



avec l'aimable autorisation de ClearSpace

■ Le contexte de l'encombrement spatial

Longtemps resté vierge de toute intervention terrestre, l'espace extra-atmosphérique a connu dès la seconde moitié du XX^e siècle des incursions d'origine humaine. Au fil du temps, celles-ci se sont banalisées, laissant derrière elles des débris de plus en plus nombreux.

L'Agence spatiale européenne (ESA) dénombre ainsi un million d'objets d'origine humaine en rotation autour de la Terre¹, pour s'en tenir aux seuls débris dont la taille est supérieure à un centimètre. Les risques causés par ces objets doivent désormais être pris en considération par les acteurs de l'espace.

➤ La problématique nouvelle des constellations

Le problème se pose dans les mêmes termes en **orbite basse**, en **orbite terrestre moyenne** et en **orbite géostationnaire**. Sur cette dernière, située à environ 36 000 kilomètres de la Terre, les satellites accomplissent en 24 heures leur révolution, de telle sorte qu'ils se trouvent en permanence au-dessus du même point de la surface du globe. Cependant, il est possible d'assurer à moindre coût une couverture continue de la surface terrestre en lançant en orbite basse des satellites plus petits, mais plus nombreux, qui forment ce qu'on appelle des **constellations**.

Dans le domaine des télécommunications, la constellation la plus ancienne est celle d'Iridium. Forte de 66 satellites injectés à 780 kilomètres, elle appartient au département de la défense des États-Unis. La constellation OneWeb, initialement lancée par le

Résumé

- Depuis le lancement de Spoutnik en 1957, l'homme a envoyé dans l'espace des satellites toujours plus nombreux. Les lancements, notamment en orbite basse, se sont cependant multipliés ces dernières années, ce qui pose avec une acuité nouvelle la question des débris spatiaux.
- Car une fois hors service, les satellites sont loin de retomber tous rapidement dans l'atmosphère : nombreux sont ceux qui continuent à tourner autour de la Terre pendant des années ou des décennies, voire potentiellement des siècles. Entiers ou réduits à l'état de débris, ils polluent l'espace et peuvent entrer en collision avec des satellites encore opérationnels.
- De premières solutions pour gérer ces débris sont en train de s'esquisser.

Jean-Luc FUGIT, député Ludovic HAYE, sénateur

Royaume-Uni, mais achetée en 2023 par Eutelsat, compte 624 satellites. Starlink possède la plus grande des constellations : 4 000 satellites actuellement, à des altitudes comprises entre 350 et 500 kilomètres ; elle en comportera 8 000 à la fin de 2024. L'entreprise a reçu une autorisation pour 42 000 satellites. Kuiper, constellation d'Amazon, comptera 10 000 satellites.

Alors qu'on ne dénombrait dans l'espace extra-atmosphérique que 540 satellites actifs en 2003, ils étaient 900 en 2013 et sont 8 700 actuellement.

➤ La collision de satellites, un risque réel

Le 10 février 2009, les satellites Kosmos 2251 et Iridium 33 se sont percutés au-dessus de la Sibérie à 789 kilomètres d'altitude. Le premier était un satellite russe retiré du service depuis 1995 ; le second, encore opérationnel, appartenait à la constellation Iridium.

Même si les risques sont allés en s'aggravant, aucune collision aussi importante n'a eu lieu depuis cette date. Certains pays (USA, Russie, Chine, Inde) ont cependant mené des tests de destruction de satellites par explosion, créant des milliers de nouveaux débris spatiaux.

➤ Autres effets néfastes

• Impact négatif sur l'observation astronomique²

La multiplication des satellites perturbe l'observation astronomique. Pour l'astronomie optique, reposant sur l'usage de rayons ultra-violet à infra-rouges, le principal problème vient de la réflexion de la lumière du Soleil par les satellites (zébrures de clichés, destruction de capteurs, erreurs d'interprétation). Pour la radioastronomie, c'est

l'émission radio des satellites, intentionnelle ou due à l'électronique de bord, qui brouille la qualité du signal. Sur les instances de l'Union astronomique internationale, Starlink a d'ailleurs adopté pour ses constellations une peinture moins réfléchissante et s'efforce d'éteindre ses satellites au droit des principaux radiotélescopes d'observation.

- *Risques accrus à la rentrée dans l'atmosphère*

Les objets en orbite basse finissent par retomber sur Terre, car l'atmosphère, même très peu dense à haute altitude, les freine et les fait descendre en spirale³. Or ils ne brûlent pas complètement au cours de ce processus : entre 10 % et 40 % de la masse survit à la rentrée et s'écrase à la surface du globe.

Certes, les risques sont extrêmement faibles. Pour la rentrée dans l'atmosphère de son satellite ERS-2, de 2,3 tonnes, l'Agence spatiale européenne estimait par exemple que le risque d'un choc était, pour un individu donné, inférieur à 1 sur 100 milliards.⁴ Les débris résiduels se sont de fait abîmés sans incident dans l'Océan pacifique le 21 février 2024.⁵ Les risques ne peuvent cependant que suivre l'accroissement du nombre de satellites qui circulent en orbite basse.

■ La croissance du nombre de débris

➤ La pollution originelle de Spoutnik

Le premier satellite de télécommunication ne pesait que 87 kg, mais son histoire est tristement exemplaire du point de vue des débris engendrés. La charge utile de Spoutnik, lancé le 4 octobre 1957, ne représentait que 1,3 % de la masse satellisée à cette occasion, puisque l'étage central de la fusée Semioroka (6 500 kg) utilisée comme lanceur se retrouva sur la même orbite, de même que la coiffe protectrice du satellite (100 kg). Actif pendant 21 jours, Spoutnik est rentré dans l'atmosphère après 92 jours, car il avait été introduit sur une orbite relativement basse, dont le point le plus proche de la Terre – le périégée – ne se situait qu'à 225 kilomètres. Même s'il rentra ainsi rapidement dans l'atmosphère (où l'étage central l'avait précédé d'un mois), il fut néanmoins un débris orbital pendant les trois quarts de son existence.⁶

➤ Les sources de débris

Les débris spatiaux sont de sources diverses :

- les vaisseaux spatiaux hors service, tels les satellites qui ne sont plus opérationnels. Les satellites ont en effet une durée de vie moyenne de seulement 15 ans environ, notamment du fait de l'irradiation ambiante dans l'espace ;
- les étages hors d'usage des fusées utilisées pour lancer les satellites en orbite ;
- les objets lâchés dans l'espace au cours des missions, ainsi les débris rejetés par les navettes spatiales ;

- de petits fragments causés par des collisions, des explosions ou par la détérioration de satellites actifs ou de débris de taille plus grande.

➤ La caractérisation des débris : taille et dangerosité

Les débris sont généralement classés en trois catégories, selon leur taille et leur dangerosité :

- les débris de plus de 10 cm sont déjà surveillés en orbite basse, ce qui permet de prendre des mesures pour éviter des collisions ; il en va de même en orbite géostationnaire pour les débris de plus de 1 m ;

- les débris compris entre 1 et 10 cm, parfois appelés « débris mortels » (*lethal population*) doivent leur nom au fait qu'ils sont assez grands pour causer d'importants dommages, mais trop petits pour être surveillés ;⁷

- les débris inférieurs à 1 cm ne sont normalement pas assez grands pour détruire le satellite qu'ils percutent. Un blindage peut protéger les satellites contre eux.

Capables de détruire complètement un satellite, les gros objets artificiels en orbite (plus de 10 cm) sont au nombre de 36 000, dont environ 8 713 satellites actifs (près de 550 en orbite géostationnaire et près de 8 000 en orbite basse). Capables de destructions partielles, les objets de plus de 1 cm sont plus d'un million. On compte enfin 150 millions de débris inférieurs à 1 cm.⁸

➤ Probabilité des collisions

Pour l'heure, les débris proviennent principalement de la fragmentation des satellites obsolètes se disloquant dans un environnement particulièrement éprouvant pour les équipements.⁹

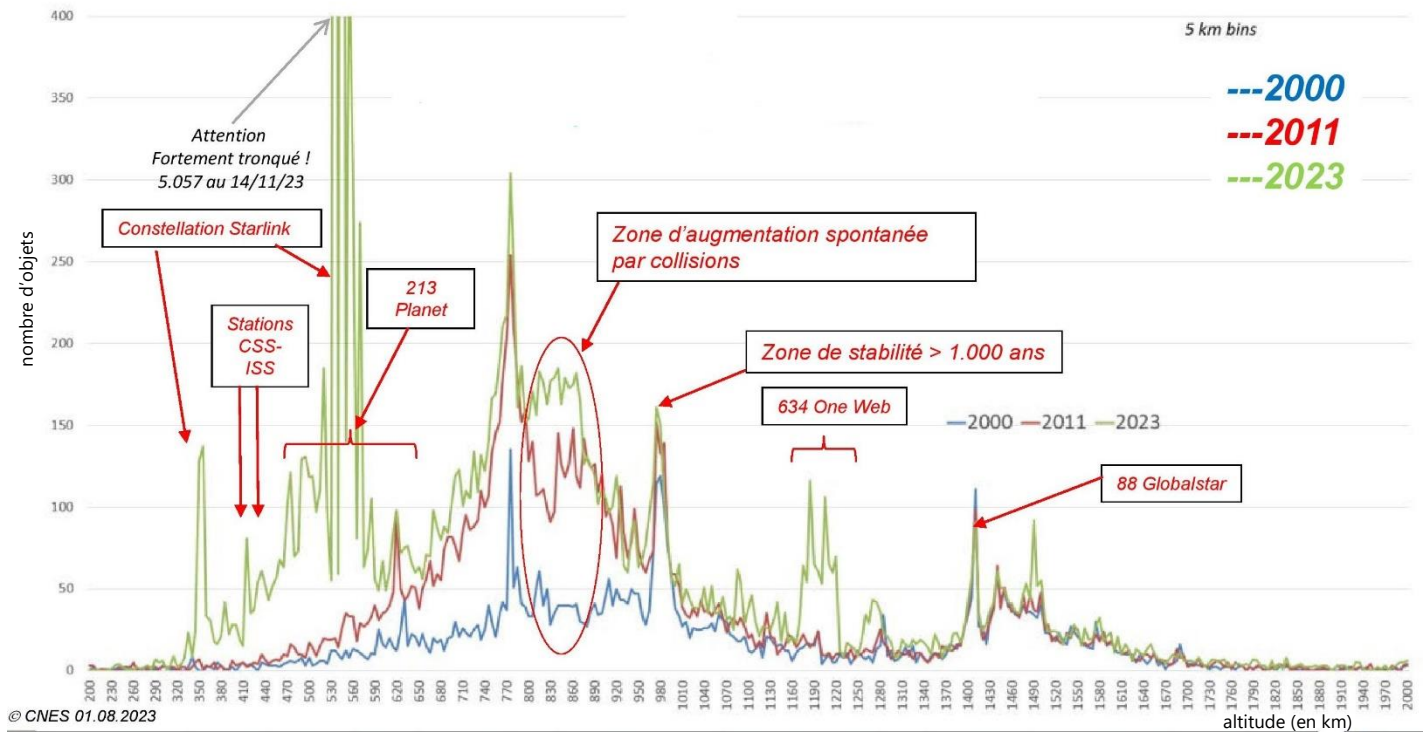
La probabilité des collisions ne faisant que grandir, celles-ci pourraient cependant, en l'absence de mesures concrètes, devenir la principale source de débris. Un scientifique de la NASA, Donald J. Kessler, a même conjecturé un scénario de « réaction en chaîne » où la quantité de débris et le nombre de collisions évolueraient de concert sur un mode exponentiel. Ce scénario, appelé **syndrome de Kessler**, ne s'est pas encore produit. Le cas échéant, comme l'ont souligné les membres de l'Académie des sciences entendus par les rapporteurs, il sera impératif de connaître le moment où il pourrait se déclencher.

■ Vers un suivi de plus en plus fin des débris

Il est possible de surveiller les débris spatiaux depuis la Terre en recourant à des télescopes ainsi que, pour l'orbite basse, à des radars. Ce sont les débris les plus volumineux qui peuvent être ainsi suivis et catalogués.

➤ Le programme spatial de l'Union européenne

L'Union européenne met en œuvre un programme de suivi des débris qui s'inscrit dans une démarche plus large de surveillance de l'espace (*Space Situational Awareness*)¹⁰ articulée selon trois axes.



La prolifération des objets en orbite basse

Une première composante dite NEO s’intéresse aux astéroïdes qui approchent la Terre ; la deuxième analyse les phénomènes météorologiques observables dans l’environnement naturel spatial ; la troisième est le système de surveillance de l’espace et de suivi des objets en orbite (*Space Surveillance and Tracking, EU SST*).

Le réseau inclut les agences spatiales de 15 pays membres de l’Union européenne. Sous l’égide de l’Agence de l’Union européenne pour le programme spatial (EUSPA), il fédère trois types de moyens de surveillance : 3 lasers, 9 radars et 28 télescopes. Du côté français, en fait notamment partie le système Graves de surveillance militaire par radar qui permet de suivre au quotidien les satellites évoluant entre 400 km et 1 000 km d’altitude. S’y ajoutent les nombreux systèmes privés que sont en train de développer de jeunes pousses telles que ShareMySpace, Look Up Space, SpaceAble et Dark¹¹.

➤ **Le programme de surveillance américain**

Le plus grand catalogue de débris est tenu par l’armée américaine. Ce catalogue Space Track recense plus de 28 000 objets de plus de 10 cm en orbite basse ou de plus de 1 m en orbite géostationnaire. Depuis la collision de 2009 entre Kosmos 2251 et Iridium 33, les États-Unis en partagent publiquement des pans de plus en plus larges¹².

■ **Les solutions possibles**

Des solutions s’esquissent. Certaines sont déjà mises en œuvre, tandis que d’autres sont en train d’être testées. N’étant souvent que des mesures palliatives, elles ouvrent parfois la perspective de trouver aussi de véritables remèdes à la situation actuelle.

➤ **La protection des satellites contre les impacts de débris**

La première solution consiste à prémunir les satellites contre les collisions ou à leur faire éviter celles-ci.

• **La protection passive par blindage**

Même des débris de petite taille peuvent causer de graves dommages. Les objets en orbite basse se déplacent en effet à une vitesse élevée, la norme y étant de 7,5 km/seconde. À cette vitesse¹³, un débris en aluminium de 1mm de rayon produira autant de dégâts qu’une boule de bowling lancée à 100 km/h ; un débris de 1 cm causera le même impact qu’une berline moyenne lancée à 130 km/h ; un débris de 10 cm libérera autant d’énergie que 240 kg de TNT...

C’est pourquoi les opérateurs placent désormais, devant les surfaces les plus sensibles de leurs satellites, des boucliers en Kevlar ou des mousses métalliques. Encore ces protections ne sont-elles efficaces que pour des débris de 1 cm, indépendamment de la question de leur coût¹⁴. Elles ne constituent pas une solution pour les débris compris entre 1 cm et 10 cm.

• **La protection active par évitement**

Il est possible d’éviter les collisions si l’un des deux objets concernés est actif et peut manœuvrer. En calculant les orbites des objets catalogués, il est possible d’identifier des risques de rapprochement et de prendre une décision de manœuvre si un risque est avéré. La collision de 2009 entre Iridium 33 et Kosmos 2251 aurait ainsi pu être évitée, car Iridium pouvait encore manœuvrer.

En France, le service CAESAR (*Conjunction Analysis and Evaluation Service: Alerts and Recommendations*) du CNES

© CNES 01.08.2023

est capable d'évaluer les risques et d'émettre des alertes de collision quelques jours avant l'évènement. Ce service gratuit fait partie intégrante de l'initiative européenne EU SST évoquée précédemment. Concrètement, les avis émis aux opérateurs inscrits à ce service leur permettent d'effectuer les manœuvres d'évitement nécessaires.¹⁵

Même avec le renfort de l'intelligence artificielle, il est cependant très chronophage de tenir en permanence à jour les éphémérides des objets catalogués, qui demeurent les seuls concernés. En 2022, le CNES a formulé 3,5 millions de conjectures de collisions sur 293 satellites et 17 manœuvres ont eu lieu. En 2023, la Station spatiale internationale a effectué 6 manœuvres. En moyenne, on recense 1 manœuvre par an par satellite en orbite basse.

➤ La réduction de la quantité de débris

Même en orbite basse, une élimination naturelle par retombée dans l'atmosphère peut prendre des siècles. De nouvelles technologies permettent d'envisager un traitement actif du problème posé par les débris existants, du moins les plus gros d'entre eux. Des démonstrations de retrait actif ont déjà été conduites.

• La mission RemoveDebris de l'ESA (2018)

Il s'agit de l'une des premières missions d'élimination active des débris (ADR). Le module principal RemoveDebris a éjecté dans l'espace des nano-satellites dépourvus de propulsion (et, partant, non manœuvrants) pour mieux faire la démonstration de leur récupérabilité. Menée du 20 juin 2018 au 4 mars 2019, la mission a démontré en orbite la viabilité de technologies telles que la **capture par filet** ou le **harponnage**. Les deux méthodes reposent sur la navigation basée sur la vision (VBN)¹⁶, technologie consistant à utiliser deux capteurs optiques – une caméra classique et un système laser de localisation (LiDAR) – couplés à un algorithme de traitement d'images pour constituer un système de navigation efficace dans l'environnement immédiat du module principal.

Dans la perspective d'une future mise en œuvre de la technique du harponnage, Eutelsat équipe désormais, par anticipation, ses satellites en orbite basse d'une surface de préhension (*grapple fixture*) ouvrant la possibilité qu'ils soient à terme récupérés par un système de grappin.¹⁷

• Les deux récentes missions japonaises d'Astroscale

Une entreprise privée japonaise, Astroscale, a également conduit deux expériences de retrait de débris. Le 24 janvier 2024, elle a réussi la démonstration en orbite de son système de capture magnétique puis de désorbitation, dit ELSA-d. Ce système est composé de deux satellites : un satellite maître conçu pour retirer en toute sécurité les débris en orbite et un satellite client faisant office de proie.¹⁸

Plus proche des conditions réelles, le second projet d'Astroscale, baptisé ADRAS-J¹⁹, vise à démontrer la faisabilité de rendez-vous et services sur orbite (RSO). Il

s'agit de réaliser l'approche, et de faciliter la récupération, de déchets inertes. Ainsi, le satellite ADRAS-J s'est placé, le 22 février 2024, en déplacement synchrone avec un étage supérieur de la fusée H2A japonaise, mesurant environ 11 mètres de long, 4 mètres de diamètre et pesant environ 3 tonnes. Il a pu caractériser l'état et la trajectoire de ce déchet de même que les risques induits par lui. C'est l'étape préalable à une opération de retrait.

• La mission ClearSpace-1 de l'ESA pour 2026

En usant d'un **bras robotique**, ce projet vise à capturer et ramener en toute sécurité, en vue d'en provoquer la rentrée atmosphérique sécurisée, un gros débris particulièrement délabré, en l'occurrence le *VEGA Secondary Payload Adapter* (VESPA), étage supérieur de fusée de 112 kg, placé en orbite à une altitude variant entre 664 km et 801 km. La mission²⁰, développée par l'équipe ClearSpace de l'ESA, est préparée en partenariat avec la jeune pousse suisse ClearSpace SA. Son lancement est prévu en 2026.

• Un objectif à portée de main ?

Pour stabiliser l'environnement, il faut, selon Christophe Bonnal (CNES), retirer de l'orbite basse environ 10 gros débris chaque année, en commençant naturellement par les 50 plus dangereux.²¹

• La maîtrise du nombre de nouveaux débris

Pour l'avenir, la réglementation doit inciter les opérateurs à prévoir la quantité de combustible (ergols) suffisante pour propulser vers une orbite cimetière le satellite en fin de vie. Là aussi, des questions de coût entrent en jeu.

On considère qu'entre 85 % et 100 % des objets spatiaux ayant atteint leur fin de vie au cours de la dernière décennie en orbite géostationnaire ont déjà tenté de se conformer aux normes en vigueur relatives à la limitation des débris. Entre 60 % et 90 % d'entre eux y sont parvenus, soit en tout état de cause plus de la moitié du total de l'effectif.²²

■ Recommandations

- approfondir les efforts de surveillance et d'exploitation et traitement des données de suivi ;
- suspendre tous les essais de destruction de satellites ;
- ne délivrer d'autorisation de lancement que sous condition de solutions durables pour la fin de mission ;
- effectuer rapidement en orbite basse un retrait actif des débris les plus dangereux, au rythme de 10 par an minimum, en commençant par les 50 plus dangereux.

Sites Internet de l'Office :

<http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opepst-index.asp>

<http://www.senat.fr/opepst>

Personnes auditionnées

- Le général Philippe Adam, général de division aérienne, commandant de l'espace
- MM. François Baccelli et Jean-Loup Puget, membres de l'Académie des sciences
- M. Christophe Bonnal, expert senior, direction de la stratégie du CNES
- Mmes Astrid Bonté, directrice des affaires internationales et institutionnelles, et Chehineze Bouafia, responsable des affaires réglementaires Espace et télécommunications et M. Étienne Lesoeur, responsables des affaires institutionnelles d'Eutelsat
- M. Julien Cantegreil, fondateur de SpaceAble
- MM. Juan Carlos Dolado Perez et Michel Friedling, co-fondateurs de Look Up Space
- M. Didier Flaender, président de Numérisat
- M. Stijn Lemmens et Mme Francesca Letizia, analystes au Bureau des débris spatiaux, Agence spatiale européenne (ESA)
- M. Clyde Laheyne, co-fondateur de Dark
- M. Pierre Lionnet, directeur Recherche chez ASD Eurospace
- M. Romain Lucken, fondateur de ShareMySpace

Références

¹ Depuis 2016, le Bureau des débris spatiaux de l'ESA publie un rapport annuel sur l'environnement spatial. Le dernier est paru en 2023 : https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf.

² Les rapporteurs remercient M. Jean-Loup Puget, membre de l'Académie des sciences, d'avoir appelé leur attention plus particulièrement sur ce point, lorsqu'ils l'ont entendu avec son confrère François Baccelli.

³ On estime qu'il faut en revanche plusieurs siècles pour qu'un débris retombe dès lors qu'il est en orbite à plus de 1000 kilomètres d'altitude.

⁴ <https://blogs.esa.int/rocketscience/2024/02/05/ers-2-reentry-frequently-asked-questions/>

⁵ https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ERS-2_reenters_Earth_s_atmosphere_over_Pacific_Ocean

⁶ Présentation de M. Christophe Bonnal, expert du CNES, devant l'Académie de l'air et de l'espace de Toulouse, le 19 mai 2016 : <https://academieairespace.com/wp-content/uploads/2018/05/Bonnal-Bdx-2016.pdf> Les auteurs de la note remercient l'auteur de les avoir fait bénéficier de la dernière mise à jour de cette présentation panoramique de la question des débris spatiaux dont il est spécialiste.

⁷ Même si on ignore ses performances réelles, on estime toutefois que le radar le plus récent du réseau américain de surveillance, le Space Fence, situé dans les îles Marshall, « voit sans doute des objets de la taille d'un centimètre en orbite basse. » (Michel Friedling, *Commandant de l'espace*, éditions Bouquin, Paris, 2023, p. 182.) Le seuil de 10 cm reste toutefois communément considéré comme la limite actuelle du catalogue.

⁸ Rapport de l'ESA sur l'environnement spatial de 2023. Dans une [note scientifique](#) (postnote), le *Parliament Office of Science and Technology* britannique dénombrait en mars 2010 respectivement 19 000 débris de plus de 10 cm et quelques centaines de milliers de débris compris entre 1 et 10 cm.

⁹ Lire notamment, au sujet de la météorologie de l'espace, c'est-à-dire des variations de l'activité solaire et de leurs effets dans l'espace, la [note scientifique n° 43 de Mme Christine Arrighi](#), où il est notamment précisé : « Le flux de particules de haute énergie liées à l'activité du Soleil et de la magnétosphère peut accélérer le vieillissement de l'électronique embarquée dans les satellites, y provoquer des erreurs informatiques ou réduire la puissance des panneaux solaires qui les alimentent en énergie. »

¹⁰ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32021R0696> (règlement 2021/696)

¹¹ https://www.eusst.eu/wp-content/uploads/2023/11/SDSC-conference_1nov2023.pdf

¹² « La collision de 2009 provoqua une réaction salubre au sein de la communauté spatiale. Les Américains firent progressivement bénéficier de nombreux opérateurs spatiaux civils de leurs alertes quotidiennes de collision, avec des niveaux de précision et de calcul satisfaisants pour l'époque. » (Michel Friedling, *Commandant de l'espace*, éditions Bouquin, Paris, 2023, p. 181.)

¹³ Rappelons que la vitesse d'un objet en mouvement est un paramètre essentiel de son énergie cinétique (E_c), puisque celle-ci est égale à la moitié de sa masse multipliée par sa vitesse au carré : $E_c = 1/2 \times \text{masse} \times \text{vitesse}^2$.

¹⁴ Devant l'Office, au cours d'une [audition du 4 mai 2023](#), M. Yannick Borthomieu, de l'entreprise Saft, a mis en avant la légèreté des batteries pour satellites produites par son entreprise, en fournissant les explications suivantes : « tout gramme supplémentaire mis dans la batterie va devoir être porté par le lanceur, avec un coût situé entre 50 et 80 euros par gramme. Lorsque plusieurs centaines de kilogrammes sont embarqués, je vous laisse imaginer l'économie que permet de réaliser le fait de réduire cette masse de 10 % ou 20 %... ». Le même raisonnement vaut, *a contrario*, pour les blindages ajoutés aux satellites.

¹⁵ [CNES, « Débris spatiaux, un risque à la loupe »,](#) propos recueillis auprès de Christophe Taillan.

¹⁶ <https://inria.hal.science/hal-02286751/document>

¹⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=nTtskTGRr1U>

¹⁸ <https://astroscale.com/astrocales-elsa-d-finalizes-de-orbit-operations-marking-successful-mission-conclusion/>

¹⁹ <https://astroscale.com/astrocales-adras-j-mission-starts-rendezvous-operations/>

²⁰ <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/320/SDC8-paper320.pdf>

²¹ Une pléiade d'équipes de tous les pays a recensé les 50 débris les plus dangereux en orbite basse : '[Identifying the 50 statistically-most-concerning derelict objects in LEO](#)', *Acta Astronautica*, vol. 181, avril 2021, p. 282-291. Au nombre des 19 co-auteurs de l'article, on retrouve M. Stijn Lemmens et Mme Francesca Letizia, analystes au Bureau des débris spatiaux, Agence spatiale européenne (ESA), entendus par les auteurs de la note.

²² [Rapport 2024 de l'IADC](#), voir notamment figure 14.