



Assemblée générale

Distr. générale
13 novembre 2018
Français
Original : anglais/espagnol

**Comité des utilisations pacifiques
de l'espace extra-atmosphérique**
Sous-Comité scientifique et technique
Cinquante-sixième session
Vienne, 11-22 février 2019
Point 7 de l'ordre du jour provisoire*
Débris spatiaux

Recherche sur les débris spatiaux, la sûreté des objets spatiaux équipés de sources d'énergie nucléaire et les problèmes relatifs à leur collision avec des débris spatiaux

Note du Secrétariat

I. Introduction

1. À sa cinquante-cinquième session, le Sous-Comité scientifique et technique du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique est convenu qu'il faudrait continuer à inviter les États Membres et les organisations internationales dotées du statut d'observateur permanent auprès du Comité à soumettre des rapports concernant la recherche sur la question des débris spatiaux, la sûreté des objets spatiaux équipés de sources d'énergie nucléaire, les problèmes relatifs à la collision d'objets de ce type avec des débris spatiaux et la façon dont les lignes directrices relatives à la réduction des débris spatiaux étaient appliquées (voir [A/AC.105/1167](#), par. 146). À cette fin, une communication datée du 29 août 2018 a été envoyée aux États Membres et aux organisations internationales dotées du statut d'observateur permanent pour les inviter à soumettre leurs rapports avant le 5 novembre 2018, afin que les informations puissent être communiquées au Sous-Comité à sa cinquante-sixième session.

2. Le présent document a été établi par le Secrétariat à partir des informations reçues de deux États Membres, le Japon et le Mexique, et de la Fédération internationale d'astronautique (FIA). Un complément d'information fourni par le Japon et la FIA, qui comporte des données chiffrées relatives aux débris spatiaux, sera distribué en tant que document de séance à la cinquante-sixième session du Sous-Comité.

* [A/AC.105/C.1/L.373](#).



II. Réponses reçues d'États Membres

Japon

[Original : anglais]

[2 novembre 2016]

Aperçu

En réponse à une demande d'informations du Bureau des affaires spatiales du Secrétariat, le Japon fait savoir que ses activités relatives aux débris sont menées principalement par l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA).

Les activités relatives aux débris menées à l'Agence en 2018, qui sont exposées ci-après, ont été prises comme exemples des principaux progrès qui seront présentés à la prochaine session :

- a) Trente-sixième réunion annuelle du Comité de coordination inter-agences sur les débris spatiaux (IADC) ;
- b) Résultats de l'évaluation des conjonctions et recherches sur les technologies de base pour la connaissance de l'environnement spatial ;
- c) Recherches sur les techniques permettant d'observer des objets en orbite terrestre basse et en orbite géosynchrone et d'en déterminer l'orbite ;
- d) Système de mesure des microdébris *in situ* ;
- e) Protection contre les impacts de microdébris ;
- f) Réservoir d'ergol qui se désintègre facilement au moment de la rentrée dans l'atmosphère ;
- g) Retrait actif des débris.

Situation

Trente-sixième réunion annuelle du Comité de coordination inter-agences sur les débris spatiaux

La trente-sixième réunion annuelle de l'IADC s'est tenue en juin à Tsukuba (Japon). Plus d'une centaine d'experts techniques venant de 11 agences y ont participé. C'est la JAXA qui l'a organisée et accueillie. Les principales questions abordées ont été les suivantes :

- Déclaration de l'IADC sur les vastes constellations de satellites en orbite terrestre basse

L'IADC a déjà publié la déclaration qui n'énonce que des considérations qualitatives sur les vastes constellations, car les résultats des recherches sur l'impact que celles-ci ont sur la situation en matière de débris spatiaux étaient peu nombreux à l'époque. Au cours de cette réunion, les résultats de simulations de vastes constellations réalisées par les membres de l'IADC ont été présentés, et ceux-ci se sont entendus pour dire que les vastes constellations avaient un impact négatif sur la situation en matière de débris spatiaux. C'est pourquoi ils sont en train de mettre à jour la déclaration, pour y inclure des conditions plus restrictives assorties de valeurs numériques.

- Lignes directrices de l'IADC relatives à la réduction des débris spatiaux

Les lignes directrices ont été publiées en 2002 et révisées en 2007. Actuellement, de nombreux pays et entités internationales commencent à assortir leurs normes de conditions quantitatives pour la réduction des débris spatiaux, alors que pour les lignes directrices il a fallu employer un grand nombre de formulations qualitatives. Aussi l'IADC a-t-il entamé des discussions

pour assortir les lignes directrices de valeurs numériques, afin que ses membres puissent en avoir une compréhension commune plus concrète.

Résultats de l'évaluation des conjonctions et recherches sur les technologies de base pour la connaissance de l'environnement spatial

La JAXA est informée des conjonctions par le Combined Space Operations Center. En août 2018, 131 réunions avaient été consacrées à une manœuvre d'évitement des collisions fondée sur les notifications reçues, et depuis 2009 la JAXA a exécuté 26 de ces manœuvres concernant des engins spatiaux en orbite terrestre basse.

Technologies de base pour la connaissance de l'environnement spatial

La JAXA détermine l'orbite des objets spatiaux au moyen d'un capteur à radar du centre de veille spatiale Kamisaibara et d'un capteur optique du centre de veille Bisei. Elle établit des prévisions de rapprochements en se basant sur les dernières éphémérides de ses satellites et calcule les probabilités de collision. Par ailleurs, elle évalue, sur la base des expériences que nous menons, les critères utilisés pour l'évaluation des conjonctions et les manœuvres d'évitement de collision. Dans le cadre de ces évaluations, elle analyse l'évolution de chaque condition de conjonction et les erreurs de prévision dues à des perturbations (telles que les incertitudes concernant la traînée aérodynamique).

Recherches sur les techniques permettant d'observer des objets en orbite terrestre basse et en orbite géosynchrone et d'en déterminer l'orbite

En général, les objets en orbite terrestre basse sont observés principalement au moyen d'un radar, mais la JAXA s'efforce de remplacer cette méthode par un système optique pour réduire les coûts de construction et d'exploitation. Un grand capteur semi-conducteur complémentaire à l'oxyde de métal (CMOS) a été mis au point pour l'observation des orbites terrestres basses. L'analyse des données qu'il transmet à l'aide de techniques de traitement d'images basées sur une matrice prédiffusée programmable par l'utilisateur, que la JAXA a mises au point, nous permet de détecter des objets en orbite terrestre basse d'une taille inférieure à 10 cm. On a envisagé de recourir à un réseau d'observation optique destiné à réduire la charge d'évitement des collisions, en utilisant les données météorologiques réelles de la National Oceanic and Atmospheric Administration des États-Unis. Afin d'accroître les possibilités d'observation d'objets en orbite terrestre basse et en orbite géosynchrone, un site de téléobservation a été créé en Australie, en plus de l'observatoire du mont Nyukasa au Japon. Deux télescopes de 25 cm et un de 18 cm sont disponibles pour différents objectifs.

Protection contre les impacts de microdébris

La quantité de microdébris (moins de 1 mm de diamètre) en orbite terrestre basse a augmenté. Leurs impacts peuvent gravement endommager un satellite, étant donné que leur vitesse moyenne d'impact est de 10 km/s.

Pour évaluer l'impact des débris sur un satellite, la JAXA a élaboré un outil d'évaluation des risques de collusion avec des débris, baptisé Turandot, qui analyse ces risques par rapport à un modèle tridimensionnel d'engin spatial.

Réservoir d'ergol qui se désintègre facilement au moment de la rentrée dans l'atmosphère

Un réservoir d'ergol est généralement constitué d'un alliage de titane, matériau supérieur en raison de sa légèreté et de sa bonne compatibilité chimique avec les ergols. Cependant, il présente un point de fusion si élevé qu'il ne pourra pas se désintégrer lors de sa rentrée dans l'atmosphère, risquant de provoquer des accidents au sol.

Depuis 2010, la JAXA mène des recherches sur la mise au point d'un réservoir recouvert d'aluminium puis d'un composite de carbone, dont la température de fusion est moins élevée. Dans le cadre d'une étude de faisabilité, elle a effectué des essais de base, notamment un essai visant à déterminer si le revêtement en aluminium était compatible avec l'hydrazine de l'ergol, ainsi qu'un essai de chauffage par arc.

Après la fabrication et les essais de la première maquette du réservoir (EM-1), de taille réduite, un deuxième modèle d'ingénierie du réservoir (EM-2) a été fabriqué en grandeur nature. Il a une forme identique à celle du réservoir nominal, qui comprend un dispositif de gestion de l'ergol. Des essais de timbrage, de vibration (dans des conditions humides et sèches), d'étanchéité, de cyclage et de rupture sous pression ont tous été concluants. Après la fabrication du réservoir EM-2, il est prévu de fabriquer un prototype, qui sera également soumis à des essais.

Les délais de livraison et les coûts de ce réservoir d'ergol composite sont inférieurs à celui d'un réservoir d'ergol en titane. Toutefois, d'autres études et essais sont en cours pour déterminer sa capacité de désintégration pendant la rentrée dans l'atmosphère.

Retrait actif des débris

La JAXA a organisé et structuré un programme de recherche dont l'objectif est d'entreprendre, pour un faible coût, une mission de retrait actif des débris. La recherche-développement sur les techniques clefs de retrait actif des débris suit trois grands axes : l'approche d'objets non coopératifs, les technologies de capture de ces objets et les techniques de désorbitation de débris spatiaux volumineux intacts. La JAXA coopère avec des entreprises privées japonaises qui ont fait du retrait actif de débris à faible coût leur objectif et qui s'efforcent de fournir les techniques essentielles à cette fin.

La technologie du filin électrodynamique pourrait intégrer à l'avenir le système de propulsion en désorbitation destiné aux activités de retrait actif des débris, car elle peut contribuer à en réduire la taille et donc à en réduire les coûts. Pour tester certaines des techniques essentielles à l'utilisation de ce filin, la JAXA a planifié et mené en 2017 la mission KITE, qui visait à mener une expérience en orbite avec un tel filin monté sur le véhicule de transfert H-II 6 (HTV-6). Bien que le filin ne se soit pas déployé, la cathode à émission de champ, élément essentiel du système de filin électrodynamique, a bien fonctionné, et des données en orbite ont été obtenues qui permettront d'améliorer celui-ci.

Mexique

[Original : espagnol]
[7 novembre 2018]

Le Mexique collabore, par l'intermédiaire de l'Agence spatiale mexicaine, avec le Groupe de travail sur la viabilité à long terme des activités spatiales, dans les quatre groupes d'experts, à savoir : utilisation viable de l'espace en faveur du développement durable sur la Terre (groupe A) ; débris spatiaux (groupe B) ; météorologie spatiale (groupe C) ; et règles et conseils aux acteurs du domaine spatial (groupe D).

À cet égard, en ce qui concerne les recherches nationales sur les débris spatiaux et conformément à la pratique relative à l'élimination de ces débris, le Mexique mène de telles recherches, au sein de ses universités publiques. Par exemple, l'Universidad Nacional Autónoma de México, par l'intermédiaire de sa faculté d'ingénierie et de son centre de haute technologie de Juriquilla (Querétaro), mène des travaux visant à planifier les missions futures en mettant l'accent sur la viabilité.

Ces travaux portent sur la détection des particules spatiales, l'élaboration de modèles mathématiques de production de débris, la mesure de ces débris et l'établissement de plans de protection. En outre, l'Universidad Nacional Autónoma

de México s'emploie à installer une chambre à vide et une chambre de rayonnement électromagnétique pour tester les satellites et leur capacité à éliminer ces interférences, de façon à réduire la probabilité qu'ils dysfonctionnent pendant les opérations spatiales et deviennent des débris spatiaux. Des travaux visant à mettre au point des propulseurs électriques sont également en cours afin que les satellites atteignant la fin de leur vie utile puissent quitter leur orbite, revenir dans l'atmosphère terrestre et se désintégrer, sans produire des débris spatiaux supplémentaires.

En ce qui concerne la surveillance des débris spatiaux qui vise à assurer la sûreté des infrastructures spatiales, l'Université autonome de Sinaloa, grâce à l'utilisation de son télescope, s'est associée aux initiatives internationales menées par l'International Scientific Optical Network. Les débris spatiaux sont surveillés depuis 2012 et près d'une douzaine d'objets nouveaux sont découverts chaque année, notamment des fragments et des satellites perdus qui ont quitté l'orbite géostationnaire. L'observatoire astronomique exploité conjointement par l'Université autonome de Sinaloa et l'International Scientific Optical Network enregistre jusqu'à 864 images par nuit, et entre 30 et 70 objets spatiaux sont détectés. Le programme permet d'enregistrer automatiquement les images et d'enregistrer les coordonnées. L'enregistrement peut également être effectué manuellement.

Le Centre de recherche en sciences physiques et mathématiques de l'Université autonome de Nuevo León, qui fait partie du projet international de surveillance des débris spatiaux, comprenant un réseau de 25 observatoires dans plus d'une quinzaine de pays, sous la coordination de l'Institut Keldysh de l'Académie des sciences de Russie, s'est également associé à ces travaux. L'observatoire des débris spatiaux de l'Université, géré par la faculté des sciences physiques et mathématiques, y participe aussi. Il surveille les débris spatiaux afin d'identifier ceux qui pourraient endommager les satellites et, par conséquent, perturber des services tels que les signaux de téléphonie mobile ou les vols, ou provoquer des erreurs du Système mondial de localisation (GPS).

En outre, l'Institut polytechnique national et l'École de génie mécanique et électrique (ESIME) de Ticomán ont fondé l'Association aérospatiale ESIME de Ticomán qui, entre autres activités, mène des recherches sur des sujets comme les débris spatiaux. Ces établissements publient fréquemment des articles sur le sujet et diffusent des informations au sein de l'Institut et à destination du grand public.

Par ailleurs, le Réseau scientifique et technologique, en activité depuis 2011, est un groupe de chercheurs qui s'intéressent aussi aux techniques et aux sciences spatiales au Mexique et qui cherchent à recueillir des fonds pour organiser des séminaires, des ateliers et des projets multidisciplinaires impliquant une coordination entre des acteurs nationaux et internationaux du milieu universitaire, d'organismes publics, d'entreprises et de la société civile, afin de promouvoir le développement de ces techniques et sciences dans le pays. L'un de ses objectifs concrets est de promouvoir les recherches sur des sujets scientifiques tels que les débris spatiaux, en encourageant les experts et chercheurs mexicains à y participer, et de mettre en œuvre des projets annuels.

Toutes les activités susmentionnées sont menées conformément aux règles internationales telles que les Lignes directrices relatives à la réduction des débris spatiaux du Comité de coordination inter-agences sur les débris spatiaux (IADC), la recommandation ITU-R S.1003 de l'Union internationale des télécommunications sur la protection de l'environnement de l'orbite des satellites géostationnaires, les normes du Code européen de conduite pour la réduction des débris spatiaux et la norme 24113 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) « Systèmes spatiaux – Exigences de mitigation des débris spatiaux ».

Le Mexique a également participé, avec l'Allemagne, le Canada et la Tchèque, à l'initiative visant à élaborer un recueil des normes relatives à la réduction des débris spatiaux, qui a été présenté au Sous-Comité juridique du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique à sa cinquante-troisième session. Pour la première fois, un document donne des informations, communiquées par des États

Membres, dont le Mexique, sur les mesures réglementaires qu'ils ont prises pour réduire et éliminer les débris spatiaux.

Sûreté des objets spatiaux équipés de sources d'énergie nucléaire et problèmes relatifs à leur collision avec des débris spatiaux

Ce thème est abordé dans les lignes directrices aux fins de la viabilité à long terme des activités spatiales. Conformément au Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes (Traité sur l'espace extra-atmosphérique), le Mexique a maintenu sa position en faveur de la non-militarisation de l'espace et de ses utilisations pacifiques. L'utilisation de sources d'énergie nucléaire ne fait partie d'aucun de ses programmes spatiaux. Les normes publiées par l'Agence internationale de l'énergie atomique régissent l'utilisation de ces sources d'énergie. À cet égard, la sûreté des êtres humains dans l'espace extra-atmosphérique et de l'environnement spatial est un élément essentiel, comme dans toutes les questions relatives à l'utilisation des sources d'énergie nucléaire.

Sur ce point, les lignes directrices susmentionnées constituent un des fondements du cadre de sûreté.

Ni les Principes relatifs à l'utilisation de sources d'énergie nucléaire dans l'espace ni ces lignes directrices ne sont contraignants. L'article IV du Traité sur l'espace extra-atmosphérique prévoit une protection, quoique de façon limitée.

III. Réponses reçues des organisations internationales

Fédération internationale d'astronautique

[Original : anglais]
[5 novembre 2018]

Assurer la viabilité des activités spatiales dans le futur : la question des débris orbitaux

Une population orbitale en constante augmentation

Le tout premier lancement en orbite, celui de Spoutnik 1, le 4 octobre 1957, a ouvert la voie à toutes les applications spatiales dont nous bénéficions aujourd'hui. Notre vie quotidienne dépend de plus en plus d'applications qui s'avèrent indispensables et d'une importance stratégique pour le climat et pour les télécommunications, la localisation, la sécurité, la défense, les sciences et l'exploration. Ces applications sont également d'une grande importance économique, avec des millions d'emplois dans le monde et les milliards d'euros générés par les activités correspondantes.

Il faut cependant se rendre compte que le vol de Spoutnik 1 a également été la toute première étape de la pollution orbitale ; sur la même orbite que le satellite de 82 kg étaient placés l'étage principal qui l'avait mis en orbite, le bloc A Semioroka de 6,5 tonnes, et une petite coiffe de 100 kg qui l'avait protégé pendant la phase de montée dans l'atmosphère. Ainsi, près de 99 % de la masse propulsée en orbite n'y avait aucune fonction utile. Spoutnik a bipé pendant 21 jours, mais a passé au total 92 jours en orbite avant de revenir dans l'atmosphère. Cela signifie qu'il n'a eu aucune fonction utile pendant les trois quarts de sa vie orbitale. Ce satellite « mort », son étage de fusée principal et sa coiffe de protection étaient tous des objets artificiels, orbitaux et non fonctionnels, ce qui correspond à la définition des débris orbitaux.

Depuis 1957, le nombre des objets en orbite et leur masse ont considérablement augmenté.

C'est évidemment un signe de bonne santé du secteur spatial et de la quasi-explosion du nombre des applications associées, mais cela soulève également

des questions quant à la viabilité à long terme de nos opérations orbitales. La masse des objets en orbite a augmenté de manière linéaire depuis 1957, atteignant aujourd'hui près de 8 000 tonnes, et le nombre d'objets répertoriés (assez grands pour être suivis depuis le sol, généralement de 10 cm de diamètre en orbite terrestre basse ou d'un mètre à proximité de l'orbite géostationnaire) s'établit désormais à 20 000. Une telle augmentation peut paraître surprenante, étant donné que le nombre de lancements orbitaux réussis a considérablement diminué par rapport à la période de la guerre froide (140 lancements réussis en 1967 contre 52 en 2005) et que la réglementation internationale destinée à maîtriser l'augmentation de la population orbitale a été mise en place il y a plus de 20 ans, en 1995.

Sur les 20 000 objets répertoriés enregistrés aujourd'hui, quelque 1 700 sont des satellites actifs ; les autres sont des débris spatiaux, soit 92 % de la population orbitale. Ces débris se trouvent principalement en orbite terrestre basse, à des altitudes variant entre 600 et 1 200 km, ainsi qu'à proximité de l'orbite géostationnaire, à 35 800 km. La moitié des débris répertoriés sont constitués d'éléments entiers, de satellites morts, d'étages supérieurs laissés en orbite ou de reliquats d'opérations spatiales ; l'autre moitié est constituée de fragments de toute taille, de résidus de collisions ou d'explosions survenues en orbite.

En plus de ces grands objets répertoriés, quelque 750 000 autres de plus de 1 cm de diamètre et plus de 170 millions d'autres encore de plus de 1 mm de diamètre sont également en orbite autour de la Terre.

Ces chiffres peuvent paraître impressionnants, mais il faut garder à l'esprit que l'espace est infiniment large au-dessus de nos têtes. Les 8 000 tonnes d'objets orbitaux artificiels, soit l'équivalent de la masse de la tour Eiffel, sont disséminées dans tout l'espace entourant la Terre. La densité correspondante est extrêmement faible – au maximum 0,1 objet pour 1 million de kilomètres cubes dans la région la plus densément peuplée.

Néanmoins, ces objets présentent trois caractéristiques très particulières. La première est qu'une fois en orbite un objet y reste en général longtemps. Par exemple, un satellite évoluant à 1 000 km d'altitude y restera pendant 1 000 ou 2 000 ans. La seconde est qu'il se déplace à une vitesse orbitale proche de 8 km/s ou 30 000 km/h. Une telle vitesse, intégrée sur des milliers d'années, constitue un risque de collision important. La troisième est que tout objet placé en orbite terrestre basse est voué à retomber sur terre, risquant ainsi de provoquer des accidents.

Les débris orbitaux soulèvent deux problèmes majeurs

La rentrée atmosphérique incontrôlée de grands objets spatiaux constitue un risque pour les populations

Lors de la rentrée dans l'atmosphère, les débris se fragmentent sous la pression dynamique très élevée qui est proportionnelle au carré de la vitesse. Ensuite, les fragments qui en résultent sont soumis à des flux thermiques très élevés, proportionnels au cube de la vitesse en raison de la friction avec les molécules d'air, qui le plus souvent fait fondre les matériaux et induit un phénomène de sublimation. Malheureusement, ce processus est généralement incomplet, et environ 10 % à 20 % de la masse totale des débris peuvent survivre à leur rentrée dans l'atmosphère, selon les matériaux dont ils sont faits. Les matériaux réfractaires, comme le titane, le carbone et certaines variétés d'acier, ne fondent pas en franchissant le manteau atmosphérique et frappent la surface terrestre.

Heureusement, 71 % de la surface de la Terre est recouverte d'eau, le reste étant composé principalement de vastes zones désertiques. Les zones densément peuplées n'y représentent que 3 %, de sorte que le risque pour les populations reste faible.

Pour avoir un ordre de grandeur, un satellite ou un étage de lanceur de grande taille rentre fortuitement dans l'atmosphère une fois par semaine, le risque de blesser quelqu'un étant de 1 sur 10 000. Jusqu'à présent, autant que l'on sache, il n'y a jamais eu de victimes, bien que de nombreux débris de grande taille aient été retrouvés près

de zones habitées, dans de rares cas après avoir causé des dégâts mineurs à des bâtiments. Le problème plane au-dessus de nos têtes comme une épée de Damoclès : nous continuons à envoyer dans l'espace des étages ou des satellites de grande taille, sachant qu'ils finiront par retomber fortuitement dans l'atmosphère, générant un risque considérable pour les populations.

Risque de collision en orbite

Les collisions ont diverses conséquences. Il s'agit moins d'un problème de sûreté que d'un risque commercial associé aux dommages causés à des satellites actifs, utiles ou souvent indispensables à notre vie quotidienne.

Il existe plusieurs risques potentiels.

Une collision entre un petit débris non répertorié et un satellite actif peut entraîner la perte fonctionnelle de l'engin spatial. L'énergie cinétique libérée lors d'une collision est extrêmement élevée (une collision avec un débris de 1 mm de diamètre dégage une énergie de 1 kilojoule, soit l'équivalent d'une boule de bowling lancée à 100 km/h). Dans ces circonstances, même un léger impact peut entraîner la perte d'un satellite, par exemple si l'ordinateur de bord est touché. Plusieurs études ont montré que la probabilité de perdre un satellite à la suite d'une collision est de l'ordre de 5 %. Les débris spatiaux sont actuellement la première cause de perte de satellites en orbite. Comme les petits débris sont par définition non répertoriés, et donc cachés à notre vue, il n'y a aucun moyen d'empêcher de telles collisions.

Les collisions entre gros objets sont très rares, ne survenant qu'une fois tous les cinq à huit ans, selon les modèles. Cependant, chacune d'entre elles produit une grande quantité de nouveaux débris et peut donc augmenter considérablement le risque global en orbite. Cet effet de reproduction qu'elles induisent augmente le risque d'une augmentation incontrôlée de la quantité de débris. Connue sous le nom de syndrome de Kessler, il a été théorisé dès 1978. La situation pourrait devenir incontrôlable, même si nous arrêtons toute activité spatiale à l'avenir. Par exemple, la collision entre deux satellites, Iridium 33 et Kosmos 2251, en février 2009, a entraîné la formation de plus de 2 200 débris de grande taille, qui sont répertoriés, et d'une myriade de plus petits.

Des simulations menées par l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) des États-Unis puis par sept agences du Comité de coordination inter-agences sur les débris spatiaux (IADC) montrent que même si nous arrêtons complètement toute activité spatiale, la quantité de débris orbitaux augmenterait exponentiellement dans les années à venir. À titre d'exemple, les résultats des simulations menées par la NASA, dans lesquelles aucun lancement n'était prévu après 2006, montrent une nette augmentation de leur nombre à long terme due aux collisions entre des objets de grande taille.

Mesures visant à limiter le nombre de débris orbitaux à l'avenir et à garantir la viabilité des opérations spatiales

Un ensemble d'exigences international, efficace et largement accepté

La mesure la plus importante, voire fondamentale, consiste à établir des règles au niveau international pour empêcher la production de nouveaux débris dans le sillage des futures activités spatiales. C'est ce que l'on appelle la réduction des débris spatiaux, qui peut se résumer en cinq mesures adoptées à un haut niveau.

Premièrement, il est obligatoire de limiter la production de débris pendant les opérations normales de lancement et d'éviter toute destruction volontaire de satellites en orbite.

Deuxièmement, les explosions accidentelles en orbite doivent être évitées grâce à des mesures de passivation de tous les objets spatiaux laissés en orbite, qui consistent par exemple à éliminer toute source d'énergie stockée comme les ergols

résiduels, à dépressuriser les réservoirs et à décharger les batteries, ou à arrêter les volants d'inertie.

Troisièmement, il est nécessaire de limiter la durée de vie en orbite des objets spatiaux. Les satellites et les étages supérieurs des lanceurs doivent rester dans deux zones protégées pendant au plus 25 ans après la fin de leur durée de vie opérationnelle, à savoir les orbites terrestres basses et à proximité de l'orbite géostationnaire.

Quatrièmement, il convient de recommander aux exploitants de satellites de faire de leur mieux pour empêcher les collisions en orbite lorsqu'ils disposent d'informations suffisamment précises et que le satellite est manœuvrable.

Enfin, il est recommandé de réduire le plus possible le risque pour les populations que constituent les rentrées atmosphériques incontrôlées. À cette fin, les opérateurs devraient piloter une rentrée contrôlée pour toute mission présentant un risque d'accident supérieur à 1 sur 10 000.

Ces règles sont énoncées dans de nombreux textes, tant au niveau national qu'international. La liste ci-après ne vise qu'à montrer que de telles recommandations existent depuis plus de 20 ans maintenant.

La toute première publication exprimant des inquiétudes quant à la viabilité à long terme des activités spatiales semble être un document japonais daté de 1971. Ces premières réflexions ont été suivies de nombreuses autres, mentionnées dans des travaux de la NASA publiés dès 1974 et en Europe avant 1987, qui ont débouché sur les premières normes nationales, notamment celles publiées par la NASA en 1995, par l'Agence nationale de développement spatial du Japon, devenue en 1996 l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale, et par le Centre national d'études spatiales, à Paris, en 1999.

Au niveau international, le premier texte adopté a été les Lignes directrices relatives à la réduction des débris spatiaux de l'IADC, ensemble de recommandations élaborées par ce dernier qui regroupe actuellement les 13 grandes agences spatiales. Ce texte a été adopté à l'unanimité en 2002, puis révisé en 2007. Une norme européenne similaire mise au point en 2000 a été approuvée en juin 2004.

Les Lignes directrices de l'IADC ont été adaptées par le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique de l'ONU et par l'Assemblée générale des Nations Unies dans une résolution adoptée en séance plénière en 2007.

La France a été le premier pays à adopter une loi sur le sujet, la loi relative aux opérations spatiales, qui est entrée en vigueur en 2010 et a été modifiée en 2017.

Depuis 2011, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) a publié plusieurs normes consacrées aux débris spatiaux, en particulier la norme ISO 24113, qui est du niveau le plus élevé. Si elle pouvait s'appliquer véritablement à tous les exploitants et constructeurs, cette norme permettrait d'atténuer efficacement la pollution spatiale.

Parallèlement, en 2010, le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique a créé le Groupe de travail sur la viabilité à long terme des activités spatiales, en lui confiant la mission d'établir un rapport de consensus énonçant des lignes directrices facultatives sur les meilleures pratiques à l'intention de tous les acteurs du domaine de l'espace en vue d'aider à garantir l'utilisation viable à long terme de l'espace extra-atmosphérique. Le processus d'approbation des 37 lignes directrices par tous les membres a fait émerger quelques difficultés et, pour l'heure, seules 12 d'entre elles ont été approuvées. Toutefois, le Groupe de travail est toujours en activité et, une fois approuvé, le recueil complet des lignes directrices des Nations Unies devrait devenir un outil très efficace.

Enfin, de nombreux opérateurs ont récemment établi une charte spéciale qui énonce des lignes directrices plus strictes que d'autres documents. Cet ensemble de meilleures pratiques est encore à l'état d'ébauche, et il est donc difficile de savoir comment il pourrait devenir un document réglementaire.

Protection contre les impacts

Une deuxième mesure visant à réduire les effets de la population orbitale consiste à équiper de protections les satellites actifs. Des feuilles de métal ou de kevlar, voire de la mousse dense, placées à l'extérieur d'une paroi structurelle feront éclater les débris qui s'y heurteront et les réduiront en une myriade de minuscules particules incapables de percer ou d'endommager la structure principale.

Les possibilités d'assemblage sont très diverses, selon le type de débris à arrêter, de même que l'orbite du satellite ainsi protégé, son orientation et l'importance des zones à protéger. Un très grand nombre de tests sont réalisés dans le monde entier pour trouver les combinaisons optimales. Les essais au sol sont effectués à l'aide de canons à gaz légers, souvent à deux étages, qui propulsent de petites billes métalliques d'un millimètre de diamètre à des vitesses allant jusqu'à 12 km/s.

Malheureusement, les protections du type décrit ont une efficacité limitée et ne peuvent pas vraiment protéger une paroi contre des impacteurs de plus de 1 cm de diamètre. Pour éviter d'être endommagés par l'impact d'un gros débris, les satellites doivent être manœuvrés vers une zone sûre, et cela n'est possible que si l'orbite et la position du débris en question sont connues. Ceux de plus de 10 cm de diamètre étant répertoriés, on peut en protéger les satellites en procédant à une manœuvre d'évitement de collision. Il est toutefois impossible de protéger ceux-ci de débris dont le diamètre est compris entre 1 cm (parce que les protections n'y résistent pas) et 10 cm (parce que ces débris ne peuvent pas être répertoriés).

Les protections posent également de nombreux problèmes en termes d'encombrement, de masse et de coûts, voire pour le système lui-même, comme celui de l'équilibre thermique du satellite. En fait, seuls les satellites habités comme la Station spatiale internationale, les véhicules de transfert automatiques européens, le véhicule de transfert japonais H-II ou certains très gros satellites militaires des États-Unis en sont actuellement équipés.

Évitement des collisions

Une mesure efficace pour protéger les satellites opérationnels équipés d'un système de propulsion embarqué est d'éviter les collisions avec des objets répertoriés.

C'est une activité très complexe, car il faut « reproduire » les orbites de tous les objets potentiellement dangereux sur plusieurs jours pour prévoir les éventuelles collisions. Les calculs statistiques sont basés sur les probabilités de collision déterminées par les matrices de covariance de chaque objet. Chaque alerte déclenche une analyse à rebours de la trajectoire de l'impacteur potentiel et peut nécessiter que l'on procède à des mesures spécifiques à partir de moyens de surveillance spatiale spécialisés, tels que des radars et télescopes. Certains messages de données de conjonction sont aussi directement communiqués par le Centre mixte des opérations spatiales.

Ce processus s'appuie sur les réseaux existants de surveillance et de suivi de l'espace, principalement celui des États-Unis, mais aussi le réseau ISON (International Scientific Optical Network), des réseaux nationaux, comme le système français basé sur le Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale (GRAVES), et des initiatives commerciales telles que le Commercial Space Operations Center d'AGI ou LeoLabs.

Les analyses effectuées permettent de déterminer le moment où il faut manœuvrer un satellite pour réduire la probabilité d'une collision. En gros, chaque satellite devra être manœuvré une fois par an à cette fin.

Le principal problème est l'inexactitude des paramètres orbitaux des débris, entre 100 et 1 000 mètres en général. Il en résulte un taux extrêmement élevé de fausses alarmes, de l'ordre de 99,99 %. L'une des améliorations à apporter en priorité dans les années à venir est l'obtention de paramètres orbitaux plus justes. Il serait

possible d'utiliser à cette fin des techniques de télémétrie laser, soit à partir du sol, soit à partir d'une orbite.

Mesures d'évitement « juste-à-temps » des collisions avec de gros débris dont on ne peut modifier la trajectoire

Le processus d'évitement des collisions décrit au paragraphe précédent ne concerne que les satellites actifs, qui représentent moins de 20 % des très gros objets en orbite terrestre basse (satellites ou étages de lanceurs). Il permet certes de protéger efficacement les satellites opérationnels, mais pas de freiner l'accroissement de la population orbitale due aux collisions entre de grands objets non manœuvrables, statistiquement prédominants, aussi sa contribution à la viabilité à long terme des opérations spatiales est-elle limitée.

Une autre mesure est donc à l'étude depuis quelques années, à savoir l'évitement de collisions prévisibles entre de gros objets abandonnés. L'idée de base est que lorsqu'une collision entre deux débris est probable dans les deux jours suivants, c'est-à-dire lorsque la probabilité d'une collision est supérieure à un seuil admissible, on entreprend d'ajuster très légèrement la trajectoire de l'un des deux pour éviter cette collision ou rétablir des marges acceptables.

Diverses techniques d'évitement des collisions « juste à temps » sont à l'étude, principalement aux États-Unis et en France, dont l'une qui consiste par exemple à répandre, à l'aide d'une fusée-sonde, un nuage de gaz, de poussière ou de particules devant le débris pour en augmenter brièvement la traînée et le ralentir. Ces méthodes sont très prometteuses, car elles semblent beaucoup plus simples à appliquer que le retrait actif des débris, et elles ne seraient utilisées qu'en cas de collision très probable, généralement tous les cinq ou six ans. D'autres techniques, également étudiées conjointement par les États-Unis et la France, font appel à des lasers orbitaux qui permettent d'ajuster la trajectoire d'un débris au moyen d'impulsions très courtes mais intenses projetées sur toute la surface de celui-ci, dont on modifie aussi légèrement la vitesse. Il a même été proposé de contrôler en permanence la position de tous les gros débris à l'aide d'un laser orbital relativement petit afin de réduire au minimum la probabilité de collisions (gestion du trafic des gros débris spatiaux).

Retrait actif des débris

Une mesure importante, à l'étude depuis plus de 15 ans, consiste à récupérer de très gros débris potentiellement dangereux, c'est-à-dire des débris susceptibles de produire une très grande quantité de débris secondaires après une collision. Cette mesure et d'autres semblables font partie de ce que l'on appelle le retrait actif des débris.

Cette stratégie fait suite aux conclusions d'études réalisées d'abord par la NASA, qui ont été publiées en 2010, puis par la plupart des délégations siégeant à l'IADC. À supposer que les mesures d'atténuation soient très bien respectées (pas de fragmentation en orbite, application de la règle des 25 ans en orbite terrestre basse), la récupération de 5 à 10 gros débris bien choisis dans les orbites les plus peuplées suffirait à stabiliser la population orbitale.

Un très grand nombre de solutions possibles ont été proposées, étudiées et testées au sol, en conditions de vol en apesanteur et – récemment – en orbite, en vue d'un « nettoyage » de l'espace extra-atmosphérique, que l'on classe en plusieurs catégories (le résumé ci-après est loin d'être exhaustif).

Tout d'abord, il existe quelques solutions sans contact, par exemple l'utilisation d'un filin électrostatique virtuel, ou d'un laser pour surélever l'orbite de vieux satellites abandonnés en orbite géostationnaire.

Ensuite, de nombreuses solutions reprenant des techniques de pêche font appel à des hameçons, des harpons et des filets pour capturer un débris et le tirer à l'aide d'un long câble jusqu'à ce qu'il regagne l'atmosphère d'une manière contrôlée.

Par ailleurs, on réfléchit aussi à augmenter la traînée d'un débris afin de lui faire perdre de l'altitude plus rapidement, par exemple en y fixant, à l'aide d'un chasseur spécial, un grand coussin gonflable ou une voile, qui augmenterait considérablement la surface de l'assemblage. On peut aussi arrimer un filin électrodynamique sur un débris, sorte de fil conducteur qui interagit avec le champ magnétique ambiant de la Terre pour générer des forces de Lorentz, lesquelles ralentissent l'objet, réduisant ainsi sa durée de vie en orbite. Ces solutions présentent néanmoins d'importants inconvénients, car elles provoquent une rentrée dans l'atmosphère non contrôlée et sont donc potentiellement dangereuses pour les populations.

Enfin, il existe des solutions plus traditionnelles qui consistent à capturer un débris à l'aide d'un bras robotisé, équipé de tentacules ou de pinces qui le maintiennent, puis à le désorbiter de manière contrôlée jusqu'à ce qu'il regagne l'atmosphère.

Ces solutions sont globalement parvenues à maturité sur le plan technique et ont été maintes fois testées, y compris en orbite. Les principaux problèmes ne sont donc pas d'ordre technique mais financier, car de telles opérations seraient très onéreuses en l'absence d'un plan d'action clair ouvrant la voie à des activités commerciales. Il existe également de nombreux obstacles juridiques liés à la responsabilité des opérations, voire à des préoccupations d'ordre militaire, certaines de ces opérations pouvant ouvrir la voie à une militarisation de l'espace.

Ces questions sont activement examinées au sein de plusieurs groupes de travail à l'échelle internationale, en particulier au Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique dans le cadre de l'initiative relative à la viabilité à long terme des activités spatiales. Les premières tentatives de retrait actif des débris ont pu être menées plus tôt que prévu grâce à l'arrivée des remorqueurs spatiaux. Plusieurs de ces véhicules orbitaux polyvalents sont en train d'être mis au point, notamment aux États-Unis et en France, et la désorbitation de gros débris pourrait être la dernière action ou manœuvre de fin de vie d'un remorqueur spatial une fois qu'il aurait achevé ses opérations orbitales. Des véhicules orbitaux spécialisés dans la désorbitation de satellites de constellations égarés sont aussi en train d'être mis au point, preuve qu'il est possible d'élaborer un plan d'action positif en vue du retrait actif des débris.

Conclusion : une situation préoccupante

Les règles de réduction des débris sont actuellement très peu observées

Le degré d'observation de ces règles est d'environ 55 % dans l'ensemble, mais ce pourcentage est peut-être un peu optimiste, car il englobe tous les petits satellites lancés à basse altitude qui reviennent rapidement dans l'atmosphère. Si l'on ne considère que les engins spatiaux évoluant à des altitudes supérieures à 600 km, il est inférieur à 20 %. Si l'on ne considère que les satellites de plus de 100 kg, il tombe à 6 %.

La masse et le nombre de débris en orbite continuent de croître sans qu'apparemment se profile une quelconque diminution. De nombreuses collisions et fragmentations continuent de se produire en orbite chaque année et, outre les satellites et étages supérieurs, des dizaines de gros objets continuent de se détacher pendant les opérations de lancement.

Il ressort de nombreuses études qu'il faudrait respecter les règles de réduction à plus de 90 % si l'on veut limiter l'augmentation du nombre des débris en orbite terrestre.

L'émergence des nanosatellites soulève de nombreuses questions

Nous assistons actuellement à une explosion du nombre de très petits satellites mis en orbite. Ces CubeSats changent la donne, car ce sont des satellites intelligents qui tirent pleinement parti de la miniaturisation, offrent un grand nombre d'applications spatiales pour des coûts de développement, de production et de

lancement très faibles. Par conséquent, plusieurs centaines d'entre eux sont lancés chaque année, mais comme dans la plupart des cas ils n'ont pas de système de propulsion, ils ne peuvent pas éviter les collisions ou l'on ne peut pas en réduire la durée de vie en orbite. Ils sont souvent mis en orbite haute et la règle des 25 ans ne s'applique pas à eux. Quelque 430 CubeSats ont été lancés en 2017, et plus de 500 par an devraient l'être à partir de 2018.

L'IADC et l'ISO définissent actuellement d'autres règles pour les satellites qui ne peuvent pas éviter les collisions, de sorte à limiter leur durée de vie en orbite à 25 ans après leur lancement et leur altitude à environ 600 km.

Les vastes constellations

Les vastes constellations soulèvent un problème différent. Il est prévu de lancer par milliers des constellations de satellites de 200 à 500 kg chacune, en général sur des orbites très stables. À titre d'exemple, dans le cadre de l'initiative One Web, près d'un millier de satellites Internet seront envoyés à partir de mi-2018 à 1 200 km de distance, sur une orbite circulaire à forte inclinaison, stable depuis des milliers d'années. Et ce n'est peut-être que le début. La compagnie Boeing a annoncé l'envoi de sa propre constellation de 2 900 satellites, tandis que SpaceX annonçait sa première constellation de 2 800 satellites et une deuxième de 7 500. Au total, la Commission fédérale des communications des États-Unis a reçu des demandes pour le lancement de plus de 17 000 nouveaux satellites au cours des 10 prochaines années (pour rappel, il n'y a aujourd'hui que 1 700 satellites actifs).

Les opérateurs sont souvent de nouveaux venus, des acteurs de la Silicon Valley qui n'ont aucune expérience des opérations spatiales. Ils semblent cependant bien connaître toutes les règles de réduction des débris spatiaux, de sorte qu'il y a de bonnes raisons d'espérer que ces opérations d'envergure sur des orbites très stables permettront de garder le contrôle de la situation sur le long terme, à condition que les règles internationales soient strictement respectées.

Nouvelle clôture radar dans l'espace

L'armée de l'air des États-Unis est en train de construire un nouveau système radar en bande S appelé Space Fence, qui devrait entrer en service en 2019. Ce système sera capable de suivre des objets beaucoup plus petits que ceux qui sont actuellement répertoriés, probablement de 3 à 5 cm de diamètre. L'installation de cet élément supplémentaire de surveillance et de suivi spatial est une excellente nouvelle, mais cela signifie que le nombre d'objets répertoriés va augmenter d'un ordre de grandeur, pour s'établir peut-être à 200 000 objets. Cela augmentera considérablement le nombre d'alertes de collision si l'exactitude des données orbitales ne s'améliore pas considérablement par ailleurs.

Gestion du trafic spatial

Il semble y avoir une meilleure prise de conscience de la nécessité d'agir rapidement pour préserver les activités orbitales dans le futur. La gestion du trafic spatial fait l'objet de nombreux travaux au niveau international qui visent à assurer la sécurité dans l'espace extra-atmosphérique, à savoir la protection des infrastructures spatiales contre les menaces et les risques naturels et anthropiques afin de garantir la viabilité des activités spatiales, selon la définition qu'en donne l'Institut européen de politique spatiale. Certains chercheurs proposent de créer une nouvelle organisation spatiale civile internationale en lui confiant un ensemble très ambitieux de tâches allant de la gestion des règles de réduction à l'imposition de droits d'accès à l'espace et en la dotant de pouvoirs de coercition.

Ces initiatives sont bonnes, mais elles visent essentiellement à protéger les satellites opérationnels à court terme. Jusqu'à présent, il n'y a pratiquement aucune proposition visant à éviter la production de milliers de nouveaux fragments de débris résultant des collisions entre de gros débris non manœuvrables. Tant qu'il n'y aura pas de solution, les futures opérations spatiales resteront gravement menacées.