



Sujet d'entraînement 2025

Épreuve d'Analyse documentaire

DOSSIER DOCUMENTAIRE

LA POLLUTION SPACIALE

À PROPOS DES DÉBRIS SPATIAUX	2
RÉPARTITION DES DÉBRIS EN ORBITE AUTOUR DE LA TERRE.....	4
DÉBRIS SPATIAUX : 24H AVEC NOS SENTINELLES DE L'ESPACE.....	5
LE CATALOGUE DU CNES	7
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	9

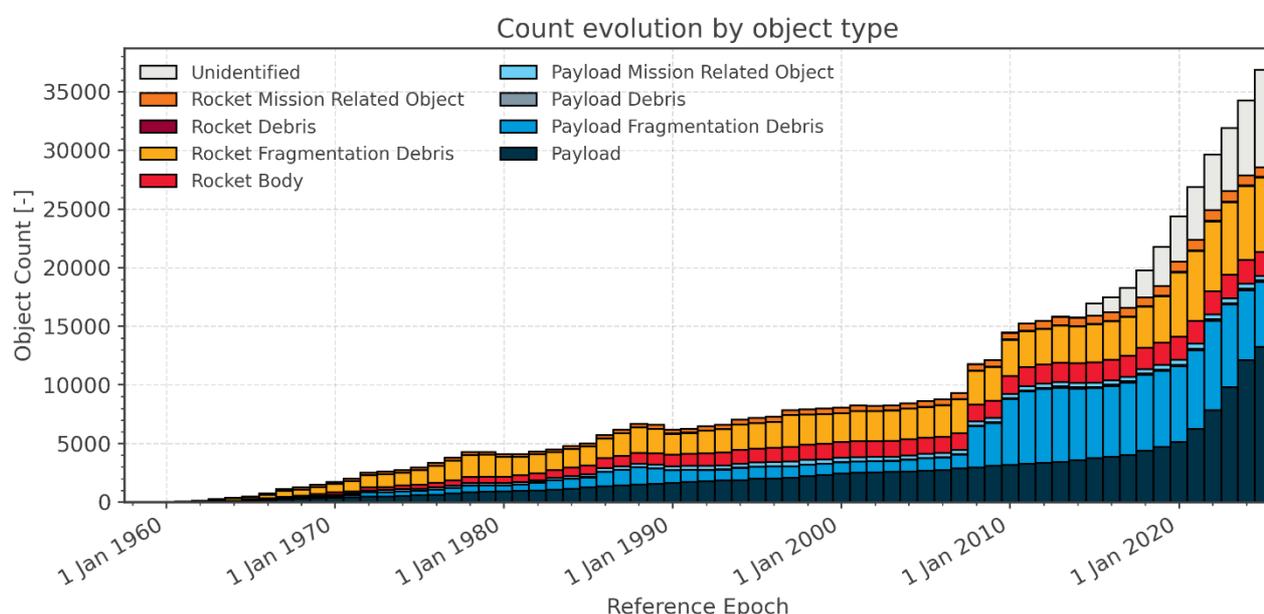
LA POLLUTION SPACIALE

TEXTE I

À PROPOS DES DÉBRIS SPATIAUX

Les satellites en orbite sont au cœur de notre vie moderne. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines et disciplines, notamment la science spatiale, l'observation de la Terre, la météorologie, la recherche sur le climat, les télécommunications, la navigation et l'exploration spatiale humaine. Ils offrent une perspective unique, une ressource pour la collecte de données scientifiques, des opportunités commerciales et divers services et applications essentiels, qui ouvrent des possibilités de recherche et d'exploitation inégalées.

Cependant, au cours des dernières décennies, avec l'augmentation des activités spatiales, un danger nouveau et inattendu a commencé à émerger : les débris spatiaux.



60 ans d'activité spatiale

En plus de 60 ans d'activités spatiales, plus de 6050 lancements ont permis de suivre quelque 56450 objets en orbite, dont environ 28160 restent dans l'espace et sont régulièrement suivis par le réseau américain de surveillance spatiale et conservés dans son catalogue, qui couvre les objets de plus de 5 à 10 cm en orbite basse (LEO) et de 30 cm à 1 m à des altitudes géostationnaires (GEO). Seule une petite fraction - environ 4000 - sont aujourd'hui des satellites intacts et opérationnels. Cette grande quantité de matériel spatial a une masse totale de plus de 9 300 tonnes.

Les objets en orbite comprennent les étages supérieurs usagés

Environ 24 % des objets catalogués sont des satellites (dont moins d'un tiers sont opérationnels) et environ 11 % sont des étages supérieurs usagés et des objets liés à la mission tels que des adaptateurs de lancement et des caches d'objectif.

Plus de 560 événements de fragmentation en orbite ont été enregistrés depuis 1961. Seuls 7 événements étaient liés à des collisions et la majorité des événements actuels étaient des explosions de vaisseaux spatiaux et d'étages supérieurs. On s'attend toutefois à ce que les collisions deviennent à l'avenir la principale source de débris spatiaux.

Explosions de satellites et de corps de fusées

On suppose que ces événements de fragmentation ont généré une population d'objets de plus de 1 cm, dont le nombre est de l'ordre de 900 000. Le flux sporadique des météorites naturelles ne peut prévaloir que sur celui des débris d'origine humaine d'une taille proche de 0,1 à 1 mm.

La principale cause des explosions en orbite est liée au carburant résiduel qui reste dans les réservoirs ou les conduites de carburant, ou à d'autres sources d'énergie restantes, qui restent à bord une fois qu'un étage de fusée ou un satellite a été rejeté en orbite terrestre.

Au fil du temps, l'environnement spatial hostile peut réduire l'intégrité mécanique des pièces externes et internes, ce qui entraîne des fuites et/ou un mélange des composants du carburant, ce qui peut déclencher une auto-inflammation. L'explosion qui en résulte peut détruire l'objet et disperser sa masse en de nombreux fragments présentant un large spectre de masses et de vitesses imparties.

Test antisatellite : 25% de débris en plus

Outre ces désintégrations accidentelles, les interceptions de satellites par des missiles lancés depuis la surface ont été un facteur majeur dans un passé récent.

L'engagement chinois FengYun-1C en janvier 2007 a à lui seul augmenté la population d'objets spatiaux traçables de 25 %.

Autres sources de fragments de débris

La source la plus importante de débris non fragmentés a été constituée par plus de 2 460 tirs de moteurs-fusées à propergol solide, qui ont libéré de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) sous forme de poussière de la taille d'un micromètre et de particules de scories de la taille d'un millimètre à un centimètre.

Une deuxième source importante fut l'éjection des cœurs des réacteurs Buk après la fin de l'exploitation des satellites radar russes de reconnaissance océanique dans les années 1980. Lors de 16 de ces éjections, de nombreuses gouttelettes de liquide de refroidissement du réacteur (un alliage sodium-potassium à bas point de fusion) ont été libérées dans l'espace.

Une autre source historique fut la libération de fils de cuivre fins dans le cadre d'une expérience de communication radio lors des missions Midas dans les années 1960.

Enfin, sous l'effet du rayonnement ultraviolet extrême, l'oxygène atomique et les microparticules qui entrent en contact érodent les surfaces des objets spatiaux. Cela conduit à une perte de masse des revêtements de surface et au détachement de paillettes de peinture dont la taille varie du micromètre au mm.

Des observations réalisées avec le télescope de 1 m de diamètre de l'ESA à l'observatoire du Teide, à Tenerife, en Espagne, ont permis de découvrir une population d'objets présentant des rapports surface/masse extrêmement élevés. L'origine et la nature de ces objets ne sont pas encore entièrement comprises. Il est désormais généralement admis que ces objets ont été créés dans la région GEO, probablement à partir de matériaux de couverture thermique de satellites abandonnés.

Première collision en orbite de l'histoire

La première collision accidentelle en orbite entre deux satellites s'est produite le 10 février 2009 à 16h56 UTC, à 776 km d'altitude au-dessus de la Sibérie. Un satellite de communication privé américain, Iridium-33, et un satellite militaire russe, Kosmos2251, sont entrés en collision à 11,7 km/s. Les deux ont été détruits et plus de 2 300 fragments traçables ont été générés, dont certains sont depuis rentrés dans l'atmosphère (c'est-à-dire qu'ils se sont désintégrés et sont rentrés dans l'atmosphère, où ils ont brûlé).

Répartition des objets catalogués dans l'espace - vue globale

Les satellites lancés en LEO sont continuellement exposés aux forces aérodynamiques des zones supérieures ténues de l'atmosphère terrestre.

Selon l'altitude, au bout de quelques semaines, années ou même siècles, cette résistance ralentit suffisamment le satellite pour qu'il rentre dans l'atmosphère. À des altitudes plus élevées, au-delà de

800 km, la résistance de l'air devient moins efficace et les objets restent généralement en orbite pendant plusieurs décennies.

À n'importe quelle altitude, la génération de débris due aux opérations normales de lancement, aux désintégrations et autres événements de libération est contrecarrée par des mécanismes naturels de nettoyage, tels que la traînée de l'air et l'attraction gravitationnelle luni-solaire. Le résultat de ces effets d'équilibrage est une concentration (densité spatiale) de débris spatiaux dépendante de l'altitude et de la latitude.

Les concentrations maximales de débris peuvent être observées à des altitudes de 800 à 1 000 km et à proximité de 1 400 km. Les densités spatiales dans l'espace extra-atmosphérique et à proximité des orbites des constellations de satellites de navigation sont inférieures de deux à trois ordres de grandeur.

Prévision si « business as usual » : croissance des débris

Avec un rythme de lancement annuel actuel d'environ 110, et des fragmentations futures qui continueront de se produire à un rythme historique moyen de 10 à 11 par an, le nombre de débris dans l'espace va augmenter régulièrement.

En raison de l'augmentation du nombre de débris, la probabilité de collisions catastrophiques va également augmenter progressivement ; doubler le nombre d'objets multipliera le risque de collision par quatre environ.

À mesure que la population de débris augmente, davantage de collisions se produiront.

Dans un scénario de « statu quo », de telles collisions commenceront à prendre le pas sur les explosions qui dominent actuellement d'ici quelques décennies. À terme, les fragments de collision entreront en collision avec des fragments de collision, jusqu'à ce que la population entière soit réduite à des tailles sous-critiques.

Ce processus auto-entretenu, particulièrement critique pour la région LEO, est connu sous le nom de « syndrome de Kessler ». Il doit être évité par la mise en œuvre rapide de mesures d'atténuation et de remédiation à l'échelle internationale.

ILLUSTRATION 1

RÉPARTITION DES DÉBRIS EN ORBITE AUTOUR DE LA TERRE



©ESA - European Space Agency

TEXTE 2

DÉBRIS SPATIAUX : 24H AVEC NOS SENTINELLES DE L'ESPACE

Qu'ils manipulent des formules mathématiques ou des logiciels, qu'ils travaillent sur la réglementation ou qu'ils développent des solutions techniques... Au CNES, nombreux sont celles et ceux qui œuvrent pour la sauvegarde et la protection des orbites terrestres. Nous avons suivi quelques-unes de ces sentinelles de l'espace pour décrypter leur quotidien.

Il est 6h30.

Morgane Jouisse arrive en trombe au Centre Spatial de Toulouse. Son portable d'astreinte a sonné il y a 20 minutes à peine. Morgane, 30 ans, est ingénieure Surveillance de l'espace au CNES. « *Nous devons réagir 24h/24 aux alertes de collisions entre 2 objets en orbite terrestre.* »

En 2013, le CNES a en effet créé CAESAR¹, un service gratuit à disposition de tous les opérateurs de satellites. Il évalue les risques encourus par leurs satellites d'entrer en collision avec d'autres satellites ou débris.

« *En général, les alertes sont activées dès qu'il y a 0,05 % de risque qu'une collision survienne, précise Morgane. Il nous faut vérifier le risque, le recalculer, et si nécessaire, il nous faut appeler les opérateurs des satellites pour leur conseiller d'effectuer des manœuvres, pour éviter la collision. C'est ce que je m'apprête à faire !* » Morgane Jouisse, ingénieure Surveillance de l'espace au CNES.

Il est 10h.

L'alerte est passée et la collision évitée. Grâce à Morgane, mais aussi à toutes les personnes qui travaillent au quotidien au service de l'anticollision : des spécialistes en informatique, pour développer les logiciels de calcul de risques, des opérateurs pour utiliser les télescopes qui permettent de suivre les objets célestes, ou encore des ingénieurs chargés de leur bon fonctionnement... A l'image de Mégane Diet, ingénieure spécialisée en optique. Elle revient d'une mission de maintenance sur l'un des télescopes de l'observatoire de la Silla, au Chili. « *Nous avons démonté, nettoyé et remonté la mécanique, les optiques, les miroirs du télescope... Nous avons également implémenté de nouveaux logiciels, pour améliorer ses performances.* »

Le télescope est l'un des 3 instruments du réseau TAROT² (l'un est sur l'île de la Réunion et l'autre dans les Alpes-Maritimes), utilisés par le CNES pour surveiller les objets qui gravitent au-dessus de nos têtes : satellites en activité ou hors-service, débris de satellites, de fusées... « *Et nous construisons actuellement un 4e télescope en Nouvelle-Calédonie, s'enthousiasme la jeune femme. Il sera opérationnel cet été !* » Les télescopes de TAROT, ainsi que les nombreux radars répartis sur la planète, alimentent également le catalogue du CNES.

Aujourd'hui, le catalogue du CNES contient 12 000 objets de quelques centimètres et plus - un chiffre en constante augmentation, mais non exhaustif. Les données manquent encore, même sur les objets recensés, et créent des incertitudes.

Et c'est là qu'intervient Emmanuel Delande, lui aussi ingénieur en surveillance de l'espace. Sa spécialité ? Les mathématiques appliquées ! « *Il existe des incertitudes quant à la position des objets dans l'espace, notamment les débris inactifs, incapables de nous donner leur position. Car tous sont en mouvement, continuellement. De plus, les mécaniques orbitales sont complexes. En orbite basse par exemple, il subsiste un peu d'atmosphère, ce qui crée des perturbations difficiles à modéliser. Toutes ces incertitudes doivent être prises en compte au maximum dans nos logiciels informatiques. Et c'est là ma mission : les estimer au mieux et les transcrire en formules mathématiques qui amélioreront nos logiciels.* »

¹ CAESAR : Conjunction Analysis and Evaluation Service: Alert and Recommendations

² TAROT : Télescope à Action Rapide pour les Objets Transitoires

Services après-vente

Autre problématique : l'explosion du nombre de satellites opérationnels en orbite autour de la Terre. Il a été multiplié par 9 entre 2000 et 2023, passant d'environ 750 à plus de 7 000 aujourd'hui. Face à cette évolution, le CNES avait participé, dès 2008, à la mise en place de la Loi relative aux opérations spatiales (LOS), plaçant alors la France à l'avant-garde de la protection et de la préservation de l'espace.

« Cette loi vise à assurer la pérennité et la sécurité des opérations spatiales pour les satellites » explique Olfa El Jed, cheffe du service LOS et Sauvegarde, à la sous-direction Sécurité, sauvegarde et maîtrise de l'espace (SME) au CNES. Comment est-ce possible, concrètement ?

Tout opérateur français, ou opérant depuis la France, doit demander une autorisation pour développer et opérer son satellite. Et donc charge à nous d'émettre des avis techniques sur lesquels se base le Ministère chargé de l'espace pour l'autoriser, ou non.

Olfa El Jed, cheffe du service LOS et Sauvegarde au CNES

Des solutions techniques aux obligations réglementaires

Depuis sa création il y a plus de 12 ans, la sous-direction SME s'étoffe régulièrement de nouvelles activités, comme récemment avec celles liées à ce qu'on appelle les Services en Orbite (SeO).

« Cela correspond essentiellement aux activités menées sur des satellites en orbite pour prolonger leur durée de vie » explique Ludovic Rochas, tout nouveau chef de projet Service en Orbite, un service né début 2024. « Les réparer, les réapprovisionner en carburant, les inspecter... Cette économie circulaire est l'une des stratégies pour dépolluer l'espace, en misant sur le service après-vente. »

Les services en orbite recouvrent également les activités visant à rendre les satellites inoffensifs ou à nettoyer les orbites, c'est le cas par exemple de la désorbitation d'engins hors service.

« La SME regroupe aujourd'hui une trentaine de personnes au CNES, se félicite Patrice Benarroche, directeur adjoint de cette sous-direction. Nos activités se sont structurées au fil des ans de manière indépendante, il s'agit désormais de les fédérer. Et c'est là justement mon rôle : créer des passerelles entre ces activités. Par exemple entre les équipes LOS et SeO, afin que les contraintes réglementaires soient prises en compte dans les projets que l'on va mener. »

Des contraintes de plus en plus fortes. La Loi sur les Opérations Spatiales vient en effet d'être entièrement revue par le service d'Olfa, qui y travaille activement depuis 4 ans. Le contexte évolue, la loi doit s'adapter. La nouvelle réglementation prend désormais en compte les services en orbite ou les constellations et méga-constellations de satellites. « Quand on lance 500 satellites plutôt qu'un seul, l'opération doit être plus fiable ! » assume Olfa.

14h.

Une discussion anime les couloirs du CST. Il est question de la forme que doit prendre le bouclier en aluminium qui viendrait protéger les satellites en y piégeant les débris de quelques millimètres. Pierre Omaly, chef de projet de Tech For Space Care (T4SC), donne de la voix : « Je suis sûr qu'on peut arriver à le faire voler sur un satellite de démonstration dès 2026. C'est un gros challenge, mais on peut le faire ! »

Tech For Space Care (T4SC) est une initiative du CNES pour développer des technologies qui aideront les constructeurs et les opérateurs de satellites à répondre aux obligations liées à la protection de l'espace. « Car c'est bien beau de vouloir protéger l'orbite terrestre, sourit Pierre, encore faut-il trouver les solutions pour y arriver ! »

Ainsi, via le projet T4SC, le CNES imagine ces technologies, les prototype, les teste... avant de passer le relais aux industriels qui seront en charge de les... industrialiser. A l'image d'un système qui stabilise un satellite une fois hors-service, pour éviter qu'il ne roule sur lui-même de manière aléatoire et permettre ainsi de le récupérer plus facilement.

Le but de T4SC est de préserver l'espace mais aussi la compétitivité des entreprises. Et Ludovic Rochas de compléter : « L'expertise du CNES doit aussi servir à amener à maturation des

technologies, même parfois venues de l'extérieur. Il nous faut soutenir les innovations qui permettront de dépolluer l'espace, comme celles liées aux services en orbite. Mais tout en assurant leur rentabilité économique. Par exemple, en proposant des services duals, utiles à la société et à l'armée. »

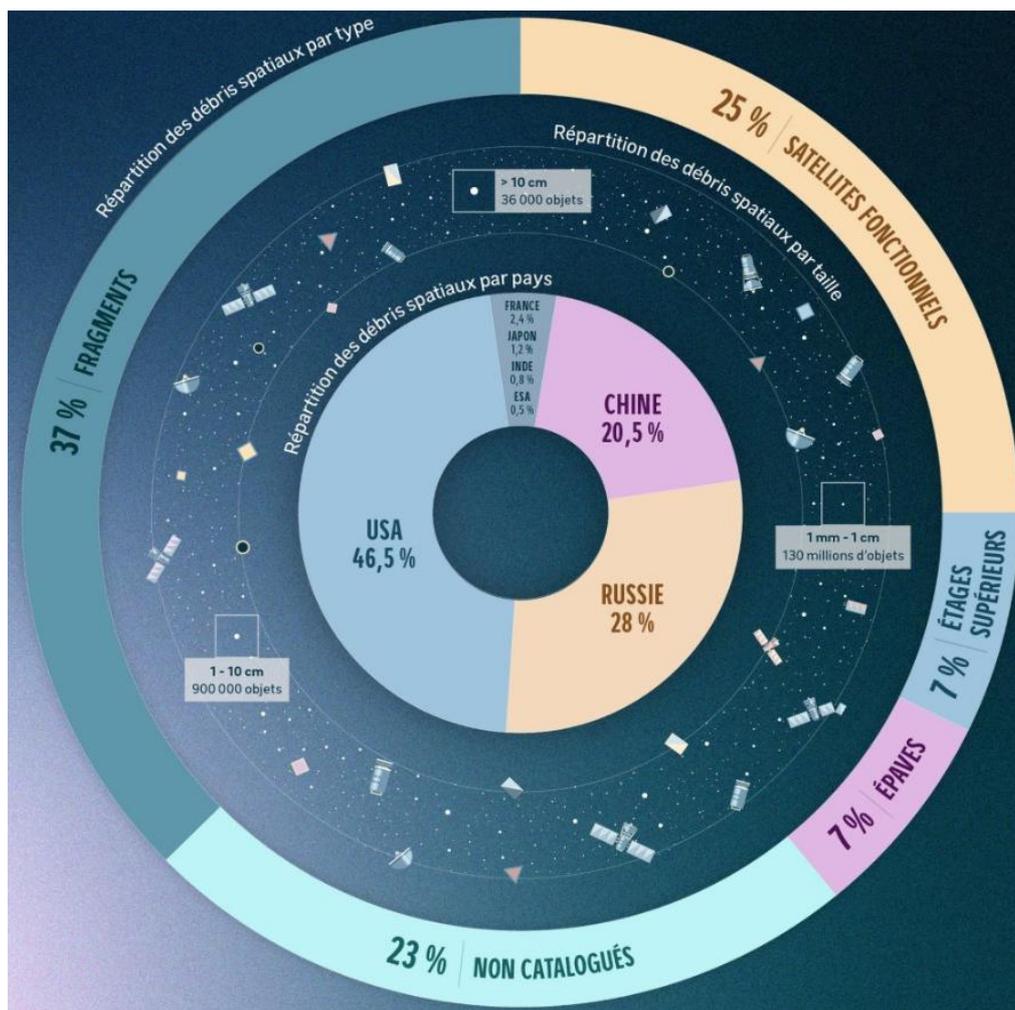
Ludovic, Pierre ou encore Patrice... pour ces responsables, le succès de leur mission dépendra de leur capacité à travailler en équipe, et à fédérer les compétences. Qu'ils s'agissent d'experts en rendez-vous spatiaux, en robotique, en thermique ou en transport spatial : « C'est comme cela que naissent les idées, confirme Pierre Omalu. Lors de réunions formelles, ou comme aujourd'hui, autour de la machine à café. La France doit montrer l'exemple, Nous avons des valeurs au CNES : ça vaut le coup de trouver le moyen de les imposer, non ? »

Et Ludovic Rochas de renchérir : « L'orbite terrestre est une ressource limitée que certains n'hésitent pourtant pas à s'accaparer. Il faut agir. Et le CNES a en effet un vrai rôle à jouer dans ce domaine. »

ILLUSTRATION 2

LE CATALOGUE DU CNES

Ce projet ambitieux, mené depuis une quinzaine d'années, recense un maximum d'objets en orbite autour de la Terre, des orbites basses, en dessous de 2000 km d'altitude jusqu'à l'orbite géostationnaire à 36 000 km. Objectif : réaliser une cartographie spatiale et en temps réel de tous ces objets. Le comité inter-agence de coordination des débris spatiaux (IADC) estime à 900 000 le nombre d'objets de plus de 1 cm (dont 7000 satellites en activité) en orbite.



Chiffres au 1^{er} septembre 2023

CNES, 2024

SUSTAINABLE SPACE

The United Nations has previously defined sustainability as “meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” Building upon this, the IADC³ is performing work to set metrics to define a sustainable space environment. It is hoped that future releases of this report will include the outcome of this work and this section will build upon this research by providing a quantitative interpretation of the space environment status and forecasts. Ahead of this and using the results provided in this report, the following observations can be made concerning the current and future state of the space environment:

- The most significant change in the launch traffic has been seen in LEO, principally from 2010, due to the deployment of large constellations and a shift towards commercial operators [...];
- The widespread adoption of the COPUOS and IADC space debris mitigation guidelines and the IADC recommendations for large constellations of satellites continue to remain the most effective method to reduce the long-term environmental impacts of global space activity by slowing the rate of growth of the space debris population observed;
- With an increasing number of active satellites collision avoidance is also becoming increasingly important;
- Adoption of the IADC space debris mitigation guidelines is not yet at a level that is sufficient to induce substantial benefits or slowing of the population growth;
- With the current level of adoption of the IADC guidelines and recommendations, the extrapolation of current space launch activity could lead to the rapid growth of the orbital object population. The environmental evolution results [...] identified that a doubling of the space debris population may occur in less than 50 years;
- Critically, in the case of no further launches into orbit, it is expected that collisions among space debris objects already present will lead to a further growth in space debris population;
- The IADC continues to encourage widespread adoption of the IADC guidelines and its recommendations. However, even with widespread adoption of these guidelines and recommendations, or even stricter behaviours, the consensus is that the environmental impacts cannot be removed completely and additional steps should be taken, such as enabling the technology for active debris removal;
- Further research and discussions are encouraged within the global community to develop a consensus view on the definition of a sustainable space environment. The IADC will continue to perform research in this area and will provide regular releases of this environment report to support these discussions, including at the UN sessions.

³ L'Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) est une organisation internationale composée des principales agences spatiales (NASA, ESA, etc) et d'institutions scientifiques collaborant pour atténuer les risques liés aux débris spatiaux. Créée en 1993, elle se concentre sur l'échange d'informations, la coordination des recherches et l'élaboration de recommandations techniques pour la gestion des débris en orbite.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TEXTES :

- 1. À PROPOS DES DÉBRIS SPATIAUX**
<https://cnes.fr/dossiers/debris-spatiaux>
- 2. DÉBRIS SPATIAUX : 24H AVEC NOS SENTINELLES DE L'ESPACE**
<https://cnes.fr/actualites/debris-spatiaux-24h-nos-sentinelles-de-lespace>
- 3. SUSTAINABLE SPACE**
IADC-23-01 IADC Report on the Status of the Space Debris Environment (Issue 2, Jan. 2024)

ILLUSTRATIONS :

- 1. LE CATALOGUE DU CNES**
<https://cnes.fr/sites/default/files/2024-07/infographie-debris-spatiaux-orbite-cnes-2024-p85678.jpg>
- 2. RÉPARTITION DES DÉBRIS EN ORBITE AUTOUR DE LA TERRE**
©ESA - European Space Agency