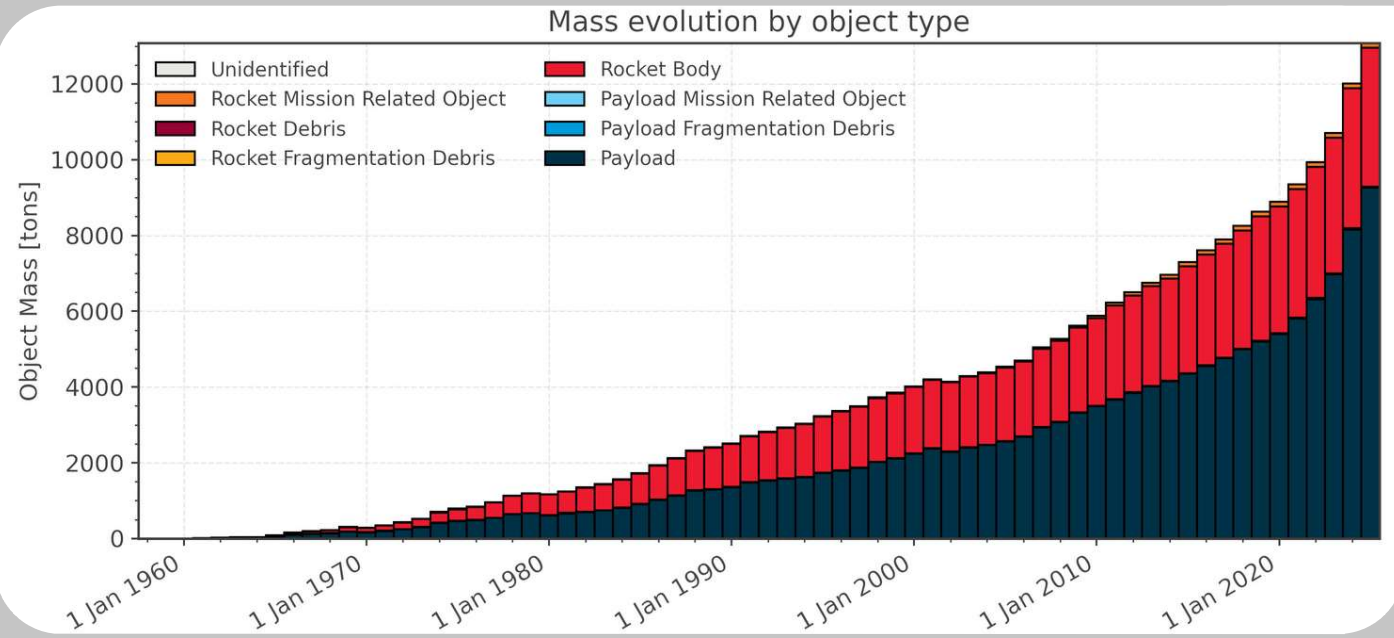
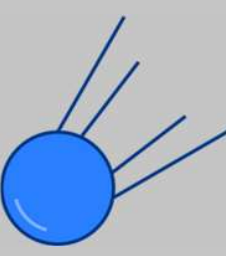


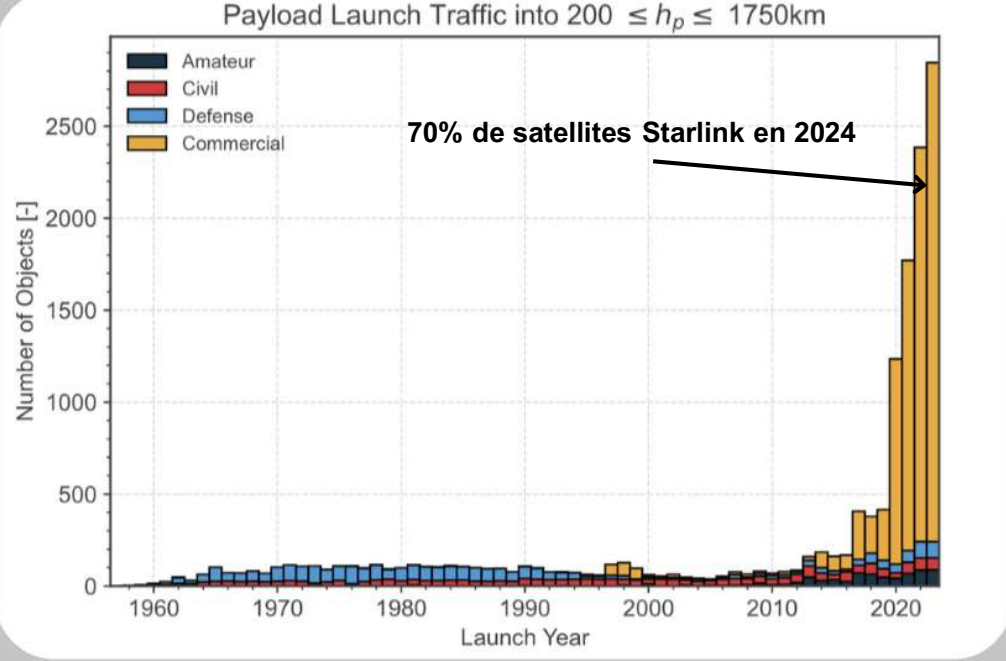
Les lancements de satellites ne font qu'augmenter



Depuis le début de la **conquête spatiale**, l'humanité n'a cessé de lancer de plus en plus de masse en orbite chaque année. Par ailleurs, l'augmentation de l'**efficacité** des lanceurs a engendré une **stagnation** du poids des lanceurs alors que la **charge utile** augmente.

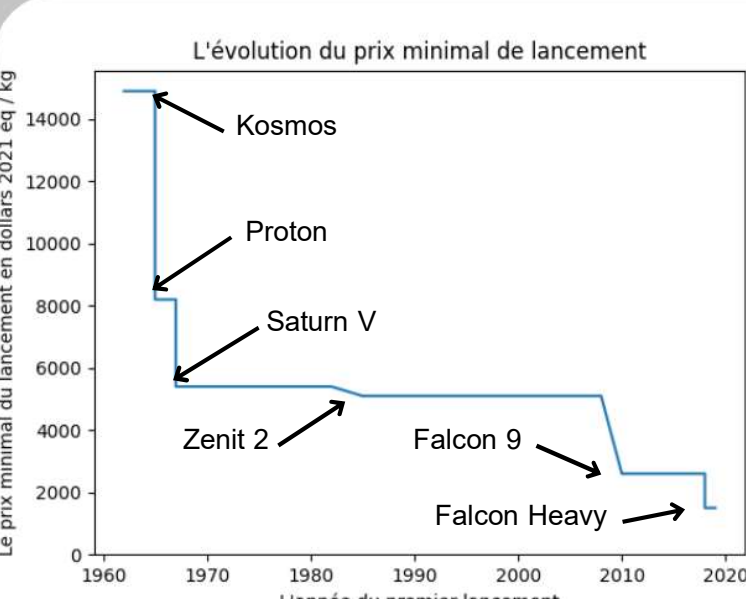


Évolution de la masse lancée chaque année depuis 1960



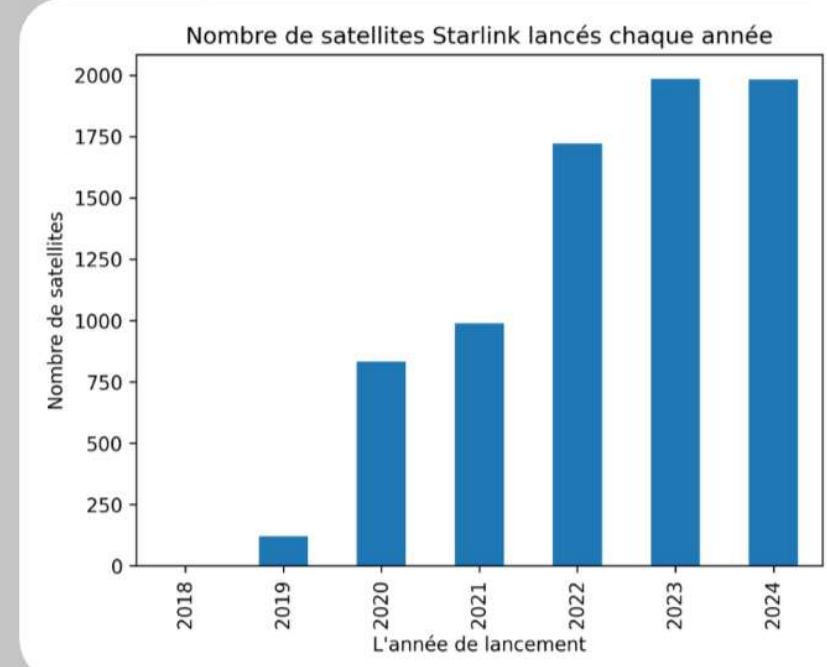
Nombre d'objets lancés par an

Le **coût minimal** de lancement n'a lui fait que **baissier** grâce à l'amélioration des technologies et à des **économies d'échelle** [2]. Le lanceur de **SpaceX** a été le moteur principal de progrès ces dernières années, pour permettre à Starlink de profiter de **coûts de lancement** plus faibles et donc des **coûts d'exploitation** plus bas.

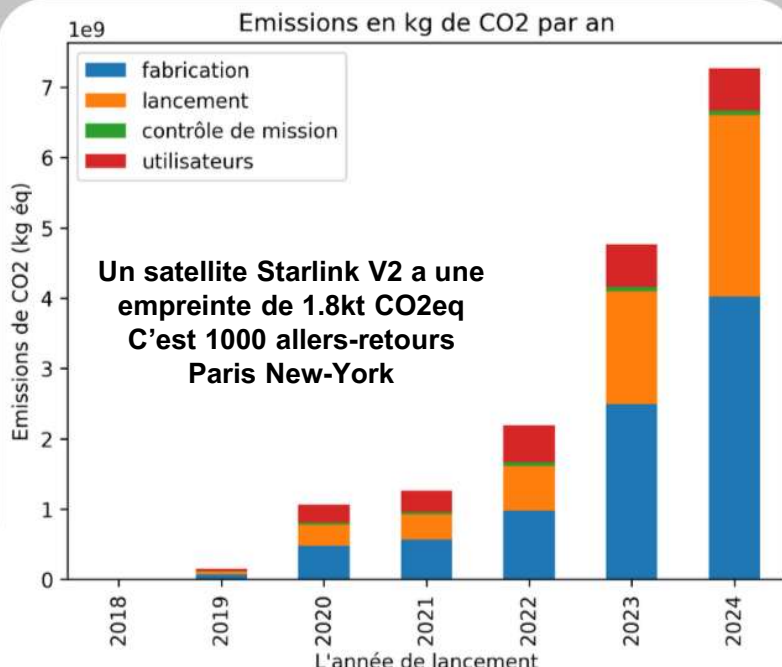


Coût massique de lancement au cours du temps

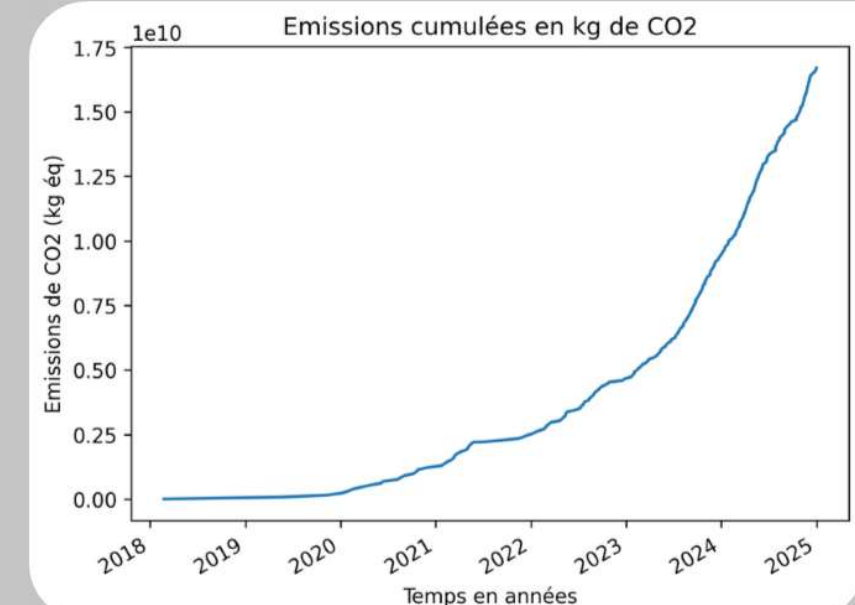
Étude de cas concret : les satellites Starlink



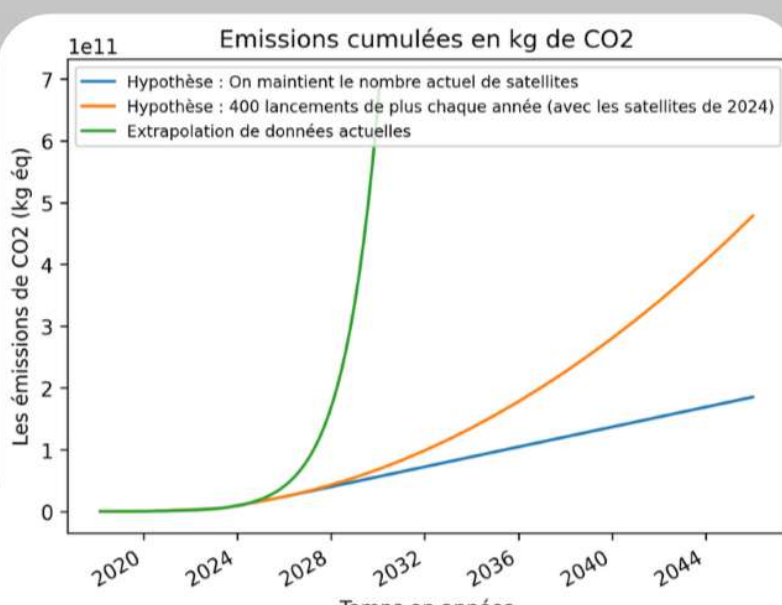
Le nombre de **satellites** lancés **augmente** chaque année, avec approximativement **400 lancements de plus** par rapport à l'année précédente. Le projet actuel prévoit de déployer **42000 satellites** au total.



En utilisant un **modèle** développé par "The Shift Project" [4] on peut estimer les émissions du projet **Starlink**. Ces dernières augmentent de manière **exponentielle**, car les nouveaux satellites sont plus **lourds** et les fusées nécessitent plus de **carburant**.



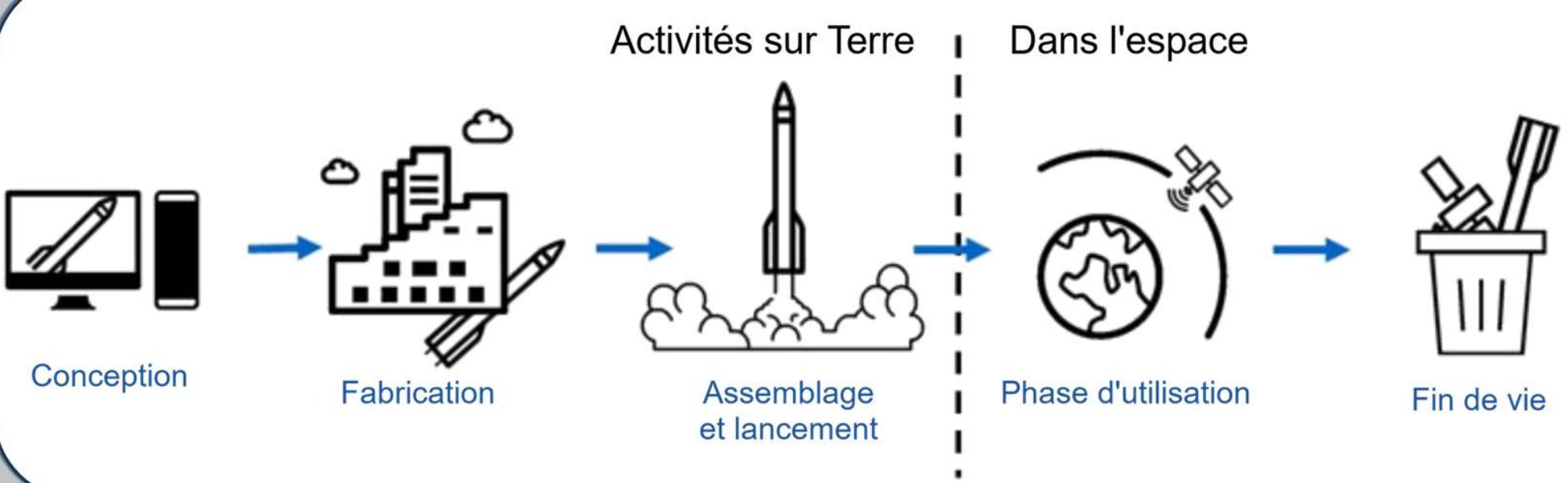
Les **émissions cumulées** à ce jour sont de l'ordre de 18 MtCO2 équivalentes.



Les différents **scénarios** de futures émissions possibles. Si on **maintient** le nombre actuel de satellites, les émissions cumulées s'élèveront à **200 MtCO2** d'ici 2050. Cela représente **7MtCO2/ans**.

Cependant, les émissions de CO2 de Starlink, qui représente 2/3 des satellites en orbite aujourd'hui, ne correspondent qu'à un **millionième** des émissions de CO2 du transport aérien.

Cycle de vie d'une mission spatiale



Crédit : T. Maury

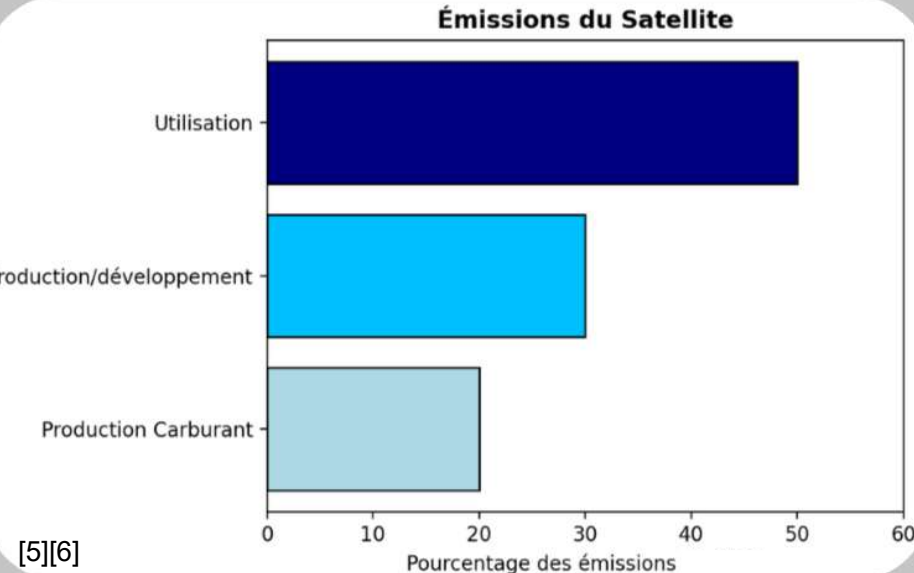
Bilan carbone d'un satellite

Répartition des émissions lors d'une mission

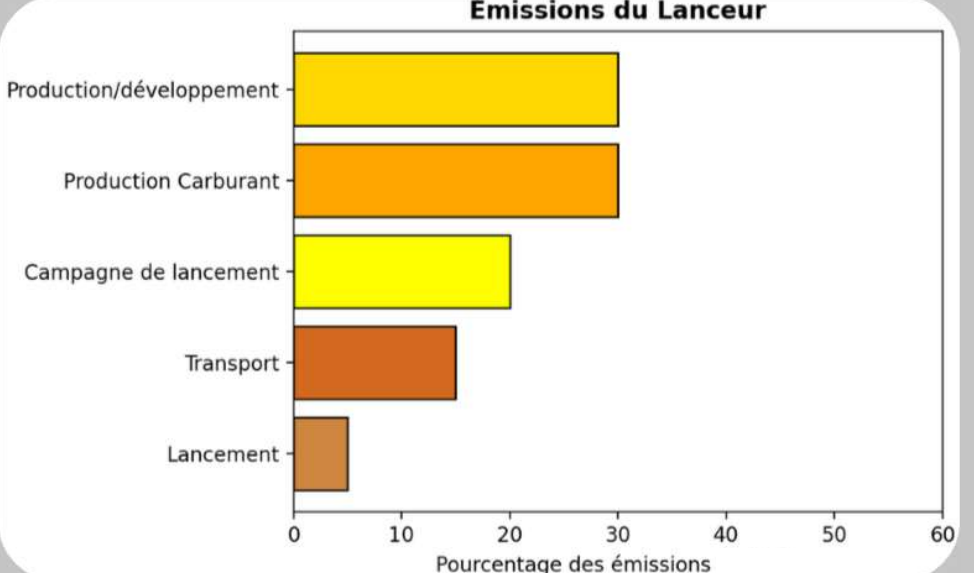


La **production de carburant** est l'une des **principales sources d'émissions** : elle est extrêmement **énergivore** en raison de la pureté très élevée (>99%)[5] recherchée pour les carburants. De plus les procédés en eux mêmes sont émetteurs de CO2 (vapoformage).

La **production du satellite et du lanceur** est l'autre plus grande source d'émissions et est de loin la première source d'**épuiement des ressources minérales**[6].

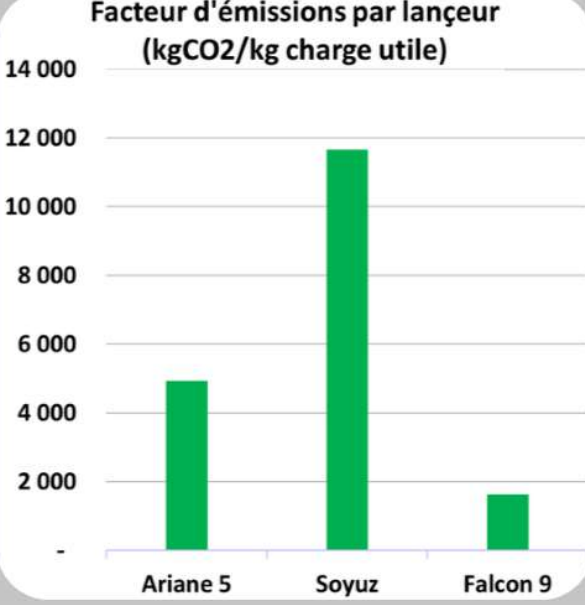


Les **émissions** liées à la phase d'**utilisation du satellite** sont principalement dues aux **infrastructures** sur Terre nécessaire à leur fonctionnement (centres de contrôle, antennes) et à leur **consommation électrique**[7].



Le **lancement**, c'est-à-dire la combustion des carburants constitue **moins de 5%** de l'empreinte carbone totale. Par contre, il est un véritable enjeu en termes de **destruction de la couche d'ozone**, l'industrie pourrait être responsable de 6% de l'empreinte anthropique sur celle-ci.[6]

Tous les lanceurs ne se valent pas



Au lieu d'encourager la sobriété, les gains d'efficacité des lanceurs alimentent la **croissance** du secteur en renforçant la **rentabilité** économique des lancements : c'est le **paradoxe de Jevons**.

Ce qui monte finit par retomber

Comme cela a été révélé dans un article récent du journal *Le Monde* [8], la **désintégration** massive des satellites en fin de vie pose d'importantes questions quant à la **pollution** de la haute **atmosphère**. Très peu de recherches existent à ce jour, mais l'injection de milliers de tonnes de **métaux** dans l'atmosphère chaque année pourrait avoir un impact significatif. Les **mécanismes chimiques** restent mal connus et plusieurs études sont en cours pour évaluer ce risque.



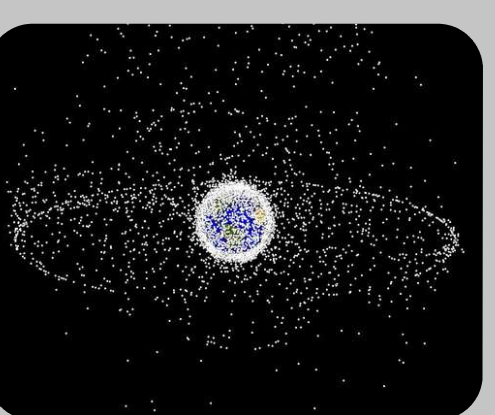
[8]

Des pistes d'améliorations



La **production de carburant** peut être **décarbonée** en remplaçant le kérosène par des alternatives et en s'appuyant sur un mix électrique à faible empreinte carbone. Il existe des **méthodes de production électrique de dihydrogène** et de **méthane**, telles que l'électrolyse et la réaction de Sabatier. Décarboner le mix électrique pourrait ainsi **réduire jusqu'à 50 %** l'empreinte carbone du secteur.

Des orbites encombrées ?



Certains satellites, lorsqu'ils arrivent en fin de vie, restent en orbite. Outre les questions de **pollution lumineuse** que cela pose, la pollution spatiale pourrait atteindre un tel niveau qu'une **réaction en chaîne** se déclencherait, empêchant tout nouveau lancement à cause d'un nuage de débris denses. On appelle cela le **syndrome de Kessler**. Cependant, il est très peu probable que cela arrive, les satellites réalisent des manœuvres d'évitement au moindre risque de collision et la majorité des satellites sont désorbités en fin de vie.

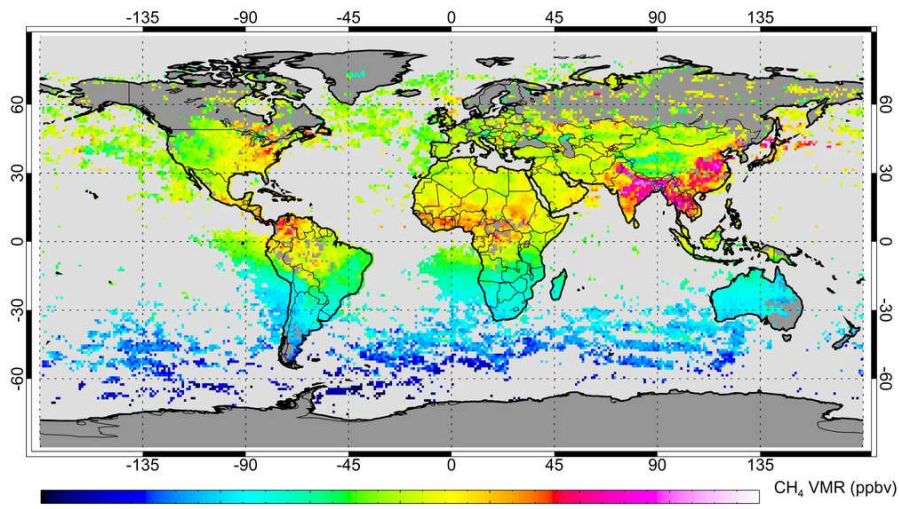
Les bénéfices de l'industrie spatiale: mesures météorologiques et climatologiques



Plus de la moitié des **50** variables essentielles sur le changement climatique sont mesurées par satellite

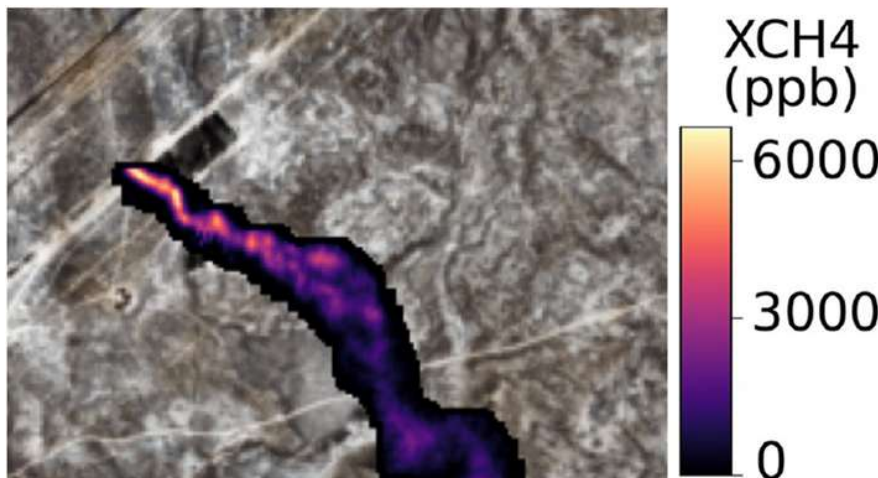
Les satellites offrent la possibilité unique de mesurer des données très précises sur le climat. Grâce à un petit nombre de satellites, on peut suivre l'évolution de nombreux paramètres clés du changement climatique sur toute la planète et à des intervalles de temps réduits. C'est le rôle du programme Copernicus de l'Union Européenne, dans le cadre duquel a par exemple été lancé le satellite Sentinel-2, qui peut détecter des points individuels d'émission de méthane dans l'atmosphère.

Exemple: Mesure de concentration en méthane atmosphérique

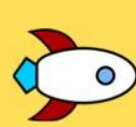


Mesures globales de la concentration en méthane

Détection d'événements de pollution au méthane par des exploitations pétrolières



L'ESSENTIEL



Une **nouvelle course spatiale** menée par le secteur privé semble n'en être qu'à son début, et on doit s'attendre à une augmentation significative du nombre de satellites mis sur orbite, et donc de l'impact de l'industrie spatiale sur l'atmosphère terrestre et le reste de l'environnement.

Cependant, les satellites offrent une opportunité de mieux comprendre les mécanismes du **climat** et de la **météo**, ainsi que de surveiller en temps réel les perturbations de l'atmosphère. Les satellites sont en cela un véritable atout dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Enfin, des innovations permettent d'envisager des missions spatiales avec une **moindre empreinte écologique**, notamment en réduisant l'impact carbone de l'utilisation du satellite.

Il faut néanmoins garder en tête que ces gains d'efficacité ne doivent pas accélérer l'augmentation du nombre de lancements, qui aurait pour conséquence d'**annuler** les bénéfices écologiques.

[1] Ehret, Thibaud, Aurélien De Truchis, Matthieu Mazzolini, Jean-Michel Morel, Alexandre d'Aspremont, Thomas Lauvaux, Riley Duren, Daniel Cusworth, et Gabriele Facciolo. « Global Tracking and Quantification of Oil and Gas Methane Emissions from Recurrent Sentinel-2 Imagery ». Environmental Science & Technology 56, no 14 (19 juillet 2022): 10517-29. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08575>.
[2] Jones, Harry W. « The Recent Large Reduction in Space Launch Cost ». Stafford Springs, CT, United States, 2018. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20200001093>.
[3] ESA Space Debris Office. « ESA Space Environment Report 2024 », 19 juillet 2024. https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2024.
[4] The Shift Project. « Lean Networks for Resilient Connected Uses », mars 2024. <https://theshiftproject.org/en/article/virtual-worlds-and-networks-new-reports-release/>.
[5] Thibaut Maurya, b, Philippe Loubeta, "Application of environmental life cycle assessment (LCA) within the space sector: A state of the art"
[6]Augustin Chanoine, Deloitte Sustainability "Environmental impacts of launchers and space missions"
[7]The-Shift-Project-2024-Materials-Carbon-footprint-Satellite-network
[8]Les activités spatiales menacent-elles la haute atmosphère ? Le Monde