



Figure 1 : Rentrée dans l'atmosphère de débris spatiaux. Crédits : NASA.

Des débris dans l'espace comme sur la terre

André Deschamps

Membre senior SEE

En plus d'un demi-siècle d'activité spatiale, l'humanité a procédé à plus de 5500 lancements de satellites. On considère comme débris tous les objets créés par l'Homme incluant leurs fragments ou pièces s'en étant détachés, à l'exclusion des véhicules actifs ou susceptibles d'être utilisés différemment, se trouvant sur orbite contrôlée.

Quels débris ?

La population d'objets, d'origine humaine, en orbite autour de la Terre est composée des satellites opérationnels et des débris spatiaux. Dans une certaine littérature les véhicules spatiaux opérationnels sont parfois inclus dans le terme «débris spatiaux» afin de pouvoir établir une différenciation entre l'environnement naturel constitué, entre autres, par les météorites et l'environnement artificiel regroupant l'ensemble des objets

créés par l'Homme qu'ils soient fonctionnels ou non. Dans cet article, il sera tenu compte uniquement des artefacts, à l'exclusion des objets naturels.

On retrouve dans cette catégorie des objets entiers (satellites désactivés, étages supérieurs, capots, sangles, ...) qui représentent la moitié des débris orbitaux connus. L'autre moitié est composée de fragments de toutes tailles produits par l'explosion d'étages de lanceurs ou de satellites.

En 1996 on a observé la première collision connue dans l'espace entre un satellite opérationnel et un débris : selon l'identification fournie par les Etats-Unis, un débris provenant de l'explosion en 1986 d'un troisième étage d'Ariane a percuté et endommagé le satellite français Cerise.

Une fois leur vie opérationnelle achevée, ou une panne ayant entraîné leur perte, la plupart des satellites sont demeurés sur leur orbite. Le vieillissement des revêtements et des équipements, comme les

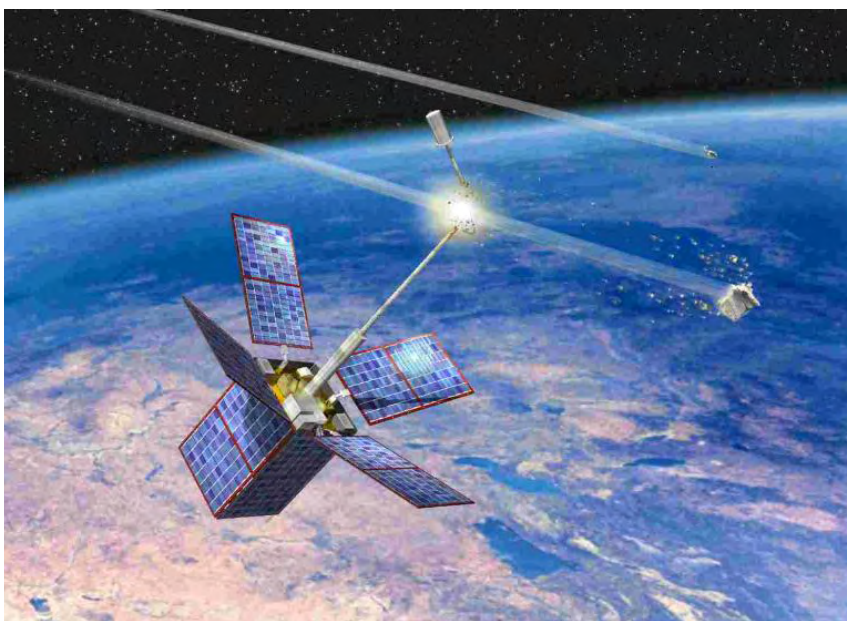


Figure 2 : Vue d'artiste de la collision du satellite « Cerise » avec un débris spatial. Source CNES.

Quels formes de dégâts ?

Les dommages engendrés par les débris spatiaux peuvent être relativement importants même si la taille du débris est petite. Ce phénomène est dû à la vitesse orbitale des débris qui est très élevée. Elle est de l'ordre de 25.000 Km/h pour un satellite en orbite basse produisant une énergie cinétique importante.

Pour de petits débris d'une taille inférieure à 1/10 de millimètre, ceux-ci ne feront qu'éroder les surfaces des satellites impactés. Mais cette érosion, cumulée sur le long terme, peut occasionner le détachement d'écaillés de peinture ou des bandes de la couverture de protection thermique. Les débris d'une taille comprise entre 1/10 de millimètre et 1 centimètre, peuvent engendrer des dommages significatifs comme la perforation des équipements. Selon l'équipement atteint et son temps de fonctionnement, les dommages peuvent aller d'un dysfonctionnement mineur, à la perte du module et peut mener à la perte du satellite.

générateurs solaires, a pu produire une fragmentation partielle. Un résidu d'ergol dans un réservoir ou la surcharge d'une batterie peut entraîner une explosion et la dispersion de centaines de débris.

Kessler a modélisé par une théorie qui porte son nom la réaction en chaîne produite par la collision de deux objets spatiaux se fragmentant en un millier de débris

plus petits mais tout aussi potentiellement dévastateurs.

La figure 3 montre l'accroissement du nombre de débris détectés depuis 1960, ils sont ici caractérisés par la somme de leur surface équivalent Radar. En rouge figurent les satellites inactifs, en orange sont les lanceurs et en vert foncé figurent les objets produits par un lanceur.

Comment les observe-t-on ?

Des débris de toutes tailles

Le nombre des débris spatiaux ne cessant de croître, il est important de pouvoir caractériser cette population et sa répartition. Les débris de faible taille ne sont connus que de manière statistique et servent à élaborer des modèles d'environnement artificiel. 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 dans l'espace ainsi que lors de leur rentrée atmosphérique.

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 environ

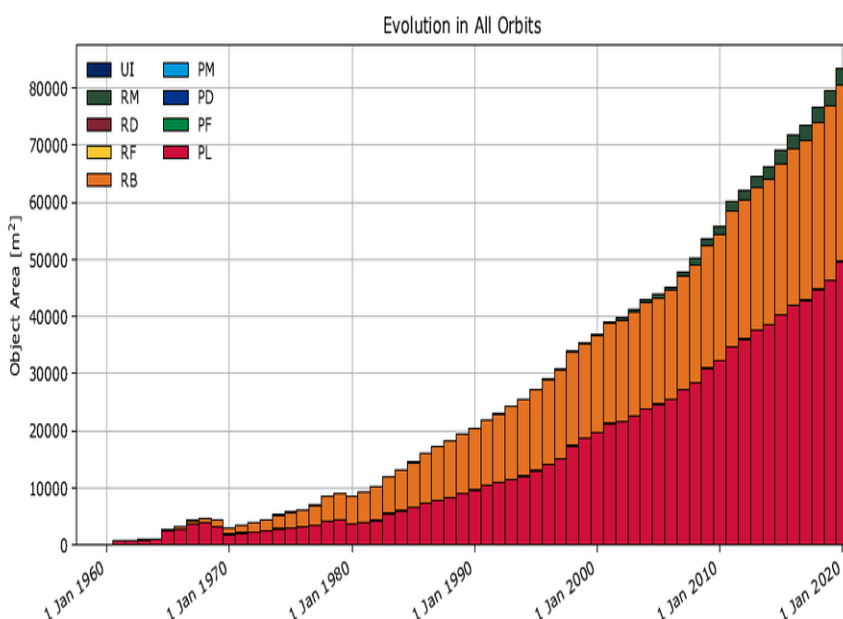


Figure 3 : Augmentation de la présence de déchets spatiaux. Source : ESA.

Radar au sol	Orbites Basses (altitudes inférieures à 2000 Km)	Détection d'objets de plus d'1 cm situés à 1000 Km Poursuite d'objets de plus de 10 cm
Télescope au sol	Orbite Géostationnaire Orbites Géosynchrones	Détection d'objets de plus de 20 cm Poursuite d'objets de plus de 50 cm
Capteurs Embarqués Matériels récupérés	Fonction de l'altitude du satellite porteur. Orbite très basse pour les matériels récupérés	Détection d'objets de 1 à 10 mm

Tableau 1

10 centimètres en orbite basse, et environ 1 mètre en orbite haute. 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. Ces détecteurs spécifiques sont embarqués sur certains satellites ou sur la station spatiale. D'autres débris ont été récupérés lors des opérations de maintenance en orbite comme les panneaux du télescope (voir tableau 1).

Classés par taille et orbite

Les moyens au sol et en orbite permettent d'acquérir deux types de connaissance :

- Une connaissance déterministe et précise pour les objets de plus de 10 cm en orbite basse et environ 1 m en orbite haute ;
- Une connaissance statistique et moins fiable pour les objets de très petite taille.

Ils permettent d'accéder à des informations comme l'orbite de l'objet (position, vitesse), sa surface équivalente radar ou sa magnitude optique. Cette connaissance permet de remonter à la taille apparente de l'objet, ou tout simplement à des informations statistiques comme le nombre d'impacts par unité de temps et l'énergie d'impact.

Un objet est considéré comme catalogué si une désignation internationale (numéro COSPAR), une orbite et quelques caractéristiques (origine, dimensions, ...)

ont pu lui être associées, et si ces données sont réactualisées régulièrement.

Un danger dans l'espace...

Lors des collisions en orbite, même un petit débris peut causer de gros dégâts. La taille du débris n'est pas proportionnelle à la taille des dégâts causés. Ainsi, un objet de 1 cm de diamètre aura la même énergie qu'une berline lancée à 130 km/h. Malheureusement, il n'existe pas de moyen de s'en protéger, on ne peut qu'en subir l'impact. Il n'est pas toujours possible d'effectuer une manœuvre d'évitement pour des déchets trop petits pour être catalogués. Et les astronautes sont aussi concernés.

D'autres collisions sont répertoriées dont le liste serait trop longue et fastidieuse, mais en voici quelques-unes. En 2015, l'ISS a manœuvré 5 fois pour éviter des collisions avec des débris spatiaux.

En 1996, le petit satellite Cerise du CNES a eu le triste privilège d'être la première victime avérée d'une collision avec un objet catalogué, lorsqu'un débris issu de l'explosion de l'étage supérieur de l'Ariane qui avait lancé Spot 1 a sectionné son mât de stabilisation (figure 2).

Un de ces exemples de collision catastrophique à 8 km/s a eu lieu le 10 février 2009 à 16:56 TUC à 776 kilomètres au-dessus de la péninsule de Taïmyr

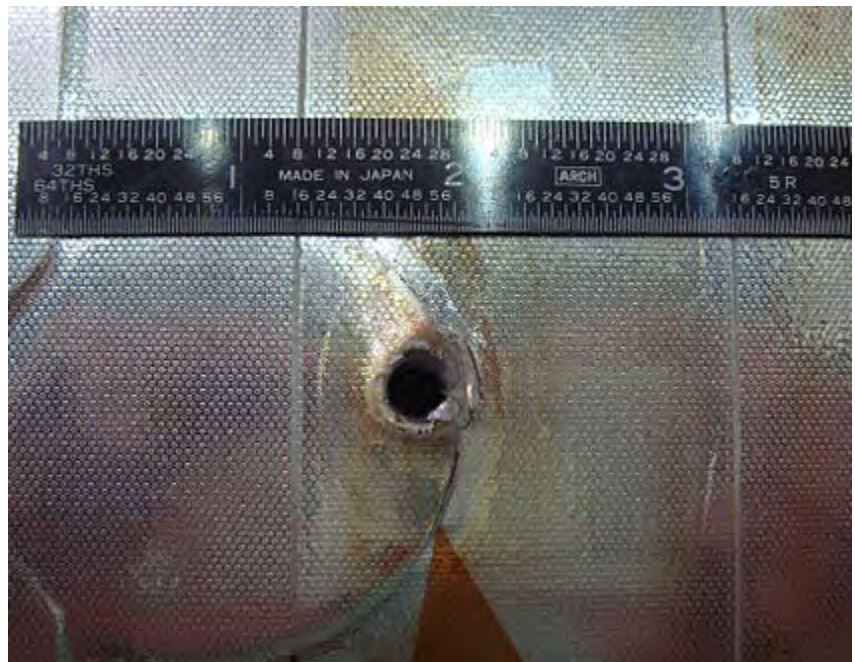


Figure 4 : Trou dans le radiateur de la navette spatiale américaine Endeavour provoqué par un débris durant la mission ST-118. Le diamètre de l'orifice d'entrée est de 6,4 mm et celui de sortie est le double. Source : NASA.

en Sibérie. Cette collision impliquait le satellite commercial Iridium 33 (560 kg) et le satellite Cosmos-2251 (900 kg), un satellite de télécommunications militaires russe hors service. Cette collision a été la première impliquant deux satellites intacts. Par suite de cette collision plus de 2000 débris, d'une taille suffisante pour être catalogués, ont été générés.

Il est possible, lorsqu'on le peut, de programmer la rentrée dans l'atmosphère. Ainsi pour la station Mir, le cargo européen ATV ou ses homologues russes Progress : afin de se débarrasser des gros objets sur orbite, une manœuvre a été effectuée afin de les placer sur une trajectoire interceptant les couches denses de l'atmosphère au-dessus d'une zone sans risque, telle que le Pacifique Sud, loin des îles habitées et du trafic aérien ou maritime. Pour les épaves, comme les derniers étages de lanceurs ou de gros satellites hors de contrôle, ce n'est malheureusement pas possible. Généralement l'erreur relative d'estimation de la date de rentrée non contrôlée d'un engin spatial est d'environ 10 %.

...mais aussi sur Terre

Tous les débris finissent par retomber sur Terre. Si la plupart se vaporisent lors de leur rentrée atmosphérique 10 à 20 % arrivent à la surface du globe. Dans la majorité des cas, les impacts ont lieu dans des zones immergées de la Terre qui ne compte que 3 % de surface habitée.

Lors de la rentrée atmosphérique d'un engin spatial, ce dernier va être soumis à des contraintes thermomécaniques très importantes. Ces contraintes vont générer la fragmentation, et éventuellement l'explosion de l'objet rentrant. Une fois que l'objet rentrant a été fragmenté, générant un nombre plus ou moins important de fragments, ces derniers vont suivre à leur tour des contraintes thermomécaniques importantes compte tenu que les fragments vont traverser des couches atmosphériques de plus



Figure 5 : Chute de débris d'un lanceur Delta à 250 km de Ryad, Arabie Saoudite .



Figure 6 : Débris de la chute au Zimbabwe d'une fusée lancée il y a 40 ans. Source : Bulawayo.

en plus denses. Un certain nombre de ces fragments brûleront littéralement et n'arriveront jamais au sol, tandis que des composants conçus pour résister à des fortes contraintes de température et de pression pourront arriver au sol. Si possible dans le cas d'une rentrée contrôlée, l'attitude au début de la phase de rentrée est maîtrisée ce qui permet une meilleure estimation de la région géographique où les fragments de l'objet rentrant retomberont.

Pour le moment, on ne décompte aucune victime due à l'impact d'un débris spatial. La probabilité qu'un individu soit impacté par un débris spatial est estimée à un sur mille milliards. Comparativement, la probabilité d'être impacté par la foudre est estimée à 1 sur un million.

Une gestion opérationnelle des déchets

La gestion opérationnelle des risques de collision consiste en la détection des rapprochements dangereux entre deux objets spatiaux pour ensuite analyser d'un point de vue statistique la probabilité que ces derniers entrent en collision.

Compte tenu de sa complexité, la connaissance de la trajectoire de chaque déchet est entachée d'erreurs. Cette incertitude sur la position et la vitesse des objets spatiaux en orbite, doit être correctement modélisée afin de pouvoir réaliser une gestion opérationnelle des risques de collision en réduisant le nombre de cas pour lesquels une manœuvre sera décidée.

●●● Lorsqu'on le peut, pour se débarrasser des gros objets en orbite comme la station Mir, le cargo européen ATV ou ses homologues russes Progress, on les manœuvre afin de les placer sur une trajectoire interceptant les couches denses de l'atmosphère au-dessus d'une zone sans risque. Ils représentent cependant un danger, car leurs structures ne seront pas totalement détruites lors de la rentrée dans l'atmosphère. C'est le cas en particulier de certains réservoirs ou des chambres de combustion des moteurs, conçus pour résister à de fortes chaleurs et de fortes pressions.

Les dates, et par conséquent la localisation de l'endroit géographique, où la rentrée aura lieu sont difficiles à modéliser. Ce manque de données induit des incertitudes sur le coefficient balistique qui détermine l'importance du frottement atmosphérique. En évaluant ce coefficient avec une incertitude de 10 %, nous obtenons une fenêtre de rentrée et donc une trace au sol. Dix jours avant la rentrée, l'incertitude est d'une journée, dix heures avant, elle est de la durée d'une orbite, ce qui nous donne une trace au sol de 40 000 km de long.

Une protection insuffisante

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

Les blindages spécifiques sont des blindages multicouches qui consistent 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 inférieure à 2 cm.

Les blindages intrinsèques consistent à utiliser les parois du satellite comme boucliers, ou à privilégier des attitudes particulières comme ce fut le cas sur la navette spatiale. Une conception intelligente de l'architecture du satellite permet de protéger les équipements

“ 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 à l'intérieur du satellite ou derrière des équipements moins sensibles si cela est possible. ”

fragiles en les plaçant soit sur des faces qui seront peu exposées à l'intérieur du satellite ou derrière des équipements moins sensibles si cela est possible. Toutes ces mesures engendrent une augmentation de masse, mais aussi de coût.

Cette solution ne couvre donc qu'une partie du risque.

Le blindage des satellites

L'idée est simple : il s'agirait de recouvrir les satellites de plusieurs couches supplémentaires destinées à fragmenter les débris et protéger les parois sensibles. Cette solution ne fonctionne que pour des débris de moins de 1 cm. Par ailleurs, les blindages sont lourds, chers à développer et souvent difficiles à positionner sur les satellites. Elle n'est donc pas envisagée pour l'ensemble des objets spatiaux, mais uniquement utilisée pour les véhicules habités comme l'ISS ou les ravitailleurs de la station.

Une réglementation contraignante

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. Elle permettra de favoriser l'utilisation de techniques opérationnelles limitant au mieux la création des débris en phase d'opérations, tout en préservant la compatibilité des programmes et projets spatiaux avec les exigences de la

mission, les exigences de sauvegarde et les objectifs de coût réduit.

Comme il n'existe pas, aujourd'hui, de solution pour se débarrasser des débris déjà créés, les principaux acteurs du domaine spatial ont commencé à prendre des mesures préventives pour essayer de réduire la production de débris. Ces mesures consistent, par exemple, à mettre sur une orbite « cimetière » les satellites géostationnaires en fin de vie afin de libérer l'orbite « utile », ou à rendre inertes les étages de lanceur après leur mise en orbite pour éviter tout risque ultérieur d'explosion. Ces mesures sont décrites dans des documents tels que le « Code de conduite européen sur les débris spatiaux » développé par l'Agence Spatiale Italienne (ASI), l'Agence Spatiale du Royaume Uni (UKSA), l'Agence Spatiale Allemande (DLR), le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Ces mesures représentent à l'évidence un surcoût non négligeable. On peut citer par exemple, une limitation de la durée de vie en orbite des étages de lanceurs, ce qui peut conduire à la réduction de la charge utile. De même la nécessité de désorbiter ou de réorbiter les satellites en fin de mission entraîne une réduction potentielle de leur durée de vie, à cause de la consommation supplémentaire d'ergols, et nécessite la mise en place de dispositifs supplémentaires dont le coût peut être très élevé. Comme l'activité spatiale se développe de plus en plus dans un contexte de concurrence économique, avec en par-

ticulier l'apparition de nouveaux acteurs, les mêmes règles doivent être appliquées par tous les acteurs du domaine pour être efficaces. Ces règles doivent faire l'objet d'un consensus international. Pour cela, les principales Agences ont mis en place une structure de coordination appelée IADC (*Inter-Agency Space Debris Coordination Committee*). Ce comité, créé en 1993 à la suite d'une initiative américaine, regroupe aujourd'hui les douze principales Agences spatiales, dont le CNES depuis 1996. L'IADC a publié en octobre 2002 le document « *IADC Space Debris Mitigation Guidelines* » qui décrit les mesures à appliquer dans l'espace pour lutter contre la prolifération des débris.

Au niveau des pays, le sujet est discuté dans le cadre des Nations Unies par le Comité pour l'utilisation pacifique de l'espace extra-atmosphérique (CUPEEA), plus connu sous son acronyme anglais, COPUOS. Les Etats membres se sont mis d'accord sur un recueil de principes

de haut niveau, issu des recommandations de l'IADC qui a été entériné par l'Assemblée Générale des Nations Unies en décembre 2007. Les Etats sont invités à introduire ces grands principes dans leur législation nationale pour les rendre applicables par tous leurs industriels et opérateurs. C'est le cas de la France pour laquelle la loi relative aux opérations spatiales a été votée en juin 2008. Cette loi, établissant des règles du jeu claires et équitables, permet d'établir la sécurité juridique de tous les acteurs du spatial, qu'ils soient publics ou privés. La réglementation technique associée contient, conformément aux recommandations de l'ONU et de l'IADC, des exigences sur les débris spatiaux.

Des méthodes ponctuelles

Quelques méthodes développées par certaines agences sont présentées ici, mais la limite de cette récupération des déchets apparaît clairement.

Une mission de l'ESA

En septembre 2018, le satellite de démonstration Remove Debris, lancé par le Surrey Space Centre (Royaume-Uni) et financé par la Commission européenne a réussi avec succès à déployer un filet pour capturer un débris en orbite à 300 kilomètres d'altitude. Ce dernier a ensuite été précipité vers l'atmosphère terrestre où il s'est consumé. L'avantage de cette technique est qu'elle permet de capturer des déchets de n'importe quelle taille, y compris les plus petits. Il est possible d'attraper des objets jusqu'à sept mètres de distance. En septembre 2019, le même satellite a mené un deuxième test avec un harpon lancé à 20 mètres par seconde vers un panneau composite situé à 1,5 mètre. Le harponnage est plutôt adapté aux débris de très grande taille, comme les réservoirs et les étages supérieurs de lanceurs spatiaux. Les ingénieurs ont également dû s'assurer que l'impact du harpon sur la cible ne générerait pas de

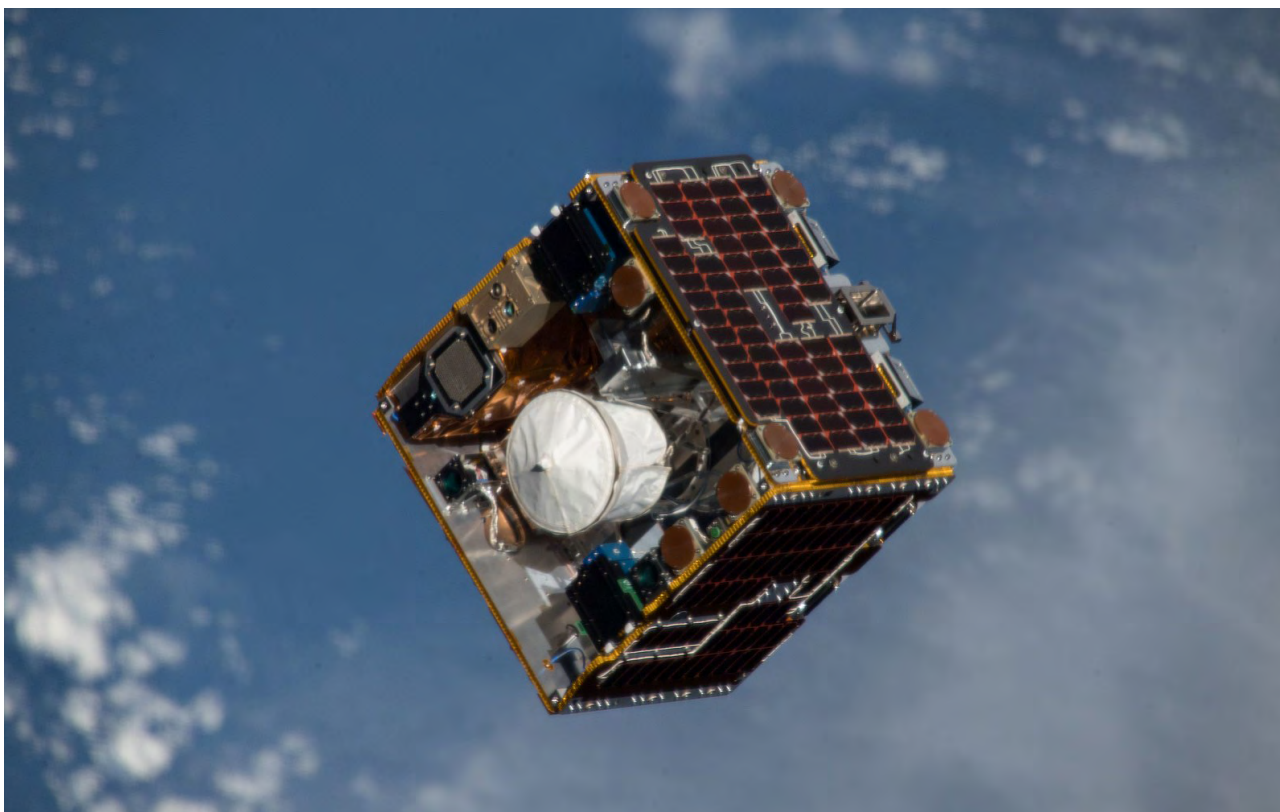


Figure 7 : Le satellite « Remove Debris » photographié depuis l'ISS. Source : ESA.

●●● nouveaux débris. Il a donc été conçu de telle manière que les fragments créés par le choc soient projetés vers l'intérieur de la structure cible.

Dévier les satellites avec un rayon laser

Plutôt que de récupérer les satellites en bout de course, il s'agit ici les faire fondre avec un rayon laser. Plusieurs scientifiques envisagent ainsi de bombarder les vieux satellites avec un faisceau laser pour les faire dévier de leur trajectoire.

Un remorqueur magnétique

L'utilisation d'un remorqueur magnétique pour désorbiter les satellites a été présenté en 2017 à l'Agence spatiale européenne. Ces remorqueurs seraient équipés d'électroaimants qui ajusteraient la trajectoire du satellite en utilisant le champ magnétique terrestre. Le système serait ainsi capable de dévier un satellite à 10 à 15 mètres de distance sans entrer en contact avec lui, avec une précision de 10 centimètres. Le concept permettrait également de maintenir en formation un essaim de satellites chasseurs capables de traiter plusieurs morceaux de débris, ou de coordonner et de guider les débris vers un endroit spécifique.

Emprisonner les déchets dans de la mousse

La méthode proposée consiste ici à accroître le volume d'un débris pour augmenter sa traînée et précipiter sa chute vers la Terre. Décrit par des chercheurs italiens en 2011, le système est censé éjecter de la mousse expansible depuis une plateforme, qui va adhérer à la surface cible, gonfler et recouvrir les débris. Selon les calculs de chercheurs, le débris doit être entouré d'une mousse d'un volume correspondant à au moins 0,07 fois sa masse, soit 14 mètres cubes pour un débris de 200 kg par exemple. Plus on augmente ce rapport,

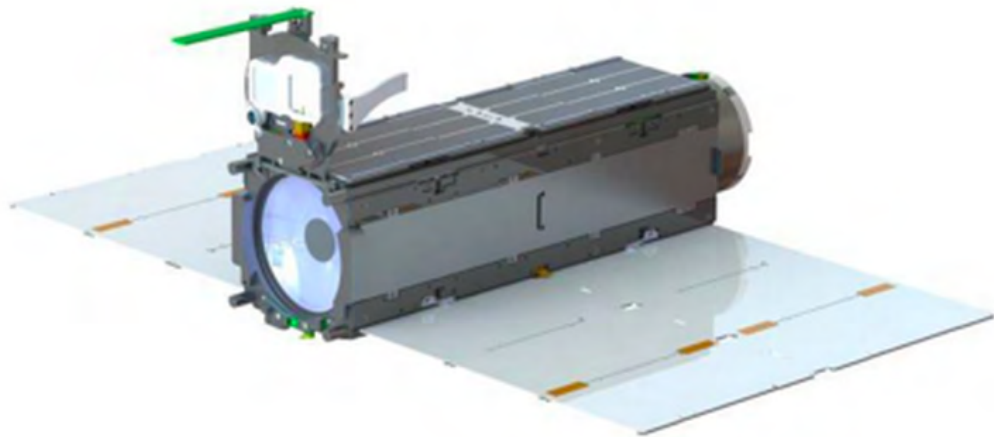


Figure 8 : Un satellite du type « Cube Sat » récupéré par l'ISS. La taille du corps du satellite est d'environ 20 x 20 x 80 cm.

et plus la rentrée dans l'atmosphère se fait rapidement : c'est pourquoi cette méthode s'adresse plutôt aux débris de petite taille.

Des satellites qui s'autodétruisent

La start-up japonaise ALE Co développe un satellite que l'on pourrait désorbiter à la demande. Ce dernier sera équipé d'une cathode en nanotube de carbone et d'une attache électrodynamique. Une fois sa mission terminée, la sangle sera déployée vers l'espace pour modifier l'orbite du satellite induite par le champ magnétique de la Terre, forçant le satellite à plonger vers l'atmosphère.

De son côté, l'entreprise japonaise Sumitomo Forestry veut développer un minisatellite en bois baptisé Lignosat, qui serait entièrement consommé dans l'atmosphère lors de sa chute. Les satellites actuels contiennent en effet des composants en Kevlar ou en alliages métalliques qui résistent à l'échauffement et peuvent de disséminer dans la haute atmosphère. Le lancement du Lignosat est prévu pour cette année.

Et ça ne va pas s'arranger...

Toutes ces initiatives légales et techniques montrent que les débris sont au

cœur des préoccupations de la communauté spatiale. Cela ne l'empêche pas de s'interroger sur l'avenir.

La recrudescence de lancements de petits satellites témoigne d'un réel marché (500 nouveaux microsats par an) et de la démocratisation du domaine spatial. Ces satellites miniatures sont certes très efficaces mais en général dépourvus de propulsion. Ils ne peuvent donc pas éviter les collisions en orbite ni se désorbiter en fin de mission. Ainsi, leur nombre important vient grossir les rangs des futurs débris spatiaux.

De plus, le recours annoncé aux méga-constellations de satellites en orbite basse ne va pas dans le sens de la diminution de la population d'objets spatiaux. La plupart de ces demandes émanent de structures qui n'ont pas l'habitude de lancer des satellites ou qui annoncent la réalisation de satellites à bas coût. Il y a donc fort à parier que ces projets ne seront pas forcément conçus dans le respect de toutes les contraintes énoncées précédemment. Ainsi la priorité de l'IADC à l'heure actuelle est de proposer une réglementation spécifique aux méga-constellations de satellites dans l'optique d'éduquer ces nouveaux acteurs et non pas de nuire aux activités spatiales commerciales. ■