de débris deviendront une des causes majeures d'échec de mission, et que dans 50 ans l'utilisation de l'espace circumterrestre sera douteuse.

B) Scénario réformiste. Dans les 5 ans qui viennent les promoteurs de lancements spatiaux concluent un accord pour s'imposer des mesures de prévention énergiques. La quantité de débris en orbite circumterrestre atteint vers l'an 2000 un niveau de 30% à 50% supérieur à celui d'aujourd'hui, puis se maintient.

C) Scénario radical. Des mesures contraignantes sont prises, visant à limiter ou à contingenter l'activité spatiale sur les orbites les plus sensibles, mais aussi les plus utiles.

Le scénario A est inacceptable, car les services rendus par l'espace (télécommunications, télévision, météorologie, science, observation, reconnaissance, écoute, navigation...) sont irremplaçables.

Pourtant aujourd'hui, aucune concertation formelle entre agences spatiales ne se dessine.

Le scénario C aurait des conséquences dramatiques sur les applications de l'espace et sur l'industrie, et ne permettrait que de gagner un peu de temps.

Le scénario B est bien entendu le meilleur. Il importe toutefois que tous les pays promoteurs de lancement y adhèrent.

Il est temps de construire un accord international.

Jacques BRETON
Directeur de la Recherche au CNES