
LES DÉBRIS SPATIAUX

Ann C. Vandaele

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

En à peu près 50 ans d'activités spatiales, plus de 4800 lancements ont mis environ 6000 satellites en orbite autour de notre Terre. 800 d'entre eux seulement sont encore opérationnels aujourd'hui. Ces satellites sont utilisés dans différents domaines et disciplines, comme par exemple la recherche spatiale, l'observation de la Terre, la météorologie, la recherche sur le climat, les télécommunications, la navigation, l'exploration spatiale. Ils permettent l'acquisition de données uniques qui ouvrent un éventail de nouvelles possibilités sans égal tant sur le plan scientifique que technologique ou commercial. En parallèle à cette activité spatiale accrue, un nouveau type de danger est apparu : les débris spatiaux. Depuis le début de la conquête spatiale en 1957, l'activité humaine a produit dans l'espace un très grand nombre d'objets de toutes les tailles. Quelque 34000 objets d'une taille supérieure à 10 cm ont été observés au moins une fois par des radars ou des télescopes au sol. Pendant longtemps, on a considéré que l'immensité de l'espace autorisait d'y abandonner

sans précaution des objets comme les étages supérieurs, les satellites en fin de vie, et des objets divers tels que des boucliers, boulons Mais aujourd'hui avec l'augmentation constante du nombre de ces débris, les risques encourus par les satellites en opérations deviennent prohibitifs. En effet un doublement du nombre d'objets augmente le risque de collision d'un facteur quatre environ.

Qu'est-ce qu'un débris spatial ?

Le CNES donne la définition suivante pour les débris spatiaux : *ce sont tous les corps créés par l'Homme incluant leurs fragments ou pièces s'en étant détachées, autre qu'un véhicule spatial actif ou susceptible d'être utile différemment, d'une taille supérieure à 10 microns, évoluant autour de la Terre dans l'espace extra-atmosphérique.*

En plus des 5500 tonnes correspondant à du matériel spatial en bon ordre de fonctionnement, on compte de nombreux objets en orbite. Les évaluations récentes comptabilisent ainsi environ

13000 objets d'une taille supérieure à 10 cm qui sont suivis régulièrement par des capteurs, 200 000 objets d'une taille comprise entre 1 et 10 cm, et 35 000 000 d'objets d'une taille comprise entre 0,1 et 1 cm. Les particules d'une taille inférieure à 0,1 cm sont bien sûr encore plus nombreuses.

Quelque 13000 objets sont ainsi suivis et catalogués. Ils concernent essentiellement des objets plus grands que 5 à 10 cm en orbite basse (LEO, Low Earth Orbit) ou dépassant



Figure 1 : Répartition des débris autour de la Terre (Crédit CNES)

les 30 cm en orbite géostationnaire (GEO, Geostationary Earth Orbit). 6% seulement de la population cataloguée sont des satellites opérationnels, alors que 38% peuvent être associés à des satellites hors d'usage, des étages supérieurs de fusées ou à d'autres objets en relation avec la mise en orbite (couvercles d'optique, adaptateurs pour les lancements, ...). Les 56% restants proviennent de fragmentations qui ont eu lieu dans l'espace. A part une dizaine de collisions accidentelles ou intentionnelles, la majorité de ces fragmentations sont le résultat d'explosions de vaisseaux spatiaux ou d'étages supérieurs de fusées. Celles-ci ont créé une population d'objets de l'ordre du centimètre. La cause principale de ces explosions est à mettre en relation avec les résidus de matériaux combustibles qui persistent dans les réservoirs une fois l'étage de fusée ou le satellite mis au rebut. Au cours du temps, l'environnement spatial rude altère l'intégrité mécanique des éléments externes et internes, provoquant des fuites ou des mélanges de combustibles qui peuvent induire l'embrassement. L'explosion détruit l'objet initial et produit une multitude de fragments plus petits répartis sur un large éventail de masses et de vitesses. Les objets plus petits, de 0,1 à 1 mm sont en général d'origine météoritique. Il ne faut pas non plus oublier le rôle important du rayonnement solaire ultraviolet extrême ou celui

des collisions avec les atomes et ions, comme l'oxygène atomique, voire même avec des microparticules faisant partie de l'environnement naturel de notre Terre. Tous ces phénomènes provoquent une érosion des surfaces, des pertes de masses, des altérations des surfaces de protection, le détachement de peintures, entraînant une production de petits débris de l'ordre du millimètre. De sorte que, pour cette gamme de taille, la pollution créée par l'Homme est maintenant devenue supérieure à l'environnement naturel dû aux météorites.

En résumé, on compte :

- 13000 objets > 10 cm (objets catalogués)
- 200000 objets entre 1 et 10 cm (objets non catalogués)
- 35 000 000 objets entre 0,1 et 1 cm (objets non catalogués)

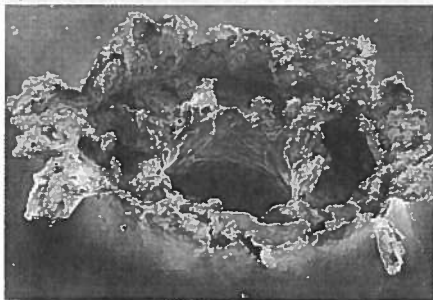


Figure 3: Exemple d'impact sur une surface d'un satellite (Crédit : CNES)

Densité des débris spatiaux

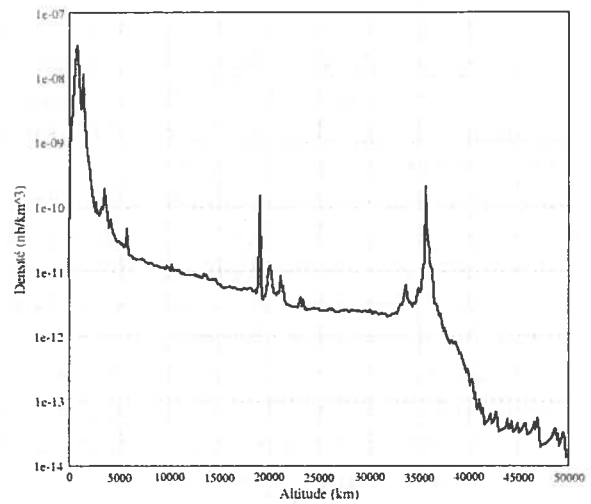


Figure 2: Densité des débris spatiaux en fonction de l'altitude (Crédit: CNES)

Durée de vie des débris

Les satellites mis en orbite basse sont continuellement exposés aux forces aérodynamiques dues aux couches les plus externes de notre atmosphère. Même si celles-ci sont très peu denses, elles n'en exercent pas moins un effet. En fonction de l'altitude, après quelques semaines ou années, la résistance de l'air va faire en sorte de ralentir les satellites, suffisamment pour les faire quitter leur orbite et les faire plonger vers la surface. Aux altitudes plus élevées, au-dessus de 800 km, la résistance de l'air est moindre et les objets peuvent rester à leur place pendant plusieurs décennies.

Tableau 1: Exemples de durée de vie d'objets en orbite autour de la Terre

Exemple d'objets spatiaux	Orbite (altitudes périégée et apogée)	Durée de vie
Station Spatiale Internationale	400 km x 400 km	entre 6 mois et 1 an
SPOT	825 km x 825 km	200 ans
Orbite de transfert géostationnaire	200 km x 36000 km	environ 10 ans
Orbite géostationnaire	36000 km x 36000 km	millions d'années

L'altitude à laquelle vont rester certains objets va dépendre non seulement de leur masse et de leur taille mais aussi de la résistance de l'air ou de l'attraction luni-solaire. Le résultat est une dépendance en latitude et en altitude de la répartition des objets autour de la Terre (Figures 1 et 2). On parle de densité d'objets spatiaux évoluant dans un volume donné à une altitude donnée. Il est intéressant de connaître les zones d'évolution des débris spatiaux catalogués à des fins d'analyse de mission ainsi que leur évolution au cours du temps. Cette connaissance peut se traduire, par exemple, par la densité d'objets spatiaux par altitude. La Figure 9 montre les zones d'intérêt pour les applications ou missions spatiales, c'est-à-dire les orbites basses (altitude inférieure à 2000km), les orbites moyennes dites MEO (altitude autour de

20000 km), les orbites géostationnaire et géosynchrones. On note que des concentrations particulièrement importantes sont observées aux altitudes de 800 à 1000 km et à 1400 km.

Pour fixer des ordres de grandeur, voici quelques exemples de durée de vie sur des objets bien connus (voir Tableau 1).

On peut distinguer deux types de risque liés à la durée de vie des débris en orbite :

- Le risque en orbite qui inclut les risques de collision avec des objets opérationnels du fait de leurs durées de vie en orbite importantes, les risques liés à la production de débris suite au vieillissement des matériaux et des impacts éventuels avec d'autres débris ou météorites, et aux éventuelles explosions ;
- Le risque au sol, c'est-à-dire le risque de faire des victimes au sol lors des retombées sur Terre.

Risques en orbite

Les dommages engendrés par les débris spatiaux peuvent être relativement importants même si la taille du débris est petite. Ceci est tout simplement dû à la vitesse orbitale des débris qui est très élevée (8-10 km/s) et par conséquent l'énergie cinétique n'en est que plus importante.

Des mesures en laboratoire permettent d'étudier l'impact de ces petits objets. Par exemple, une sphère d'aluminium d'un diamètre de 1mm se déplaçant à une vi-

tesse de 10 km/s perce facilement une paroi d'aluminium de 4 mm d'épaisseur. Cette sphère a alors la même énergie cinétique qu'une boule de pétanque lancée à 100km/h.

Les débris d'une taille inférieure à 0,01cm ne font qu'éroder les surfaces des satellites opérationnels sur le long terme (effet cumulatif) générant par exemple le détachement d'écaillés de peinture tandis que les débris d'une taille comprise entre 0,01 et 1 cm provoquent des dommages significatifs comme des perforations d'équipements dont les conséquences peuvent être variables en fonction de l'équipement atteint (dysfonctionnement mineur à total de l'équipement). Ceci a été notamment observé sur les panneaux solaires du télescope Hubble par exemple.

Par contre, les débris d'une taille comprise entre 1 cm et 10 cm engendrent des dommages très importants compte tenu de leur énergie cinétique. Ils présentent un réel danger du fait qu'ils ne sont pas catalogués à ce jour. Les débris d'une taille supérieure à 10 cm ont des conséquences catastrophiques pour le satellite atteint pouvant aller jusqu'à sa perte voire générer une explosion.

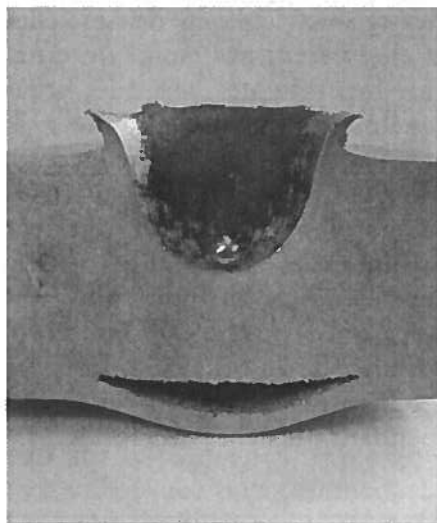


Figure 4: Cette image est le résultat d'un test d'impact réalisé en laboratoire entre une bille d'aluminium (de 1,2 cm diamètre, 1,7 g) et une plaque d'aluminium de 18 mm d'épaisseur. Dans un tel impact la pression et la température peuvent être supérieures à celles régnant au centre de la Terre (> 365 GPa et > 6000 K). Le cratère de l'impact a un diamètre de 9,0 cm et une profondeur de 5,3 cm. (Crédit: European Space Agency, ESA)

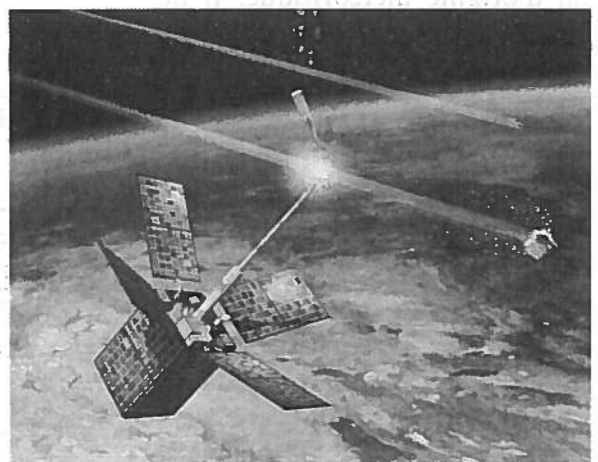


Figure 5: Illustration d'artiste de la collision ayant détruit le satellite CERISE (Crédit: CNES)

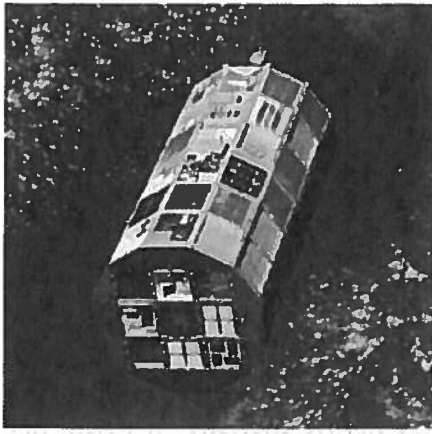


Figure 6: L'expérience LDEF (Crédit: NASA)

Intéressons-nous à la probabilité d'une collision dans l'espace. Prenons l'exemple d'un satellite évoluant sur l'orbite type SPOT c'est-à-dire autour de 825 km d'altitude, ayant une surface de 20 m². La probabilité de collision entre ce satellite et des débris sur 1 an dépend de la taille des débris :

Taille	Probabilité
>0,1 mm	1
>1 mm	0,5
>1 cm	3x10 ⁻³
>10 cm	2x10 ⁻⁴

L'interprétation de ces chiffres est la suivante : si l'on considère que l'environnement est figé dans le temps c'est-à-dire le nombre et la répartition des débris restent les mêmes et que le satellite évolue sur la même orbite, alors il y aura 2 collisions en 10 000 ans avec des débris d'une taille supérieure à 10 cm.

La probabilité de collision dépend à la fois du flux de particules qui est fonction de l'altitude, de la surface du véhicule et de la durée passée en orbite. En moyenne, tous les 14 jours, un objet d'une taille supérieure à 10 cm passe à moins de 1500 m de chaque satellite SPOT ou Helios. La navette spatiale américaine changeait en moyenne 1 hublot par mission à cause d'impacts de météorites ou de dé-

bris. Elle a par ailleurs déjà réalisé des manœuvres d'évitement vis-à-vis de débris catalogués (taille supérieure à 10 cm). Le premier cas de collision avérée entre objets catalogués s'est produit le 24 juillet 1996 entre le satellite français Cerise et un débris issu d'une explosion d'un étage supérieur d'Ariane (voir Figure 5). On peut citer encore de nombreux cas de telles collisions, comme par exemple : 17 janvier 2005, la collision entre un étage lanceur américain (Thor) et un débris de lanceur chinois (CZ-4), en décembre 1991 (collision identifiée en 2005), collision entre satellite de navigation russe (COSMOS 1991) et un débris de satellite russe (COSMOS 926), ou encore le 10 février 2009, une collision qui a impliqué deux satellites, dont un actif (IRIDIUM 33), et un satellite russe inactif mais intact (COSMOS 2251). Les débris générés par cet évènement sont nombreux (de l'ordre du millier) et se situent à des altitudes très peuplées (vers 800km).

De nombreux impacts de débris et météorites ont été recensés sur les panneaux du télescope spatial HUBBLE, panneaux récupérés au sol afin de mener des analyses. Un trou d'une taille de 1,9 x 1,7 cm a été détecté dans une des antennes.

L'expérience LDEF (Long Duration Exposure Facility, Figure 6) avait pour but de fournir des données sur l'environnement spatial sur le long terme et ses effets sur les systèmes spatiaux et opérations. Il s'agissait d'un véhicule d'une forme cylindrique composé de 57 expériences, lancé en 1984 qui est resté en orbite environ 5,5 ans avant d'être ramené sur Terre. L'analyse de ses surfaces a montré des dizaines de milliers d'impacts dont le plus grand impact avait un diamètre de 0,63 cm.

Risques au sol

Lors des rentrées atmosphériques, les objets traversent les couches de l'atmosphère. Durant cette traversée, les matériaux chauffent intensément et une grande partie est "sublimée"..... mais il reste parfois des éléments qui résistent à la rentrée du fait de leur forme et de la nature des matériaux les composant (acier, titane, composite...). La survie à la rentrée est plus importante pour les grandes structures comme les réservoirs.

Contrairement à la croyance populaire, les satellites ou débris qui quittent leur orbite et entrent dans l'atmosphère terrestre ne brûlent pas tous lors de leur réentrée : certains composants peuvent en effet survivre au chauffage intensif car ils sont prévus pour ça. Par exemple, et heureusement, les composants des navettes spatiales résistent aux fortes chaleurs et tensions grâce à leur bouclier prévu à cet effet. La survie d'un élément de satellite non particulièrement protégé peut se produire si la température de fusion du composant est suffisamment élevée ou si sa forme lui permet d'évacuer rapidement la chaleur produite de manière à rester en deçà de cette température de fusion. Lors de la réentrée, l'objet décélère rapidement et les charges sur la structure peuvent dépasser les 10 G. Ces tensions, combinées aux hautes températures, causent la dislocation de la structure. Lorsque les éléments ont perdu assez de vitesse, le taux de réchauffement diminue, et ils commencent à se refroidir. A ce moment, ces objets ont déjà atteint les couches plus denses de l'atmosphère et tombent littéralement tout droit vers le sol. Ils impactent le sol avec des vitesses relativement faibles.

Il existe deux types de rentrée atmosphérique : rentrée contrôlée et rentrée naturelle.

Dans le cas d'une rentrée contrôlée, l'homme guide la rentrée de l'objet grâce à des moteurs vers une zone inhabitée de son choix comme l'océan. Cela a été le cas, par exemple, avec la rentrée contrôlée du satellite ASTRA 1-K réalisée par le CNES en décembre 2002 suite à un échec au lancement. Un autre cas bien connu est la rentrée de Mir qui a eu lieu en mars 2001 dans le Pacifique Sud. La masse de Mir en orbite était de l'ordre de 140 tonnes en orbite et au final 30 tonnes de débris sont retombés dans l'Océan Pacifique.

Les risques de blesser ou tuer quelqu'un au sol sont extrêmement faibles.

Dans le cas d'une rentrée non guidée par l'homme, il est difficile de prévoir longtemps à l'avance la zone où tous les débris de l'objet rentrant vont retomber :

- 10 jours avant la retombée, la date de rentrée n'est connue qu'à 1 jour près seulement.
- 1 jour avant la retombée, la date de rentrée n'est connue qu'à 1 à 2 orbites près.

Mais il faut se rappeler que 70% de la surface de la Terre sont des océans, par conséquent, le risque de faire une victime à la rentrée est faible. Par ailleurs, il s'agit de relativiser ce risque puisqu'à ce jour plus de 20000 objets (>10cm) environ sont rentrés sur Terre sans jamais faire de victime.

Des exemples d'objets ayant survécu à la rentrée sont disponibles sur le site du *Center for Orbital and Reentry Debris Studies* (<http://www.aero.org/capabilities/cords/index.html>). Un réservoir d'hélium haute pression d'Ariane V13 lancé en mai 1985 est retombé en mars 2002 en Ouganda.



Figure 7: Réservoir d'hélium haute pression d'Ariane V13 retombé en 2002 en Ouganda. (Crédit: CNES)

Le risque lié à la retombée d'objets créés par l'homme est plus faible que le risque lié aux rentrées de météorites qui est connu comme étant faible.

Lottie Williams est la première et la seule personne (septembre 2008) à avoir été touchée par un débris spatial d'origine humaine. Alors qu'elle se promenait dans un parc de Tulsa, Oklahoma, le 22 janvier 1997 à 3 h 30, elle remarqua une lueur dans le ciel qu'elle prit pour une étoile filante. Quelques minutes plus tard, elle fut frappée à l'épaule par un objet métallique sombre de 15 cm qui s'avéra plus tard être une pièce de réservoir d'une fusée Delta II lancée en 1996. Elle ne fut pas blessée.

Le suivi des débris spatiaux

La population des débris spatiaux ne cessant de croître, il est important de pouvoir caractériser cette population et sa répartition. Les débris de faible taille sont observés de manière statistique et servent à élaborer des modèles d'environnement artificiel donnant leur flux de débris. Les débris de taille supérieure peuvent être observés individuellement à l'aide de capteurs afin de calculer leur trajectoire et de pouvoir ainsi évaluer les risques de collision et les risques lors de la rentrée atmosphérique.

On a déjà cité la taille des débris qui font l'objet de ce suivi : de l'ordre de ou plus grand que 10 cm pour des objets situés en orbite basse et de l'ordre du mètre pour les objets évoluant en orbite géostationnaire. En fait ces tailles sont un compromis entre le coût d'un système de détection et de suivi et ses performances.

Pour observer la population des débris spatiaux, il existe des moyens au sol et en orbite. Les moyens d'observation au sol sont des radars ou des télescopes, qui permettent de suivre les trajectoires d'objets mesurant quelques centimètres. Les moyens embarqués permettent quant à eux de caractériser la densité de petits débris via l'observation d'impacts sur des surfaces soumises à l'environnement spatial. Cela peut être des détecteurs spécifiques embarqués sur des satellites ou sur la station spatiale, ou bien encore simplement des équipements en orbite qui ont été récupérés au sol comme les panneaux du télescope de Hubble par exemple. Ces moyens peuvent être civils ou militaires. Ils permettent d'accéder à des informations comme l'orbite de l'objet (position, vitesse), sa surface équivalente radar ou sa magnitude qui permet de remonter à sa taille apparente, ou tout simplement à des informations statistiques comme le nombre d'impacts, l'énergie de l'impact.

Un objet est, par définition, dit **catalogué** si une désignation internationale (numéro), une orbite et quelques caractéristiques (origine, dimensions,...) ont pu lui être associés et si ces données sont réactualisées régulièrement.

Les télescopes au sol peuvent détecter des débris en orbite géostationnaire de l'ordre de 10 cm et des radars peuvent suivre des objets en orbite basse de l'ordre du millimètre. Par exemple, le radar

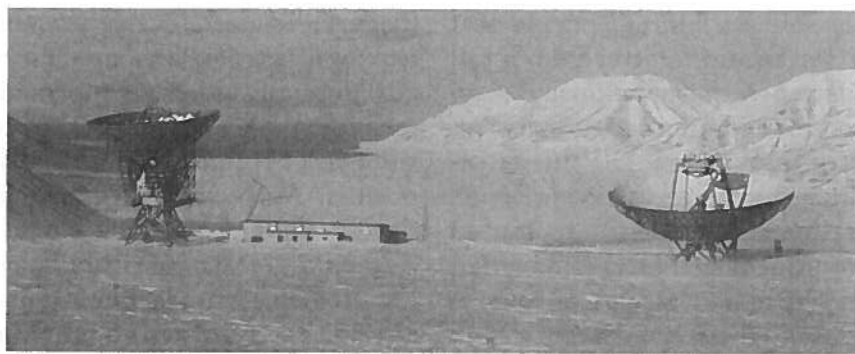


Figure 8a: Le radar EISCAT sur l'île de Svalbard près de Longyearbyen avec son antenne parabolique de 32 m (Crédit: ESA).

EISCAT (European Incoherent Scatter Radar) à Tromsø en Norvège est utilisé dans les bandes des 930 MHz et 225 MHz, associé à un autre radar situé à Longyearbyen, Svalbard. La mission principale du réseau EISCAT est de réaliser des mesures ionosphériques. Cependant un code de suivi de débris est en opération en *background* et permet de suivre des débris LEO d'une taille de l'ordre de 2 cm. Ces radars permettent actuellement un suivi continu. Ils ont notamment observé le nuage de débris créé par l'explosion du satellite chinois Feng-Yun 1C en janvier 2007.

Existe-t-il des solutions pour réduire le nombre des débris spatiaux ?

Il faut garder en tête quelques principes qui doivent guider le choix des techniques à mettre en œuvre. Il faut à la fois limiter les risques de collision en orbite, mais aussi limiter les risques associés aux réentrées. La plus simple des solutions est de réduire le nombre d'objets spatiaux en orbite autour de la Terre. Pour les risques en orbite, l'attention doit se focaliser sur les zones dites d'intérêt. Ces zones d'intérêt (Figure 9) sont tout simplement des zones d'altitude qui sont intéressantes au titre des applications ou missions spatiales: observation de la Terre, télécommunications, navigation, mission scientifi-

que... Il s'agit des orbites basses, des orbites MEO (autour de 20 000 km d'altitude), l'orbite géostationnaire et les orbites géosynchrones. Les zones protégées sont représentées par les régions A et B sur la Figure 9. La région A correspond aux altitudes inférieures à 2000 km. La région bleue est un tore décrit par un angle de $\pm 15^\circ$ autour de l'orbite géostationnaire sur une altitude environ de ± 300 km. La zone verte désigne tout simplement l'orbite GEO.

Il existe quatre solutions : l'évitement, la protection, l'élimination et la prévention.

Évitement

Cela consiste à réaliser des manœuvres afin d'éviter toute collision avec les débris dans le cas d'un satellite ou bien à modifier l'heure de tir d'un lancement en cas de risque de collision. Cette solution ne peut être mise en œuvre que pour éviter les débris catalogués c'est-à-dire ceux régu-

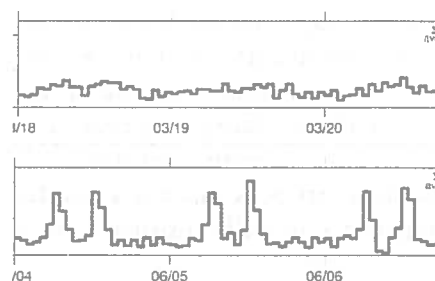


Figure 8b: Taux de détection de débris observés par les radars EISCAT à Svalbard avant (figure du dessus) et après (figure en-dessous) le test réalisé par la Chine en janvier 2007 (Crédit: ESA)

lièrement suivis par un système de surveillance de l'espace, soit les débris d'une taille supérieure à 10 cm (de l'ordre de 13000 objets). Par ailleurs, les données relatives à la trajectoire des objets spatiaux sont imprécises ce qui peut conduire à des fausses alertes. Ces évitements coûtent chers et ne sont pas toujours faciles à réaliser. De ce fait, cela sera réservé aux lancements, et aux satellites sensibles. L'évitement ne couvre donc qu'une partie du risque (moins de 5%) et ne concerne que les objets catalogués.

Protection

Des mesures de protection des satellites peuvent être mises en œuvre pour atténuer les effets d'un impact avec des débris : les blindages spécifiques ou intrinsèques.

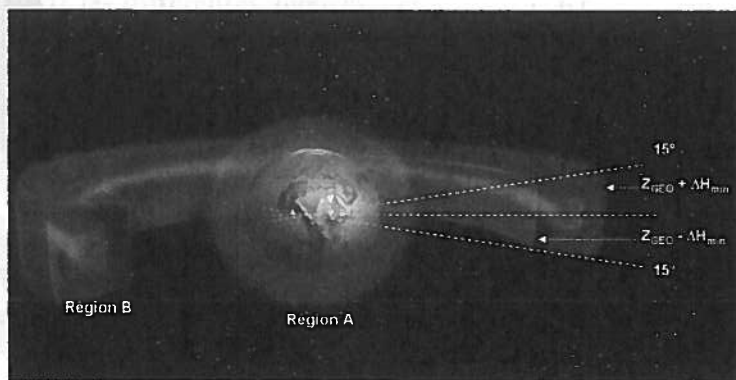


Figure 9: Zones d'intérêt (Crédit: CNES)

Les blindages spécifiques sont des blindages multi-couches (Kevlar ou Nextel); cela consiste à rajouter des surfaces de protection autour de l'élément à protéger. Ils ne sont efficaces que vis-à-vis des débris d'une taille jusqu'à 1 cm.

Les blindages intrinsèques consistent à utiliser les parois du satellite comme boucliers, ou à privilégier des attitudes particulières (cas de la navette spatiale par exemple). Une conception intelligente de l'architecture du satellite permet de protéger les équipements fragiles en les plaçant soit sur des faces qui seront peu exposées soit par exemple à l'intérieur du satellite ou derrière des équipements moins sensibles si cela est possible.

Toutes ces mesures vont souvent engendrer un surcoût non seulement en termes de masse mais aussi de coût. Ces mesures n'auront bien entendu un effet positif que si la taille des débris est inférieure à 1 cm. Cette solution ne couvre donc aussi qu'une partie du risque.

Ces deux premières solutions ne concernent que des débris entre 0,01 et 1 cm et ceux supérieurs à 10 cm, et encore ils n'offrent pas une protection à 100 %. Ils n'apportent aucune solution en ce qui concerne les débris dont la taille est comprise entre 1 et 10 cm. En effet, l'énergie cinétique du débris est alors trop importante ce qui rend les blindages inefficaces. Par ailleurs, ces débris ne sont pas catalogués, ce qui signifie que nous ne disposons d'aucune information sur leur position, il est donc impossible de les éviter !

Deux autres solutions pourraient alors être envisagées.

Elimination

Il s'agirait de nettoyer l'espace pour diminuer le nombre de dé-

bris soit en les récupérant soit en les faisant rentrer sur Terre. Différentes propositions ont été évoquées comme la récupération par la navette spatiale ou un satellite spécifique ou bien la désorbitation à l'aide de câble ou d'un remorqueur spatial, la destruction des objets par laser. A ce jour, la faisabilité de tels concepts n'a pu être démontrée. Par ailleurs, le coût serait sans aucun doute extrêmement élevé.

Le dernier projet en date est celui proposé par l'École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL et le Centre spatial suisse: CleanSpace One, un petit satellite de récupération de débris, qui doit les désorbiter afin de les détruire dans l'atmosphère terrestre. Avec CleanSpace One, les initiateurs du projet veulent aller récupérer le picosatellite Swisscube (820 grammes, 10 cm de côté) mis en orbite en 2009 ou Tisat lancé en juillet 2010. Une fois lancé, le petit CleanSpace One – 30 cm de long sur 10 de large et 10 de haut – devra rejoindre sa cible, la saisir, se stabiliser, sortir de l'orbite et se diriger vers l'atmosphère terrestre où le couple de satellites se consumera.

À terme, CleanSpace ambitionne de désorbiter des objets bien plus gros. C'est pourquoi le Cnes, l'Esa et certains industriels suivent ce projet qui doit valider en vol les différentes technologies nécessaires à ce type de mission. Si la récupération de Swisscube ou Tisat réussit, les technologies mises en œuvre pourront être extrapolées pour des débris bien plus encombrants.

La mission n'est pas envisagée avant 2016, car en effet, trois dé-

fis de taille attendent ce premier nettoyeur spatial. Chacun d'entre eux implique un développement technologique qui pourra par la suite être appliqué à d'autres dispositifs. Après son lancement, il s'agira d'abord pour le satellite d'adapter sa trajectoire afin de rejoindre l'orbite de sa cible. Il pourrait pour cela utiliser un nouveau type de moteur destiné à l'espace, ultracompact, également en développement dans les laboratoires de l'EPFL. Lorsqu'il sera parvenu à proximité de son objectif, qui fonce à 28000 km/h et à 630 ou 750 km d'altitude, CleanSpace One le saisira et le stabilisera – une mission particulièrement délicate à ces vitesses, surtout si le satellite à éliminer est en rotation. Pour l'accomplir, les scientifiques envisagent de développer un mécanisme de préhension dont le fonctionnement s'inspirerait du monde animal ou végétal. Enfin, couplé au satellite à désorbiter, CleanSpace One devra prendre la direction de l'atmosphère terrestre, où les deux satellites seront brûlés.

Prévention

La solution la plus réaliste est d'éviter de générer de nouveaux débris et de limiter ainsi la prolifération des débris. Il s'agit par exemple d'appliquer des mesures

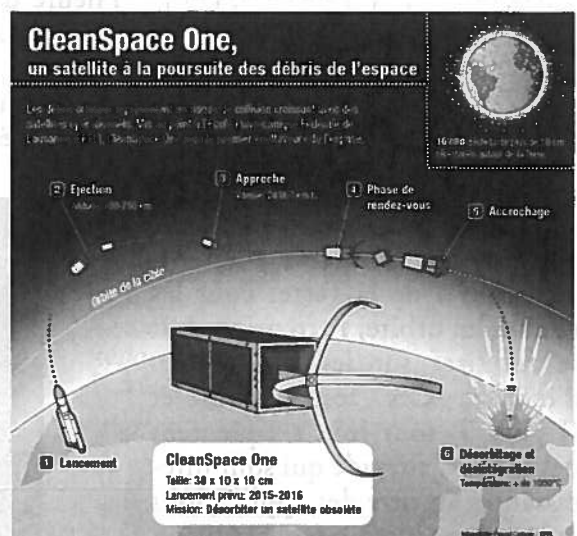


Figure 10 : Schéma de principe de CleanSpace (Crédit; EPFL)

de passivation des étages supérieurs ou des satellites, de désorbiter ou ré-orbiter les satellites afin de protéger certaines zones d'intérêt.

Il existe plusieurs mesures qui ont été identifiées à ce jour. On peut par exemple citer la libération volontaire d'éléments (attaches de câbles électriques, boulons explosifs, ressorts, ...). Cette libération volontaire doit être conçue pour que les éléments libérés soient retenus. Lors des lancements, le nombre d'éléments constitutifs du véhicule de lancement doit être limité à 1 pour un lancement simple et à 2 maximum pour un lancement multiple en dehors des satellites lancés.

Tout véhicule spatial qui restera dans l'espace après la fin de sa phase de retrait de service doit être passivé afin de réduire l'occurrence d'explosion. Cela consiste à éliminer toute l'énergie stockée : vidanger les réservoirs, décharger les batteries, baisser la pression des réservoirs par exemple.

Les mesures de prévention possibles pour protéger la région des orbites basses pourraient concerner la désorbitation directe du véhicule (rentrée atmosphérique contrôlée), le transfert du véhicule sur une orbite qui lui permettra de rentrer naturellement sur Terre en moins de 25 ans, ou encore le transfert du véhicule vers des orbites dites cimetières qui se situent au-delà des 2000 km en orbite basse. Il s'agit avant tout de limiter la durée de vie des véhicules (satellites, étages lanceur) dans cette zone.

La protection de l'orbite géostationnaire consisterait à transférer par exemple le satellite sur une orbite dite "cimetière" qui se trouve à environ +/- ΔH kilomètres au-dessus de l'orbite géostationnaire.

Un moyen d'assurer que le satellite ainsi déplacé ne revienne jamais dans la zone protégée est de définir la quantité ΔH en tenant compte de l'évolution long terme de son orbite due à la pression de radiation solaire. Cela se traduit par la formule suivante :

$$\Delta H = 235 + 1000 \times Cr \times S/m \text{ (km)}$$

où Cr = coefficient de réflexivité du véhicule spatial en début de vie (début de phase orbitale) et S/m = rapport de la surface apparente (en m^2) sur la masse sèche (en kg) du véhicule. Il existe également d'autres stratégies pour tenir compte de cette perturbation d'orbite, par exemple le fait d'orienter le périégée de l'orbite vers le soleil.

Réglementation

L'objectif d'une réglementation est de donner des principes et des méthodes de conception et d'opérations, appelés aussi "règles de bonne conduite", pour prévenir la génération de débris spatiaux, et favoriser l'utilisation de techniques opérationnelles permettant de limiter au mieux la création de débris en phase d'opérations, tout en préservant la compatibilité des programmes et projets spatiaux avec les exigences de mission, les exigences de sauvegarde et l'objectif de coût réduit. En fait, il n'existe aujourd'hui aucune réglementation internationale. Il existe quelques standards développés par les différentes agences spatiales, comme le code standard NASA établi en 1995 ou le code de conduite européen établi en 2004.

Il ne faut pas oublier que toutes ces mesures ou règles représentent un coût non négligeable en termes de masse, performance, développement et opérations. Elles doivent faire l'objet d'un consensus international pour que

tous les acteurs du domaine spatial appliquent les mêmes règles dans un contexte de concurrence économique. Du fait de la nécessité d'un consensus international, un comité international composé d'agences spatiales gouvernementales, l'IADC (Inter Agency Space Debris Coordination Committee) a été créé en 1993. Il regroupe 11 agences spatiales : ASI (Italie), BNSC (Angleterre), CNES, CNSA (Chine), DLR (Allemagne), ESA (Europe), ISRO (Inde), Japon, NASA (Etats-Unis), NSAU (Ukraine), FSA (Russie). L'IADC est une force de proposition pour les Nations Unies en matière de débris spatiaux. Ses objectifs sont notamment :

- d'échanger des données relatives aux activités de recherche sur les débris spatiaux entre les membres du comité et de coopérer dans ce domaine d'étude,
- de mener des études techniques sur les débris spatiaux,
- d'identifier et d'évaluer les mesures de prévention pour établir au final des recommandations.

Ce comité a établi un recueil de principes dictant les règles de base acceptées par les agences à appliquer qui a été avalisé par les Nations unies en 2007, après examen et approbation par le COPUOS (Committee for Peaceful Uses of Outer Space) élargissant ainsi le débat à l'ensemble des pays concernés.

Comme on le voit, si l'intention de s'attaquer à ce problème existe au sein des différentes agences, nous sommes encore loin d'une solution qui puisse être facilement mise en pratique.

Pour plus de détails: <http://debris-spatiaux.cnes.fr/>, http://www.esa.int/esaMI/Space_Debris/index.html