

Pollution spatiale

Ed – 01

1 – Pollution par les satellites

Le déploiement massif de constellations de satellites, comme Starlink, soulève de nombreuses questions quant à leur impact sur l'environnement. Bien que ces technologies offrent de nombreux avantages, notamment en matière de connectivité, elles posent également des défis environnementaux significatifs.

1 – 1 - Les principaux impacts environnementaux

- **Débris spatiaux:**
 - **Augmentation du risque de collision:** La multiplication des objets en orbite augmente considérablement le risque de collisions, générant ainsi de nouveaux débris spatiaux.
 - **Effet Kessler:** Ce phénomène décrit une situation où la densité de débris devient telle que les collisions se multiplient de manière exponentielle, rendant certaines orbites inutilisables.
- **Pollution lumineuse:**
 - **Perturbation des observations astronomiques:** La réflexion de la lumière solaire par les satellites peut interférer avec les observations astronomiques, notamment pour les télescopes au sol.
 - **Altération des écosystèmes nocturnes:** La pollution lumineuse peut perturber les cycles de vie de nombreuses espèces animales et végétales.
- **Consommation énergétique:**
 - **Fabrication et lancement:** La production des satellites et leur lancement nécessitent une quantité importante d'énergie, souvent issue de combustibles fossiles.
 - **Fonctionnement:** Les satellites en orbite consomment de l'énergie pour maintenir leur position et communiquer.
- **Volume des débris**

Le volume des débris spatiaux est difficile à quantifier précisément, car il dépend de la taille des débris et de leur densité. Cependant, on peut estimer le nombre de débris en fonction de leur taille :

- **Objets supérieurs à 10 cm:** On estime qu'il y a environ 36 000 objets de plus de 10 cm en orbite.
- **Objets entre 1 et 10 cm:** Le nombre d'objets entre 1 et 10 cm est estimé à environ 1 million.
- **Objets entre 1 mm et 1 cm:** On estime qu'il y a environ 130 millions d'objets entre 1 mm et 1 cm.

La masse totale des débris en orbite est évaluée à environ 9 000 tonnes.

Il est important de noter que ces estimations sont approximatives et que le nombre de débris augmente régulièrement en raison des lancements de satellites et des collisions.

Le problème des débris spatiaux est un enjeu majeur pour l'exploration spatiale, car il peut entraîner des collisions et des dommages aux satellites en orbite. Des initiatives internationales sont en cours pour réduire la quantité de débris spatiaux et prévenir de nouvelles collisions.

1 – 2 – les types de débris spatiaux

Les débris spatiaux peuvent être classés en plusieurs catégories selon leur taille, leur origine et leur composition. Voici une présentation des principaux types de débris spatiaux :

Selon leur taille:

- **Gros débris:** Ces débris sont généralement supérieurs à 10 cm de diamètre. Ils peuvent être visibles depuis la Terre et sont suivis par les radars. Ils comprennent les étages supérieurs des lanceurs, les satellites non fonctionnels et les fragments de collisions.
- **Petits débris:** Ces débris sont plus petits que 10 cm, mais supérieurs à 1 mm. Ils sont plus difficiles à détecter et à suivre, mais peuvent tout aussi bien endommager un satellite en cas de collision.
- **Micrométéorites et particules de poussière:** Ces débris sont très petits, souvent inférieurs à 1 mm. Ils sont difficiles à détecter et peuvent causer des dommages aux surfaces des satellites.

Selon leur origine:

- **Débris de lancement:** Ces débris proviennent des étages supérieurs des lanceurs qui sont laissés en orbite après le lancement.
- **Débris de satellites:** Ces débris sont issus de satellites qui ont échoué ou qui ont été détruits en orbite.
- **Débris de collisions:** Ces débris sont le résultat de collisions entre satellites ou entre satellites et débris.
- **Débris de fragmentation:** Ces débris sont le résultat de l'explosion d'un satellite ou d'un lanceur.

Selon leur composition:

- **Métalliques:** Ces débris sont principalement constitués de métaux, tels que l'aluminium, le titane et l'acier.
- **Non métalliques:** Ces débris sont constitués de matériaux non métalliques, tels que les plastiques, les composites et les peintures.

Voici un tableau récapitulatif des différents types de débris spatiaux:

Type de débris	Taille	Origine	Composition
Gros débris	>10 cm	Lanceurs, satellites, collisions	Métalliques, non métalliques

Petits débris	1 mm - 10 cm	Lanceurs, satellites, collisions	Métalliques, non métalliques
Micrométéorites et particules de poussière	<1 mm	Naturels	Métalliques, non métalliques

Il est important de noter que ces catégories ne sont pas exclusives. Un même débris peut appartenir à plusieurs catégories en fonction de ses caractéristiques.

1 –3 - Les enjeux à long terme

- **Durabilité:** Il est essentiel de développer des solutions durables pour réduire l'impact environnemental des constellations de satellites.
- **Réglementation:** La mise en place d'une réglementation internationale stricte est nécessaire pour limiter la production de débris spatiaux et réduire la pollution lumineuse.
- **Innovation:** L'innovation technologique peut contribuer à développer des satellites plus respectueux de l'environnement, avec des matériaux recyclables et des systèmes de propulsion plus efficaces.

Les mesures à envisager

- **Réduction des débris spatiaux:**
 - **Mesures de fin de vie:** Mettre en place des mesures pour assurer une fin de vie contrôlée des satellites, comme la désorbitation ou le stockage en orbite stable.
 - **Surveillance:** Améliorer les systèmes de surveillance pour détecter et suivre les débris spatiaux.
- **Limitation de la pollution lumineuse:**
 - **Matériaux moins réfléchissants:** Utiliser des matériaux moins réfléchissants pour la fabrication des satellites.
 - **Orbites moins lumineuses:** Choisir des orbites moins exposées à la lumière du soleil.
- **Réduction de la consommation énergétique:**
 - **Énergies renouvelables:** Utiliser des sources d'énergie renouvelable pour alimenter les satellites.
 - **Optimisation des systèmes:** Optimiser les systèmes de propulsion et de communication pour réduire la consommation énergétique.

les constellations de satellites offrent de nombreuses opportunités, mais leur développement doit se faire de manière responsable et durable. Il est essentiel de trouver un équilibre entre les bénéfices économiques et sociaux de ces technologies et leur impact sur l'environnement.

1 – 3 - Les technologies émergentes pour réduire l'impact environnemental des satellites

Le déploiement massif de constellations de satellites soulève des préoccupations environnementales légitimes. Fort heureusement, de nombreuses recherches sont en cours pour développer des technologies visant à réduire cet impact. Voici quelques pistes prometteuses :

1. Matériaux plus respectueux de l'environnement

- **Matériaux composites biodégradables:** Des matériaux composites à base de substances naturelles, comme certains polymères biologiques, sont étudiés pour remplacer les matériaux traditionnels plus polluants.
- **Peintures moins réfléchissantes:** Des peintures spéciales, moins réfléchissantes, pourraient réduire la pollution lumineuse causée par les satellites.

2. Systèmes de propulsion innovants

- **Propulsion électrique:** Les systèmes de propulsion électrique, plus efficaces que les propulseurs chimiques traditionnels, permettent de réduire la consommation de carburant et les émissions.
- **Voiles solaires:** Ces voiles utilisent la pression de radiation solaire pour propulser les satellites, éliminant ainsi le besoin de carburant à bord.

3. Fin de vie des satellites

- **Désorbitation active:** Des systèmes de propulsion peuvent être utilisés pour faire redescendre les satellites en fin de vie dans l'atmosphère, où ils se désintègrent.
- **Orbite cimetière:** Pour les satellites de grande taille ou difficiles à désorbiter, une orbite cimetière, située à une altitude élevée, peut être utilisée pour les stocker en toute sécurité.
- **Récupération en orbite:** Des missions de récupération pourraient être développées pour ramener les satellites en fin de vie sur Terre, afin de les réparer ou de les recycler.

4. Optimisation des orbites

- **Orbites moins encombrées:** En choisissant des orbites moins fréquentées, les risques de collision peuvent être réduits.
- **Optimisation des constellations:** Une meilleure planification des constellations peut permettre de réduire le nombre de satellites nécessaires pour couvrir une zone donnée.

5. Surveillance et suivi des débris spatiaux

- **Radars et télescopes:** Des systèmes de surveillance plus performants permettent de détecter et de suivre les débris spatiaux, facilitant ainsi la planification des manœuvres d'évitement.
- **Intelligence artificielle:** L'intelligence artificielle peut être utilisée pour analyser les données de surveillance et prédire les trajectoires des débris.

6. Récupération des débris spatiaux

- **Harpons et filets:** Des systèmes de capture utilisant des harpons ou des filets pourraient être développés pour ramener les débris spatiaux sur Terre.
- **Lasers:** Des lasers pourraient être utilisés pour modifier la trajectoire des débris et les faire redescendre dans l'atmosphère.

les technologies pour réduire l'impact environnemental des satellites sont en constante évolution. Si des défis restent à relever, les perspectives sont prometteuses. En combinant ces différentes approches, il est possible de construire un secteur spatial plus durable et respectueux de l'environnement.

1 – 4- Méthodes pour localiser et caractériser les débris nucléaires

La localisation et la caractérisation des débris nucléaires sont des opérations complexes qui requièrent une combinaison de techniques spécialisées. Ces méthodes varient en fonction de la nature des débris (solides, liquides, gazeux), de leur environnement (terrestre, marin, aérien) et de leur niveau de radioactivité.

Méthodes de localisation

- **Détection à distance:**
 - **Radiométrie aérienne:** Des avions équipés de détecteurs de rayonnement survolent les zones suspectes pour détecter des anomalies radioactives.
 - **Téledétection satellitaire:** Les satellites peuvent détecter des anomalies thermiques ou radiométriques à la surface de la Terre.
- **Détection in situ:**
 - **Instruments de mesure portatifs:** Les équipes de mesure utilisent des dosimètres, des compteurs Geiger-Müller et d'autres instruments pour détecter les radiations.
 - **Campagnes de prélèvement:** Des échantillons de sol, d'eau ou de sédiments sont prélevés et analysés en laboratoire.
 - **Techniques géophysiques:** La résistivité électrique, la magnétométrie et la gravimétrie peuvent aider à localiser des anomalies souterraines.

Méthodes de caractérisation

- **Analyse chimique:**
 - **Spectrométrie gamma:** Cette technique permet d'identifier les radionucléides présents dans un échantillon en analysant le spectre énergétique des rayonnements gamma émis.
 - **Spectrométrie alpha:** Utilisée pour les émetteurs alpha, comme le plutonium.
- **Analyse physique:**
 - **Mesure de la radioactivité:** La mesure de l'activité permet de quantifier la quantité de radionucléides présents.
 - **Dosage isotopique:** Cette technique permet de déterminer la composition isotopique d'un échantillon, ce qui peut fournir des informations sur son origine.

Enjeux et défis

La localisation et la caractérisation des débris nucléaires sont confrontées à plusieurs défis :

- **La diversité des débris:** Les débris nucléaires peuvent prendre de nombreuses formes et tailles, ce qui complique leur détection.

- **La profondeur de contamination:** Les radionucléides peuvent être présents en surface ou en profondeur dans le sol, ce qui nécessite des techniques d'investigation différentes.
- **L'évolution des radionucléides:** Les radionucléides se désintègrent au fil du temps, ce qui peut modifier leur signature radioactive.
- **Les environnements difficiles:** Certains environnements, comme les océans ou les zones fortement industrialisées, rendent les opérations de détection et de caractérisation plus complexes.

Cas particuliers : les accidents nucléaires

Dans le cas d'accidents nucléaires majeurs, comme ceux de Tchernobyl ou de Fukushima, des méthodes spécifiques sont mises en œuvre :

- **Cartographie des zones contaminées:** Des cartes détaillées sont établies pour identifier les zones les plus fortement contaminées.
- **Suivi à long terme:** Des systèmes de surveillance sont mis en place pour suivre l'évolution de la contamination dans le temps.
- **Décontamination:** Des opérations de décontamination sont menées pour réduire les niveaux de radioactivité dans les zones les plus touchées.

la localisation et la caractérisation des débris nucléaires sont des opérations complexes qui nécessitent une expertise scientifique et technique approfondie. Les progrès technologiques et l'amélioration des méthodes d'analyse permettent d'affiner les techniques de détection et de caractérisation, contribuant ainsi à une meilleure gestion des risques radiologiques.

1 – 5 - Localisation et caractérisation des débris nucléaires en LEO

Comprendre l'enjeu des débris nucléaires en LEO

Les débris nucléaires en orbite basse terrestre (LEO) représentent un risque particulier en raison de :

- **La radioactivité:** Les matériaux radioactifs présents dans ces débris peuvent constituer une menace pour la santé des astronautes et contaminer l'environnement terrestre en cas de rentrée atmosphérique incontrôlée.
- **La densité des objets en LEO:** La LEO est une zone très fréquentée, où la densité d'objets (satellites actifs, débris spatiaux) est élevée, augmentant ainsi le risque de collision.
- **La difficulté de récupération:** La récupération d'objets en orbite est une opération complexe et coûteuse, rendant la gestion des débris nucléaires encore plus ardue.

Méthodes de localisation et de caractérisation

Les méthodes utilisées pour localiser et caractériser les débris nucléaires en LEO sont principalement basées sur des techniques de télédétection et d'analyse spectrale.

- **Radars et télescopes:**

- **Radars:** Ces instruments permettent de détecter les objets en mouvement grâce aux ondes radio qu'ils émettent. Ils fournissent des informations sur la taille, la forme et la trajectoire des objets.
- **Télescopes:** Ils permettent d'observer les objets dans le domaine visible et infrarouge. En combinant les données radar et télescope, il est possible d'obtenir une image plus précise de l'objet.
- **Spectrométrie:**
 - **Spectrométrie gamma:** En analysant le spectre énergétique des rayons gamma émis par un objet, il est possible d'identifier les radionucléides présents et d'estimer leur activité. Cette technique est particulièrement utile pour détecter les sources de rayonnement de haute énergie.

Défis spécifiques à la LEO

La localisation et la caractérisation des débris nucléaires en LEO sont confrontées à des défis spécifiques :

- **La vitesse des objets:** Les objets en LEO se déplacent à des vitesses très élevées, ce qui rend leur suivi difficile et nécessite des instruments de mesure très précis.
- **La taille des objets:** Les débris nucléaires peuvent être de taille très variable, allant de quelques centimètres à plusieurs mètres, ce qui complique leur détection.
- **La nature de la trajectoire:** Les trajectoires des objets en LEO sont influencées par de nombreux facteurs (frottement atmosphérique, attraction gravitationnelle, etc.), ce qui rend leurs prévisions à long terme complexes.

Solutions et perspectives

Pour faire face à ces défis, plusieurs pistes sont explorées :

- **Amélioration des systèmes de surveillance:** Le développement de nouveaux radars et télescopes plus performants permettra d'améliorer la détection et le suivi des débris.
- **Mise en place de réseaux de surveillance internationaux:** Une coopération internationale est essentielle pour établir un réseau mondial de surveillance des débris spatiaux.
- **Développement de technologies de capture et de désorbitation:** La capture et la désorbitation des débris nucléaires sont des solutions à long terme pour réduire les risques.
- **Encadrement réglementaire:** Un cadre réglementaire international strict est nécessaire pour encourager les bonnes pratiques et réduire la production de nouveaux débris.

En conclusion, la localisation et la caractérisation des débris nucléaires en LEO est un enjeu majeur pour la sécurité spatiale et la protection de notre planète. Les progrès technologiques et la coopération internationale sont essentiels pour faire face à ce défi.

2 - Les initiatives internationales pour réduire les débris spatiaux

La problématique des débris spatiaux est un enjeu mondial qui nécessite une collaboration internationale. De nombreuses initiatives ont vu le jour pour tenter de réduire la pollution de l'espace et assurer la durabilité des activités spatiales.

Les acteurs clés du nettoyage spatial

- Les agences gouvernementales
- Les organisations internationales
- Les universités et centres de recherche
- Les organisations non gouvernementales (ONG)
- Laboratoires privés et start-up

Le nettoyage spatial est un enjeu mondial qui mobilise une multitude d'acteurs, chacun apportant son expertise et ses ressources. Voici un aperçu des principaux organismes impliqués :

2 – 1 . Agences spatiales gouvernementales nationales

Les agences spatiales gouvernementales jouent un rôle primordial dans la gestion et la mitigation des débris spatiaux. Ces entités, dotées de budgets conséquents et d'une expertise pointue, mènent des actions variées pour faire face à ce problème croissant.

Les principales actions menées par les agences spatiales

1. **Suivi et catalogage des débris:**
 - **Réseaux de télescopes:** Les agences spatiales utilisent des réseaux de télescopes terrestres et spatiaux pour détecter et suivre les objets en orbite, notamment les débris spatiaux.
 - **Radars:** Les radars permettent de détecter les objets de plus petite taille et à des altitudes plus basses.
 - **Catalogues:** Les données collectées sont utilisées pour créer et maintenir des catalogues de débris spatiaux, permettant ainsi d'évaluer les risques de collision.
2. **Modélisation et prédiction:**
 - **Simulations numériques:** Les agences spatiales développent des modèles mathématiques pour simuler l'évolution des populations de débris spatiaux et prédire les futurs risques de collision.
 - **Études d'impact:** Elles étudient les conséquences potentielles des collisions entre débris spatiaux et les satellites en fonctionnement.
3. **Développement de technologies de mitigation:**
 - **Systèmes de propulsion:** Les agences spatiales investissent dans le développement de systèmes de propulsion électrique et chimique pour permettre aux satellites de modifier leur orbite en fin de vie et de réduire ainsi les risques de création de nouveaux débris.
 - **Voiles solaires:** Ces voiles utilisent la pression de radiation solaire pour désorbiter les satellites en fin de vie.
 - **Systèmes de capture:** Des recherches sont menées sur des systèmes de capture pour saisir les débris en orbite et les désorbiter.
4. **Élaboration de normes et de réglementations:**
 - **Recommandations internationales:** Les agences spatiales participent activement à l'élaboration de recommandations internationales visant à réduire la production de débris spatiaux et à améliorer la gestion des satellites en fin de vie.

- **Collaboration internationale:** Elles encouragent la coopération internationale pour mettre en place des normes communes et harmoniser les pratiques.
5. **Sensibilisation et éducation:**
- **Communication:** Les agences spatiales mènent des actions de communication pour sensibiliser le public et les acteurs du secteur spatial aux enjeux liés aux débris spatiaux.
 - **Formation:** Elles organisent des formations et des conférences pour former les futurs ingénieurs et scientifiques à ces problématiques.

Exemples d'agences spatiales impliquées

- **NASA (États-Unis):** La NASA est à la pointe de la recherche sur les débris spatiaux et mène de nombreux projets pour développer de nouvelles technologies de mitigation.
- **ESA (Agence spatiale européenne):** L'ESA joue un rôle de coordination au niveau européen et finance de nombreux projets de recherche sur les débris spatiaux.
- **JAXA (Japon):** La JAXA est également très active dans ce domaine et a développé plusieurs missions pour étudier les débris spatiaux.
- **Roscosmos (Russie):** Roscosmos contribue aux efforts internationaux de nettoyage spatial en participant à des programmes de coopération.

Les défis à relever

Malgré les efforts des agences spatiales, le problème des débris spatiaux reste complexe et exige des solutions à long terme. Les principaux défis sont :

- **Coûts élevés:** Les opérations de nettoyage spatial sont coûteuses et nécessitent des investissements importants.
- **Complexité technique:** La capture et la désorbitation des débris spatiaux sont des opérations complexes qui requièrent des technologies de pointe.
- **Collaboration internationale:** Une coopération internationale renforcée est nécessaire pour mettre en œuvre des solutions efficaces à l'échelle mondiale.

En conclusion, les agences spatiales gouvernementales jouent un rôle essentiel dans la gestion des débris spatiaux. Grâce à leurs efforts, des progrès significatifs ont été réalisés, mais de nombreux défis restent à relever. La collaboration entre les différents acteurs du secteur spatial est indispensable pour garantir la durabilité de l'exploration spatiale.

2 – 2 - Organisations internationales

Les organisations internationales jouent un rôle crucial dans la coordination des efforts mondiaux pour nettoyer l'espace. Elles établissent des normes, facilitent la coopération entre les nations et encouragent des pratiques responsables dans le domaine spatial.

Les principales missions des organisations internationales

- **Élaboration de normes et de réglementations:** Les organisations internationales développent des lignes directrices et des traités internationaux pour réguler les activités spatiales et minimiser la création de nouveaux débris.
- **Coordination de la recherche:** Elles soutiennent et coordonnent la recherche scientifique sur les débris spatiaux, en favorisant les échanges entre les chercheurs du monde entier.
- **Sensibilisation et éducation:** Les organisations internationales mènent des campagnes de sensibilisation pour informer le public et les décideurs politiques sur les enjeux liés aux débris spatiaux.
- **Promotion de la coopération internationale:** Elles facilitent les collaborations entre les agences spatiales, les gouvernements et les industries du secteur spatial pour mettre en œuvre des solutions communes.

Les principales organisations internationales impliquées

- **Les Nations Unies (ONU):** L'ONU, à travers le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (**COPUOS**), est l'organe principal chargé de discuter des questions liées à l'espace, y compris les débris spatiaux.
- **L'Union internationale des télécommunications (UIT):** L'UIT établit les normes techniques pour les télécommunications, y compris celles utilisées dans l'espace. Elle joue un rôle important dans la coordination des fréquences radio et des orbites.
- **L'Agence spatiale européenne (ESA):** Bien qu'elle soit une agence régionale, l'ESA joue un rôle de leader dans la recherche sur les débris spatiaux et collabore étroitement avec d'autres agences spatiales et organisations internationales.
- **La Fédération aéronautique internationale (FAI):** La FAI est une organisation non gouvernementale qui établit des normes et des records dans le domaine de l'aéronautique et de l'astronautique. Elle s'intéresse également aux questions liées à la sécurité spatiale.

Les défis à relever

Les organisations internationales font face à plusieurs défis :

- **La diversité des intérêts nationaux:** Les États membres ont des intérêts nationaux divergents qui peuvent compliquer la mise en œuvre de normes internationales.
- **Le caractère complexe des problèmes:** Les problèmes liés aux débris spatiaux sont complexes et nécessitent des solutions à long terme.
- **Le manque de ressources:** Les organisations internationales disposent souvent de ressources limitées pour mener à bien leurs missions.

Les organisations internationales jouent un rôle essentiel dans la coordination des efforts mondiaux pour nettoyer l'espace. Elles fournissent un cadre juridique et institutionnel pour la coopération internationale et contribuent à la mise en place de solutions durables pour ce défi mondial.

2 - 3 - Universités et centres de recherche

De nombreuses universités à travers le monde mènent des recherches de pointe sur les débris spatiaux. Ces établissements jouent un rôle crucial dans le développement de nouvelles technologies et de stratégies pour nettoyer l'orbite terrestre.

Il est difficile de dresser une liste exhaustive, car la recherche dans ce domaine est en constante évolution et de nouveaux laboratoires émergent régulièrement. Cependant, voici quelques universités et laboratoires particulièrement reconnus pour leurs travaux sur les débris spatiaux :

En Europe :

- **Université de Surrey (Royaume-Uni):** L'université de Surrey abrite le Space Centre, qui est l'un des principaux centres de recherche sur l'espace en Europe. Ils travaillent sur de nombreux aspects des débris spatiaux, notamment la modélisation, la détection et la mitigation.
- **Université de Liège (Belgique):** Le laboratoire STAR (Space and Terrestrial Advanced Research) de l'université de Liège est spécialisé dans l'étude des débris spatiaux et des impacts hypervéloces.
- **Université de Stuttgart (Allemagne):** L'Institut de mécanique spatiale de l'université de Stuttgart est impliqué dans des recherches sur la dynamique des débris spatiaux et le développement de technologies de capture.

Aux États-Unis :

- **Massachusetts Institute of Technology (MIT):** Le MIT possède plusieurs laboratoires qui travaillent sur les débris spatiaux, notamment le Lincoln Laboratory et le Space Systems Laboratory.
- **Université de Californie à Los Angeles (UCLA):** L'UCLA abrite le Space Plasma Physics Group, qui étudie les interactions entre les débris spatiaux et l'environnement spatial.
- **Université du Colorado à Boulder:** L'université du Colorado est reconnue pour ses travaux sur la dynamique des fluides spatiaux et l'impact des débris spatiaux sur les satellites.

En Asie :

- **Université de Tokyo (Japon):** L'université de Tokyo possède un laboratoire spécialisé dans l'étude des débris spatiaux et le développement de technologies de nettoyage.
- **Université de Pékin (Chine):** L'université de Pékin est impliquée dans des recherches sur la modélisation des débris spatiaux et l'évaluation des risques de collision.

Il est important de noter que cette liste n'est pas exhaustive et que de nombreux autres laboratoires universitaires à travers le monde contribuent à la recherche sur les débris spatiaux.

Les domaines de recherche abordés dans ces laboratoires

Les recherches menées dans ces laboratoires couvrent un large éventail de sujets, notamment :

- **Modélisation et prédiction:** Développement de modèles mathématiques pour simuler l'évolution des populations de débris spatiaux et prédire les risques de collision.
- **Détection et suivi:** Mise au point de nouveaux systèmes de détection et de suivi des débris spatiaux, notamment par radar et par télescope.

- **Technologies de capture et de désorbitation:** Développement de technologies innovantes pour capturer et désorbiter les débris spatiaux, comme les harpons, les filets ou les lasers.
- **Impacts hypervélocés:** Étude des effets des impacts hypervélocés sur les matériaux spatiaux pour améliorer la résistance des satellites.
- **Politique spatiale:** Analyse des politiques spatiales internationales et développement de recommandations pour une meilleure gestion des débris spatiaux.

2 – 4 - Organisations non gouvernementales (ONG)

Les organisations non gouvernementales (ONG) jouent un rôle de plus en plus important dans le domaine du nettoyage spatial. Bien qu'elles ne disposent pas des mêmes ressources que les agences spatiales gouvernementales, elles apportent une contribution significative en complétant leurs actions.

Les actions des ONG dans le nettoyage spatial

1. **Sensibilisation et mobilisation:**
 - **Communication:** Les ONG mènent des campagnes de communication pour sensibiliser le public aux enjeux liés aux débris spatiaux et à l'importance de préserver l'environnement spatial.
 - **Éducation:** Elles organisent des ateliers, des conférences et des événements éducatifs pour informer les jeunes et le grand public sur ces problématiques.
 - **Lobbying:** Les ONG exercent un lobbying auprès des décideurs politiques pour les inciter à adopter des politiques plus ambitieuses en matière de gestion des débris spatiaux.
2. **Recherche et développement:**
 - **Soutien à la recherche:** Certaines ONG financent des projets de recherche dans des universités ou des laboratoires, notamment sur des technologies de capture et de désorbitation des débris.
 - **Incubation de startups:** Elles soutiennent la création de startups spécialisées dans le développement de solutions innovantes pour le nettoyage spatial.
3. **Collaboration avec les acteurs du secteur spatial:**
 - **Partenariats:** Les ONG collaborent avec les agences spatiales gouvernementales, les entreprises du secteur spatial et les universités pour mettre en œuvre des projets communs.
 - **Réseaux:** Elles créent des réseaux pour favoriser les échanges et la coopération entre les différents acteurs.
4. **Élaboration de normes et de bonnes pratiques:**
 - **Propositions de normes:** Les ONG participent à l'élaboration de normes internationales pour une meilleure gestion des débris spatiaux.
 - **Diffusion de bonnes pratiques:** Elles diffusent les bonnes pratiques en matière de conception et d'exploitation des satellites.

Exemples d'ONG actives dans le domaine

- **Secure World Foundation:** Cette fondation américaine est spécialisée dans la gouvernance de l'espace et la sécurité spatiale. Elle mène des activités de recherche, de sensibilisation et de plaidoyer.

- **Space Debris Mitigation Office:** Ce bureau, basé aux États-Unis, travaille à la réduction des débris spatiaux en encourageant l'adoption de meilleures pratiques par l'industrie spatiale.
- **The Satellite Industry Association (SIA):** Bien qu'il s'agisse d'une association professionnelle, la SIA joue un rôle important dans la promotion de bonnes pratiques pour réduire la production de débris spatiaux.

Les défis rencontrés par les ONG

Les ONG confrontent plusieurs défis dans leurs actions :

- **Ressources limitées:** Les ONG disposent généralement de budgets limités, ce qui restreint leurs capacités d'action.
- **Manque de visibilité:** Elles peuvent avoir du mal à se faire entendre face aux grands acteurs du secteur spatial.
- **Complexité des enjeux:** Les problèmes liés aux débris spatiaux sont complexes et nécessitent des solutions à long terme.

Les ONG jouent un rôle complémentaire essentiel dans le nettoyage spatial. Elles contribuent à sensibiliser l'opinion publique, à soutenir la recherche et à promouvoir des pratiques responsables dans le secteur spatial. Leur action est indispensable pour faire avancer ce défi mondial.

2 – 5 -Les entreprises commerciales dans le nettoyage spatial : un secteur en plein essor

Le nettoyage spatial, un enjeu majeur pour la pérennité de l'exploration spatiale, attire de plus en plus d'entreprises commerciales. Ces dernières proposent des solutions innovantes pour faire face au problème croissant des débris spatiaux.

Pourquoi les entreprises se tournent-elles vers le nettoyage spatial ?

- **Opportunités commerciales:** Le marché du nettoyage spatial est en pleine croissance, offrant de nouvelles opportunités d'affaires.
- **Responsabilité environnementale:** Les entreprises cherchent à démontrer leur engagement en faveur de la durabilité et de la protection de l'environnement spatial.
- **Réglementation accrue:** La pression réglementaire pour réduire les débris spatiaux pousse les entreprises à trouver des solutions.

Les types de services proposés

Les entreprises commerciales proposent une gamme de services pour le nettoyage spatial, notamment :

- **Développement de technologies:**
 - **Systèmes de propulsion:** Mise au point de systèmes de propulsion innovants pour déplacer les satellites en fin de vie vers des orbites cimetière.
 - **Systèmes de capture:** Développement de technologies pour capturer les débris spatiaux, comme les harpons, les filets ou les lasers.

- **Voiles solaires:** Utilisation de la pression de radiation solaire pour désorbiter les objets en fin de vie.
- **Services de consultation:**
 - **Études de faisabilité:** Réalisation d'études pour évaluer la faisabilité de missions de nettoyage spatial.
 - **Conception de missions:** Conception de missions personnalisées pour répondre aux besoins spécifiques des clients.
- **Missions de démonstration:**
 - **Tests en vol:** Réalisation de missions de démonstration pour tester les technologies de nettoyage spatial en conditions réelles.

Quelques exemples d'entreprises

Plusieurs entreprises, notamment des startups, se sont positionnées sur ce marché émergent. Parmi les plus connues, on peut citer :

- **ClearSpace:** Cette startup suisse a pour objectif de développer des technologies pour capturer et désorbiter les débris spatiaux.
- **AstroScale:** Cette entreprise japonaise propose des solutions pour prolonger la durée de vie des satellites et pour les désorbiter en fin de vie.
- **Momentum:** Cette entreprise américaine développe des systèmes de propulsion électrique pour déplacer les satellites en orbite.

Les défis à relever

Le nettoyage spatial reste un domaine complexe et coûteux. Les entreprises doivent faire face à plusieurs défis :

- **Le coût des opérations:** Les missions de nettoyage spatial sont très coûteuses, ce qui limite l'accès à ce marché.
- **La réglementation:** Le cadre réglementaire international est encore en cours de développement, ce qui crée une certaine incertitude pour les entreprises.
- **La technologie:** Les technologies de nettoyage spatial sont encore à un stade relativement immature.

L'avenir du nettoyage spatial

Le nettoyage spatial est un secteur en pleine croissance avec un potentiel important. Les progrès technologiques, la prise de conscience des enjeux environnementaux et l'évolution de la réglementation devraient accélérer le développement de ce marché. Les entreprises commerciales joueront un rôle de plus en plus important dans la mise en œuvre de solutions pour nettoyer l'espace.

2 - 6 - Les startups du nettoyage spatial

Le secteur du nettoyage spatial est en pleine effervescence, avec l'émergence de nombreuses startups innovantes qui proposent des solutions pour remédier au problème croissant des débris spatiaux. Ces entreprises, souvent portées par des ingénieurs et des scientifiques passionnés, apportent un vent de fraîcheur et de dynamisme à ce domaine.

L'objectif des startups est de devenir une société commerciale. La phase Startup correspond à la recherche de capitaux et de faire preuve de la pérennité des actions commerciales

Pourquoi créer une startup dans le nettoyage spatial ?

- **Un enjeu mondial:** La pollution spatiale est un problème qui concerne toute l'humanité. En s'attaquant à ce problème, ces startups contribuent à préserver l'environnement spatial et à garantir la durabilité des activités spatiales.
- **Un marché en croissance:** Le marché du nettoyage spatial est en pleine expansion, avec de nombreux acteurs institutionnels (agences spatiales, gouvernements) et privés (opérateurs de satellites, entreprises de télécommunications) qui sont prêts à investir dans des solutions innovantes.
- **Des technologies de pointe:** Le développement de technologies de pointe, telles que la propulsion électrique, la robotique et l'intelligence artificielle, ouvre de nouvelles perspectives pour le nettoyage spatial.

Les principales activités des startups du nettoyage spatial

- **Détection et suivi des débris:** Ces startups développent des systèmes de surveillance avancés pour détecter et suivre les objets en orbite, quelle que soit leur taille.
- **Évaluation des risques:** Elles évaluent les risques de collision pour les satellites en activité et les infrastructures spatiales.
- **Missions de désorbitation:** Ces entreprises conçoivent des missions de désorbitation pour éliminer les débris les plus dangereux.
- **Technologies de capture:** Elles développent des technologies innovantes pour capturer les débris, telles que des harpons, des filets ou des systèmes magnétiques.
- **Réutilisation des débris:** Certaines startups envisagent de récupérer les débris pour les réparer ou les réutiliser.

Des exemples de startups dans le domaine

- **ClearSpace:** Cette startup suisse a développé une technologie de capture pour éliminer les débris spatiaux.
- **AstroScale:** Cette entreprise japonaise propose des solutions pour nettoyer l'orbite terrestre basse.
- **Orbital Assembly:** Cette entreprise américaine travaille sur la construction de stations spatiales modulaires et durables.

Les défis à relever

- **Le financement:** Le développement de technologies spatiales est coûteux, et il est essentiel de trouver des sources de financement durables.
- **La réglementation:** Le cadre juridique régissant les activités spatiales est complexe et en constante évolution.
- **La coopération internationale:** Le nettoyage spatial est un enjeu mondial qui nécessite une coopération internationale étroite.

L'avenir du nettoyage spatial

L'avenir du nettoyage spatial s'annonce prometteur. Avec l'émergence de nouvelles technologies et le soutien croissant des gouvernements et des entreprises, nous pouvons espérer voir une réduction significative de la pollution spatiale dans les prochaines années.

En conclusion, les startups du nettoyage spatial jouent un rôle essentiel dans la préservation de l'environnement spatial. Ces entreprises innovantes apportent des solutions concrètes à un problème mondial, tout en créant de nouvelles opportunités économiques.

Pour aller plus loin, je vous invite à explorer les ressources suivantes:

- **Sites web des startups du nettoyage spatial:** ClearSpace, Astroscale, Orbital Assembly, etc.
- **Publications scientifiques:** De nombreuses revues scientifiques publient des articles sur les débris spatiaux.
- **Organisations non gouvernementales:** Des ONG comme la Secure World Foundation travaillent sur ce sujet.

3 – Evolution de la gestion des débris

3 – 1 - Les principales initiatives

- **Lignes directrices internationales :** Les États membres des Nations Unies ont adopté des lignes directrices volontaires pour réduire les débris spatiaux. Ces lignes directrices couvrent des domaines tels que la conception des satellites, les opérations en orbite et la désorbitation en fin de vie.
- **Registres des objets spatiaux :** De nombreux pays ont mis en place des registres nationaux des objets spatiaux pour suivre les objets en orbite et faciliter le partage d'informations.
- **Projets de recherche et développement:** Les agences spatiales et les entreprises investissent dans la recherche pour développer de nouvelles technologies permettant de capturer, de désorbiter ou de déplacer les débris spatiaux.
- **Collaboration internationale :** Les agences spatiales collaborent étroitement pour partager les données sur les débris spatiaux, développer des normes communes et coordonner les opérations de nettoyage.

Les défis à relever

Le nettoyage spatial est un enjeu majeur qui nécessite une approche globale et des solutions innovantes. De nombreux défis se posent, tant sur le plan technique que juridique et économique.

Défis techniques

- **Détection et suivi des débris:** Il est essentiel de disposer de systèmes de surveillance capables de détecter et de suivre les débris de toutes tailles, y compris les plus petits, qui représentent la majorité des objets en orbite.
- **Capture des débris:** La capture d'un objet en mouvement rapide dans l'espace est une opération extrêmement complexe qui nécessite des technologies de propulsion et de manipulation précises.

- **Désorbitation:** Une fois capturés, les débris doivent être désorbités pour qu'ils brûlent en rentrant dans l'atmosphère terrestre. Les méthodes de désorbitation varient en fonction de la taille et de l'orbite des débris.
- **Énergie:** Les opérations de nettoyage spatial nécessitent une grande quantité d'énergie. Il faut donc développer des systèmes de propulsion efficaces et durables.

Défis juridiques et réglementaires

- **Responsabilité:** La question de la responsabilité en cas de collision entre un débris et un satellite en fonctionnement est complexe. Il faut définir clairement les responsabilités des différents acteurs impliqués.
- **Réglementation internationale:** Le cadre juridique régissant les activités spatiales est en constante évolution. Il est nécessaire de mettre en place des normes internationales claires et contraignantes pour réguler le nettoyage spatial.
- **Propriété des débris:** La question de la propriété des débris spatiaux est également délicate. Qui a le droit de nettoyer les débris et de tirer profit de leur récupération ?

Défis économiques

- **Coûts élevés:** Les opérations de nettoyage spatial sont extrêmement coûteuses, en raison des technologies complexes mises en œuvre et des risques encourus.
- **Modèle économique:** Il est difficile de trouver un modèle économique viable pour le nettoyage spatial, car les bénéfices ne sont pas immédiats et les coûts sont élevés.

Autres défis

- **Encombrement spatial:** Le nombre de débris augmente de manière exponentielle, ce qui rend la tâche de nettoyage de plus en plus complexe.
- **Risque de créer de nouveaux débris:** Les opérations de nettoyage spatial peuvent elles-mêmes générer de nouveaux débris si elles ne sont pas menées avec précaution.

Le nettoyage spatial est un défi de taille qui nécessite une approche multidisciplinaire. Les solutions à ces défis nécessiteront des investissements importants, une coopération internationale renforcée et le développement de nouvelles technologies. Malgré les difficultés, il est essentiel de trouver des solutions durables pour préserver l'environnement spatial et garantir la sécurité des opérations spatiales futures

3 – 2 - L'avenir du nettoyage spatial

Le nettoyage spatial est un défi de taille qui nécessite une approche globale et des solutions innovantes. Bien que de nombreux défis subsistent, l'avenir de ce domaine s'annonce prometteur grâce aux avancées technologiques et à la prise de conscience croissante de l'importance de préserver l'environnement spatial.

Les perspectives d'avenir

- **Nouvelles technologies:** Le développement de technologies de pointe, telles que la propulsion électrique, la robotique avancée et l'intelligence artificielle, ouvre de

nouvelles perspectives pour le nettoyage spatial. Des systèmes de capture plus précis et des méthodes de désorbitation plus efficaces sont à l'étude.

- **Collaboration internationale:** La coopération entre les agences spatiales, les entreprises privées et les organisations internationales est essentielle pour relever ce défi mondial. Des accords internationaux et des normes communes sont nécessaires pour réguler les activités spatiales et favoriser le nettoyage.
- **Économie circulaire spatiale:** À l'avenir, l'objectif sera de mettre en place une économie circulaire dans l'espace, où les matériaux seraient recyclés et réutilisés. Cela permettrait de réduire la production de nouveaux déchets spatiaux.
- **Réglementation renforcée:** Les réglementations internationales devront être renforcées pour encourager les opérateurs de satellites à adopter des pratiques responsables et à prendre en charge la fin de vie de leurs satellites.
- **Missions de démonstration:** Des missions de démonstration seront menées pour tester les technologies de nettoyage spatial et valider leur efficacité. Ces missions permettront d'acquérir une expérience précieuse et de réduire les coûts des opérations futures.

Les enjeux pour l'avenir

- **Coûts:** Les opérations de nettoyage spatial restent coûteuses. Il est nécessaire de développer des modèles économiques durables pour rendre ces activités rentables.
- **Complexité technique:** La capture et la désorbitation de débris spatiaux sont des opérations complexes qui nécessitent une grande précision.
- **Temps:** Le nettoyage de l'orbite terrestre basse prendra du temps et nécessitera des efforts soutenus sur le long terme.
- **Prévention:** Il est tout aussi important de prévenir la création de nouveaux débris en encourageant les bonnes pratiques dans le secteur spatial.

L'avenir du nettoyage spatial est prometteur, mais il reste encore beaucoup de défis à relever. Les avancées technologiques, la coopération internationale et la prise de conscience des enjeux environnementaux sont les clés pour assurer la durabilité de l'exploration spatiale. Il est essentiel d'agir maintenant pour préserver l'environnement spatial et garantir un accès sûr et durable à l'espace pour les générations futures.

3 – 3 - Les enjeux juridiques et économiques du nettoyage spatial

Le nettoyage spatial, bien qu'étant une nécessité pour assurer la durabilité des activités spatiales, soulève de nombreuses questions juridiques et économiques complexes.

Enjeux juridiques liés à la responsabilité en cas de collision

- **Attribution des responsabilités:** En cas de collision entre un débris spatial et un satellite opérationnel, déterminer qui est responsable est un enjeu majeur. Les traités internationaux actuels, comme la Convention de 1972 sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux, fixent des principes généraux, mais des zones d'ombre subsistent, notamment en ce qui concerne les débris anciens ou les constellations de satellites.
- **Assurance:** Les compagnies d'assurance sont réticentes à couvrir les risques liés aux débris spatiaux en raison de l'imprévisibilité des événements et du coût élevé des dommages potentiels.

- **Droit international :** Le droit international de l'espace est en constante évolution. De nouvelles normes juridiques sont nécessaires pour réguler les activités de nettoyage spatial et les responsabilités associées.

Implications économiques de la réduction des débris spatiaux

- **Coûts élevés:** Le développement et le déploiement de technologies de nettoyage spatial sont extrêmement coûteux. Qui financera ces opérations ? Les États, les agences spatiales, les entreprises privées ou une combinaison de ces acteurs ?
- **Retour sur investissement:** Il est difficile d'évaluer le retour sur investissement des opérations de nettoyage spatial, car les bénéfices sont souvent à long terme et difficiles à quantifier.
- **Impact sur le marché spatial:** Le nettoyage spatial pourrait modifier le paysage du marché spatial en créant de nouvelles opportunités d'affaires et en incitant les acteurs à adopter des pratiques plus responsables.

Autres enjeux

- **Équité:** Comment répartir équitablement les coûts et les bénéfices du nettoyage spatial entre les différents acteurs ?
- **Priorité des cibles:** Quels débris doivent être nettoyés en priorité ? Les plus dangereux, les plus récents ou ceux qui représentent une menace pour les infrastructures critiques ?
- **Coopération internationale:** Une coopération internationale étroite est indispensable pour résoudre ce problème mondial.

3 – 4 - Perspectives d'avenir

Pour relever ces défis, plusieurs pistes sont envisagées :

- **Renforcement du cadre juridique international:** Il est nécessaire de clarifier les règles juridiques régissant la responsabilité en cas de collision et de définir les obligations des États et des acteurs privés.
- **Création de mécanismes de compensation:** Des mécanismes d'assurance ou de fonds d'indemnisation pourraient être mis en place pour couvrir les dommages causés par les débris spatiaux.
- **Promotion de partenariats public-privé:** Les partenariats entre les États et les entreprises privées peuvent favoriser le développement de technologies de nettoyage spatial et réduire les coûts.
- **Sensibilisation et éducation:** Une meilleure sensibilisation aux enjeux des débris spatiaux est nécessaire pour encourager les acteurs du secteur à adopter des pratiques responsables.

le nettoyage spatial est un enjeu complexe qui nécessite une approche globale et multidisciplinaire. Les défis juridiques et économiques sont importants, mais les bénéfices potentiels en termes de sécurité spatiale et de développement durable justifient les efforts entrepris.

3 – 5 - Initiatives internationales pour renforcer le cadre juridique et financier du nettoyage spatial

Le nettoyage spatial est un enjeu global qui nécessite une coordination internationale. De nombreuses initiatives sont en cours pour renforcer le cadre juridique et financier de ces opérations :

Renforcement du cadre juridique

- **Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (COPUOS) :** Ce comité des Nations Unies est au cœur des discussions sur la gouvernance de l'espace. Il élabore des recommandations et des lignes directrices pour réguler les activités spatiales, y compris le nettoyage des débris.
- **Traités internationaux :** Les traités existants, tels que le Traité sur l'espace extra-atmosphérique de 1967, servent de base juridique. Cependant, ils nécessitent des mises à jour pour s'adapter aux nouveaux défis posés par les débris spatiaux.
- **Responsabilité et indemnisation :** Les États membres travaillent à clarifier les règles de responsabilité en cas de dommages causés par des débris spatiaux, notamment en ce qui concerne les débris anciens et les constellations de satellites.
- **Registre des objets spatiaux :** Le maintien et l'amélioration de ce registre sont essentiels pour suivre les objets en orbite et attribuer les responsabilités.

Modèles économiques pour financer le nettoyage spatial

- **Partenariats public-privé:** De nombreux projets de nettoyage spatial sont le fruit de collaborations entre les agences spatiales (NASA, ESA, JAXA, etc.) et des entreprises privées. Ces partenariats permettent de mutualiser les ressources et les compétences.
- **Crédits d'impôt et subventions:** Les gouvernements peuvent encourager les investissements dans le nettoyage spatial en offrant des incitations fiscales et des subventions aux entreprises.
- **Fonds dédiés:** La création de fonds dédiés au nettoyage spatial permettrait de financer des projets à long terme et de réduire les risques pour les investisseurs.
- **Mécanismes de financement innovants:** Des mécanismes tels que les obligations vertes ou les marchés du carbone pourraient être adaptés au secteur spatial pour financer des projets environnementaux.
- **Responsabilité des opérateurs:** Les opérateurs de satellites pourraient être tenus de contribuer à un fonds commun destiné au financement du nettoyage spatial.

Exemples d'initiatives

- **Programme Space Situational Awareness (SSA) de l'ESA:** Ce programme vise à améliorer la surveillance des débris spatiaux et à développer des technologies de nettoyage.
- **ClearSpace-1:** Cette mission suisse est la première mission commerciale de nettoyage spatial visant à capturer un débris orbital.
- **Constellation de satellites de surveillance des débris:** Plusieurs pays envisagent de lancer des constellations de satellites dédiées à la surveillance des débris spatiaux, ce qui pourrait améliorer la connaissance de la situation et faciliter la planification des opérations de nettoyage.

Les défis à relever

- **Coûts élevés:** Les opérations de nettoyage spatial sont extrêmement coûteuses, ce qui représente un obstacle majeur pour leur déploiement à grande échelle.
- **Complexité technique:** Le développement de technologies de capture et de désorbitation est un défi technique complexe.
- **Coordination internationale:** Une coopération internationale étroite est nécessaire pour mettre en œuvre des solutions efficaces et durables.
- **Équilibre entre les intérêts commerciaux et le bien commun:** Il est essentiel de trouver un équilibre entre les intérêts commerciaux des entreprises spatiales et le besoin de protéger l'environnement spatial pour les générations futures.

le renforcement du cadre juridique et financier du nettoyage spatial est un processus complexe et progressif. Les initiatives internationales existantes sont encourageantes, mais des efforts supplémentaires sont nécessaires pour faire face aux défis posés par la pollution spatiale.

4 – Mise en place

4 – 1 - La pollution

L'essor des constellations de satellites, notamment pour fournir un accès internet haut débit mondial, soulève de plus en plus de préoccupations concernant leur impact environnemental, et plus particulièrement la pollution qu'ils engendrent.

Les différents types de pollution liés aux satellites

- **Pollution lumineuse:** Les satellites réfléchissent la lumière du soleil, ce qui crée une pollution lumineuse qui peut interférer avec les observations astronomiques. Les astronomes craignent que cela ne compromette leurs recherches et notre compréhension de l'univers.
- **Pollution spatiale:** Chaque lancement de satellite génère des débris spatiaux. Ces débris peuvent entrer en collision avec d'autres objets en orbite, créant ainsi une cascade de débris et augmentant le risque de collisions futures.
- **Impact sur la faune:** Bien que moins étudiée, la pollution lumineuse pourrait également avoir un impact sur la faune, notamment les animaux nocturnes qui utilisent les cycles jour-nuit pour leurs activités.

Les enjeux liés à cette pollution

- **Sécurité spatiale:** La multiplication des objets en orbite augmente le risque de collisions, ce qui pourrait rendre l'espace moins sûr pour les futures missions spatiales.
- **Observation astronomique:** La pollution lumineuse générée par les satellites compromet la qualité des observations astronomiques et pourrait à terme limiter notre capacité à étudier l'univers.
- **Environnement terrestre:** Les débris spatiaux qui rentrent dans l'atmosphère peuvent se consumer et générer des particules polluantes.

Les solutions envisagées

Pour limiter l'impact environnemental des constellations de satellites, plusieurs solutions sont explorées :

- **Réduction des débris:**
 - Mise en place de normes plus strictes pour la conception des satellites afin de réduire la production de débris.
 - Développement de technologies permettant de désorbiter les satellites en fin de vie de manière plus efficace.
- **Diminution de la pollution lumineuse:**
 - Utilisation de matériaux moins réfléchissants pour les satellites.
 - Orientation des panneaux solaires de manière à minimiser la réflexion de la lumière.
 - Développement de logiciels permettant de prédire les trajectoires des satellites et d'alerter les observatoires en cas de risque d'interférence.
- **Réglementation internationale:**
 - Mise en place de réglementations internationales strictes pour régir l'utilisation de l'espace et limiter la production de débris spatiaux.
 - Création d'un organisme international chargé de coordonner les activités spatiales et de surveiller l'environnement spatial.

la pollution liée aux satellites est un enjeu majeur qui nécessite une réflexion collective et la mise en place de mesures concrètes pour protéger l'environnement spatial et terrestre. Il est essentiel de trouver un équilibre entre les bénéfices des constellations de satellites et leur impact environnemental.

4 – 2 – nettoyage spatial

Le nettoyage spatial est devenu une préoccupation majeure de la communauté scientifique et des agences spatiales du monde entier. Avec la multiplication des lancements de satellites, la quantité de débris spatiaux en orbite ne cesse d'augmenter, posant un risque croissant pour les missions spatiales en cours et futures.

Pourquoi le nettoyage spatial est-il nécessaire ?

- **Risque de collisions:** La densité croissante des objets en orbite augmente considérablement le risque de collisions, ce qui pourrait créer une réaction en chaîne de débris et rendre certaines régions de l'espace impraticables.
- **Menace pour les missions spatiales:** Les débris spatiaux représentent une menace pour la Station spatiale internationale (ISS) et pour les futurs projets d'exploration spatiale, tels que les missions vers la Lune et Mars.
- **Pollution lumineuse:** Les débris spatiaux peuvent refléter la lumière du soleil, ce qui peut interférer avec les observations astronomiques.

Les défis du nettoyage spatial

Le nettoyage spatial est une tâche extrêmement complexe et coûteuse pour plusieurs raisons :

- **Détection des débris:** Il est difficile de détecter et de suivre tous les débris spatiaux, en particulier les plus petits.
- **Atteinte des débris:** Les débris spatiaux se déplacent à des vitesses très élevées, ce qui rend leur interception difficile.
- **Coût:** Les missions de nettoyage spatial sont extrêmement coûteuses en raison des technologies complexes requises et du carburant nécessaire pour atteindre les débris.
- **Légal:** Il n'existe pas encore de cadre juridique international clair pour réguler le nettoyage spatial et attribuer les responsabilités.

Les solutions envisagées

Plusieurs solutions sont actuellement à l'étude pour nettoyer l'espace :

- **Réduction de la production de débris:**
 - Mise en place de normes plus strictes pour la conception des satellites afin de réduire la production de débris.
 - Obligation pour les opérateurs de satellites de désorbiter leurs engins en fin de vie.
- **Enlèvement actif des débris:**
 - Développement de vaisseaux spatiaux capables de capturer et de désorbiter les débris.
 - Utilisation de lasers pour désintégrer les petits débris.
- **Modification de l'orbite des débris:**
 - Utilisation de la pression de radiation solaire ou de petits propulseurs pour modifier légèrement l'orbite des débris et les faire rentrer dans l'atmosphère.

Les acteurs impliqués

De nombreuses agences spatiales et entreprises privées travaillent sur des projets de nettoyage spatial, notamment :

- **L'Agence spatiale européenne (ESA):** L'ESA a lancé plusieurs missions pour étudier la problématique des débris spatiaux et développer des technologies de nettoyage.
- **La NASA:** L'agence spatiale américaine mène également des recherches sur le nettoyage spatial et soutient des projets de développement de technologies.
- **Des entreprises privées:** De nombreuses entreprises, comme ClearSpace, ont développé des projets pour nettoyer l'espace et proposent des services de retrait de débris.

Le nettoyage spatial est un défi majeur pour l'avenir de l'exploration spatiale. Si des progrès significatifs ont été réalisés, il reste encore beaucoup à faire pour mettre en place un système efficace de gestion des débris spatiaux. Une coopération internationale est essentielle pour trouver des solutions durables à ce problème.

5 - Projets de nettoyage spatial: les initiatives pour un espace plus propre

Le nettoyage de l'espace est devenu une priorité mondiale. De nombreux projets sont actuellement en cours pour développer des technologies et des missions capables de retirer les débris spatiaux de leur orbite. Voici quelques exemples de ces initiatives :

Projets européens

- **e.Deorbit de l'ESA:** Ce projet de l'Agence spatiale européenne vise à développer des technologies de capture et de désorbitation de satellites en fin de vie. Les techniques envisagées incluent l'utilisation de bras robotiques, de filets et de harpons.
- **ClearSpace-1:** Cette mission, menée par la start-up suisse ClearSpace, a pour objectif de capturer et de désorbiter un adaptateur de fusée Vespa, un débris spatial de 100 kg en orbite basse. Ce sera la première mission commerciale de nettoyage spatial au monde.

Projets américains

- **RemoveDebris:** Ce projet de l'Université de Surrey, en collaboration avec la NASA, a testé avec succès en orbite un système de capture de débris utilisant un filet et un harpon.
- **NASA Orbital Debris Program Office:** La NASA soutient de nombreux projets de recherche et de développement dans le domaine du nettoyage spatial, notamment des études sur les technologies de propulsion électrique pour la désorbitation.

Autres projets internationaux

- **Start-ups et entreprises privées:** De nombreuses start-ups, comme Astroscale et SpaceJunk Removal, développent des technologies innovantes pour le nettoyage spatial.
- **Collaboration internationale:** Des collaborations internationales sont de plus en plus fréquentes, réunissant des agences spatiales, des universités et des entreprises pour partager leurs connaissances et développer des solutions communes.

Les défis à relever

Ces projets ambitieux sont confrontés à de nombreux défis :

- **Complexité technique:** Les opérations de capture et de désorbitation sont extrêmement complexes et nécessitent une grande précision.
- **Coût:** Le coût de développement et de déploiement de ces technologies est élevé.
- **Légal:** Le cadre juridique régissant les activités de nettoyage spatial est encore en construction.
- **Sécurité:** Il est essentiel de garantir la sécurité des opérations de nettoyage pour éviter de créer de nouveaux débris.

Les enjeux

Le nettoyage spatial est un enjeu majeur pour l'avenir de l'exploration spatiale. En réduisant la quantité de débris en orbite, nous :

- **Assurons la sécurité des missions spatiales:** En diminuant le risque de collision.
- **Protégeons l'environnement spatial:** En préservant l'espace pour les générations futures.
- **Favorisons le développement durable du secteur spatial:** En créant un environnement spatial sûr et propre.

les projets de nettoyage spatial sont en plein essor. Bien que de nombreux défis restent à relever, les progrès réalisés sont encourageants. Ces initiatives ouvrent la voie à un avenir où l'espace sera un environnement plus sûr et plus propre.

5 – 1- Le projet e.Deorbit : une initiative ambitieuse pour nettoyer l'espace

e.Deorbit est un projet pionnier de l'Agence spatiale européenne (ESA) visant à démontrer la faisabilité du retrait actif de débris spatiaux. Ce projet ambitieux marque une étape importante dans la lutte contre la pollution spatiale, un problème croissant qui menace la sécurité des opérations spatiales.

Objectifs du projet

Le principal objectif d'e.Deorbit est de développer et de tester en vol une technologie capable de capturer un satellite en fin de vie et de le désorbiter de manière contrôlée. En d'autres termes, il s'agit de mettre au point un "aspirateur spatial" capable de nettoyer les débris de notre orbite terrestre basse.

Comment ça marche ?

Le concept d'e.Deorbit repose sur l'utilisation d'un vaisseau spatial spécialement conçu pour cette mission. Ce vaisseau serait équipé d'un bras robotique et d'un système de capture capable de s'agripper à un satellite cible. Une fois capturé, le satellite serait ensuite désorbité de manière contrôlée pour se désintégrer en rentrant dans l'atmosphère terrestre.

Les enjeux

Le projet **e.Deorbit** présente de nombreux enjeux :

- **Technologique:** Le développement d'un système capable de capturer un objet en mouvement dans l'espace est un défi technologique de taille. Il nécessite une grande précision et une fiabilité à toute épreuve.
- **Économique:** Les missions de nettoyage spatial sont extrêmement coûteuses. Il est donc essentiel de développer des technologies abordables et réutilisables.
- **Légal:** Le cadre juridique régissant le nettoyage spatial est encore en construction. Il est nécessaire de définir des règles claires pour attribuer les responsabilités et éviter les conflits.

Les bénéfices

Si le projet **e.Deorbit** est un succès, il pourrait ouvrir la voie à une nouvelle ère de services spatiaux, notamment :

- **Nettoyage de l'espace:** En démontrant la faisabilité du retrait actif de débris, e.Deorbit pourrait encourager le développement de nouvelles missions de nettoyage spatial, contribuant ainsi à réduire la pollution spatiale.
- **Prolongation de la durée de vie des satellites:** Les technologies développées dans le cadre d'e.Deorbit pourraient être utilisées pour prolonger la durée de vie des satellites en effectuant des réparations ou des ravitaillements en orbite.
- **Sécurité spatiale:** En réduisant le nombre de débris spatiaux, e.Deorbit contribuera à améliorer la sécurité des opérations spatiales et à protéger les astronautes.

le projet **e.Deorbit** est une initiative ambitieuse qui pourrait marquer un tournant dans la gestion de l'espace. En développant des technologies de nettoyage spatial, nous pourrions préserver l'environnement spatial pour les générations futures et garantir la pérennité de l'exploration spatiale.

5 – 2 -CleanSpace : Une initiative ambitieuse pour un espace propre

CleanSpace est une entreprise suisse à l'avant-garde du nettoyage spatial. Fondée en 2018, elle s'est donnée pour mission de développer des technologies et des services orbitaux afin de favoriser une exploitation sûre et durable de l'espace.

Objectifs de CleanSpace

Les objectifs de CleanSpace sont clairs :

- **Éliminer les débris spatiaux:** En développant des engins spatiaux capables de capturer et de désorbiter les objets spatiaux en fin de vie ou les débris, CleanSpace vise à réduire la pollution spatiale.
- **Préserver l'espace pour les générations futures:** En nettoyant l'espace, CleanSpace contribue à garantir la sécurité des opérations spatiales et à préserver l'environnement spatial pour les générations futures.
- **Développer des technologies innovantes:** CleanSpace est à la pointe de l'innovation dans le domaine spatial. L'entreprise développe des technologies de pointe pour la capture, le transport et la désorbitation des débris spatiaux.

La mission ClearSpace-1

Le projet le plus connu de CleanSpace est **ClearSpace-1**. Il s'agit de la première mission au monde visant à démontrer la faisabilité du retrait actif de débris spatiaux. Cette mission, soutenue par l'Agence spatiale européenne (ESA), devrait être lancée en 2025.

Comment fonctionne ClearSpace-1 ?

1. **Identification de la cible:** ClearSpace-1 ciblera un adaptateur de fusée Vespa, un objet de 100 kg lancé en 2013 et qui représente un risque pour les opérations spatiales.
2. **Capture:** Un satellite chasseur sera lancé pour intercepter l'adaptateur Vespa. Grâce à un bras robotique et à un système de vision, il sera capable de saisir l'objet.
3. **Désorbitation:** Une fois capturé, l'adaptateur Vespa sera désorbité de manière contrôlée pour se désintégrer en rentrant dans l'atmosphère terrestre.

L'importance de CleanSpace

CleanSpace joue un rôle essentiel dans la lutte contre la pollution spatiale. En démontrant la faisabilité du nettoyage spatial, l'entreprise ouvre la voie à de nouvelles missions et à l'établissement d'un marché pour les services de retrait de débris spatiaux.

Les avantages de CleanSpace:

- **Innovation:** CleanSpace est à l'avant-garde de l'innovation dans le domaine spatial.
- **Impact environnemental positif:** En nettoyant l'espace, CleanSpace contribue à préserver l'environnement spatial.
- **Sécurité spatiale:** Les missions de CleanSpace contribuent à améliorer la sécurité des opérations spatiales.

CleanSpace est un acteur clé dans le domaine du nettoyage spatial. Grâce à des projets ambitieux comme ClearSpace-1, l'entreprise contribue à rendre l'espace plus sûr et plus durable.

5– 3 -Le projet RemoveDebris : une avancée majeure dans le nettoyage spatial

Le projet **RemoveDebris** est une initiative européenne ambitieuse ,ce projet de l'Université de Surrey, en collaboration avec la NASA visant à développer et à démontrer des technologies innovantes pour éliminer les débris spatiaux. Ce projet a marqué une étape importante dans la lutte contre la pollution spatiale en réalisant la toute première démonstration en orbite de techniques de capture et de désorbitation de débris.

Les objectifs de RemoveDebris

Les principaux objectifs de RemoveDebris étaient :

- **Démontrer la faisabilité:** Mettre en évidence la faisabilité technique de capturer et de désorbiter des objets en orbite.
- **Tester différentes technologies:** Évaluer l'efficacité de différentes méthodes de capture, telles que l'utilisation d'un harpon et d'un filet.
- **Développer des systèmes autonomes:** Créer des systèmes capables de fonctionner de manière autonome dans l'espace.

Les principales expériences réalisées

Le satellite RemoveDebris a mené plusieurs expériences en orbite :

- **Déploiement d'un filet:** Un filet a été déployé pour capturer un objet simulant un débris spatial.
- **Utilisation d'un harpon:** Un harpon a été tiré pour s'accrocher à un autre objet cible.
- **Désorbitation d'une voile:** Une petite voile a été déployée pour augmenter la résistance atmosphérique du satellite et accélérer sa rentrée dans l'atmosphère.

L'importance de RemoveDebris

RemoveDebris a apporté plusieurs contributions majeures au domaine du nettoyage spatial :

- **Validation technologique:** Les expériences menées ont permis de valider la faisabilité de plusieurs technologies clés pour le nettoyage spatial.
- **Levée de fonds:** Le succès de RemoveDebris a contribué à attirer de nouveaux investissements dans le secteur du nettoyage spatial.
- **Sensibilisation:** Le projet a permis de sensibiliser le public et les décideurs politiques à la problématique de la pollution spatiale.

5 – 4 - Le Bureau du Programme de Débris Orbitaux de la NASA : Un acteur clé dans le nettoyage spatial

Le **Bureau du Programme de Débris Orbitaux de la NASA** (NASA Orbital Debris Program Office) joue un rôle essentiel dans la gestion du problème croissant des débris spatiaux. Ce bureau est à la pointe de la recherche, du développement et de la mise en œuvre de stratégies pour atténuer les risques liés à la pollution spatiale.

Missions clés du Bureau :

- **Surveillance et suivi:** Le bureau maintient un catalogue détaillé des objets en orbite, y compris les débris spatiaux, et utilise des systèmes de suivi avancés pour surveiller leurs trajectoires et les risques de collision.
- **Recherche et développement:** Il investit dans la recherche pour mieux comprendre la dynamique des débris spatiaux, développer de nouvelles technologies pour les éliminer et explorer des solutions innovantes pour prévenir leur accumulation.
- **Collaboration internationale:** Le bureau collabore étroitement avec d'autres agences spatiales et organisations internationales pour élaborer des normes communes, partager des données et coordonner les efforts de mitigation.
- **Sensibilisation du public:** Il joue un rôle important dans la sensibilisation du public aux enjeux de la pollution spatiale et à l'importance de préserver l'environnement spatial.

Contributions significatives :

- **Modélisation:** Le bureau a développé des modèles informatiques sophistiqués pour simuler le comportement des débris spatiaux et prédire les risques de collision.
- **Meilleures pratiques:** Il a promu des pratiques exemplaires pour la conception et l'exploitation des engins spatiaux, afin de minimiser la production de nouveaux débris.
- **Coopération internationale:** Le bureau a joué un rôle moteur dans la coopération internationale sur les débris spatiaux, conduisant à l'élaboration de lignes directrices et de normes internationales.

Défis et perspectives d'avenir :

- **Croissance des débris:** L'augmentation du nombre de satellites en orbite aggrave le problème des débris spatiaux.
- **Avancées technologiques:** Le bureau explore constamment de nouvelles technologies pour améliorer la mitigation des débris, comme le retrait actif des débris et les systèmes de surveillance avancés.
- **Cadre réglementaire:** Il travaille à l'élaboration de réglementations internationales pour régir l'utilisation de l'espace et réduire la production de débris.

le Bureau du Programme de Débris Orbitaux de la NASA est à l'avant-garde de la lutte contre la pollution spatiale. Ses travaux de recherche, ses collaborations internationales et ses efforts de sensibilisation contribuent à assurer la durabilité de l'exploration spatiale et à préserver l'environnement spatial pour les générations futures.

5 – 5 - Astroscale : Un acteur majeur du nettoyage spatial

Astroscale est une entreprise aérospatiale japonaise spécialisée dans les services de nettoyage spatial. Elle s'est donnée pour mission de développer et de déployer des technologies innovantes pour capturer et éliminer les débris spatiaux, afin de préserver la durabilité de l'environnement spatial.

Les objectifs d'Astroscale

Les principaux objectifs d'Astroscale sont :

- **Développer des technologies de capture:** Mettre au point des systèmes capables d'attraper les débris spatiaux de différentes tailles et formes.
- **Désorbiter les débris:** Faire rentrer les débris capturés dans l'atmosphère terrestre pour qu'ils se désintègrent.
- **Proposer des services commerciaux:** Offrir des services de nettoyage spatial aux opérateurs de satellites et aux agences spatiales.

Les projets d'Astroscale

Astroscale a plusieurs projets en cours, chacun visant un type de débris spécifique :

- **ELSA-d:** Ce démonstrateur technologique a été lancé en 2021. Il a pour objectif de démontrer la faisabilité de la capture magnétique d'un petit débris spatial.
- **END of Life Services by Astroscale-demonstration (ELSA-d):** Cette mission a pour but de démontrer la capacité d'Astroscale à capturer et à désorbiter un satellite en fin de vie.

Les technologies utilisées par Astroscale

Pour atteindre ses objectifs, Astroscale utilise des technologies de pointe telles que :

- **La capture magnétique:** Cette technologie permet d'attirer les débris métalliques grâce à des aimants puissants.
- **Les systèmes de vision:** Des caméras haute résolution permettent de localiser et d'identifier les débris.
- **Les systèmes de propulsion:** Des propulseurs permettent de manœuvrer les satellites de nettoyage avec précision.

Pourquoi Astroscale est importante ?

- **Pionnière:** Astroscale est l'une des premières entreprises à développer des solutions concrètes pour le nettoyage spatial.

- **Innovations:** L'entreprise est à l'origine de nombreuses innovations technologiques dans le domaine du nettoyage spatial.
- **Engagement commercial:** Astroscale propose des services commerciaux, ce qui contribue à rendre le nettoyage spatial plus accessible.

Astroscale est un acteur clé dans le domaine du nettoyage spatial. Ses projets et ses technologies innovantes contribuent à rendre l'espace plus sûr et durable.

5 – 6 - Dark Space : Une startup pionnière dans le nettoyage spatial-

<https://www.dark-space.co/>

Dark Space est une entreprise française innovante qui s'est positionnée à l'avant-garde du nettoyage spatial. Face à la problématique croissante des débris orbitaux, cette startup a développé une approche unique et ambitieuse pour assurer la sécurité et la durabilité de l'espace.

Une approche globale de la sécurité spatiale

Dark Space ne se limite pas à la simple élimination des débris. L'entreprise propose une offre complète de services de sécurité spatiale, couvrant :

- **La détection et le suivi des débris:** Grâce à des systèmes de surveillance avancés, Dark Space est capable de détecter et de suivre les objets en orbite, quelle que soit leur taille.
- **L'évaluation des risques:** L'entreprise évalue les risques de collision pour les satellites en activité et les infrastructures spatiales.
- **Les missions de désorbitation:** Dark Space développe des technologies innovantes pour capturer et désorbiter les débris les plus dangereux.
- **La dissuasion:** L'entreprise propose des services de dissuasion pour protéger les actifs spatiaux de menaces potentielles.

Interceptor : Une plateforme réactive pour des missions sur mesure

Au cœur de l'offre de Dark Space se trouve **Interceptor**. Cette plateforme spatiale est conçue pour effectuer des missions de sécurité spatiale de manière rapide et flexible. Elle peut être déployée pour :

- **Éliminer les débris dangereux:** Interceptor est capable de capturer et de désorbiter les objets les plus menaçants.
- **Effectuer des inspections in situ:** La plateforme peut être utilisée pour inspecter des satellites endommagés ou suspects.
- **Assurer la protection d'actifs spatiaux:** Interceptor peut être déployée pour protéger des satellites ou des constellations de satellites contre des menaces.

Les enjeux et les défis

Le nettoyage spatial est un défi complexe qui nécessite des investissements importants et une collaboration internationale. Dark Space fait face à plusieurs enjeux :

- **Le coût des opérations:** Les missions de nettoyage spatial sont coûteuses, et il est essentiel de développer des modèles économiques durables.
- **La réglementation internationale:** Le cadre juridique régissant les activités spatiales est en constante évolution, et il est important de s'adapter aux nouvelles réglementations.
- **La technologie:** Les technologies de capture et de désorbitation sont encore en développement, et il faut continuer à investir dans la recherche et l'innovation.

Dark Space est une entreprise ambitieuse qui joue un rôle de pionnier dans le domaine du nettoyage spatial. En développant des solutions innovantes et en proposant une offre complète de services de sécurité spatiale, l'entreprise contribue à assurer la durabilité de l'exploration spatiale et à protéger les investissements réalisés dans l'espace.

5 – 7 - Orbital Assembly : Une vision ambitieuse pour l'habitat spatial et le nettoyage

Orbital Assembly est une entreprise américaine qui se distingue dans le secteur spatial, mais pas forcément de la manière à laquelle on pourrait s'attendre en parlant de nettoyage spatial. Alors que la plupart des startups de ce secteur se concentrent sur la capture et la désorbitation des débris, Orbital Assembly a une approche plus globale et ambitieuse.

Une vision axée sur l'habitat spatial modulaire

L'objectif principal d'Orbital Assembly est de construire des **stations spatiales modulaires et durables**. Ces stations seraient assemblées en orbite terrestre basse et pourraient servir à diverses fins :

- **Tourisme spatial:** Offrir des expériences touristiques uniques dans l'espace.
- **Recherche scientifique:** Faciliter la conduite d'expériences scientifiques dans un environnement microgravité.
- **Production industrielle:** Permettre la fabrication de produits dans l'espace.

Le lien avec le nettoyage spatial

Bien qu'Orbital Assembly ne soit pas directement impliquée dans la capture et la désorbitation des débris spatiaux, son approche a des implications importantes pour la gestion de l'environnement spatial :

- **Durabilité:** En construisant des stations spatiales durables, Orbital Assembly contribue à réduire la quantité de déchets spatiaux générés.
- **Économie circulaire:** L'entreprise envisage de mettre en place une économie circulaire dans l'espace, où les matériaux seraient recyclés et réutilisés.
- **Infrastructure pour le nettoyage:** Les stations spatiales d'Orbital Assembly pourraient servir de bases pour des opérations de nettoyage spatial, en fournissant de l'énergie, des ressources et un espace de travail aux engins de désorbitation.

Les défis à relever

- **Coûts élevés:** La construction de stations spatiales est un projet extrêmement coûteux, nécessitant des investissements importants.
- **Technologie:** De nombreuses technologies doivent encore être développées pour rendre les stations spatiales modulaires une réalité.
- **Réglementation:** Le cadre juridique régissant les activités spatiales est complexe et en constante évolution.

Orbital Assembly représente une vision ambitieuse pour l'avenir de l'exploration spatiale. En se concentrant sur la construction d'habitats spatiaux durables, l'entreprise contribue indirectement au nettoyage spatial en réduisant la quantité de déchets générés et en créant les infrastructures nécessaires pour mener des opérations de désorbitation.

5 – 8 - Momentum : Un acteur clé dans la propulsion électrique pour satellites

Momentum est une entreprise aérospatiale américaine spécialisée dans les services de transport spatial, notamment la propulsion électrique pour satellites. Son objectif principal est de révolutionner la façon dont les satellites sont déplacés dans l'espace, en offrant des solutions plus flexibles, plus économiques et plus durables que les méthodes traditionnelles.

Comment fonctionne la propulsion électrique de Momentum ?

La technologie de propulsion électrique utilisée par Momentum repose sur l'accélération d'ions pour générer une poussée faible mais continue. Contrairement aux propulseurs chimiques qui brûlent rapidement de grandes quantités de carburant, les propulseurs électriques consomment très peu de carburant et peuvent fonctionner pendant de longues périodes.

Les avantages de cette technologie sont multiples :

- **Flexibilité:** Les satellites équipés de propulseurs électriques peuvent effectuer de nombreuses manœuvres orbitales, telles que le changement d'altitude, l'inclinaison de l'orbite ou le regroupement de plusieurs satellites.
- **Économies:** La faible consommation de carburant réduit les coûts de lancement et permet d'emporter une charge utile plus importante.
- **Durabilité:** La propulsion électrique contribue à réduire la quantité de débris spatiaux en permettant de désorbiter les satellites en fin de vie de manière plus contrôlée.

Les applications de la propulsion électrique Momentum

La propulsion électrique de Momentum trouve de nombreuses applications dans le secteur spatial :

- **Transport de satellites:** Momentum propose des services de transport de satellites vers différentes orbites, notamment des orbites géostationnaires et des orbites basses.
- **Regroupement de constellations:** Cette technologie permet de regrouper des constellations de satellites pour améliorer leur performance et leur efficacité.
- **Désorbitation:** Les propulseurs électriques peuvent être utilisés pour désorbiter les satellites en fin de vie, réduisant ainsi le risque de collisions.
- **Missions de service:** Momentum envisage également des missions de service pour réparer ou ravitailler des satellites en orbite.

Les défis et l'avenir de Momentum

Bien que la propulsion électrique soit une technologie prometteuse, Momentum et d'autres entreprises du secteur font face à plusieurs défis :

- **Développement technologique:** Il reste encore des défis à relever pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des propulseurs électriques.
- **Réglementation:** Le cadre réglementaire international pour les activités spatiales est en constante évolution, ce qui peut complexifier les opérations de Momentum.
- **Concurrence:** Le marché de la propulsion électrique est de plus en plus concurrentiel, avec l'émergence de nouvelles entreprises et de nouvelles technologies.

Momentum joue un rôle de pionnier dans le domaine de la propulsion électrique pour satellites. Ses technologies innovantes offrent de nouvelles perspectives pour l'exploration spatiale et contribuent à rendre l'espace plus sûr et plus durable.

6 – Technologie

6 – 1 - Méthodes de désorbitation des débris spatiaux

La désorbitation est le processus consistant à faire rentrer un objet en orbite terrestre basse (LEO) dans l'atmosphère terrestre, où il brûlera en raison de la friction. C'est la méthode la plus utilisée pour éliminer les débris spatiaux.

Plusieurs techniques sont envisagées pour désorbiter les débris :

1. Désorbitation passive:

- **Freinage atmosphérique:** Le satellite est placé sur une orbite légèrement plus basse, où il subira progressivement l'effet du freinage atmosphérique. Ce processus peut être long, mais il est simple à mettre en œuvre.
- **Voiles solaires:** Des voiles solaires peuvent être déployées pour augmenter la surface du satellite et ainsi augmenter la force de freinage due à la pression du rayonnement solaire.

2. Désorbitation active:

- **Propulsion:** Le satellite utilise ses propres propulseurs pour modifier son orbite et la rendre plus basse. Cette méthode est plus rapide mais nécessite de l'énergie à bord du satellite.
- **Harpons et filets:** Des systèmes de capture peuvent être utilisés pour harponner ou capturer les débris, puis les désorbiter à l'aide de propulseurs.
- **Laser:** Des lasers au sol pourraient être utilisés pour créer une pression sur les débris, modifiant ainsi leur trajectoire. Cette technologie est encore expérimentale.

Les défis de la désorbitation

- **Détection et suivi:** Il est essentiel de détecter et de suivre les débris pour pouvoir planifier une opération de désorbitation.

- **Énergie:** Les opérations de désorbitation nécessitent de l'énergie, ce qui peut limiter la durée de vie des satellites.
- **Coût:** Les missions de désorbitation sont coûteuses, ce qui freine leur déploiement à grande échelle.
- **Légal:** Il est nécessaire d'établir un cadre juridique clair pour réguler les activités de désorbitation et attribuer les responsabilités en cas d'incident.

Pourquoi la désorbitation est-elle importante ?

- **Sécurité:** La désorbitation réduit le risque de collision entre les satellites en fonctionnement et les débris.
- **Durabilité:** En éliminant les débris, nous contribuons à préserver l'environnement spatial pour les générations futures.
- **Réglementation:** De nombreuses agences spatiales et organisations internationales encouragent la désorbitation en fin de vie des satellites.

la désorbitation est un enjeu majeur pour assurer la durabilité de l'exploration spatiale. Si plusieurs méthodes existent, chacune avec ses avantages et ses inconvénients, le développement de technologies efficaces et abordables reste un défi majeur.

6 – 2 -Les technologies de capture des débris spatiaux

La capture des débris spatiaux est une étape essentielle dans le processus de nettoyage orbital. Elle requiert des technologies de pointe capables d'interagir avec des objets en mouvement rapide dans un environnement hostile.

Les principales technologies de capture

Plusieurs approches sont explorées pour capturer les débris spatiaux :

- **Harpons:** Inspirés des systèmes de pêche, les harpons sont propulsés vers le débris pour s'y accrocher. Ils sont particulièrement adaptés aux objets de grande taille et de forme régulière.
- **Filets:** Des filets déployables peuvent être utilisés pour envelopper les débris. Cette méthode est moins précise que les harpons mais peut être adaptée à une variété de formes et de tailles.
- **Bras robotiques:** Des bras articulés équipés de pinces ou de ventouses peuvent saisir les débris avec une grande précision. Cette technologie est particulièrement adaptée aux opérations délicates et aux objets de petite taille.
- **Systèmes adhésifs:** Des matériaux adhésifs peuvent être utilisés pour capturer les débris, en particulier ceux ayant une surface lisse.
- **Systèmes magnétiques:** Pour les débris métalliques, des systèmes magnétiques peuvent être utilisés pour les attirer et les capturer.

Les défis à relever

Le développement de ces technologies pose de nombreux défis :

- **Précision:** La capture d'un objet en mouvement rapide dans l'espace nécessite une extrême précision.
- **Robustesse:** Les systèmes de capture doivent être capables de résister aux contraintes thermiques et mécaniques de l'environnement spatial.
- **Autonomie:** Les systèmes doivent être autonomes ou semi-autonomes pour pouvoir fonctionner dans l'espace sans intervention humaine directe.
- **Sécurité:** Les opérations de capture doivent être menées de manière sûre pour éviter de créer de nouveaux débris.

Les avantages de chaque technologie

- **Harpons:** Rapidité, efficacité pour les gros objets.
- **Filets:** Polyvalence, adapté à une variété de formes.
- **Bras robotiques:** Précision, adaptabilité à des tâches complexes.
- **Systèmes adhésifs:** Simplicité, efficace pour les surfaces lisses.
- **Systèmes magnétiques:** Simplicité, efficace pour les objets métalliques.

L'avenir des technologies de capture

Les recherches se poursuivent pour développer des technologies de capture toujours plus performantes et polyvalentes. Les avancées en matière de robotique, d'intelligence artificielle et de matériaux composites devraient permettre de surmonter les défis actuels et d'ouvrir de nouvelles perspectives pour le nettoyage spatial.

les technologies de capture des débris spatiaux sont en constante évolution. Bien que des défis subsistent, les progrès réalisés sont prometteurs et offrent de nouvelles perspectives pour préserver l'environnement spatial et garantir la sécurité des opérations spatiales futures.

6 – 3 -Diminution des débris spatiaux grâce à l'amélioration des technologies de fabrication des satellites

L'amélioration des technologies de fabrication des satellites est l'une des clés pour réduire la quantité de débris spatiaux en orbite. En concevant des satellites plus durables, plus performants et équipés de systèmes de fin de vie plus efficaces, nous pouvons limiter la création de nouveaux débris et faciliter leur élimination.

Voici quelques pistes d'amélioration :

1. Matériaux plus résistants et durables

- **Matériaux composites:** L'utilisation de matériaux composites plus légers et plus résistants permet de réduire la masse des satellites et d'augmenter leur durée de vie.
- **Revêtements protecteurs:** Des revêtements spéciaux peuvent protéger les satellites des micrométéorites et des rayonnements, limitant ainsi la création de nouveaux débris en cas d'impact.

2. Systèmes de propulsion plus efficaces

- **Propulsion électrique:** Les systèmes de propulsion électrique offrent une meilleure efficacité énergétique et permettent des manœuvres plus précises, facilitant les opérations de désorbitation.
- **Réserves de carburant accrues:** Des réserves de carburant plus importantes permettent d'effectuer plusieurs manœuvres de correction d'orbite et de désorbitation en fin de vie.

3. Systèmes de fin de vie améliorés

- **Réservoirs de carburant auto-vidangeables:** Des systèmes permettant de vider complètement les réservoirs de carburant avant la désorbitation réduisent le risque d'explosion en altitude.
- **Voiles solaires déployables:** Des voiles solaires peuvent être déployées en fin de vie pour augmenter la surface du satellite et accélérer sa désorbitation.
- **Systèmes de désorbitation autonomes:** Des systèmes autonomes peuvent être intégrés aux satellites pour déclencher la désorbitation à la fin de leur mission, sans intervention humaine.

4. Conception modulaire

- **Satellites modulaires:** Une conception modulaire permet de remplacer les composants défectueux sans avoir à désorbiter tout le satellite.
- **Standardisation des interfaces:** La standardisation des interfaces facilite le remplacement des composants et l'assemblage de nouveaux satellites.

5. Intelligence artificielle

- **Optimisation des trajectoires:** L'intelligence artificielle peut être utilisée pour optimiser les trajectoires des satellites et réduire les risques de collision.
- **Surveillance des débris:** Les systèmes d'IA peuvent aider à détecter et à suivre les débris spatiaux, permettant de planifier les manœuvres d'évitement.

6. Réglementation internationale

- **Normes strictes:** Des normes internationales strictes en matière de conception et de fin de vie des satellites peuvent encourager les fabricants à adopter les meilleures pratiques.
- **Responsabilité des opérateurs:** Les opérateurs de satellites doivent être tenus responsables des débris qu'ils produisent.

L'amélioration des technologies de fabrication des satellites est un élément clé pour réduire la quantité de débris spatiaux. En combinant des matériaux plus durables, des systèmes de propulsion plus efficaces et des systèmes de fin de vie améliorés, nous pouvons rendre l'espace plus sûr et plus durable.

Annexe 1 : Bibliographie

- **Cité de l'espace:** <https://www.cite-espace.com/actualites-spatiales/pollution-lumineuse-bluewalker3-le-satellite-qui-brille-plus-que-saturne/>
- **Daily Science:** <https://dailyscience.be/12/03/2020/les-constellations-de-satellites-nouvelle-source-de-pollution-lumineuse-pour-les-astronomes/>
- **ESA Euronews: Débris spatiaux, comment nettoyer l'espace:** https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/ESA_Euronews_Debris_spatiaux_comment_nettoyer_l'espace
- https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/ESA_s_e.Deorbit_debris_removal_mission_reborn_as_servicing_vehicle

- **Wikipédia :** https://fr.wikipedia.org/wiki/Syndrome_de_Kessler

- **cité de l'espace :** https://www.cite-espace.com/centre_ressources/le-syndrome-de-kessler/

Annexe 2 Le syndrome de Kessler : une menace grandissante pour l'espace

Le **syndrome de Kessler** est un scénario catastrophe envisagé par l'astrophysicien Donald J. Kessler en 1978. Il décrit une situation où la densité de débris spatiaux en orbite terrestre basse atteint un point critique, au-delà duquel les collisions entre ces objets deviennent si fréquentes qu'elles engendrent une réaction en chaîne incontrôlable.

Comment fonctionne ce phénomène ?

- **Les collisions créent de nouveaux débris** : Chaque collision entre deux objets en orbite génère une multitude de nouveaux fragments, augmentant ainsi considérablement la densité de débris.
- **Une cascade de collisions** : Ces nouveaux débris peuvent à leur tour entrer en collision avec d'autres objets, créant encore plus de débris et ainsi de suite, dans une spirale de destruction.
- **Des orbites rendues impraticables** : À terme, cette accumulation de débris rend certaines orbites terrestres basses tellement dangereuses qu'elles deviennent inutilisables pendant des décennies, voire des siècles.

Les conséquences du syndrome de Kessler

- **Limitation des activités spatiales** : La multiplication des débris rend les lancements de satellites et les missions spatiales beaucoup plus risqués, voire impossibles.
- **Menace pour les satellites en service** : Les satellites en fonctionnement sont constamment menacés par des collisions avec des débris, ce qui peut entraîner des pannes ou leur destruction.
- **Impact sur les communications et l'observation de la Terre** : De nombreux services essentiels, tels que les communications, la navigation par satellite et l'observation de la Terre, dépendent de satellites en orbite basse. Leur perte aurait des conséquences importantes sur notre société.

Les causes de l'augmentation des débris spatiaux

- **Les lancements de satellites** : Chaque lancement ajoute de nouveaux objets en orbite, qu'il s'agisse de satellites, de lanceurs ou de fragments de ceux-ci.
- **Les explosions en orbite** : Les explosions de satellites ou de lanceurs, qu'elles soient accidentelles ou intentionnelles, génèrent d'énormes quantités de débris.
- **Les collisions naturelles** : Bien que moins fréquentes, les collisions avec des météorites peuvent également contribuer à augmenter la densité de débris.

Quelles solutions pour éviter le syndrome de Kessler ?

- **La surveillance de l'espace** : Il est essentiel de développer des systèmes de surveillance capables de détecter et de suivre les débris spatiaux en temps réel.
- **L'élimination active des débris** : Des techniques sont à l'étude pour capturer et éliminer les débris les plus dangereux.
- **La conception de satellites plus résistants** : Les futurs satellites doivent être conçus pour résister aux impacts de débris et pour être éliminés en fin de vie de manière sûre.

- **Une réglementation internationale stricte :** Il est nécessaire de mettre en place des règles internationales pour limiter la production de nouveaux débris et encourager leur élimination.

Le syndrome de Kessler représente un défi majeur pour l'exploration spatiale. Il est urgent de prendre des mesures pour limiter l'accumulation de débris et préserver l'accès à l'espace pour les générations futures.

Conséquences du syndrome de Kessler sur les télécommunications

Le syndrome de Kessler, avec sa menace de créer une cascade de collisions de débris spatiaux, présente des risques considérables pour le secteur des télécommunications, qui repose en grande partie sur les satellites en orbite terrestre basse.

Perturbations et interruptions des services

- **Perte de satellites:** Les collisions avec des débris peuvent endommager ou détruire des satellites, entraînant une perte de capacité et des interruptions de service.
- **Dégradation des signaux:** Même sans collision directe, les débris peuvent perturber les signaux émis ou reçus par les satellites, affectant ainsi la qualité des communications.
- **Augmentation de la latence:** Les opérateurs peuvent être contraints de rediriger les signaux par des satellites plus éloignés ou par des routes terrestres, ce qui entraîne une augmentation de la latence et une diminution de la qualité de service.

Impact sur les infrastructures terrestres

- **Investissements supplémentaires:** Pour pallier les défaillances des satellites, les opérateurs peuvent être amenés à investir dans des infrastructures terrestres supplémentaires (câbles sous-marins, relais terrestres), ce qui représente des coûts importants.
- **Complexité accrue des réseaux:** La redondance des systèmes devient essentielle pour assurer la continuité des services, ce qui complexifie la gestion des réseaux.

Secteurs particulièrement impactés

- **Téléphonie mobile:** Les réseaux de téléphonie mobile s'appuient de plus en plus sur les satellites pour assurer une couverture étendue, notamment dans les zones rurales et reculées. La perte de satellites peut entraîner des zones blanches et une dégradation de la qualité de service.
- **Internet:** L'Internet par satellite est utilisé dans de nombreuses régions du monde, notamment pour connecter des zones mal desservies par les infrastructures terrestres. Le syndrome de Kessler menace directement la disponibilité de ce service.
- **Télévision par satellite:** La télévision par satellite est un autre secteur fortement dépendant des satellites en orbite basse. Les interruptions de service peuvent entraîner des pertes de revenus pour les opérateurs et une insatisfaction des abonnés.
- **Navigation par satellite:** Les systèmes de navigation par satellite (GPS, Galileo, etc.) sont utilisés dans de nombreux domaines, tels que la logistique, l'agriculture et

l'aviation. La perte de satellites peut entraîner des erreurs de positionnement et compromettre la sécurité des opérations.

Le syndrome de Kessler représente une menace sérieuse pour les télécommunications. Les conséquences potentielles sont multiples et vont de simples perturbations de service à des interruptions complètes, avec un impact économique et social important. Il est donc essentiel de prendre des mesures pour limiter la production de débris spatiaux et développer des technologies permettant de nettoyer l'espace

Annexe 3 : Les technologies émergentes pour la surveillance de l'espace

La surveillance de l'espace est un domaine en constante évolution, motivé par la prolifération des objets en orbite, les enjeux de sécurité spatiale et la nécessité de protéger les actifs spatiaux. Les technologies émergentes jouent un rôle de plus en plus important dans cette surveillance.

Pourquoi la surveillance de l'espace est-elle importante ?

- **Sécurité spatiale:** Éviter les collisions entre satellites, protéger les missions spatiales habitées.
- **Gestion du trafic spatial:** Organiser et réguler la circulation des objets en orbite.
- **Détection des menaces:** Identifier les objets non identifiés, les débris spatiaux et les menaces potentielles.
- **Observation de la Terre:** Collecter des données pour la météorologie, la gestion des catastrophes naturelles, etc.

Les technologies clés pour la surveillance spatiale

- **Radars:**
 - **Radars à haute fréquence:** Permettent de détecter de petits objets à grande distance.
 - **Radars à ouverture synthétique (SAR):** Fournissent des images haute résolution des objets en orbite.
- **Télescopes spatiaux:**
 - **Télescopes infrarouges:** Détectent la chaleur émise par les objets spatiaux.
 - **Télescopes optiques:** Observent les objets dans le spectre visible.
- **Réseaux de capteurs:**
 - **Réseaux de stations au sol:** Couvrent de vastes zones pour détecter les objets en orbite.
- **Intelligence artificielle (IA):**
 - **Traitement d'images:** Analyse des données provenant des radars et des télescopes pour identifier et classer les objets.
 - **Prédiction des trajectoires:** Prévoit les futurs mouvements des objets en orbite.

Les applications de la surveillance spatiale

- **Catalogue des objets spatiaux:** Création et mise à jour d'une base de données complète sur les objets en orbite.
- **Alerte de collision:** Prévenir les opérateurs de satellites des risques de collision.
- **Surveillance des débris spatiaux:** Suivre l'évolution des débris et évaluer les risques qu'ils représentent.
- **Validation des traités internationaux:** Vérifier le respect des traités sur l'espace extra-atmosphérique.

Les défis à relever

- **La quantité croissante d'objets en orbite:** Le nombre d'objets en orbite augmente rapidement, rendant la surveillance de plus en plus complexe.
- **La diversité des objets:** Les objets en orbite ont des tailles, des formes et des matériaux très variés, ce qui complique leur détection et leur identification.
- **Les fausses alertes:** Il est essentiel de développer des algorithmes capables de distinguer les vrais objets des faux échos.
- **La coopération internationale:** La surveillance de l'espace nécessite une coopération étroite entre les différents pays.

L'avenir de la surveillance spatiale

Les technologies futures devraient permettre d'améliorer encore la précision, la rapidité et l'automatisation de la surveillance spatiale. Parmi les pistes explorées, on peut citer :

- **Les constellations de petits satellites:** Pour une couverture plus étendue et plus fréquente.
- **Les lasers spatiaux:** Pour une mesure plus précise de la distance et de la vitesse des objets.
- **Les technologies quantiques:** Pour des communications plus sécurisées et des capteurs plus sensibles.

En conclusion, la surveillance de l'espace est un domaine stratégique qui nécessite des investissements continus en recherche et développement. Les technologies émergentes offrent de nouvelles perspectives pour garantir la sécurité et la durabilité de l'exploitation de l'espace.