

# Soutenabilité environnementale et structurelle des activités spatiales dans l'Anthropocène

Lois Miraux<sup>1</sup>

(1) Indépendant

[lois.miraux@gmail.com](mailto:lois.miraux@gmail.com)

## Résumé

---

Le rôle et la soutenabilité du secteur spatial dans le contexte de la transition de l'Anthropocène sont examinés. Les données d'observation satellite font des apports cruciaux pour l'information, la mitigation et l'adaptation aux dégradations environnementales, mais reposent sur une industrie qui pourrait être particulièrement vulnérable dans les trajectoires de transitions brutales vers lesquelles nos sociétés sont engagées. En parallèle, la récente accélération de la commercialisation de l'espace fait naître de nouveaux projets qui alimentent un imaginaire dans lequel l'humanité s'affranchit durablement des limites planétaires. Une première estimation de leurs impacts environnementaux montre pourtant clairement leur incompatibilité totale avec ces contraintes. Ceci suggère qu'il est nécessaire de diffuser de nouveaux narratifs sur le futur de l'humanité.

## Mots-clés

---

Spatial, Impact environnemental, Information environnementale, Soutenabilité, Technologie, Narratif

## 1. Contexte

Les satellites d'observation de la Terre utilisent de nombreuses méthodes de télédétection pour observer les états et les processus de l'atmosphère, des terres et des océans à plusieurs échelles spatio-temporelles. Par exemple, les données satellitaires sont fréquemment utilisées dans les modèles climatiques pour simuler l'évolution du climat et de ses effets. Ainsi, le Global Climate Observing System (GCOS) rapporte que 26 des 50 Variables Climatiques Essentielles dépendent de manière significative des observations satellites (Yang et al., 2013). Ces données et les modèles qu'ils permettent d'alimenter sont à la source du développement de politiques de mitigation et d'adaptation. Les observations satellites supportent d'ailleurs également directement ces politiques, notamment en fournissant des informations géospatiales et des systèmes d'alertes précoces (*Earth Observation for Sustainable Development*, 2021; *Space Climate Observatory*, 2022).

Si les programmes d'observation de la Terre constituent une partie majeure des budgets des agences spatiales (1er poste du budget de l'Agence Spatiale Européenne), le secteur privé, qui constitue ~80% de l'économie du secteur, fournit également de nombreux services comme les télécommunications et le géo-positionnement. Ce secteur privé est en croissance très forte, et est à la source de nombreux projets posant question dans le contexte des dégradations environnementales actuelles.

Certains de ces nouveaux services privés se positionnent comme des solutions aux dégradations environnementales et sociales dans un paradigme de croissance verte. C'est le cas des mégaconstellations de satellites, qui souhaitent offrir un accès omniprésent aux services internet haut débit (5G, 6G, IoT,...), utilisant souvent la réduction de la fracture numérique et la numérisation de la société (villes intelligentes, objets connectés, agriculture connectée,...) comme raison d'être, mais alimentent par effet rebond la croissance du secteur du numérique dont les besoins énergétiques et matériels deviennent problématiques. Plusieurs entreprises proposent désormais des vols de tourisme dans l'espace, en se justifiant de faire prendre conscience à leurs clients de la fragilité de leur planète et leur faisant vivre « l'overview effect ». L'entreprise SpaceX souhaite proposer des vols commerciaux en fusée pour aller d'un point à l'autre de la Terre en moins d'une

## Soutenabilité environnementale et structurelle des activités spatiales dans l'Anthropocène

heure, suggérant que ce transport serait plus propre que l'avion grâce à l'utilisation de carburants produits avec des procédés bas carbone et parce qu'une partie du voyage se ferait en dehors de l'atmosphère.

Mais ce qui est unique au secteur spatial, ce sont d'autres projets qui vont au-delà de la question du couplage entre croissance économique et dégradations environnementales, en ne cherchant non pas à optimiser les niveaux de consommation et de pollution pour qu'ils soient compatibles avec les limites planétaires, mais justement en s'affranchissant de ces limites. Par exemple, plusieurs états et groupes d'états (Chine, Corée du Sud, USA, UK, UE) ont amorcé des projets de stations solaires orbitales avec pour objectif annoncé d'aider à atteindre leur neutralité carbone. Certaines entreprises souhaitent miner des astéroïdes pour utiliser les ressources métalliques sur Terre, et SpaceX a annoncé vouloir créer une colonie indépendante sur Mars en y envoyant 1 million de personnes d'ici 2050.

## 2. Formulation du problème

Le système d'information sur les paramètres environnementaux du système Terre est crucial pour la réponse de nos sociétés face aux multiples dérèglements environnementaux. Il est donc important de s'assurer qu'il soit lui-même compatible avec les limites planétaires et résilient face aux transitions brutales vers lesquelles nos sociétés sont engagées. Or, à ce jour, il dépend très largement de l'industrie des satellites et de l'accès à l'espace. En outre, le secteur spatial est en croissance forte et de nouveaux projets émergent, visant à déployer des activités de lancements et des infrastructures spatiales à grandes échelles en les justifiant notamment par un supposé apport bénéfique du point de vue social et environnemental. Ils s'inscrivent dans une idéologie de développement technologique inexorable et alimentent un imaginaire dans lequel l'humain s'affranchit des limites planétaires en exploitant les ressources extraterrestres.

Dans ce contexte, cette étude vise à apporter un éclairage sur les impacts environnementaux des activités spatiales, avec un double objectif :

- Mettre en lumière certains risques auxquels notre système d'information environnemental pourrait être confronté.
- Obtenir des premiers impacts chiffrés sur les principaux projets spatiaux futurs pour évaluer leur (non-)pertinence et proposer des contre-narratifs.

## 3. Méthode

En premier lieu, un état de l'art sur les impacts environnementaux des activités spatiales a été mené (Miroux, 2021). Ensuite, les impacts environnementaux des activités spatiales proposées par les acteurs du secteur sur la période 2022 à 2050 ont été estimés en se basant sur leurs déclarations, feuilles de routes et en modélisant leurs satellites et lanceurs à partir de données réelles (Miroux et al., 2022). Les types d'activités considérés sont les méga constellations de satellites, le tourisme spatial, les missions lunaires, les stations solaires orbitales, le transport Terre-Terre et la colonisation de Mars. Les activités de référence, c'est-à-dire les activités spatiales de 2021 à l'exclusion de celles qui viennent d'être énumérées, ont également été analysées à des fins de comparaison. Elles contiennent notamment les activités d'observation de la Terre. Les plans proposés sont donc considérés comme tels, sans tenir compte de leur faisabilité technique ou économique. En effet, l'objectif n'est pas de prédire les impacts futurs, mais d'évaluer les ordres de grandeur des impacts environnementaux qui seraient causés si les plans annoncés étaient mis en œuvre, dans une démarche d'expérience de pensée.

La principale source de données d'impacts environnementaux de cette étude est la Strathclyde Space Systems Database (SSSD), une base de données dédiée à l'analyse de cycle de vie des systèmes spatiaux. Les phases de vie considérées sont la production des composants et des ergols des satellites et des lanceurs, et la combustion des ergols lors du lancement. Les effets de cette dernière phase sont particulièrement complexes et uniques car les fusées sont les seuls objets humains à émettre dans toutes les couches de l'atmosphère. Le niveau de maturité scientifique sur ce sujet est bas. Ainsi, dans cette étude, l'impact sur l'ozone se base sur un coefficient approximant les effets en haute altitude, alors que l'impact sur le climat se base sur des coefficients basés au sol. L'effet des particules n'est pas pris en compte mais la masse émise est calculée pour servir d'indication, car ce sont les contributrices principales au forçage radiatif des lancements (Ross & Sheaffer, 2014).

Les résultats d'impacts sont ensuite comparés aux impacts annuels globaux (IAG) et aux limites planétaires (LPs) en utilisant des facteurs de normalisation fournis par le Joint Research Center (Sala et al., 2017). Notez que ces IAG sont basés sur les données les plus récentes, qui concernent l'année 2010.

## 4. Résultats

Les impacts environnementaux des activités spatiales de référence sont faibles (<0.1% des IAGs) sauf pour l'ozone qui atteint 0.4% de l'IAG avec seulement 86 lancements/an. Cependant, en tenant compte des émissions de particules de suies et d'alumine, avec une flotte de lancement similaire, Ross et al. ont trouvé un forçage radiatif sur la stratosphère comparable au quart de celui de l'aviation sur la troposphère (Ross & Sheaffer, 2014). Ceci est principalement dû au phénomène d'accumulation de ces particules qui augmente leur temps de résidence (quelques années dans la stratosphère contre quelques jours dans la troposphère). Ainsi, Ryan et al. estiment que les suies émises dans la stratosphère réchauffent l'atmosphère 500x plus efficacement que les autres sources de suies (troposphériques) (Ryan et al., 2022), elles-mêmes 400 à 1000x plus efficaces que le CO<sub>2</sub> (The International Council on Clean Transportation, 2009).

En plus de la question des impacts, l'analyse des cycles de vies des activités spatiales de référence a permis d'établir des premières indications sur la résilience du système d'information climatique et environnemental. Elle a montré que l'industrie des satellites et des lanceurs repose sur des connaissances hyperspécialisées, des matériaux et procédés haut de gamme et de haute technologie, des chaînes d'approvisionnement internationales et des matériaux critiques. Cette industrie est également caractérisée par des cycles de vie très longs de la conception aux phases d'exploitation, où un choix de conception - figé une fois le système qualifié - a des conséquences sur des décennies. Elle est également très sensible aux aléas géopolitiques. Cet ensemble de facteurs la rend donc particulièrement vulnérable à la rétroaction des dommages environnementaux sur les sociétés humaines.

Dans un scénario où les plans de constellations, de tourisme spatial, de missions lunaires et de deux stations solaires orbitales (Chine et UK) seraient mis en œuvre, les impacts du spatial sur le climat (GES uniquement, hors particules) et sur l'ozone seraient multipliés par ~9. Avec l'effet des particules, d'ici 10 ans le forçage radiatif du spatial deviendrait comparable à celui de l'aviation. Pour l'ozone, les résultats de Ryan et al. suggèrent qu'avec ce niveau de lancements le rétablissement acquis avec le protocole de Montréal pourrait être compromis au niveau de l'arctique (Ryan et al., 2022). Ainsi, la prise en compte de ces effets pourrait compromettre tout l'intérêt environnemental (s'il existait) des projets de stations solaires orbitales, et plus généralement de l'exploitation de ressources extraterrestres. Concernant le tourisme spatial, les empreintes par passager font de cette activité la pire en termes d'inégalités environnementales, même sans l'effet des particules (Miraux et al., 2022). En orbite, les mégaconstellations conduiraient à une augmentation drastique du nombre de satellites, de 7840 en 2021 à 112000 en 2050, ce qui exacerberait le problème des débris spatiaux, certaines orbites ayant déjà atteint un point de non retour (European Space Agency, 2021), mais perturberait aussi fortement les observations astronomiques (Hainaut & Williams, 2020).

Ensuite, les plans spéculatifs de transport terrestre en fusée et de colonisation de Mars conduiraient à des conséquences sur l'environnement prohibitives. Les émissions de GES deviendraient proches de celles de l'aviation dans chacun des cas (avec une connexion journalière entre seulement quelques villes pour le transport terrestre), alors que la masse de particules émise serait multipliée par 100 à 1000 par rapport aux activités spatiales de référence. L'impact sur l'ozone serait plusieurs fois supérieur à la LP. La mitigation par l'utilisation de carburants bas-carbone (biométhane ou hydrogène) serait limitée par leur disponibilité, et ne résoudrait pas les impacts en haute atmosphère. Il en découle un résultat ayant des implications majeures : au-delà des aspects technico-économiques, la contrainte environnementale est un obstacle considérable au développement d'une civilisation multiplanétaire. Cette étude contribue donc à justifier la construction d'un narratif différent du futur de l'humanité, en montrant que les ambitions humaines de développement dans l'espace diffusées par des décennies de science-fiction et de programmes d'exploration spatiale pourraient bien ne pas être compatibles avec la réalité biophysique des limites planétaires.

## 5. Conclusion

Les activités d'observation de la Terre par satellite ont un impact négatif faible sur l'environnement mais constituent une composante critique du système d'information climatique et environnemental, et apportent une aide précieuse aux politiques de mitigation et d'adaptation. Cependant, le secteur spatial semble

## Soutenabilité environnementale et structurelle des activités spatiales dans l'Anthropocène

particulièrement vulnérable dans les trajectoires de l'Anthropocène, rendant donc ce système peu résilient. Si c'est le cas, il faudrait idéalement penser l'utilisation de ce système pour qu'il aide à la transformation sans créer de dépendance sur le long terme, et trouver des solutions alternatives.

Enfin, le secteur spatial est très intensif en termes d'impacts environnementaux notamment à cause des émissions en haute altitude qui ont des effets décuplés. Tout projet nécessitant un nombre important de lancements aura donc un impact significatif, ce qui tend à faire de toute solution de mitigation des problèmes environnementaux basée sur les technologies spatiales.

## Références

- Earth observation for sustainable development*. (2021). <https://eo4sd.esa.int/>
- European Space Agency. (2021). *ESA's Annual Space Environment Report 2021*.  
[https://www.sdo.esoc.esa.int/environment\\_report/Space\\_Environment\\_Report\\_latest.pdf](https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf)
- Hainaut, O. R., & Williams, A. P. (2020). Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains. *Astronomy & Astrophysics*, 636, A121.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037501>
- Miriaux, L. (2021). Environmental limits to the space sector's growth. *Science of The Total Environment*, 150862.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150862>
- Miriaux, L., Wilson, A. R., & Dominguez Calabuig, G. J. (2022). Environmental sustainability of future proposed space activities. *Acta Astronautica*, 200, 329–346. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.034>
- Ross, M. N., & Sheaffer, P. M. (2014). Radiative forcing caused by rocket engine emissions. *Earth's Future*, 2(4), 177–196. <https://doi.org/10.1002/2013EF000160>
- Ryan, R. G., Marais, E. A., Balhatchet, C. J., & Eastham, S. D. (2022). Impact of Rocket Launch and Space Debris Air Pollutant Emissions on Stratospheric Ozone and Global Climate. *Earth's Future*, 10(6), e2021EF002612.  
<https://doi.org/10.1029/2021EF002612>
- Sala, S., Benini, L., Crenna, E., & Secchi, M. (2017, January 11). *Global environmental impacts and planetary boundaries in LCA*. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2788/64552>
- Space Climate Observatory*. (2022). <https://www.spaceclimateobservatory.org/>
- The International Council on Clean Transportation. (2009). *A policy-relevant summary of black carbon climate science and appropriate emission control strategies*.  
[https://theicct.org/sites/default/files/publications/BCsummary\\_dec09.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/BCsummary_dec09.pdf)
- Yang, J., Gong, P., Fu, R., Zhang, M., Chen, J., Liang, S., Xu, B., Shi, J., & Dickinson, R. (2013). The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change*, 3(10), Article 10.  
<https://doi.org/10.1038/nclimate1908>