



HAL
open science

Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique

Isabella Damiani, Philippe Keckhut

► **To cite this version:**

Isabella Damiani, Philippe Keckhut. Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique. L'Espace Politique, 2024. hal-04719280

HAL Id: hal-04719280

<https://hal.science/hal-04719280v1>

Submitted on 3 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique + Varia

Isabella Damiani et Philippe Keckhut (dir.)



Édition électronique

- URL : <https://journals.openedition.org/espacepolitique/12327>
- ISSN : 1958-5500

Éditeur

Université de Reims Champagne-Ardenne

Référence électronique

Isabella Damiani et Philippe Keckhut (dir.), *L'Espace Politique*, 51-52 | 2023-3/2024-1, « Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique + Varia » [En ligne], mis en ligne le 01 septembre 2024, consulté le 27 septembre 2024. URL : <https://journals.openedition.org/espacepolitique/12327>

Ce document a été généré automatiquement le 27 septembre 2024.

Ce document vous est fourni par Université de Reims Champagne-Ardenne



Le texte seul est utilisable sous licence [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/). Les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

1. [Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique](#)

1. [Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique](#)

Isabella Damiani et Philippe Keckhut

2. [Géopolitiques de l'espace](#)

1. [La puissance spatiale, permanences et changements](#)

Isabelle Sourbès-Verger

2. [Nouveaux enjeux de sécurité spatiale](#)

Florence Gaillard-Sborowsky

3. [La nouvelle économie spatiale à la croisée de plusieurs enjeux sécuritaires : Une analyse des politiques d'innovation en Europe et aux États-Unis](#)

Patrick Schembri

4. [The Sovereignty of Sovereignities: On the Satellitization of Planet Earth](#)

Brad Tabas

5. [Observation de la Terre et du Soleil depuis l'espace : vers un changement de paradigme](#)

Philippe Keckhut, Mustapha Meftah et Laurence Croizé

3. [Espace\(s\) de la géopolitique](#)

1. [La démocratisation de l'accès aux images satellite : un enjeu de citoyenneté ?](#)

Gwenaël Régnier

2. [Enjeux socio-économiques et géopolitiques des observations depuis l'espace du sondeur atmosphérique IASI](#)

Camille Viatte

3. [Le faux miroir de l'objectif : enquête sur la fabrication des données spatiales](#)

Marvin Freyne

4. [L'avènement des constellations de satellites dédiées au haut débit dans les territoires isolés : le cas de Starlink dans l'Arctique canadien](#)

Célestine Rabouam

5. [La surveillance des émissions anthropiques de CO₂ depuis l'espace : un enjeu géopolitique émergent](#)

Grégoire Broquet et Frédéric Chevallier

6. [La frontière vue du satellite : étude du territoire transfrontalier de Khorgos à l'aide des ondes infrarouges](#)

Isabella Damiani

2. [Varia](#)

1. [Vues depuis Pékin, les actuelles évolutions du système portuaire de la RPC](#)

Gouvernance renouvelée, projection planétaire assumée

Benjamin Claverie

Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique

Geopolitics of outer space

Géopolitique de l'espace extra-atmosphérique

Geopolitics of outer space

Isabella Damiani et Philippe Keckhut

Pourquoi conquérir l'espace aujourd'hui ? Pourquoi, 63 ans après la première présence humaine dans l'espace, les acteurs continuent-ils à rivaliser dans ce domaine ? Quels rôles jouent les acteurs privés aujourd'hui ? Comment la compétition dans l'industrie spatiale a-t-elle évolué et remodelé le jeu des alliances et coopérations à l'échelle interétatique, mais également infraétatique ? Au-delà de leur utilisation habituelle à des fins militaro-sécuritaires, comment les données recueillies depuis l'espace peuvent-elles contribuer aujourd'hui aux réflexions dans les sciences exactes, mais également dans les sciences sociales ?

Ces questions sont à la base d'une réflexion pluridisciplinaire sur le spatial qui a débuté au sein de l'Observatoire de Versailles Saint Quentin en Yvelines (OVSQ) à travers des cycles de conférences et des projets de coopération, et qui se poursuit aujourd'hui à travers ce numéro de la revue *LEspace Politique*.

Pourquoi le besoin d'une réflexion nouvelle sur le spatial ? La première réponse à cette question renvoie à la haute pluridisciplinarité de ce travail, comme première clef de lecture du spatial et de l'espace extra-atmosphérique. Une variété disciplinaire qui ne se limite pas aux différentes sciences humaines et sociales, mais qui inclut aussi les sciences exactes et qui invite ces dernières à discuter le spatial comme objet de recherche géographique et géopolitique. Cette approche – inscrite donc dans un dialogue pluridisciplinaire – est née d'un besoin de voir le spatial à travers le regard de l'autre et donc d'en comprendre les enjeux dans leur globalité.

Une deuxième clé de lecture pourrait être la volonté de créer de nouvelles analyses sur des représentations essentielles en géopolitique et dans les études spatiales. Dans ce numéro, de nombreux travaux reviendront sur l'idée de *surveillance* exercée grâce aux données spatiales, en mettant l'accent sur une vision de la surveillance différente de l'image foucauldienne descendante du contrôle de la part des pouvoirs sur le territoire et les sociétés, mais – *a contrario* – en se concentrant sur une surveillance ascendante, qui se produit grâce à la démocratisation et au libre accès d'une grande quantité de données géospaciales, à la création donc d'un contre-pouvoir qui permet de contrôler les actions des centres traditionnels du pouvoir. Une autre notion qui sera abordée sous une connotation critique et moins habituelle sera la *sécurité*. Ce concept clé en géopolitique, notamment dans sa forme traditionnelle de légitimation par un acteur de l'exercice de son pouvoir sur son territoire de compétence, mais aussi de légitimation d'une intervention à l'extérieur afin de réduire les risques pour la population qu'il représente ou pour lui-même, sera analysé aussi dans d'autres déclinaisons. Les données spatiales permettent aujourd'hui de faciliter les réflexions également sur des questions de sécurité environnementale ou sociétale contre les risques atmosphériques, le changement climatique ou pour la gestion des aides humanitaires dans les situations de crises.

La troisième et dernière clé de lecture se traduira sous la forme d'une répartition des travaux en deux axes. La géopolitique du spatial aujourd'hui concerne les rivalités ou les coopérations entre les acteurs, mais également l'analyse de la donnée géospaciale et comment elle peut être utilisée à des fins géopolitiques. Un premier axe sera donc plus centré sur l'analyse des acteurs et des stratégies de pouvoir dans et sur l'espace extra-atmosphérique et un second axe sera plus structuré autour des nouvelles utilisations de la donnée spatiale dans les recherches en géographie, géopolitique, sciences sociales ou sciences exactes.

Axe 1 : Géopolitiques de l'espace

Les grandes mutations dans les rivalités de pouvoir entre les acteurs pour la conquête de l'espace constituent le premier axe de cette réflexion. D'une dynamique essentiellement bipolaire russo-américaine dans les années 1950, la course spatiale a vite trouvé d'autres participants avec une coopération européenne, mise en place dès les années 1960 et qui évoluera dans la création de l'Agence spatiale européenne (ESA) en 1975, ainsi que le développement de programmes spatiaux au Japon, en Chine, en Inde dès les années 1960. Ces dernières années, le multilatéralisme du cosmos ne cesse de découvrir de nouveaux acteurs institutionnels (Peter, 2006 ; Shay, 2018 ; Sourbès-Verger, 2010, 2019, 2022). En complément des deux premiers articles de cet axe qui nous permettront de déchiffrer les dynamiques contemporaines autour des concepts de puissance et gouvernance spatiales, un regard économique proposera une lecture comparative des systèmes économiques spatiaux européen et étasunien.

La course à l'espace est alimentée par des objectifs multiples. D'abord vient l'ambition de se positionner en tant que puissance spatiale capable de générer une « économie de l'espace », au cœur de laquelle se trouve une industrie à même de soutenir le développement de technologies et d'infrastructures de très haut niveau et de nouvelle génération : sondes, lanceurs, satellites (en particulier les nano satellites). Ce désir de puissance spatiale amène à une reconnaissance diplomatique et participe aux efforts de l'acteur institutionnel en question de se construire une image plus générale de puissance (Gaillard-Sborowsky, 2023). Mais quels sont les horizons de cette nouvelle ère spatiale ? Comment interpréter l'actuelle surproduction de satellites, cette « satellisation de l'Anthropocène » ? Un travail sur la philosophie et l'éthique des technologies tâchera de répondre à ces questions et analysera la relation entre souveraineté, développement technologique spatial et durabilité.

Un autre enjeu, qui a émergé au cours des dernières années, est certainement la privatisation et/ou la commercialisation banalisée de l'espace extra-atmosphérique (Sourbès-Verger, 2022). Le cosmos ne demeure pas seulement le lieu de rivalité entre acteurs institutionnels ; il devient un lieu d'affrontement entre les plus importants capitaux privés mondiaux, notamment nord-américains et chinois (Sénéchal-Perrouault, Liffra, 2019), à l'origine de ce que certains appellent le « nouvel âge spatial », le *NewSpace* (Pasco, 2018). Pour autant, et c'est là un point discuté dans ce numéro, ces acteurs privés sont-ils vraiment en concurrence avec les acteurs publics ?

Ce premier axe se terminera sur une réflexion portée par les sciences exactes, par trois physiciens qui travaillent au cœur de la production satellitaire française, qui argumenteront autour de la création d'un nouveau paradigme dans l'observation de la terre et comment cela pourrait influencer les nouveaux équilibres géopolitiques. Cet article nous permettra de faire la jonction entre les théories et les paradigmes d'observation et de présence humaine dans l'espace et les utilisations multiples de la donnée spatiale, objet du second axe.

Axe 2 : Espace(s) de la géopolitique

Le second axe de réflexion de ce numéro a comme point de départ l'idée que la course à l'espace poursuit d'autres objectifs, dont l'importance croît, comme le développement de la communication par satellite (Guerster et al., 2022) ou la production des données sur les autres planètes, sur les autres galaxies, mais également sur la Terre, dans différents domaines scientifiques, dont la géopolitique.

La première réflexion de cet axe se concentrera sur la démocratisation de la donnée spatiale et sur d'*empowerment* citoyen vis-à-vis des pouvoirs politiques ou économiques traditionnellement détenteurs de la connaissance géospaciale.

Toutefois, certaines nouvelles données en provenance de l'espace nous permettent d'analyser, de comprendre et d'interpréter les évolutions terrestres, afin de faire, par exemple, des prévisions sur certains risques environnementaux (Saidi et al., 2021). Une contribution en provenance des sciences exactes présentera l'apport essentiel de certains sondes spatiales afin de garantir la sécurité environnementale face aux émissions volcaniques ou la présence nocive d'ammoniac dans l'atmosphère.

L'utilisation de la donnée spatiale peut également soutenir l'analyse et la compréhension de dynamiques humaines, à lire la résilience sociale des territoires, à déchiffrer une tendance dans l'urbanisation, ou encore à interpréter l'évolution de l'aménagement d'un espace politique. Un autre exemple de la manière dont la donnée spatiale peut produire une surveillance ascendante sur les pouvoirs est illustré par l'intermédiaire d'une réflexion géo-anthropologique qui se concentra surtout sur les territoires en situation de crise.

La relation entre accessibilité, périphéries, communication et relation public/privé est au fondement d'une réflexion qui portera sur l'Arctique canadien, laquelle examinera les enjeux autour de la capacité de données spatiales d'origine privée à désenclaver les territoires isolés.

L'avant dernier article de ce numéro est une contribution en provenance des sciences exactes qui s'interrogera sur la surveillance de la production anthropique des gaz à effet de serre (GES) et sur la manière dont cette surveillance environnementale peut devenir un véritable enjeu géopolitique.

Pour achever le numéro, une dernière réflexion examinera l'utilisation de la donnée géospaciale pour l'observation de l'objet/enjeu/espace géopolitique absolu : la frontière, qui fait partie des objets géopolitiques dont l'observation et l'étude peut être facilitée par le traitement de l'imagerie satellite. Un travail d'observation de la région frontalière de Khorgos, entre le Kazakhstan et la Chine, à travers une vaste gamme d'ondes électromagnétiques infrarouges, permettra de déchiffrer de nouvelles informations sur ce territoire stratégique pour le projet géopolitique et géoéconomique chinois des Nouvelles routes de la soie.

L'utilisation de la donnée spatiale pour l'analyse de l'espace politique, à l'origine particulièrement convoitée dans le domaine du renseignement militaire géospaciel (GEOINT), peut donc également avoir des objectifs exclusivement scientifiques et indépendants de toute sorte d'acteurs politiques ou économiques. La donnée spatiale peut ainsi être un outil du pouvoir, mais également un outil de contre-pouvoir, un regard critique qui permet d'exercer des nouvelles formes de surveillance, de sécurité et qui démocratise la connaissance géographique.

Bibliographie

Gaillard-Sborowsky F., 2023, *Géopolitique de l'espace*, Le Cavalier Bleu, Paris.

Guerster M., Crawley E., Aliaga S., Cameron B., 2022, « So many beams, so little time: Revenue Management in the next generation of flexible communication satellites », *Acta Astronautica* , Volume 191, 479-490.

Pasco X., 2017, *Le nouvel âge spatial – De la guerre froide au NewSpace*, CNRS Éditions, Paris.

Peter N. , 2006, « The changing geopolitics of space activities », *Space Policy* , Volume 22, Issue 2, 100-109.

Saidi , S., Younes , A.B. & Anselme , B. 2021, « A GIS-remote sensing approach for forest fire risk assessment: case of Bizerte region, Tunisia », *Applied Geomatics* 13, 587-603.

Senechal-Parrouault L., Liffra C., 2019, « La stratégie d'innovation chinoise dans le domaine spatial : les lancements spatiaux chinois à la conquête du marché », *Asia Trends*, N.5.

Shay S., 2018, « The United Arab Emirates (UAE) and the Space race », IPS Publications, octobre 2018.

Sourbès-Verger I., « Espace et Géopolitique », *L'Information Géographique*, 2010/2, vol.74, 10-35.

Sourbès-Verger, I., 2019, « Chine, Russie, Inde, Japon : essai de typologie de leurs ambitions spatiales en 2019 », *Annales des Mines – Réalités industrielles*, 25-29.

Sourbès-Verger I., 2022, « L'espace, lieu particulier des rivalités politiques et technologiques », *Revue Défense Nationale*, 2022/6.

Auteurs

Isabella Damiani

Géographe, Université Paris-Saclay / UVSQ, LIMEEP-PS (UR 20204 / OVSQ)

isabella.damiani@uvsq.fr

Philippe Keckhut

Géopolitiques de l'espace

La puissance spatiale, permanences et changements

The challenges of Space Power from 1957 to 2024

Isabelle Sourbès-Verger

La puissance spatiale passe d’abord par un affichage sur la scène internationale. En octobre 1957, en devenant le premier Etat à faire orbiter un objet artificiel, Spoutnik, autour de la Terre, l’Union soviétique acquiert l’image d’une puissance scientifique et technologique de tout premier plan. Dans un monde en pleine décolonisation qui s’interroge sur le choix de son modèle socio-économique, les succès spatiaux de l’URSS et le prestige qu’ils lui confèrent deviennent à Washington une préoccupation de sécurité nationale.

Le 25 mai 1961, dans un contexte tendu entre les Etats-Unis et l’Union soviétique, le président Kennedy demande au Congrès américain de voter les crédits nécessaires pour répondre aux besoins urgents de la Nation¹. Le point IX du discours, le dernier, porte sur l’espace. La priorité pour le président est « d’envoyer des hommes sur la Lune et les ramener sains et saufs ». Le projet est présenté d’emblée comme le plus excitant, le plus impressionnant pour l’humanité et le plus important pour l’exploration en dehors de la Terre². Il marque le point culminant de la rivalité officielle avec l’Union soviétique dans l’espace, ouvrant ce que la littérature américaine a conceptualisé et popularisé comme « the Space Race », la course à l’espace (McDougall, 1987).Fron

Huit ans plus tard, la phrase prononcée par Neil Armstrong le 20 juillet 1969 « Un petit pas pour un homme, un grand bond pour l’humanité »³, représente une étape symbolique de l’histoire de l’espace. La réussite du programme Apollo marque la fin des Premières soviétiques qui s’étaient succédées depuis le lancement du satellite Spoutnik en octobre 1957, les premières photos de la face cachée de la Lune en 1959 et le vol de Youri Gagarine, le premier homme à avoir quitté la Terre en avril 1961. La National Aeronautics and Space Administration (NASA) a tenu brillamment les engagements qui lui avaient été fixés : un voyage et un séjour sur la Lune avant la fin de la décennie 1960.

Le programme Apollo avait une double fonction. Il était présenté comme un défi que les Etats-Unis s’imposaient à eux-mêmes afin de renouer avec leurs propres valeurs au travers des thèmes fondateurs de l’esprit américain, comme la « Frontière », le New Frontier et son esprit pionnier (McCurdy, 2011). Il assumait aussi une ambition géopolitique claire de leadership, ouvertement revendiquée, au point de justifier le montant des dépenses à consentir⁴ : démontrer de façon incontestable la supériorité des Etats-Unis devant le monde, en allant sur la Lune avant l’Union soviétique (Logsdon 1970).

Lorsque le but est atteint, la compétition directe est moindre avec l’URSS. Depuis la crise de Cuba de 1962, les relations entre les deux Grands se sont normalisées dans le cadre de la Coexistence pacifique puis de la Détente, alors que la doctrine de la dissuasion mutuelle assurée conduit au début des négociations sur la limitation des armements stratégiques nucléaires. Au plan intérieur, en revanche, la situation est difficile. La ségrégation demeure vive en dépit des efforts des présidences démocrates et les émeutes sont nombreuses à la suite de l’assassinat de Martin Luther King, en avril 1968, tandis que la guerre au Vietnam suscite une opposition croissante. Alors que la contestation d’une société américaine patriarcale et inégalitaire⁵ bat son plein (Mailer, 2024), la présence d’Américains seuls sur la Lune n’en a que plus de valeur pour le gouvernement Nixon en offrant une autre image des Etats-Unis.

Au-delà de l’émotion ressentie par les 500 à 700 millions de personnes⁶ qui assistent à la retransmission en mondovision⁷, démonstration est bien faite de l’efficacité du système américain qui a su mobiliser des ressources humaines et financières exceptionnelles pour un exploit sans précédent. Les astronautes photographiés au pied du drapeau américain deviennent iconiques, éclipsant la dépose d’une plaque évoquant l’humanité, de même que celle d’un microdisque de la taille d’une pièce de 50 cents en silicium gravé avec les messages de bonne volonté de 73 chefs d’état⁸. Le moment Apollo représente la quintessence de la puissance spatiale et il devient indissolublement lié à l’image de l’Amérique chez elle et à l’étranger (Logsdon, 2002). Deux générations plus tard, il sert de document dans les épreuves d’histoire du bac⁹ pour faire commenter le statut particulier de l’Amérique à la fin des années 60. Et il apparaît toujours vivant dans les imaginaires avec les réactions exacerbées de personnalités américaines face au développement de missions chinoises et l’annonce d’une mission habitée aux alentours de 2030.

Ce type de représentation en majesté de la puissance spatiale que l’on retrouve dans les posters de Gagarine, et dans une moindre mesure de Valentina Terechkova (Gerovitch, 2015) n’est cependant que la partie émergée de l’iceberg. Depuis le début de l’ère spatiale, la capacité à être présent dans l’espace, que ce soit avec des engins automatiques, ou plus rarement avec des humains, donne une aura nouvelle à l’Etat qui la maîtrise. Mais indépendamment des vols habités qui attirent sans aucun doute le plus l’attention en favorisant la fierté nationale et la reconnaissance internationale, le suivi de l’occupation de l’espace montre d’autres déclinaisons de la puissance spatiale. Celle-ci s’exerce au travers de la maîtrise des satellites remplissant des missions dites d’application, en appui des activités terrestres à des fins d’abord militaires puis civiles. On peut ainsi observer au travers des infrastructures terrestres et en orbite, les modalités particulières d’exercice de la puissance spatiale détenue par un nombre limité d’Etats (Sourbès-Verger, 2023). Le suivi de l’acquisition de ces capacités, des objectifs qui leur sont fixés, des moyens qui leur sont accordés, de l’importance qu’ils tiennent dans la vie nationale répondent à des politiques spatiales conçues en fonction des caractéristiques sociales, politiques et économiques particulières ainsi que du contexte dans lequel elles sont décidées qu’il convient d’élucider.

L’histoire de l’acquisition et des développements de la puissance spatiale dans ses expressions nationales reflète indéniablement les évolutions des équilibres géopolitiques dans lesquelles celle-ci s’inscrit et qu’elle contribue à entretenir (Sourbès-Verger, 2022).

Ainsi la Guerre froide détermine les fondamentaux de la puissance spatiale, avec un lien spécifique à la puissance nucléaire et à l’exercice de la souveraineté. Pendant plus de 10 ans, seuls les Etats-Unis et l’Union soviétique en ont l’apanage¹⁰. Les deux premières décennies de l’histoire spatiale montrent une évolution progressive de la puissance spatiale qui dépasse les enjeux stratégiques initiaux pour intégrer d’autres logiques déterminées par les caractéristiques propres des satellites et la diversité des services qu’ils assurent (partie 1).

L’apparition progressive du Japon puis de la Chine, de l’Europe, de l’Inde, et enfin d’Israël, marque une ouverture progressive du club spatial qui ne se manifeste véritablement que dans les années 1980. Elle ne remet pas en cause le primat des Deux Grands, les seuls à avoir développé une gamme complète d’activités tant civiles que militaires conduites par des missions automatiques et habités (partie 2).

L’écatement de l’Union soviétique en 1991 laisse le champ libre aux Etats-Unis qui confortent leur toute puissance avec une diversification croissante des usages de l’espace tant civils que militaires. La Russie reste prisonnière de son histoire, tandis que les compétences croissantes de l’Europe et du Japon se coulent dans le cadre fondé par le modèle américain. La maturité progressive de la Chine dans des domaines aussi symboliques que les vols habités et les compétences militaires représente le principal élément de changement potentiel de l’ordre spatial international au début des années 2000 (Sourbès-Verger, 2002). En parallèle, on assiste à l’apparition et la consécration d’un phénomène particulier donnant un rôle plus important aux acteurs privés, désigné comme New Space par ses promoteurs et s’inscrivant dans une logique américaine qui vise à établir de nouvelles relations entre puissance publique et acteurs privés (partie 3).

En 2024, plus de 65 ans après le début de l’ère spatiale, la grille de lecture de rapports de pouvoir sur Terre semble spontanément s’imposer pour interpréter les déclinaisons de la puissance spatiale au XXI^e siècle. Le jeu de transpositions faciles conduit à des affirmations de plus en plus fréquentes sur le caractère inélucltable de conflits armés dans l’espace, l’émancipation assurée d’acteurs privés de la tutelle des Etats ou la nécessité à se préparer à de futures disputes territoriales sur la Lune. Elles méritent cependant d’être questionnées si l’on prend en compte les spécificités d’un milieu physique profondément atypique qui impose aussi ses propres contraintes.

La construction des fondamentaux de la puissance spatiale au temps de la Guerre froide

L’espace tient une place à part dans l’imaginaire du XX^e siècle. Il partage cette célébrité avec le nucléaire et les liens entre ces deux domaines sont nombreux. Mais il s’en différencie aussi fortement par le soutien consensuel accordé à l’exploration spatiale. Son histoire officielle commence d’ailleurs dans le cadre d’une manifestation scientifique internationale consacrée à l’étude de l’environnement de la Terre pendant une forte période d’activité solaire : l’Année géophysique internationale (AGI), qui doit avoir lieu de juillet 1957 à décembre 1958. En 1954, les fusées et les satellites deviennent l’objet d’un groupe de travail supplémentaire car leur apport est jugé inestimable pour les recherches sur la haute atmosphère. Le responsable du rapport écrit même qu’elles « préfigurent logiquement la plus grande aventure que l’homme soit appelé à vivre : l’exploration de l’espace interplanétaire¹¹ ».

La voie royale de la puissance spatiale, l’inscription dans des préoccupations stratégiques

Le développement de capacités spatiales exige l’existence, ou la création, de compétences scientifiques, technologiques et industrielles de haut niveau. Il suppose aussi des investissements conséquents en hommes et en matériel qui soient poursuivis dans la durée. Il requiert enfin une organisation efficace et ne peut donc exister que grâce à une volonté politique forte. Seuls les Etats-Unis et l’Union soviétique ont démontré avec leur programme nucléaire qu’ils maîtrisaient tous ces aspects.

En juillet 1955, les Etats-Unis qui embarquent depuis quelques années des expériences scientifiques à bord de leurs fusées-sondes, font l’annonce (très attendue) du lancement d’un satellite dans le cadre de leur contribution aux expérimentations de l’AGI. Un mois plus tard, l’Union soviétique fait de même, ne suscitant qu’une moindre attention générale. Cette implication importante des deux Grands dans l’AGI n’est pas une simple manifestation de leur intérêt pour l’exploration de l’espace. Elle correspond au cadre, bien particulier en ce milieu des années 1950, de la nouvelle donne stratégique qui régit les rapports entre les Etats-Unis et l’Union soviétique, disposant tous deux de l’arme nucléaire et soucieux d’en maximiser le bénéfice en cas de conflit que ce soit pour l’utiliser ou dissuader l’adversaire.

Leurs priorités et leurs atouts respectifs dans la réalisation de leur premier programme spatial sont différents. Le cœur de la démarche américaine concerne le satellite lui-même. Il est en effet essentiel pour le renseignement américain de disposer de données cartographiques fiables sur l’Union soviétique, afin de pouvoir identifier des cibles potentielles et avoir une idée de l’état de ses forces. Or ces données sont difficiles à acquérir compte tenu de la taille du territoire, de sa profondeur et de la chape de secret imposé par le pouvoir soviétique. Pour l’URSS, la problématique est autre. Si la cartographie des Etats-Unis est assez largement en accès libre, la difficulté est de disposer d’un vecteur qui permette d’atteindre les objectifs visés. Or, à la différence de leur adversaire qui dispose de bases en Europe, ses bombardiers devraient accomplir un vol trop long pour être réaliste. La seule solution passe donc par le développement d’un missile intercontinental (Sourbès-Verger, 2010).

La mise en orbite effective de Spoutnik dès octobre 1957, grâce à l’adaptation du missile R7 en lanceur¹², introduit une nouvelle donne. Si les rapports américains avaient bien identifié, dès 1947, l’effet psychologique qui serait associé à la mise en orbite du premier satellite, son importance avait été sous-estimée. Il en allait d’ailleurs de même en Union soviétique, ce dont témoigne le premier communiqué étonnamment neutre annonçant l’événement¹³. Mais la possibilité pour les radio-amateurs d’entendre le bip bip du satellite lors de son passage au-dessus de leur tête matérialise le succès soviétique dans le monde entier. Cela engendre même un véritable traumatisme chez certains Américains, nourris des angoisses d’une guerre nucléaire et qui découvrent leur vulnérabilité face à une attaque qui viendrait de l’espace.

Ce retentissement médiatique et ses effets psychologiques donnent immédiatement un statut à part entière à la puissance spatiale dont l’Union soviétique va pleinement profiter dans un premier temps. Cependant du fait des circonstances particulières de sa naissance, elle garde l’image d’un Janus bifrons, avec le visage de la grandeur scientifique dans un contexte de coopération internationale mais aussi celui de l’affrontement stratégique militaire potentiel. Cette dualité ne se retrouve pas que chez les deux Grands. En 1950, la coopération dans le domaine des missiles est inscrite dans le pacte sino-soviétique. Elle va de pair avec la volonté de la Chine de se doter au plus tôt de l’arme nucléaire. Cependant, c’est dans une perspective de reconnaissance symbolique que dès 1956, le président Mao veut voir la Chine aller dans l’espace et qu’il propose un programme de satellite indépendamment de celui de lanceurs. La rupture du traité en 1963, suite aux dissensions entre Khrouchtchev et Mao, les difficultés économiques puis la Révolution culturelle vont donner la priorité au programme de lanceur, mais le programme spatial (65-1) se poursuit et se concrétise par le 1^{er} tir réussi d’une lanceur Longue Marche en avril 1970 (Sourbès-Verger ; Borel 2008).

La logique de la constitution de la France comme puissance spatiale s’inscrit dans la même veine. Le Président de Gaulle a fait le choix, en 1958, d’un programme nucléaire militaire et d’un programme de missiles. En parallèle, la création du CNES atteste de la reconnaissance des ambitions spatiales comme attributs de la grandeur nationale, sur le modèle des capacités américaines et soviétiques. La France est présente dans les comités scientifiques de l’AGI et ses fusées-sondes Véronique servent à l’étude de la haute atmosphère. En 1965, en réussissant la mise en orbite du satellite Astérix avec une fusée Diamant, développée à partir de la filière missile, elle acquiert le titre de 3^{ème} puissance spatiale. Même s’il s’agit d’une simple capsule technologique, le tir depuis la base d’Hammaguir¹⁴ lui vaut une reconnaissance internationale. Pour autant, c’est dans le cadre d’un accord bilatéral avec la NASA que son premier satellite emportant une véritable charge scientifique, FR1, est lanc (Blamont, 1987). Il atteste du fait que les exigences d’un programme spatial supposent la mise au point de lanceurs plus élaborés et c’est dans le cadre d’une coopération européenne que la France envisage de poursuivre dans cette voie. L’effet d’image est cependant atteint. La France se présente comme un partenaire des Etats-Unis et elle noue une coopération bilatérale avec l’Union soviétique concrétisée par la signature d’un accord en 1966.

La démonstration de compétences scientifiques et technologiques de haut niveau, voie alternative de la puissance spatiale

Le processus d’acquisition de capacités de lancement autonome par le Japon, entamé aussi au début des années 1960, illustre toutes les ambiguïtés de la construction d’une puissance spatiale sur une base purement civile. Les difficultés sont accrues par les contraintes imposées par la défaite de 1945 qui pèsent sur les filières naturelles des technologies spatiales, l’industrie aéronautique et de défense. Le petit lanceur lambda de l’ISAS qui assure la mise en orbite du 1^{er} satellite japonais en 1970 est développé dans un cadre universitaire en s’appuyant sur le programme de fusées-sondes décidé en 1955 pour participer à l’AGI. Mais c’est la National Space Development Agency (NASDA), créée en 1969 dans une approche technologique, qui reçoit la responsabilité de développer un lanceur adapté à la mise en orbite de satellites d’application et non plus de petites charges scientifiques. Mais alors que le programme initial prévoyait la mise en place d’une filière indigène, c’est finalement l’achat de licences de technologies américaines qui est privilégié par le gouvernement dans le cadre de la négociation de la restitution en 1972 des îles Okinawa et de l’archipel d’Ogasawara par les Etats-Unis. Le Japon ne commencera en fait à développer sa propre filière qu’en 1986, son autonomie technologique n’étant atteinte qu’en 1994 avec le 1^{er} tir du lanceur H2.

De son côté, l’Europe envisage dès les années 1960 de se doter de son propre lanceur pour garantir son autonomie en créant une organisation spécifique l’ELDO. La formule retenue cherche à capitaliser sur les compétences de la France et du Royaume Uni, toutes dérivées de leurs expériences dans le domaine des missiles, auxquels s’associent l’Allemagne et l’Italie. Faute de maitre d’œuvre unique, cette conception hybride du lanceur Europa montre rapidement ses faiblesses^[15]. Surtout, à la différence de l’ESRO, l’organisation créée à la même époque par les scientifiques, il n’y a pas de véritable volonté de coopération mais plutôt une tentative pour valoriser des capacités existantes. L’argument français de l’autonomie ne suffit pas à convaincre les Etats européens qui redoutent le coût de développement d’un lanceur propre et se satisfont de leur coopération avec la NASA. En fait, ce sont les réticences du gouvernement américain à assurer le lancement du satellite franco-allemand Symphonie à vocation commerciale^[16] qui vont convaincre, en 1972, les pays membres de l’ESA (successeur de l’ESRO) de financer le programme Ariane sur une base optionnelle (Krige, 2000). Au-delà de la science, indépendamment du militaire, la transformation de l’Europe en puissance spatiale officielle, en 1979, est tardive, motivée par une volonté d’indépendance vis-à-vis des Etats-Unis dans le domaine des applications satellitaires afin de profiter de leurs bénéfices économiques.

Les Etats-Unis n’étaient pas favorables au développement de capacités de lancement autonomes de leurs principaux alliés, comme on le voit. En revanche, en donnant mission à la NASA de contribuer à la formation au spatial de scientifiques et ingénieurs étrangers, ils ont indéniablement contribué à sensibiliser de nombreux pays à l’intérêt des technologies spatiales, tout en acquérant une position de domination incontestée. La création de la NASA par le Président Eisenhower était un choix délibéré de séparer le secteur spatial civil de celui des applications militaires. Le Space Act de 1958 s’inscrit dans une volonté de revitalisation des compétences scientifiques et techniques nationales et de contribution au prestige national mais il mentionne aussi, spécifiquement, la charge pour la NASA de promouvoir la coopération internationale. En dehors du programme Apollo, purement national, qui va lui conférer un capital de confiance inconnu des autres agences du gouvernement (Launius, 2003), les missions scientifiques et automatiques d’exploration des planètes jouent un rôle particulièrement attractif sur la scène scientifique internationale.

L’office des relations internationales est une pièce maîtresse d’un dispositif destiné à attirer les talents, à créer une culture commune et à proposer des coopérations qui structurent un réseau de fidèles. Il s’appuie sur les scientifiques participant à l’AGI, le Committee of Space Research (COSPAR) créé en 1958 assurant la poursuite de la coordination internationale^[17]. La réalisation de stages de formation de plus ou moins longue durée est ensuite renforcée par des transferts de technologie à proportion de l’étroitesse des liens avec Washington. Dès 1962, la NASA accueille des ingénieurs et scientifiques de plus de 55 nationalités différentes^[18]. Cette diplomatie spatiale est partie prenante de la politique étrangère américaine^[19]. Quelques centaines d’ingénieurs et de chercheurs seront ainsi reçus dans les centres de la NASA pendant les années 1960 et 1970.

Les Etats-Unis disposent alors d’un pouvoir d’influence très visible, en particulier dans leurs relations avec l’Europe qui est un partenaire privilégié. Les scientifiques européens ayant acquis dans ce cadre leurs compétences initiales vont continuer à s’inspirer des méthodes de la NASA dans leurs programmes futurs. De même le choix des programmes conjoints tout en leur donnant une lisibilité croissante les place dans une position de dépendance qui ne s’atténuera que très lentement (Sebesta, 1994). Pendant toute la période de la Guerre froide, l’activité dans l’espace reflète et entretient l’évolution des équilibres géopolitiques avec un avantage marqué des Etats-Unis en influence internationale.

Des puissances spatiales inégales dans leurs ambitions et leurs moyens

La mise en place de nouveaux acteurs aux capacités en construction se caractérise par une évolution progressive de la puissance spatiale dont les composantes se déclinent différemment au fil du temps. L’analyse de la place tenue par chacune permet de dresser un tableau des différences de nature qui se creusent entre les États membres de ce premier club spatial et de fournir des éléments pour une tentative de typologie.

La recherche d’un équilibre relatif de la puissance spatiale entre les deux Grands

Le premier temps, de la fin des années 1950 et des années 1960, est présenté comme celui de la compétition symbolique, l’Union soviétique et les Etats-Unis utilisant leurs compétences spatiales pour renforcer leur image et leur statut de leader (Siddiqi, 2003). Il ne concerne que ces deux acteurs, qui sont aussi les deux puissances nucléaires et les leaders des deux Blocs autour desquels se structure le reste du monde^[20]. La fin des programmes lunaires américain et soviétique au début des années 1970 clôt cet épisode. Si les Etats-Unis ont bien démontré leur savoir-faire, la suppression des dernières missions et l’absence de suite laisse cependant un sentiment de désappointement et l’idée diffuse d’un gaspillage de ressources dans une action trop spectaculaire.

L’analyse de l’occupation de l’espace pendant cette période montre cependant que ce récit occulte un pan essentiel de ce qui constitue l’autre volet de la puissance spatiale, l’activité spatiale militaire avec la multiplication du nombre de lancements de satellites de reconnaissance et plus largement de surveillance de la Terre. Leur nombre est particulièrement important pendant les années 1960 puisqu’il faut faire revenir sur Terre les photographies recueillies ce qui suppose de nombreuses missions pour avoir des données les plus récentes possible. Alors que le droit spatial est en négociation, et que la liberté de prise de vues depuis l’espace n’est pas officiellement reconnue, ce type de mission s’effectue sous couverture d’un programme technologique, l’existence des satellites Corona américains n’étant révélée qu’en 1995 (Day, 2015).

Le deuxième temps qui couvre les années 1970 s’affiche comme celui d’une cohabitation entre les deux Grands, tandis que des acteurs nouveaux, Europe, Japon, Chine, cherchent leurs marques. La puissance spatiale américaine se déploie allant jusqu’à officialiser en 1972 une coopération avec l’Union soviétique dans le cadre de la Détente^[21]. Son point d’orgue est la mission Apollo-Soyouz en 1975, avec la jonction des vaisseaux pour une poignée de mains en orbite. Au-delà du symbole, qui est aussi une éclatante manifestation du duopole, l’exercice a permis à chacune des communautés spatiales de découvrir, pour les besoins de l’assemblage, son alter ego. Même si les opérations de lancement et de retour sur Terre sont conduites nationalement, l’espace sert ponctuellement de vitrine mais il est désormais de plus en plus opérationnel. De son côté, l’Union soviétique va proposer une diplomatie spatiale originale en capitalisant sur l’existence des stations spatiales, Salout puis Mir, héritées de la reconversion du programme lunaire. L’invitation des ressortissants des pays amis mais aussi de la France entretient l’image de l’identification du socialisme et de l’homme nouveau, les Etats-Unis étant beaucoup plus effacés dans ce registre des vols habités.

L’apaisement des relations concerne aussi un autre domaine, plus crucial pour la sécurité internationale, celui de la limitation et du contrôle des armements stratégiques, les accords SALT/ABM de 1972 et 1978. Les satellites de reconnaissance jouent un rôle crucial pour le succès des négociations puisqu’ils sont les seuls à permettre la vérification du respect des engagements pris par les satellites de reconnaissance et la détection des lancements éventuels de missiles par les satellites d’alerte avancée.

Si les Etats-Unis et l’Union soviétique semblent encore, au vu de leurs réalisations, jouer la parité, l’accélération du développement des applications civiles aux Etats-Unis commence cependant à creuser l’écart. La puissance spatiale américaine se caractérise en réalité depuis le début par une utilisation diversifiée des capacités spatiales pour assurer son leadership dans tous les domaines. C’est ainsi que dans la foulée de l’annonce du programme Apollo, le président Kennedy invitait, en 1961, tous les pays à participer à un système de communications par satellites dans le cadre de l’organisation de télécommunications internationales, Intelsat opérationnelle en 1964. L’originalité de la formule est la prise en charge par les Etats-Unis de toute l’infrastructure du système (Malavialle 1998)

Dès cette époque, la puissance spatiale américaine s’originalise par son caractère global. Elle couvre tous les enjeux scientifiques, militaires et économiques (Verger, 2002). Même si ce dernier volet met du temps à se concrétiser, en particulier dans le domaine de l’observation de la Terre, comparé à celui des télécommunications, ce sont là encore les Etats-Unis qui mènent le jeu avec le lancement du premier satellite de téledétection civil, Landsat en 1972. Certes la synergie avec les capacités acquises avec les satellites de reconnaissance militaires n’est pas réalisée mais en proposant des images de la Terre gratuitement, les Etats-Unis confortent leur conception d’un monde ouvert de l’information tout en diffusant l’apprentissage international de leurs technologies avec potentiellement l’horizon de leur commercialisation (Mack, 1990).

Panorama de la puissance spatiale dans les années 1980

Les années 1980 concrétisent ce tournant décisif dans le panorama mondial des acteurs spatiaux. L’Europe y trouve une place que l’on pourrait qualifier de puissance par proxy en capitalisant sur l’expérience de sa coopération scientifique, technologique et industrielle avec les Etats-Unis. Elle profite ainsi d’une adéquation précieuse aux standards américains devenus de plus en plus les termes de référence. La disponibilité de son lanceur Ariane lui permet de proposer ses services sur le marché des lancements de satellites commerciaux où elle bénéficie du goulot d’étranglement créé par le retard de la mise au point de la Navette spatiale américaine. Forte de son expérience dans la participation au programme du télescope Hubble, elle se fait reconnaître dans le champ de l’exploration robotique avec la mission Giotto, d’étude de comète, ou le lancement du satellite astronomique, Hipparcos (Bonnet, 1992). Dans le domaine des applications, elle développe, en parallèle des organisations internationales sous leadership américain, deux organisations régionales de télécommunications, Eutelsat, et de météorologie, Eumetsat.

L’Europe garde cependant un statut junior dans l’écosystème mondial car son poids reste limité du fait de ses faiblesses internes. L’incapacité à construire un intérêt commun suffisamment fort se manifeste de façon très visible dans le domaine des vols habités où la mobilisation de la fierté nationale est un ressort décisif. L’accord initial passé en 1987 au sein de l’ESA pour développer la navette Hermes et permettre à des spationautes de se rendre de façon autonome dans l’espace est finalement abandonné en 1992, car plusieurs États membres se satisfont de compter sur la Navette spatiale et refusent d’assumer les surcoûts annoncés. Par ailleurs, la convention de l’ESA interdit toute activité qui ne soit pas civile. Or les satellites militaires représentent la moitié de l’activité aux Etats-Unis et sont majoritaires en Union soviétique. C’est donc à l’échelon national que sont décidés plusieurs programmes de télécommunications, d’observation civile, Spot, militaire, Helios, en nouant des partenariats hors du cadre ESA. Cela renforce les acteurs industriels nationaux mais entretient aussi une concurrence des compétences et ne contribue pas à compenser les insuffisances de la construction européenne, par exemple dans le domaine du renseignement.

La Chine est le deuxième acteur qui commence à attirer l’attention après une décennie précédente de construction à bas rythme pendant laquelle, totalement isolée, elle a commencé à mettre en place des compétences de base en ne comptant que sur ses propres forces. Avec l’ouverture et la coopération prônées par Deng Xiaoping, elle normalise sa position, devenant membre du COPUOS en 1980, mais elle reste soumise aux procédures restrictives des Etats-Unis, suivies aussi par l’Europe, dans le domaine des transferts de technologie. Sa proposition, en 1985, de commercialisation de son lanceur Longue Marche ne recueille qu’un succès limité lié à une fiabilité qui n’est pas encore assurée mais surtout aux restrictions des règles sur le contrôle des technologies sensibles (International Traffic in Arms Regulations, ITAR) pour les clients de l’industrie occidentale (Balme ; Sourbès-Verger, 2002). Dans ce contexte, la Chine se concentre sur son marché intérieur et ses besoins importants en infrastructure pour assurer son développement économique.

Le Japon et l’Inde restent plus périphériques, ce qui renvoie à leur place sur la scène internationale, aussi différente soit-elle. En effet, le Japon tente de développer ses capacités nationales mais se heurte à des difficultés de différents ordres dont la relation particulière avec les Etats-Unis exerçant un contrôle strict et la place minoritaire du spatial dans les intérêts nationaux. L’Inde est exclusivement focalisée sur des objectifs de développement nationaux et ne dispose que de ressources réduites. Elle tente de les valoriser en jouant, dans le spatial comme ailleurs, la carte du non-alignement et de la 3^{ème} voie afin de gagner progressivement des compétences nouvelles et son autonomie dans le domaine des lanceurs grâce à la coopération aussi bien avec l’URSS que les Etats-Unis ou l’Europe et une approche rigoureusement pacifique. C’est donc au niveau interne qu’elle acquiert d’abord sa notoriété (Abdul Kalam, 1999). Enfin, Israël, puissance spatiale autonome, reste un acteur à part, sa volonté de maîtriser un accès à l’espace relevant de préoccupations de souveraineté qui concerne principalement le domaine du renseignement et le lancement de ses propres satellites d’observation de la Terre.

Pour les Etats-Unis en revanche, c’est le début d’une période où leur exceptionnalité s’affirme (Pasco, 1997). Le vaste secteur scientifique et industriel hérité d’Apollo se structure et vit de budgets qui restent conséquents avec le programme de la Navette spatiale mais aussi d’exploration, le relais étant pris par la croissance des dépenses militaires qui l’emportent sur les dépenses civiles à partir de 1981. L’initiative de défense stratégique (IDS) du président Reagan, immédiatement surnommée la Guerre des étoiles, Star Wars paraissant la même année sur les écrans, est une véritable rupture dans les équilibres jusque-là préservés. L’objectif est en effet de préserver le territoire américain de toute menace de frappe nucléaire soviétique en plaçant dans l’espace des satellites destinés à intercepter les missiles ennemis en vol. Même s’il ne s’agit pas d’armes à destination des satellites, le principe n’est guère différent. L’IDS remet donc en cause deux des principes fondateurs des relations stratégiques. La fin du principe de la dissuasion nucléaire, puisque les Etats-Unis seraient à l’abri d’une 2^{ème} frappe de la part de l’Union soviétique s’ils décidaient de l’attaquer en premiers, et la fin de la sanctuarisation d’un milieu qui garantissait une forme de transparence sur les menaces possibles. Les ambitions affichées se révèlent très vite au-delà des possibilités technologiques de l’époque mais le financement constant du programme à un niveau élevé représente une source de revenus très importants pour la R&D nationale tant publique que privée.

A l’opposé, l’Union soviétique perd de plus en plus sa dynamique. Certes ses compétences technologiques restent significatives ce dont témoigne sa maîtrise des vaisseaux habités, des stations spatiales et la

réalisation du programme de navette Bourne assez proche de la navette spatiale qui réussit son premier (et dernier) vol automatique en 1983 (Chertok, 2015). Elle poursuit aussi des projets spatiaux sophistiqués inspirés des ambitions de l’IDS à la fois pour protéger ses satellites et pour se doter de ses propres moyens d’interception. En revanche, le maintien de l’intégration des laboratoires et des entreprises d’État au sein du complexe des industries de défense avec un mode de fonctionnement en silos et un processus de décision opaque ne favorisent pas l’innovation. Les faiblesses récurrentes dans les champs de l’informatique et de l’électronique limitent progressivement les performances des satellites. Le phénomène est particulièrement sensible dans le domaine de la science (Huntress, Marov, 2011) et des applications. Cela contribue à son effacement relatif, l’Inde et la France étant les seules à participer à des coopérations en dehors des membres de l’organisation Interspoutnik des pays sous influence soviétique.

Ces différents types de puissances spatiales montrent que la richesse nationale, les capacités scientifiques et technologiques, comme les ressources industrielles sont moins significatives que l’adéquation au projet politique national intégrant aussi bien les besoins intérieurs qu’extérieurs. L’arrivée au pouvoir de Gorbatchev, avec l’instauration de la glasnost et de la perestroïka vont contribuer à déstabiliser un système perçu comme un des plus performants de l’industrie nationale en lui demandant de s’impliquer dans le soutien à la reconstruction des pans civils d’une économie en berne (Sagdeev, 2010). L’incapacité du secteur à s’adapter à ses nouvelles conditions d’existence va même jouer un rôle dans l’éclatement de l’Union soviétique en durcissant les concurrences internes et l’opposition des barons de l’industrie de défense à la réforme du système (Facon ; Sourbès-Verger, 2007)

Permanences et ruptures dans l’exercice de la puissance spatiale 1991-2015

La disparition de l’Union soviétique assure à la puissance spatiale américaine une hégémonie incontestée. L’Europe confirme sa présence en orbite mais, faute de projet global, ses capacités restent limitées au domaine civil (Sourbès-Verger, 2021). Le Japon, lui, n’a pas d’autre choix compte-tenu de sa dépendance aux Etats-Unis qui de privilégier la recherche de compétences technologiques et l’Inde ne diversifie que lentement ses programmes au-delà du champ des applications consacrées à l’aide au développement (Manoranjan Rao, 2015). Quant à la Russie, son secteur spatial, identifié à l’idéologie communiste, subit de plein fouet le contrecoup d’une image symboliquement et matériellement indissociable du système soviétique. Enfin la Chine est encore en train d’organiser et construire ses capacités spatiales, avec la décision d’entamer un programme de vols habités en 1992 et la création d’une agence spatiale, la CNSA, en 1993. La puissance spatiale s’inscrit sans surprise dans les cadres de l’ordre établi et reflète fidèlement le monde unipolaire qui s’est mis en place (Sourbès-Verger, 2008).

La toute-puissance spatiale des Etats-Unis et ses manifestations 1991-2006

Les Etats-Unis, vainqueurs de la Guerre froide, affichent leur puissance dans tous les domaines, dont l’espace. Leur supériorité y est attestée dans l’exploration, les applications civiles et s’est révélée dans le domaine militaire avec la guerre contre l’Irak en 1991. Ne manque que la maîtrise des séjours de longue durée à bord de stations spatiales car le projet ambitieux annoncé en 1984 par le président Reagan d’une station qui ouvrirait la voie à l’exploration future (de Mars) en intégrant sous sa bannière les capacités occidentales n’a pas trouvé de soutien politique du fait d’un coût élevé qui ne trouve plus de justification politique, surtout comparé à l’IDS qui requiert un montant important d’investissement. La décision de renoncer au programme de la NASA et de ses partenaires traditionnels (Europe, Japon) pour privilégier la construction d’une station spatiale en coopération avec la Russie confirme la fin d’une époque. La priorité est alors donnée à la préservation de la stabilité de la Russie en favorisant la reconversion du secteur des entreprises de défense afin de limiter les effets de la crise. Les vols habités représentent une activité importante et la coopération peut s’appuyer sur l’expérience passée du programme Apollo-Soyouz et du renforcement récent de la coopération scientifique intensifiée avec l’arrivée au pouvoir de Gorbatchev (Sagdeev, 2010). Pour autant, si l’intérêt est aussi financier car les technologies soviétiques ont fait la preuve de leur efficacité, le renoncement est de taille puisqu’il est acté que la nouvelle station dépendra pour ses systèmes critiques des moyens soviétiques. Cette décision de 1993 est prise en toute connaissance de cause, le National Security Council actant la dimension « technologique et géopolitique de ne pas maintenir le leadership américain dans ce domaine »[[]²².

La parution en 1996 de la National Space Policy par le président Clinton atteste de la place du spatial dans la vie nationale et la place croissante accordée au secteur privé. La décision est ainsi prise, contre l’avis du Département de la Défense (DoD), de garantir à tous les utilisateurs civils la précision des signaux GPS. L’objectif est de garder le monopole d’un système coûteux et complexe en dissuadant les pays tiers de développer des compétences autonomes dans un secteur où les applications civiles deviennent de plus en plus prometteuses. La publication du Commercial Space Act en 1998 poursuit dans cette direction avec l’autorisation donnée à des sociétés privées de commercialiser des images spatiales à haute résolution, considérées traditionnellement comme relevant de la sphère du renseignement. Les services spatiaux sont désormais pensés comme une composante d’un intérêt national dépassant les enjeux classiques de sécurité pour valoriser les bénéfices économiques du leadership. Enfin, c’est la déréglementation des grandes organisations internationales de télécommunications terrestres (Intelsat), maritimes (Inmarsat) créées dans les années 1960 au profit des opérateurs privés américains. Dans tous les cas, il s’agit de valoriser les avancées techniques spatiales en offrant à des acteurs privés l’opportunité de s’implanter les premiers sur des marchés en devenir qu’ils sont alors les seuls à maîtriser. Cette philosophie se retrouve sous la présidence Bush qui, en 2006, demande à la NASA de favoriser le développement de services commerciaux de transport spatial (COTS), mesure destinée à renforcer la compétitivité du secteur privé en lui garantissant des commandes publiques.

Pour autant, le volet militaire de l’espace reste préservé et la Stratégie de sécurité nationale[[]²³ de 1996 sous-titrée « Engagement et Enlargement » envisage un usage possible de l’espace à des fins offensives. De fait, les usages militaires de l’espace ont pris une ampleur croissante (Worden, 2002). Dans la pratique, toutes les forces américaines intègrent des services spatiaux de navigation, télécom, observation dans leurs opérations. En 1999, sous la présidence Bush, la Politique spatiale du DoD, la première depuis 1987 et la fin de la Guerre froide, décline l’importance croissante des capacités spatiales pour l’intérêt national, officialisant la notion de « Space Power » et ses différentes déclinaisons pratiques[[]²⁴. La guerre du Golfe de 2003 va en faire une démonstration spectaculaire.

Alors que cette période est sans aucun doute celle où les Etats-Unis profitent le plus largement des bénéfices de leur hégémonie spatiale, la littérature spécialisée l’analyse comme un temps de crise et de désamour de l’espace par le pouvoir politique et le public. Cela ne s’explique que partiellement par la stagnation du budget de la NASA, dès lors que celui-ci reste conséquent et sans commune mesure avec le reste du monde. Certes les programmes d’exploration sont réduits[[]²⁵ mais l’essentiel de l’exploration lointaine est toujours effectué par des sondes américaines. L’explication du malaise ressentit est sans doute à trouver dans l’absence de grand programme symbolique coûteux et mobilisateur sur le modèle d’Apollo qui a marqué profondément l’ADN de la NASA en identifiant la grandeur nationale à des réalisations spatiales prestigieuses. Pour les observateurs, la puissance spatiale ne peut exister pleinement que si elle comprend une dimension d’affichage symbolique qui marque les imaginaires. De ce point de vue, la diversification de compétences chinoises plus matures offre l’opportunité de revenir au grand récit, devenu quasi mythique, du début de l’ère spatiale, celui où les Etats-Unis se surpassent eux-mêmes quand ils sont confrontés à un adversaire.

Des équilibres qui évoluent entre puissances spatiales

Confrontée aux effets de l’avance américaine, l’Europe mesure assez vite l’intérêt des technologies spatiales comme vecteur d’innovation et garantie d’autonomie (Radtka, 2021). En dépit des garanties américaines, la Commission européenne décide, en 1998, la création d’un système autonome de positionnement, Galileo, dont l’ESA assurera le développement. Là encore, l’Europe montre toutefois ses limites en privilégiant un partenariat avec le secteur privé, censé permettre de partager le montant des dépenses. Une telle approche, politiquement en phase avec les priorités de l’Union européenne, est cependant totalement inadaptée à l’ampleur de l’investissement requis si bien que les premiers contrats ne seront signés qu’avec 10 ans de retard du fait des ajustements multiples qui ont dû être réalisés (Martin, 2009). Le deuxième grand programme d’observation de la Terre, décidé en 1998, GMES, Global Monitoring for Environment and Security montre d’autres limites autour de la notion de sécurité dans une relation compliquée avec la Politique européenne de sécurité et de défense[[]²⁶. Depuis, les entreprises du spatial européen se sont positionnées sur le marché international et les préoccupations commerciales sont de mieux en mieux identifiées (Ravillon, 2003), le point faible restant le volume limité de commandes publiques alors que celles-ci représentent l’élément décisif d’entraînement.

Quant au Japon, qui envisage de s’associer à la démarche européenne pour disposer de moyens de navigation, il est très vite dissuadé par les Etats-Unis de développer un système autonome global. Il garde néanmoins l’idée d’acquérir une couverture régionale, complémentaire de GPS, avec le Quasi-Zenit Satellite System. En parallèle, le Japon s’attache à sortir ses activités spatiales du cadre extrêmement contraint imposé par sa Constitution de 1945 allant jusqu’à interdire tout usage de ses satellites par les forces d’autodéfense. Sous l’influence de la menace accrue dans le domaine balistique par la Corée du Nord avec le tir du Taepo Dong en direction de son territoire, et la volonté des Etats-Unis d’une participation accrue aux dépenses de défense, est entreprise un long processus de réforme pour la promulgation en 2008 de la Basic Space Law[[]²⁷ qui intègre les préoccupations de sécurité nationale dans le développement des capacités spatiales.

De toute façon, ces initiatives limitées, provenant de surcroît d’Alliés des Etats-Unis, ne remettent que superficiellement en cause l’équilibre ancien, tant l’avance américaine est grande. L’effet de cumul des budgets civils et militaires[[]²⁸ permet en effet à l’industrie spatiale américaine de dégager des marges d’investissement considérables renforçant leur avance, d’autant plus que les progrès de l’électronique sont très rapides[[]²⁹.

La reprise d’une dynamique qui met à nouveau le projecteur sur les activités conduites dans l’espace est tant que telles, vient des progrès de la Chine. Avec le premier vol de ses taïkonautes en 2003, celle-ci devient la 3^{ème} puissance spatiale à pouvoir faire vivre ses ressortissants dans l’espace. La valeur symbolique est d’autant plus grande que la Chine est persona non grata, ne serait-ce que comme invitée, dans la station spatiale internationale. Dans un contexte où la concurrence économique terrestre commence à se durcir, ces réalisations chinoises reçoivent une attention d’autant plus grande que la communauté spatiale américaine cherche aussi des arguments pour relancer des programmes plus ambitieux. La publication en 2006 du Livre blanc sur les activités spatiales de la Chine[[]³⁰ décrit la stratégie de valorisation des activités spatiales pour le développement des activités économiques, la garantie de la sécurité nationale, le progrès des sciences et technologies. Ces ambitions confortent la banalisation de la perception de la menace chinoise par nombre d’acteurs américains.

Même si la Chine insiste sur sa volonté de coopération, le fait qu’elle englobe explicitement tous les registres de la puissance spatiale fait d’elle le seul acteur à afficher une posture globale semblable, dans son principe, à celle des Etats-Unis. Le succès de la première mission lunaire Chang’e en 2007 confirme la réalité des ambitions de rattrapage avec des avancées à un rythme régulier, sans être très rapide. Le basculement s’achève avec le test de destruction d’un satellite national non opérationnel par un missile depuis le sol. Ce tir antisatellite (ASAT), unanimement condamné pour le nombre très élevé de débris qu’il engendre, conforte les inquiétudes du Pentagone de plus en plus soucieux d’affirmer sa liberté d’action et de riposte dans l’espace. En même temps, on peut noter que l’essai chinois s’inscrit aussi en réponse de la National Space Policy du président Bush (Jr) qui affiche depuis 2006 son rejet de toute négociation, proposée par la Chine et la Russie, sur un traité international qui pourrait limiter sa liberté d’action dans la défense de ses satellites et la dissuasion, y compris préemptive, de toute agression potentielle (Gaillard-Sborowsky, 2023).

Vers un nouvel ordre spatial ?

L’idée d’un basculement de l’équilibre spatial est largement dominante en 2024, mais l’ordre ancien n’a pas totalement disparu. Les fondamentaux étudiés au début de l’ère spatiale demeurent. Ainsi l’agrandissement du club spatial qui a vu l’Iran, en 2008, la Corée du Nord, en 2012, et la Corée du Sud, en 2013, devenir des puissances spatiales témoigne à des titres divers, des deux grandes logiques du début de l’ère spatiale. La complémentarité de la puissance spatiale et de la puissance nucléaire se retrouve dans les programmes de l’Iran et la Corée du Nord (Sourbès-Verger, 2016). De son côté, la Corée du sud combine des préoccupations de démonstration technologique, proches de celles du Japon à l’époque, avec une dimension supplémentaire de recherche d’autonomie et de préoccupations affichées de sécurité liée aux relations tendues avec la Corée du Nord.

La coopération a son propre tempo. Celle sur l’ISS apparait détachée des affrontements terrestres, Occidentaux et Russes continuent à voyager et vivre ensemble dans l’espace, la station étant exclue des sanctions prises à la suite de l’annexion forcée de la Crimée en 2014 et de l’attaque de l’Ukraine en 2022. Ce n’est cependant que l’effet de l’imbrication d’intérêts difficiles à rompre, techniques pour les Etats-Unis et financiers pour la Russie. Pourtant derrière ce cas devenu anachronique, le basculement de la Russie vers la Chine est une réalité. Initié dans les années 2005, accéléré depuis 2014, il prend une nouvelle ampleur avec l’accord de 2021 sur le développement d’une base lunaire scientifique internationale (ILRS) qui fait pendant à l’initiative américaine du programme Artemis, décidé en 2019 par le président Trump et poursuivie par le président Biden.

L’espace reflète donc toujours les tensions géopolitiques avec une force d’inertie liée au temps long de mise en œuvre caractéristique de ces programmes. De ce point de vue, alors que les ambitions indiennes ne suscitent qu’un intérêt relatif, la résurgence d’une concurrence avec la Chine remplit pour les Etats-Unis une double fonction. La première est de mobiliser les énergies, les soutiens politiques et les financements en crédibilisant la nécessité absolue d’un effort national. La seconde est de retrouver le fil d’un récit dont l’issue est favorable puisque les Etats-Unis sont sortis grands vainqueurs de la compétition avec l’Union soviétique. Ces aspects se retrouvent fortement affirmés dans la National Space Policy du président Trump en 2020 et la création de la Space Force en tant que force distincte au sein de l’Air Force avec le recours à un imaginaire particulier, celui des Gardiens dont le recrutement est mis en scène[[]³¹. Ils sont aussi très présents dans les auditions du Congrès sur le programme lunaire chinois, en particulier autour de l’alunissage de la sonde Chang’e 6, au printemps 2024, et du retour d’échantillons de la face cachée qui n’a jamais été explorée in situ par des engins américains.

Pour la Chine, la situation est autre. La diabolisation qui s’exerce à son encontre dans certains discours américains a l’avantage de crédibiliser ses capacités quitte à les surestimer. Cela a son utilité pour servir un discours chinois devenu plus conquérant ces dernières années, ce dont témoigne la référence au « rêve chinois » porté par le président Xi Jinping (Sourbès-Verger, 2020). On doit toutefois souligner que le contexte et

des approches sont différents. Dans le domaine militaire, la modernisation de l'armée chinoise ne permet pas encore un usage intégré des capacités spatiales qui sont elles-mêmes loin derrière, numériquement et technologiquement, des moyens américains³². Quant à la création, en 2017, de Forces de soutien stratégique, elle s'effectue dans la foulée de la réforme de l'Armée populaire de libération (APL) et acte la modernisation des compétences autour du spatial mais aussi du cyber et de l'électronique. Dans le domaine civil, le volet spatial des Routes de la Soie, dit corridor numérique sert à valoriser le système de navigation Beidou dans les pays traversés mais n'a pas et ne peut pas avoir le caractère universaliste du GPS américain bien antérieur. Surtout l'étude du programme montre qu'il s'agit plus d'une volonté de rationalisation a posteriori que d'une démarche volontariste (Sénéchal Perrouault, 2020). Enfin les grands acteurs spatiaux sont encore exclusivement les entreprises d'État. De nouvelles entreprises ont été créées en profitant du cadre juridique nouveau mis en place par le pouvoir central et en s'appuyant sur le soutien des Provinces mais la logique qui les inspire est celle de la commercialisation des produits spatiaux et non le soutien à l'émergence d'acteurs privés qui disposeraient d'une véritable liberté (Sénéchal Perrouault, 2020).

Le principal facteur de changement est indéniablement lié aux effets directs et indirects de l'expansion des entreprises du « New Space » aux Etats-Unis. L'expression est commode en ce qu'elle veut donner à voir une ère, celle d'acteurs privés autonomes avec leurs propres ambitions, qui s'opposerait à celle du spatial ancien, celui de l'affirmation de la puissance des Etats dans l'espace au temps de la Guerre froide. Le représentant le plus connu est Elon Musk, entrepreneur devenu milliardaire grâce au numérique, fondateur de la société Tesla de voitures électriques novatrices et de la société Space-X produisant une gamme originale de lanceurs réutilisables originaux (Falcon) et une constellation de 5000 satellites de télécommunications en 2024 avec un déploiement complet annoncé à plus de 40 000. Le personnage, qui a racheté Twitter rebaptisé X, a une place unique sur la scène médiatique spatiale jouant sur sa situation du plus grand propriétaire de satellites en orbite, la capacité de sa société à transporter des humains dans l'espace et bientôt à assurer la desserte de la Lune. Tout ceci ne représente cependant qu'une étape intermédiaire puisque son ambition explicite est d'installer une colonie sur Mars. Elon Musk condense ainsi le rêve américain de l'entrepreneur audacieux révolutionnant l'industrie spatiale, du pionnier partant à la découverte de l'inconnu pour le transformer sur fonds de supériorité des initiatives privées sur les lourdeurs bureaucratiques. La force de cet imaginaire est d'ailleurs suffisant pour que d'autres s'inscrivent dans des perspectives proches comme Jeff Bezos (Regnaud, Saint-Martin, 2024). Ils n'ont toutefois aucun équivalent, ni en Europe, ni en Chine, et encore moins en Inde ou en Russie. Aux Etats-Unis même, au-delà du pouvoir d'enchantement, leur principale vertu pour la puissance publique est de conforter la supériorité nationale globale (Pasco, 2017).

La puissance spatiale a toujours deux volets : la place dans l'expansion de l'œkoumène hors de la Terre, le plus symbolique, et le rôle dans les activités terrestres. La Lune, son exploration, l'exploitation de ses ressources, l'installation de base, est devenue, depuis les années 2020 le nouvel horizon des activités spatiales. Pour la Chine, l'Europe, le Japon, l'Inde, il s'agit de s'y poser. Pour la Russie, il s'agit d'y revenir, avec des hommes cette fois, en coopération avec la Chine. Pour les Etats-Unis, il s'agit de s'y installer comme chef de file pour en faire un point de départ vers de nouvelles explorations humaines. L'on retrouve ainsi, sous une forme élargie, la place exceptionnelle de notre satellite naturel comme marqueur de la puissance spatiale. La logique banalisée de la dimension commerciale est désormais prise en compte sous l'impulsion des Etats-Unis, ouvrant la voie à des approches de droit international privé en parallèle du droit international public, y compris dans la perspective de droits de propriété sur les ressources lunaires (Guyomarc'h, 2024).

Du côté de la Terre, le cadre de pensée qui tend à se généraliser est celui d'un milieu « contesté, compétitif et congestionné » pour reprendre la formule américaine. L'effet d'entraînement est indéniable avec, par exemple, la création du Commandement de l'Espace en France en 2019 en lien avec l'élaboration d'une stratégie spatiale de défense dont l'objectif est de posséder une capacité de découragement de l'adversaire potentiel pour protéger ses systèmes (Leclerc, 2019). La question aujourd'hui porte donc sur le futur des activités spatiales et de l'exercice de la puissance. Le Traité de droit international de l'espace, établi en 1967, prône le principe des usages pacifiques de l'espace, de la liberté de circulation et de l'interdiction d'appropriation. Si les évolutions des politiques spatiales montrent une banalisation des approches sur le modèle de la puissance terrestre, les conditions d'exercice de la souveraineté dans l'espace restent atypiques (Achilleas, Sourbès-Verger, 2022). Les caractéristiques particulières du milieu, son caractère hostile, les conditions de circulation très contraintes par les lois de la mécanique céleste, l'absence d'équivalents de routes et de comptoirs de commerce, les difficultés techniques inhérentes à des attaques destructrices dans l'espace tracent cependant des limites réelles aux manifestations concrètes d'exercice directe de la puissance dans l'espace.

Bibliographie

ABDUL KALAM, A.P.J., 1999, Wings of Fire, Hyderabad, Universities Press.

ACHILLEAS, P., SOURBES-VERGER, I., 2022, « L'exploitation des ressources de la Lune au cœur de la nouvelle diplomatie américaine », Annuaire français des relations internationales, vol XXIII, (p.739-754)

BALME, S., SOURBES-VERGER, I., 2002, « Politique spatiale et construction de l'Etat en Chine », L'espace, enjeux politiques, Hermes, Paris, CNRS Editions, n° 34, (p.121-134).

BLAMONT, J., 1987, Vénus dévoilée. Voyage autour d'une planète, Paris, Odile Jacob.

BONNET, R., 1992, Les horizons chimériques, Paris, Dunod.

CHERTOK, B., 2005, Rockets and People, NASA History Division.

DAY, D., 2015, Eye in the Sky: The Story of the Corona Spy Satellites, Washington, Smithsonian History of Aviation and Spaceflight .

DICK, S., LAUNIUS, R., 2005, Critical Issues in the History of Spaceflight, Washington, NASA Histories Series.

FACON, I., SOURBES-VERGER, I., 2007, « Le secteur spatial russe, entre protectionnisme et ouverture à l'international », Courrier des Pays de l'Est, n° 1061, (p.47-58).

GAILLARD-SBOROWSKY, F., 2023, Géopolitique de l'espace. A la recherche d'une sécurité spatiale, 2023, Paris, Le Cavalier Bleu.

GEROVITCH, S., 2015, Soviet Space Mythologies, University of Pittsburn Press.

GUYOMARC'H, A., 2024, « Property on space resources: The search for a terminology », Journal of Law, Market and Innovation, vol 2, n°2, (p.71-100).

HUNTRESS, W., MAROV, M., 2011, Soviet Robots in the Solar System: Mission Technologies and Discoveries, Springer Praxis Books.

KRIGE, J., RUSSO, A., SEBESTA, L., 2000, A History of the European Space Agency, 2vol., Nordwijk, ESA SP-1235.

LAUNIUS, R.D., 2003, « Public opinion polls and perceptions of US human spaceflight », Space Policy, vol. 19, p. 163-175.

LECLERC, T., 2019, « Regard sur la position française de défense : de l'analyse juridique d'une stratégie à l'analyse stratégique du droit », Annals of Air and Space Law, XLIV, (p.329-378).

LOGSDON, J.M., 1970, The decision to go to the Moon: project Apollo and the National Interest, Cambridge MA, MIT Press.

LOGSDON, J.M., 2002, « Le leadership américain et l'espace : la recherche de la puissance et de la gloire », L'espace, enjeux politiques, Hermes, Paris, CNRS Editions, n° 34, (p.67-78).

MCCURDY, H.E., 2011 2d edition, Space and the American imagination, Baltimore MA, Johns Hopkins University Press.

MCDUGALL, W., 1985, The Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age, New York, Basic Books.

MACK, P., 1990, Viewing the Earth: The Social Construction of the Landsat Satellite System, Cambridge, the MIT Press.

MAILER, N.M., 2024 (trad fr), Bivouac sur la Lune, Pavillons Poches, Robert Laffont.

MALAVIALLE A.-M., 1998, in Espace et puissance, Paris, Economica (p.133-180).

MANORANJAN RAO, P., SURESH, B. BALAGANGADHARAN, V., 2015 (dir), From Fishing Hamlet to Red Planet ; India's Space Journey, Bangalore, ISRO.

MARTIN, A., 2009, Galileo Chronique d'une politique spatiale européenne annoncée, LexisNexis

MOLTZ, J.C., 2019, « The Changing Dynamics of Twenty-First-Century Space Power, Journal of Strategic Security, vol. 12, n°1, (p. 15-43).

PASCO, X., 1997, La Politique spatiale des Etats-Unis, 1958-1995. Technologie, intérêt national et débat public, Paris, L'Harmattan.

PASCO, X., 2017, Le nouvel âge spatial. De la Guerre Froide au New Space, Paris, CNRS Editions.

RADTKA, C. (dir), 2021, « L'industrie spatiale », Entreprise et histoire, vol.1, n° 102.

RAVILLON, L., 2003, Droit des activités spatiales. Adaptation aux phénomènes de commercialisation et de privatisation, Dijon, CREDIMI.

REGNAULD, I., SAINT-MARTIN, A., 2024, Une histoire de la conquête spatiale. Des fusées nazies aux astrocapitalistes du New Space, Paris, La Fabrique.

SAGDEEV, R., 2010, The making of a Soviet scientist : my Adventures in Nuclear Fusion and Space from Stalin to Star Wars, Hoboken, Jossez-Bass.

SEBESTA, L., 1994, US-European cooperation in space during the sixties, ESA History Study Reports, Noordwijk, ESA Publications Division.

SENECHAL PERROUAULT, L., 2020, « Chinese Commercial Space - A Policies Crossroad », L'espace, la « nouvelle frontière » de la Chine, Mondes chinois, nouvelle Asie, vol. 4, n° 64, ESKA, (p.60-75).

SENECHAL PERROUAULT, L., 2020, Le couloir d'information spatiale des nouvelles routes de la soie : ambitions et réalités, Asia Centre. <https://asiacentre.eu/fr/2020/08/18/le-couloir-dinformation-spatial-des-nouvelles-routes-de-la-soie-ambitions-et-realites/> consulté le 24 avril 2024

SIDDIQI, A.A., 2003, Sputnik and the Soviet Space Challenge, University Press of Florida.

SOURBES-VERGER, I. (dir), 2002, L'espace, enjeux politiques, Hermes, Paris, CNRS Editions, n° 34.

SOURBES-VERGER, I., BOREL, D., 2008, Un empire très céleste, la Chine à la conquête de l'espace, Paris, Dunod.

SOURBES-VERGER, I., 2008, « 50 ans d'espace dans les relations internationales », in Sur, S., Roche, J.-J., Annuaire français des relations internationales, Bruylant, 2008, (p.889-904.)

SOURBES-VERGER, I., 2010, L'espace en jeu, L'information géographique, Paris, Armand Colin, Vol. 74, n° 2

SOURBES-VERGER, I., 2016, « Ambitions spatiales et ambitions stratégiques : permanences et changements », *Enjeux stratégiques au Moyen-Orient, Nouveaux espaces stratégiques*, Revue Défense Nationale, n° 791, juin 2016, (p.87-99).

SOURBES-VERGER, I., 2020, « La Chine dans l'espace et le rêve chinois », L'espace, la « nouvelle frontière » de la Chine, Mondes chinois, nouvelle Asie, vol. 4, n° 64, ESKA, (p.16-35).

SOURBES-VERGER, I., 2021, « La place de l'Europe au sein des puissances spatiales » in Bories, C., Rapp, L., L'espace extra-atmosphérique et le droit international, Paris, Editions A. Pedone, (p.251-264).

SOURBES-VERGER, I., 2022, « Nouvelle frontière, l'espace extra-atmosphérique au XX^e siècle », in Beaupré, N., Louis, F., Histoire mondiale du XX^e siècle, Paris, PUF, (p.633-663).

SOURBES-VERGER, I., 2023, « Outer Space, War and Sovereignty », in Daho, Richard, Y., War, State and Sovereignty - Interdisciplinary Challenges and Perspectives for the Social Sciences, palgrave macmillan, (p.209-230).

SOURBES-VERGER, I., 2023, Géopolitique du monde spatial, Paris, Eyrolles.

STARES, P.B., 1987, Space and the National Interest, Brookings Institution Press.

VERGER, F., SOURBES-VERGER, I., GHIRARDI, R., 2002, L'espace nouveau territoire, atlas des satellites et des politiques spatiales, Paris, Belin.

Notes

1 President John F. Kennedy, "Special Message to Congress on Urgent National Needs", President John F. Kennedy Presidential Library and Museum, May 25, 1961.

2 Le thème d'une Amérique « grande perdante dans la course à l'espace et aux missiles » est au cœur de la campagne du candidat Kennedy face à l'administration Eisenhower en 1958

3 Les discussions pour savoir si Armstrong a parlé d'un petit pour un homme ou pour l'homme passionné encore. Il a été décidé de reprendre la formulation de la NASA

4 Webb JE. White House Meeting Tape 63, John Fitzgerald Kennedy Library, Boston, MA, November 21, 1962. Cet enregistrement est devenu accessible au public en août 2001 : <https://www.jfklibrary.org/about-us/news-and-press/press-releases/jfk-library-releases-white-house-tape-on-space-race>.

5 Voir par exemple le film « Les figures de l'ombre », réalisé en 2016 par Theodore Melfi

6 Les évaluations tablent autour de 20 % de la population mondiale mais le public est très inégalement distribué, compte-tenu du sous-développement des pays du Tiers monde dont seules les élites peuvent s'associer à l'événement, tandis que la Chine est en pleine Révolution culturelle.

7 La volonté de donner à voir l'exploit d'Apollo-11 est explicite dès la décision du programme par le Président Kennedy ce qui conduit à l'installation de satellites relais en orbite géostationnaire pour permettre une diffusion simultanée sur l'ensemble du globe. Ces satellites forment le système Intelsat de télécommunications mondiales fondé en 1964 et opérationnel à partir de 1966 avec une compétence exclusive des Etats-Unis.

8 <https://www.nasa.gov/history/alsj/a11/a11memorials.html> Apollo-11 Memorial items https://en.wikisource.org/wiki/Apollo_11_Goodwill_Messages, dernière mise à jour 13 octobre 2019, consulté le 24 avril 2024. On peut noter au passage que certains pays sollicités pour écrire un message n'ont pas répondu dont la France, peut-être parce que les délais étaient très courts (1 mois), mais que pour certains, ce sont les représentants en exil qui ont été privilégiés comme Taïwan à la place de la République populaire de Chine.

9 Les exemples sont multiples dans les annales indépendamment de toute date anniversaire d'Apollo.

10 La France devient bien en 1965 la 3^e puissance spatiale en mettant en orbite son propre satellite depuis Hammaguir mais le choix s'impose rapidement de privilégier la coopération européenne, le premier lanceur Ariane n'effectuant son vol d'essai qu'en 1979.

11 Voir Buedeler W., L'Année Géophysique Internationale, L'UNESCO et son programme, XV, 1957, p.35, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000128395>.

12 Les lanceurs spatiaux se distinguent des missiles par l'existence d'un dernier étage capable d'assurer la satellisation d'un objet en l'éjectant à une altitude de 150 km au moins avec une vitesse suffisante (8 km/seconde) pour le mettre en orbite autour de la Terre.

13 Le communiqué de l'agence de presse Tass fait référence au programme scientifique et encourage le public à observer le satellite dont il donne aussi les longueurs d'onde pour capter son signal.

14 Les accords d'Evian (1962) ouvrant la voie à l'indépendance de l'Algérie prévoient une utilisation de cette base dans le Sahara occidental pour 5 ans supplémentaires.

15 5 tirs de Woomera et 5 échecs en configuration complète de 1967 à 1971.

16 Courteix, S., 1980, Les satellites de télévision directe : un programme commun franco-allemand, AFDI, 1980/6/, p.648-660 https://www.persee.fr/doc/afdi_0066-3085_1980_num_26_1_2410.

17 La volonté de drainer les compétences au profit des Etats-Unis sera un reproche explicite fait par le ministre des Affaires étrangères soviétique S. Gromyko lors de sa visite à Paris en avril 1965, au cours de laquelle il propose une alliance technologique avec l'Europe. Seule la France formalisera un accord de coopération spatiale en 1966.

18 A la fin des années 1980, la NASA coopère avec une centaine de pays et organisations mais dans des conditions différentes, les participants étant désormais considérés comme des partenaires, le plus souvent quand même juniors.

19 C'est ainsi qu'au-delà des alliés traditionnels, pays européens, Canada, Japon, la NASA accueille aussi des Iraniens dans le cadre des relations de coopération avec le Shah et de la modernisation du pays.

20 Les pays non alignés sont partie intégrante de ce schéma, ne serait-ce qu'en tentant d'y échapper.

21 <https://www.nasa.gov/history/50-years-ago-the-united-states-and-the-soviet-union-sign-a-space-cooperation-agreement/> et assure un leadership réel dans le domaine des applications et de la science.

22 <https://nsarchive.gwu.edu/sites/default/files/documents/20699652/document-7-19930615-presidents-decision-meeting-on-iss.pdf> consulté le 24 avril 2024.

23 <https://history.defense.gov/Portals/70/Documents/nss/nss1996.pdf?ver=4f8rCrLnHIA-H0itYUp6A%3d%3d> consulté le 24 avril 2024.

24 https://ocw.mit.edu/courses/16-891j-space-policy-seminar-spring-2003/7014725c53e69dc9f404b2a3d21c5374_dodspacepol.pdf consulté le 24 avril 2024.

25 Les missions réalisées en application du nouveau slogan « Faster, smaller, cheaper » connaîtront un succès inégal selon la complexité de la mission mais elles favoriseront une démarche plus ouverte à l'innovation.

26 Pasco, X. 2006, A European Approach to Space Security, Cambridge MA, American Academy of Arts & Science, <https://www.amacad.org/sites/default/files/publication/downloads/spaceEurope.pdf> consulté le 24 avril 2024.

27 <https://stage.tksc.jaxa.jp/spacelaw/country/japan/27A-1.E.pdf>.

28 Le total des dépenses publiques réalisées par les Etats-Unis dans l'espace (60 milliards de dollars courants) représente près de 3 fois le total des dépenses réalisées par les autres puissances spatiales en 2010.

29 On évoque souvent à ce propos la loi de Moore, une loi empirique qui rend compte du doublement des capacités de l'informatique et l'électronique tous les deux ans.

30 http://english.www.gov.cn/archive/white_paper/2016/12/28/content_281475527159496.htm consulté le 24 avril 2024.

31 <https://www.youtube.com/watch?v=6LjUn8KMFY> consulté le 24 avril 2024.

32 Il est intéressant de noter que les rapports américains insistent sur la menace chinoise dans l'espace la situent quand même toujours à un horizon plus ou moins lointain.

Résumés

La qualification de puissance spatiale est de plus en plus utilisée dans les médias, à propos d'Etats réalisant des missions à fort pouvoir symbolique, même s'ils ne possèdent pas de moyens indépendants. Leur image profite ainsi d'un effet d'aubaine, très sensible dans le cas de l'exploration lunaire ou martienne. En fait, appliquée rigoureusement, l'expression est réservée aux seuls Etats disposant de capacités souveraines d'accès à l'espace et de maîtrise de leurs satellites qui composent le « club spatial ».

L'usage élargi de la notion va de pair avec la médiatisation du « New Space », qui redéfinit aux Etats-Unis, depuis les années 2010, les rapports entre puissance publique et acteurs privés. D'où la diffusion d'un discours occidental sur une démocratisation des activités spatiales devenues plus accessibles. Cependant la rupture du lien fondamental avec les conditions de la souveraineté qui reste la base de la puissance spatiale réduit fortement les chances de développement d'un tel modèle.

L'histoire de l'acquisition et des développements de la puissance spatiale reflète indéniablement les évolutions des équilibres géopolitiques dans lesquelles celle-ci s'inscrit et qu'elle contribue à entretenir. Ainsi la Guerre froide détermine les fondamentaux de la puissance spatiale, dans ses relations à la puissance nucléaire (partie 1). La diversification des usages de l'espace renforce la place des Etats-Unis dans un club spatial hétérogène (partie 2). L'évolution des rapports de pouvoir sur Terre et les caractéristiques particulières des acteurs jouent directement sur les déclinaisons de la puissance spatiale des années 1991-2015 marquée par des préoccupations de sécurité et l'ouverture au secteur privé (partie 3). Il faut cependant se méfier des affirmations devenues banales sur le caractère inéluctable de conflits armés dans l'espace, l'émancipation d'acteurs privés de la tutelle des Etats ou de prochaines disputes territoriales sur la Lune, car elles font fi des contraintes propres d'un milieu physique atypique.

The term "space power" is increasingly used in the media to describe States that carry out missions with strong symbolic power, even if they do not possess independent resources. Their image thus benefits from a windfall effect, particularly noticeable in the case of Lunar or Martian exploration. In fact, applied strictly, the expression is reserved for those States with sovereign capabilities for access to space and control of their satellites, who make up the "space club".

The wider use of the term goes hand in hand with the media coverage of the "New Space" movement, which has been redefining the relationship between public power and private players in the United States since the 2010s. Hence the spread of a Western discourse on the democratization of space activities, which are now more accessible. However, the breaking of the fundamental link with the conditions of sovereignty that remains the basis of space power greatly reduces the chances of such a model developing.

The history of the acquisition and development of space power undeniably reflects the changing geopolitical balances in which it is embedded and which it helps to maintain. The Cold War determined the fundamentals of space power, in its relationship with nuclear power (part 1). The diversification of space uses reinforces the United States' place in a heterogeneous space club (part 2). The evolution of power relationships on Earth and the specific characteristics of the players involved have a direct impact on the various forms of space power in the years 1991-2015, marked by security concerns and openness to the private sector (part 3). However, we must be wary of now commonplace assertions about the inevitability of armed conflict in space, the emancipation of private players from the tutelage of States or forthcoming territorial disputes on the Moon, as they ignore the specific constraints of an atypical physical environment.

Index

Mots-clés : puissance spatiale, géopolitique de l'espace, club spatial, politiques spatiales nationales, New Space, milieu extra-atmosphérique, Lune, conflits dans l'espace

Keywords : Space power, space geopolitics, space club, national space policies, New Space, outer space environment, Moon, war on outer space

Auteur

Isabelle Sourbès-Verger

Nouveaux enjeux de sécurité spatiale

Emerging Challenges in Space Security

Florence Gaillard-Sborowsky

Introduction

L'espace extra-atmosphérique, du point de vue de l'exploitation humaine, est singulier à bien des égards, qu'il s'agisse des contraintes physiques à dépasser, des ressources nécessaires à son exploration et son utilisation ou de l'échiquier géopolitique qu'il incarne (Verger, 2002). Vitrine et enjeu de puissance militaire, politique, technologique, scientifique, économique et idéologique depuis les débuts de son occupation – le contexte et les conséquences du lancement du premier satellite, Sputnik, soviétique, l'illustre parfaitement (Goldsen, 1963, p. 6 ; Gaillard-Sborowsky, 2002) – les nations ont toujours rivalisé pour affirmer leur présence et leur influence dans l'espace avec des logiques souvent en tension entre intérêts stratégiques et ambitions scientifiques (Sorbès-Verger, 2022). Cependant, si, pendant la guerre froide, les activités spatiales étaient largement dominées par les États, principalement les États-Unis et l'Union soviétique, les années 90 voient une libéralisation du secteur qui s'enclenche à la suite de la déréglementation des télécommunications et une participation croissante du secteur privé.

Dans le courant des années 2000, les entreprises privées deviennent des partenaires clés dans le développement et l'exploitation de technologies spatiales avec des entreprises comme SpaceX, fondée en 2002 par Elon Musk, qui émergent en tant qu'acteurs majeurs avec des objectifs ambitieux. La participation active de ces entreprises privées a contribué à stimuler la compétition, à réduire les coûts d'accès à l'espace, et à accélérer le développement de technologies innovantes mais a également profondément modifié les ressorts de l'initiative en matière spatiale. Les années 2010, marquées par la vision quasi téléologique de grands entrepreneurs du spatial comme Elon Musk ou Jeff Bezos (Pasco, 2017, p. 102), reflètent ainsi la part croissante des initiatives privées dans les politiques nationales, principalement aux États-Unis, avec la volonté de créer une véritable économie spatiale, qu'il reste encore à définir mais dont les perspectives telles qu'elles sont annoncées paraissent vertigineuses et de fait intensifient la course à la colonisation spatiale et à l'exploration humaine au-delà de l'orbite terrestre basse.

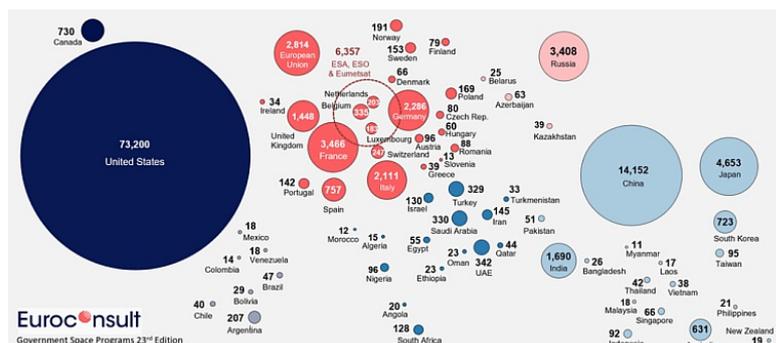
Les caractéristiques et objectifs de l'occupation de l'espace extra-atmosphérique ont donc profondément évolué depuis 1957 et, si les aspects traditionnels restent présents, de nouvelles modalités ont vu le jour (méga-constellations, « arsenalisation »¹ par exemple) parallèlement à l'ambition de nouveaux usages (exploitation des ressources spatiales, présence plus pérenne de l'humain, fabrication dans l'espace, etc.) qui transforment son écosystème et bousculent les schèmes classiques d'une géopolitique de l'espace, qui, au XX^e siècle, en raison d'un nombre limité d'acteurs, s'était appliquée à traiter de la manière dont les États agissent dans l'espace pour accroître leur influence sur la scène internationale. Les dynamiques géopolitiques se reflètent dorénavant dans de grandes questions transversales comme la guerre dans l'espace, l'élaboration d'une gouvernance et d'un cadre juridique internationaux appropriés (Gaillard-Sborowsky, 2023). Toutes convergent dans la notion complexe de sécurité spatiale, enjeu majeur de relations internationales dans l'espace reposant sur des rivalités et ambitions bien terrestres.

Dans un environnement stratégique en mutation, rechercher à sécuriser l'espace extra-atmosphérique est ainsi l'objet des discussions internationales actuelles qui tentent de prendre la mesure des changements tout en essayant de continuer à s'appuyer sur l'outil qu'est le droit international, pilier de la pratique diplomatique en la matière depuis les débuts des activités spatiales. Quelles sont dès lors les nouvelles modalités d'usage qu'il faut prendre en compte ?

Un écosystème en transformation accélérée

Le paysage qui se dessine aujourd'hui dans le secteur spatial semble être celui des records. Depuis le milieu des années 2010, chaque année (exceptée l'année 2020 pour des raisons évidentes de pandémie) se conclue avec de grands titres de la presse spécialisée sur le nombre sans précédent de lancements et de satellites en orbites. À titre d'exemple, en 2021, plus de satellites avaient été lancés que durant toute la décennie précédente (OCDE, 2022). L'année 2023 ne fait pas exception avec 212 lancements réussis et la mise en orbite de 2911 objets spatiaux quand en 2016 on comptait « seulement » 85 lancements pour 237 mises en orbites de satellites (McDowell, 2023). Une centaine de pays sont propriétaires de satellites (OCDE, 2023) et on comptabilise plus de 7560 satellites opérationnels en orbite (UCS, 2024). 2023 est également l'année où les budgets (civils et militaires, voir Figure 1) gouvernementaux n'ont jamais été aussi importants, en augmentation de 15 % par rapport à 2022, pour un montant total mondial de 117 milliards de dollars (Euroconsult, 2023).

Figure 1 : Budgets spatiaux mondiaux



Source : Euroconsult, « Government Space Programs », édition 2023, <https://www.euroconsult-ec.com/press-release/new-historic-high-for-government-space-spending-mostly-driven-by-defense-expenditures/>

Parallèlement les effets d'annonces sur les potentialités du secteur spatial pour les entrepreneurs et les investissements privés se multiplient à l'exemple de celui de l'agence spatiale britannique qui annonce 2024 comme étant « l'année de l'entrepreneur spatial », arguant du fait que les « investissements privés ont connu un taux de croissance annuel stupéfiant de 21 % » (UK Space Agency blog, 2024), dans un contexte où Bloomberg annonce que les dépenses spatiales mondiales devraient augmenter de 41 % au cours des cinq prochaines années (Bloomberg News, 2023).

Ces logiques reposent en grande partie sur les perspectives économiques associées au « NewSpace » qui promet l'ouverture d'une nouvelle ère de développement des activités spatiales bousculant le cadre traditionnel de l'exploitation de l'espace, principalement régi par les gouvernements et les grandes agences spatiales en partenariats avec les grandes entreprises du secteur. Tenter de définir ce qu'est le phénomène NewSpace reste périlleux à bien des égards, entre « mot-valise » (Saint-Martin, 2019) et slogan publicitaire « l'accès à l'espace pour tous », ce qui est certain en revanche c'est que l'on voit depuis l'orée des années 2000 une transformation des modèles commerciaux traditionnels associés à l'espace avec l'émergence de nombreuses entreprises privées innovantes ; le XX^e siècle pourrait bien être marqué par une compétition dans l'espace financée par des intérêts privés (George, 2019).

Une privatisation tous azimuts

Ce changement de paradigme dans l'occupation de l'espace a été, comme souvent en matière spatiale, initié aux États-Unis, mais ce « surgissement » des acteurs privés, ne provenant pas la plupart du temps du tissu industriel spatial traditionnel, bien qu'apparu aux yeux des observateurs comme assez éruptif, repose sur un terrain préparé depuis le milieu des années 80, avec le tournant majeur du « Commercial Space Launch Act » de 1984 sous Reagan. Cette législation clef s'appuie sur les directives du 4 juillet 1982 (National Security Decision Directive 42, 1982) « Politique spatiale nationale », où Ronald Reagan érige l'expansion de la participation du secteur privé américain aux activités spatiales civiles comme objectif national, et celles du « Commercialization of Expendable Launch Vehicles » du 16 mai 1983 (NSDD 94). Elle simplifie les procédures administratives et réduit les barrières réglementaires pour les entreprises privées qui souhaitent lancer des véhicules spatiaux commerciaux. L'objectif clairement affiché est de favoriser le développement et la croissance d'un secteur spatial commercial. Reagan va encore plus loin en 1988 en publiant le 11 février 1988, la « Directive présidentielle sur la politique spatiale nationale », qui demande aux agences gouvernementales américaines d'acheter des services de lancement auprès de sociétés commerciales.

Mettant ainsi en place les bases d'une libéralisation plus poussée, ce contexte est également enrichi dans les années 90 par le mantra de la NASA à l'ère Goldin du « smaller, faster, cheaper » (McCurdy, 2001) qui introduit déjà certains des vocables que l'on retrouvera dans les discours des entrepreneurs NewSpace (petit, micro, nano, pico, lowcost, etc.). La tendance au développement de systèmes plus souples, plus petits et moins coûteux dans un cadre privé n'est donc pas nouvelle en soi (projets des années 90 tels Skybridge, ou Teledesic) mais cette fois les progrès technologiques sont au rendez-vous en particulier dans les domaines des technologies de l'information, de la miniaturisation des composants électroniques, et des matériaux légers. Ces progrès facilitent la conception de véhicules spatiaux plus petits, plus efficaces et plus abordables – il est désormais possible d'acheter son satellite en kit, comme on fait ses courses sur internet – et se conjuguent avec les approches novatrices des entreprises du NewSpace. Elles mélangent l'utilisation de nouvelles technologies, de composants sur étagères ou de technologies déjà éprouvées et à bas coût avec une mise en œuvre de méthodes de production plus efficaces (génération d'économies d'échelle sur des programmes récurrents de méga-constellations par exemple). L'exercice de caractérisation de l'innovation (figure 2) dans ce secteur se doit donc d'envisager toutes les catégories et si certains faits d'armes comme la réutilisabilité d'un lanceur comme le Falcon 9 de SpaceX ont largement occupé la place médiatique, l'importance du modèle commercial et organisationnel adopté ne doit pas être sous-estimée.

Figure 2 : les catégories d'innovation

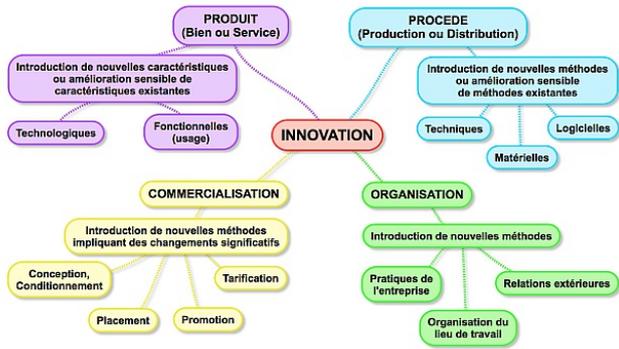


Figure construite à partir des définitions du Manuel d'Oslo (OCDE, 2005)

Concernant ce dernier, cela pourrait être amusant si cela n'était pas si tragique de remarquer que l'introduction de nouvelles méthodes de travail s'apparenterait plus du point de vue des employés à une régression qu'à une innovation. Manque de formation, surmenage et négligence régulière des procédures de sécurité pour respecter les délais serrés sont dénoncés notamment chez SpaceX ; ces « négligences » s'accompagneraient d'un relâchement majeur en matière de surveillance de l'application des réglementations des principales agences fédérales qui en ont la charge, NASA, FAA, OSHA² (Reuters, 2023).

Illustration d'une économie néo-libérale, ce *NewSpace* qui, pour certains observateurs s'apparente à une « conversion idéologique de l'espace en terrain de jeu et de profit pour le capitalisme technologique » (Saint-Martin, 2019), est sans aucun doute un acteur majeur des évolutions en cours, mais il est aussi et avant tout le résultat de la politique des États (Gaillard-Sborowsky, Sourbès-Verger, Tortora, 2018). Que serait aujourd'hui Space X sans les contrats gouvernementaux américains, notamment les 11,8 milliards de dollars que la NASA a déclaré avoir versé à SpaceX à ce jour (Reuters, 2023) notamment dans le cadre du programme *Commercial Orbital Transportation Services* (COTS, 2006-2013) qui lui permettra de développer Dragon et Falcon 9 ?

Ces nouveaux acteurs sont ainsi issus d'un autre monde, très souvent celui du numérique et des investisseurs privés mettant en avant leur philosophie d'entrepreneurs, affichant des ambitions spatiales, indépendamment de celles des acteurs institutionnels (Sourbès-Verger, 2023). Symbolisés par le groupe mythique des GAFA, auréolés de leur succès économique et considérés comme le symbole de l'innovation, ils sont porteurs de projets spatiaux destinés à engendrer de nouveaux modèles économiques aux promesses de retour sur investissement vertigineuses. Miroir aux alouettes, bulles spéculatives, les controverses ne manquent pas autour de ce phénomène *NewSpace* qui reste de fait très dépendant de la commande publique et dans un contexte où le degré de commercialisation de l'espace, entendu comme la possibilité d'alimenter un écosystème commercial, au-delà des chiffres prospectifs des sociétés de conseils, reste indéterminé. Il n'en demeure pas moins que le marché des applications spatiales voit une explosion du nombre de start-ups. Elles proposent toute une gamme de services qui va des plus sérieux (télé-détection agricole, surveillance des frontières, etc.) au plus surprenant comme l'envoi de votre ADN sur la Lune (Celestis DNA ou encore Life Ship) afin que vous deveniez une « partie de l'avenir de l'humanité au-delà de la Terre » (LifeShip) ou de transcender votre mort par un vol spatial commémoratif qui envoie votre ADN dans l'espace après votre décès ou encore de partager pour les vivants une « migration interstellaire » et de « voler seul ou avec votre famille et vos amis pour un voyage personnel parmi les étoiles » (Celestis). Si le nombre exact de start-ups dans le secteur spatial évolue constamment en fonction des nouvelles créations d'entreprises et de l'évolution du paysage industriel, un ordre d'idée peut être donné par quelques chiffres. Entre 2000 et 2016 le nombre de start-ups a été multiplié de 157 % (Arthur D. Little, 2019) et entre 2016 et 2023 de plus de 256 % (SpaceTech Database, 2024). Cette tendance est mondiale, comme en Inde qui comptait en 2023 190 start-ups spatiales, soit deux fois plus qu'en 2022 (The Economic Times, 2023).

Le domaine où les initiatives des acteurs privés ont sûrement été le plus médiatisées est certainement celui des petits satellites et des lanceurs. L'avènement des méga-constellations de satellites en orbite basse terrestre a conduit à une multiplication impressionnante des satellites annoncés. Ainsi, 18 constellations sont en cours de développement pour un total de 537 267 satellites planifiés (McDowell, 2024). Selon Euroconsult, cabinet de conseil en stratégie et d'intelligence économique spécialisé dans le secteur spatial, environ 26 104 petits satellites (satellites de moins de 500 kg) seront lancés entre 2023 et 2032. 85 % d'entre eux seront le fait des constellations dotées notamment Starlink (SpaceX) et GuoWang (China SatNet) qui représenteront à elles seules près des deux tiers de ces petits satellites mis en orbite au cours de la prochaine décennie (Euroconsult, 2023). Si l'on s'intéresse aux demandes déposées auprès de l'Union internationale des télécommunications (UIT), instance de coordination des fréquences, plus de 300 demandes de constellations ont été déposées entre 2017 et 2022 pour un total d'un million de satellites (Falle, Wright, Boley & Byers, 2023). Le Rwanda a ainsi déposé une demande, pour la société E-Space, pour plus de 330 000 satellites (constellation Cinnamon) quand la France, toujours pour E-Space a requis des allocations orbitales pour une constellation de 116 640 satellites (constellation Semaphore C). S'il est certain que toutes ne verront pas le jour, ne serait-ce parce que l'offre risque d'être supérieure à la demande et aux besoins réels avec une rentabilité qui ne sera pas au rendez-vous, et que cela témoigne avant tout d'une spéculation en cours sur les fréquences et les positions orbitales (Régnaud, 2023), ces perspectives alimentent une dynamique d'attraction des investisseurs privés que l'on retrouve également dans le domaine des lanceurs, notamment des petits lanceurs censés répondre à la demande de lancement de tous ces petits satellites (business plan affiché). Cependant nos travaux dans ce domaine montrent que les exemples très anciens de développement de types de lanceurs associés à des types de satellites pour faciliter l'intégration et la rentabilité ne font plus sens même si les économies réalisées étaient significatives. Nous ne pouvons alors qu'être interpellé par la multiplication des programmes en cours de développement ou en projet, particulièrement dans la catégorie des « petits » lanceurs (inférieurs à 2 tonnes de capacités d'export). Fin 2022, ce n'était pas moins de 58 petits lanceurs qui étaient identifiés comme en cours de développement et 41 en projets, avec 34 États affichant des ambitions plus ou moins crédibles à courte échéance. Le nombre élevé de ces projets surprend, sachant que le marché commercial est déjà largement pris par les lanceurs moyens et gros existants, si bien que le créneau visé apparaît relativement étroit, que la probabilité de faire face à moyen terme à une offre supérieure à la demande n'est pas négligeable et que le niveau de risque de développement et d'exploitation est important.

Entre concurrence, compétition et rivalités

L'enjeu n'est alors peut-être plus de regarder le secteur spatial comme une fin en soi mais comme participant d'une logique plus globale de compétition, caractéristique majeure de la scène internationale contemporaine, dans un monde défini comme VUCA (*volatile, uncertain, complex, ambiguous*). La concurrence qui semble régner peut alors s'envisager à l'aune d'un continuum, où l'industrie spatiale et l'espace sont perçus comme une source de croissance économique, levier de puissance majeur, croissance qui reposerait sur la concurrence car facteur d'innovation, elle-même facteur et moteur de compétitivité et donc pilier de croissance économique.

Le *NewSpace* serait alors un élément participatif de ce cercle « vertueux », quel que soit son devenir, et serait, dans tous les cas, une stratégie gagnante, quelles qu'en soient les finalités, « devenant un investissement auquel les États consentent, au profit de leur avenir technologique, leur développement industriel et leurs intérêts stratégiques » (Martin, 2021). L'exemple américain est à ce titre frappant. Dans un contexte où la Chine est vue comme le principal compétiteur des États-Unis, la question de la compétitivité du secteur spatial américain est un enjeu majeur. Les acteurs privés, au-delà des effets sur la politique spatiale américaine, deviennent des outils de géo-économie illustrant l'ambition des États-Unis d'acquiescer la suprématie technologique et commerciale. La concurrence nationale existante est alors un facteur positif pour les États-Unis dans la mesure où elle favorise, au-delà de la réduction des coûts et l'accessibilité à l'espace, l'innovation et par suite la croissance économique (OCDE, 2014). Le progrès technologique susceptible d'être engendré par cette concurrence participe dès lors d'une techno-géopolitique, entendue comme l'interaction entre la technologie et la géopolitique (Sultan 2023), catalyseur de puissance, favorisant l'émergence de nouveaux avantages stratégiques pouvant remodeler les dynamiques mondiales à l'aune des intérêts américains. Dans le même ordre d'idée, la multiplication des start-ups accroît les sources de connaissances et de compétences techniques quand la géopolitique de la connaissance met en évidence qu'elle est devenue une ressource stratégique essentielle. Enfin, outil de soft power, les États-Unis utilisent également les entreprises *NewSpace* pour étendre leur aire d'influence. Les récents accords entre les États-Unis et le Royaume-Uni (2022) puis avec l'Australie (2023) pour autoriser les lanceurs américains à utiliser les *spaceports* anglais et australiens dans le cadre de l'alliance AUKUS témoignent cette approche. Renforçant la position géopolitique des États-Unis, du Royaume-Uni et de l'Australie dans la région indopacifique, l'impact visé concerne les relations avec d'autres acteurs de la région, notamment la Chine. Si l'on voit bien l'intérêt du Royaume-Uni et de l'Australie à apparaître comme des États de lancement (prestige, image, etc.), les États-Unis peuvent quant à eux capter ainsi une partie du marché régional qui pourrait être séduite par une offre de « proximité ».

Les ambitions nationales s'inscriraient alors, dans des schémas « géopolitiques » plus larges – géo-économie, géo-technologie et géopolitique de la connaissance – auquel le nouveau paradigme techno-économique porté par le *NewSpace* répondrait, favorisant le passage du secteur spatial d'une logique applicative à une logique de service et capitalisant sur un fort coefficient multiplicateur de l'innovation spatiale au profit de l'économie globale (Martin, 2021). Les développements, récents, aux Émirats arabes unis illustrent ces dynamiques. La politique spatiale nationale y œuvre à la diversification économique, devient l'une des pierres angulaires d'une stratégie nationale cherchant à démontrer des compétences et l'efficacité du royaume en matière de modernisation, sa légitimité dans ses aspirations de leader régional et la réalité de ses ambitions sur la scène internationale. L'un des objectifs prioritaires de leur agence spatiale est bien de maximiser les retombées potentielles de l'utilisation de l'espace, qu'elles soient économiques, sociales, sécuritaires, environnementales ou politiques. Exploiter l'espace doit être un catalyseur pour appuyer leur agenda en matière de science, technologie, éducation avec l'ambition d'être le hub de la région pour les aspects commerciaux du spatial (Gaillard-Sborowsky, 2021), comme en témoigne tant leur loi spatiale de 2019 que l'établissement d'un tribunal pour les affaires spatiales commerciales à Dubaï (*Courts of Space*).

Ces nouveaux États, « entrants » dans le spatial, et l'on pourrait également citer la situation du continent africain où plus d'une vingtaine de pays ont créé des agences spatiales soutenues par des lois nationales ou disposent de centres de recherche qui coordonnent les activités spatiales nationales, ont une volonté d'accéder au spatial qui tient à toute une gamme de raisons : souci global d'indépendance, autonomie obligatoire par rapport à certains besoins (tels que les missions de reconnaissance), poursuite d'une compétence nationale, contribution au développement par la maîtrise d'infrastructures de télécommunication, d'observation, de gestion des risques naturels. Les argumentaires se déclinent tous autour de quelques grands axes : l'idée que la compétence spatiale participe directement de la sécurité nationale au travers des programmes de surveillance de la Terre en particulier ; l'image que le pays veut donner de lui-même à des fins aussi bien de fierté nationale que d'influence à différentes échelles régionale et internationale ; la maîtrise de technologies considérées comme indispensables à l'indépendance nationale ; l'intérêt de la recherche et développement dans le domaine spatial afin de favoriser l'innovation ; l'apport des outils spatiaux au développement économique du pays et au rattrapage de la modernité dans un domaine de haute technologie, notamment pour les pays émergents.

La multiplication des acteurs, nationaux et privés, s'est ainsi appuyée sur des développements technologiques qui ont contribué à ce que l'on pense différemment l'occupation de l'espace. Ces conditions nouvelles ont conduit à une évolution des modes de pensée, valable aussi bien pour les acteurs privés que pour les institutions publiques et les États, et à la multiplication et à la diversification des projets d'utilisation de l'espace. La densification, en cours, de l'occupation de l'espace en raison notamment des constellations de satellites, n'est pas le seul changement notable dans les usages de l'espace.

De nouvelles dynamiques d'usage de l'espace

Alors que traditionnellement occupé par des satellites pour des enjeux terrestres, qu'ils soient militaires (conduite des opérations terrestres) ou civils (politique de développement, télécommunications, navigation/localisation, etc.), l'espace devient ainsi le lieu de programmes et de projets d'opérations à finalités spatiales (base lunaire et présence humaine plus pérenne, programmes de services en orbites et satellites manœuvrant, exploitation des ressources spatiales, capacités de production industrielle in situ). Les arguments avancés tiennent tout autant de la science (exploration spatiale lointaine) que de l'économie (développement d'une économie cis-lunaire) et de la politique (compétitions, rivalités). L'approche politique actuelle des pays concernés, au premier rang desquels se trouvent les États-Unis, semble s'inscrire dans une démarche de « premier arrivé, premier servi ». Celle-ci se fonde sur une perception de l'espace et de ses potentialités qui doit pourtant s'accommoder de la singularité particulière du milieu spatial. Les technologies développées doivent composer avec l'exposition aux rayonnements solaires et cosmiques, avec des variations de température importantes en l'absence d'atmosphère pour réguler la chaleur, avec les risques que représentent les micrométéorites et les débris spatiaux, quand la présence humaine est au défi de l'absence d'atmosphère, des rayonnements également, des effets de la microgravité sur les corps, de l'isolement, du confinement et de la durée des missions en regard par exemple des difficultés d'approvisionnement en nourriture, eau et air.

Le point d'orgue de tous ces projets est certainement l'ambition américaine de développer une économie cis-lunaire dans un contexte où la Chine est perçue comme le principal compétiteur et rival, la majorité des experts américains s'attachant à soutenir cette perception d'une menace chinoise devenue quasiment une doxa. Ces experts tendent à interpréter chaque avancée chinoise comme une volonté de contestation des capacités américaines.

Ces évolutions de l'occupation de l'espace, pour certaines aux importantes promesses financières – selon certains analystes l'extraction minière pourrait générer une industrie de plusieurs centaines de milliards de dollars – au point que certains parlent du système terre-lune comme d'une future banquière industrielle, ne doivent cependant pas cacher une réalité beaucoup plus prosaïque. Les défis sont importants tant, et pour ne citer qu'eux, les challenges technologiques sont considérables, les ratios coûts-bénéfices inconnus et des ressources qui sont probables mais dont la partie économiquement exploitable n'est pas mesurée.

Nonobstant ces réserves, ces nouvelles modalités d'occupation de l'espace, l'extension du champ d'application des technologies spatiales, la transformation de l'écosystème spatial, en modifiant la façon d'appréhender et de penser l'occupation de l'espace, ont généré de nouvelles représentations des menaces et des risques susceptibles de peser sur les activités spatiales. Conduisant à une demande accrue de sécurisation, les nouveaux enjeux de la sécurité spatiale sont désormais tant affaire de durabilité de l'environnement spatial que de prévention d'une possible guerre dans l'espace, tandis que les conditions mêmes d'une sécurité spatiale sont questionnées en regard des difficultés de gouvernance collective.

La difficile recherche d'une sécurité spatiale

La notion de sécurité spatiale a progressivement évolué en fonction des différents contextes stratégiques caractérisant l'exploitation de l'espace extra-atmosphérique, mais l'évaluation des menaces ou des risques a toujours été sous-tendue par autant de considérations de politiques nationales, d'intérêts commerciaux et économiques, industriels, militaires et symboliques qu'il y a d'acteurs. La difficulté est alors de trouver des dénominateurs communs pour élaborer des outils de sécurisation de l'espace, dans un contexte où les mesures, perceptions et représentations peuvent diverger grandement et la sécurité des uns pouvant être la menace des autres. Les positions russes, chinoises ou américaines en témoignent, les États-Unis justifiant le surenchérissement de leur attitude par la crédibilité des nouvelles menaces russes et chinoises quand Russie et Chine insistent sur l'obligation qu'ils ont de se protéger *a minima* face à l'arsenal des capacités américaines (Gaillard-Sborowsky, 2023). Pour autant, une perception assez généralisée d'une aggravation de la menace pesant sur les systèmes spatiaux peut quand même être relevée.

Une perception accrue de la menace

Théâtre essentiel pour la puissance technologique et scientifique des nations, la capacité à lancer des satellites, à mener des missions d'exploration et à établir une présence humaine dans l'espace est devenue un indicateur majeur de la supériorité d'une nation sur le plan technologique. De fait, la compétition pour dominer cet environnement hostile est non seulement une quête scientifique, mais également un moyen de projection de puissance. Domaine stratégique en matière de sécurité nationale, la militarisation mais surtout l'arsenalisation projetée croissante de l'espace, avec le développement d'armes spatiales et de capacités de surveillance avancées, crée une nouvelle dimension dans les relations internationales. Les satellites, essentiels aux communications, à la navigation et à la surveillance, deviennent des cibles potentielles dans les conflits, accentuant les tensions entre les nations au sujet du statut de l'espace. Enfin, la dimension économique est de plus en plus prépondérante. Les ressources spatiales, telles que les métaux rares présents sur des astéroïdes ou les possibilités d'exploitation minière sur d'autres planètes, semblent représenter des opportunités économiques considérables. Les États et les entreprises privées cherchent à sécuriser leur accès à ces ressources pour garantir leur prospérité future, induisant ainsi des rivalités économiques qui s'inscrivent dans un cadre géopolitique plus global. Cependant, les États doivent aussi composer avec leur tissu industriel national. En effet, si la concurrence politico-diplomatique reste le fait exclusif des États où le secteur privé peut être un outil actionné par un gouvernement, la concurrence économique, *a contrario*, comprend des logiques de politiques publiques et des logiques d'acteurs privés, parfois complémentaires, parfois concurrentes ou reposant sur un combinai son des deux.

De ce fait, la sécurité spatiale est multiscalaire en tant qu'elle doit conjuguer les échelles nationale, internationale et collective quand elle est également multidimensionnelle quant à ses thèmes fondamentaux, tant affaires de risques (non-intentionnalité) que de menaces (intentionnalité). Les rivalités dans l'espace créent des points de friction, mettant à l'épreuve les relations entre États quand bien même la coopération spatiale a été souvent vue comme un moyen de renforcer les liens diplomatiques et de favoriser la confiance mutuelle.

Si les dynamiques semblent se concentrer sur les aspects civils de l'exploitation de l'espace, les évolutions technologiques, notamment celles développées dans le domaine des services en orbites pour les technologies de rendez-vous et les opérations de proximité (inspection de satellites, assemblage de superstructures, opérations d'accostage, d'amarrage, de capture, de remplacement de composants, d'extension de durée de vie, etc.) peuvent laisser supposer des manœuvres en orbite de nature potentiellement offensives et ont mis en relief la problématique non plus de la dualité des technologies mais celle d'usage quand seule l'intention présidant à l'utilisation de ces technologies les différencie d'une arme antisatellite.

Si la licéité de la militarisation de l'espace, balayant l'utopie de l'utilisation pacifique de l'espace qui présidait à la première résolution de l'ONU du 13 décembre 1958 (Résolution A/RES/1348), s'est rapidement imposée, l'arsenalisation de l'espace a longtemps été figée par les conditions stratégiques de la guerre froide. Les armes antisatellites, objet de recherche et de test, n'avaient jamais été déployées opérationnellement (Gaillard-Sborowsky et al., SEEA, 2016). Les satellites, reconnus comme « moyens techniques nationaux » par les traités, étaient tacitement intouchables, éloignant ainsi la perspective d'une confrontation dans l'espace. Le discours dominant s'appuyait sur le concept d'un espace « sanctuarisé » qui ne devait pas devenir un nouveau champ de bataille (Steer et Herscheds, 2021).

Au-delà de la dualité d'usage des nouveaux « objets » mis en orbite, la reprise des tests antisatellites à la fin des années 2010 par la Chine (2007), les États-Unis (2008), l'Inde (2019) et la Russie (2020), mais également les efforts soutenus de R&D dans le domaine des armes spatiales, qu'il s'agisse des armes à énergie cinétique (KEW) depuis le soi par impact direct (« *hit-to-kill* »), tests Chinois, USA, Inde, Russie), les systèmes co-orbitaux, les armes à énergie dirigée (DEW) utilisant principalement des techniques laser ou micro-ondes, les armes de guerre électronique (techniques de brouillage) ou les cyberattaques, ont dramatiquement accentué la perception d'une menace croissante sur les satellites. Conjugés à l'intégration de plus en plus poussée des activités spatiales dans les sphères économiques nationales, à la dépendance de plus en plus importante aux services spatiaux de nos sociétés et à leur part de plus en plus prépondérante dans les infrastructures de sécurité et de défense, les moyens spatiaux sont assimilés progressivement à « intérêt national vital » qu'il faut protéger et défendre. L'un des aspects peut-être le plus révélateur est la formalisation d'organisations spatiales militaires et/ou de changements organisationnels et doctrinaux dans de nombreux pays. De plus en plus de pays promulguent des stratégies spatiales de défense (France (2019), États-Unis (2020), Royaume-Uni (2022), Australie (2022), Europe (2023)).

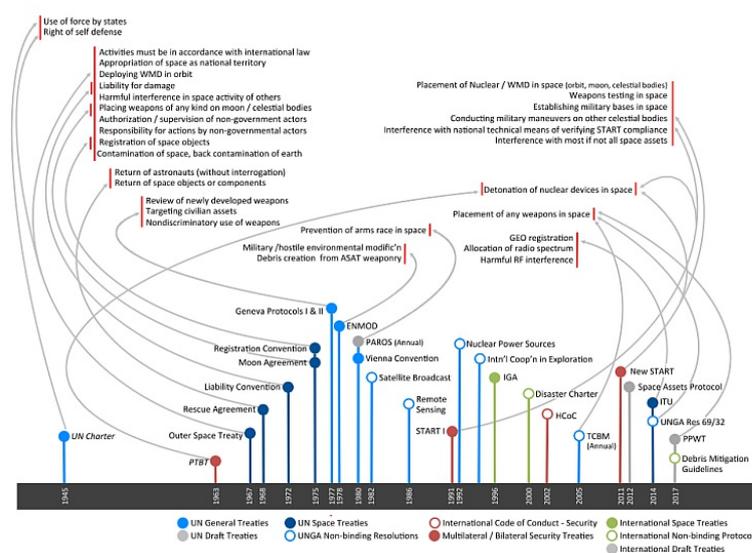
La thématique de la guerre dans l'espace est ainsi revenue au centre des discussions internationales, la question pour de nombreux experts, notamment américains (Krepon et Thompson, 2013) n'étant plus de savoir si elle aurait lieu mais quand. Cet aspect a d'ailleurs été formalisé par l'OTAN, qui reconnaît, depuis 2019, l'espace comme milieu d'opérations au même titre que les milieux aérien, terrestre, maritime et cyber mais également par la doctrine de l'*US Space Force* qui identifie l'espace comme « domaine de guerre » (*Space Power, Doctrine for Space Force, 2020*).

Ces dynamiques semblent remettre en cause le consensus explicite ou implicite sur la « non-arsenalisation » de l'espace, principe qui semblait en soi protéger les moyens spatiaux. Plus globalement, l'acuité des menaces perçues par les puissances spatiales, liées à l'évolution des usages des moyens spatiaux, conjuguées à la dégradation relative de l'environnement spatial caractérisé par un encombrement des orbites (densification) et des débris de plus en plus nombreux – pollution spatiale multipliant les risques de collisions et d'interférence non-intentionnelle (Bonnal, 2016) –, ont réactivé mais surtout modifiées sur la scène internationale les thématiques des discussions autour de la sécurité spatiale et des moyens pour l'assurer. L'articulation, complexe, doit composer avec les tensions même qu'elle soulève et dont l'une des principales est peut-être la tentation du « *qui vis pacem para bellum* » alors même que le principe de l'usage pacifique de l'espace est consacré par le Traité de 1967, lequel représente la pierre angulaire du corpus juridique applicable à l'espace.

Un droit international public de l'espace qui paraît insuffisant face aux évolutions

Le cadre réglementaire actuel comprend 27 accords, traités ou résolutions internationaux distincts qui ont des implications sur les opérations spatiales.

Figure 3 : Le cadre réglementaire des activités spatiales



Source : International Rules and Norms : Constraints on Space Operations, A Virtual Think Tank (ViTTa)® Report, mars 2018 – https://nsiteam.com/social/wp-content/uploads/2018/03/NSI_Space_ViTTa_Q20_Legal-Limitations-on-Space-Activities_FINAL.pdf

Ce corpus a comme caractéristique de comprendre des mécanismes de « *Hard Law* », ayant force obligatoire, et de « *Soft Law* », dépourvus de contraintes. Le cœur du régime spatial est composé des cinq traités spatiaux parrrainés par les Nations Unies centrés autour du « Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes » (OST) du 27 janvier 1967.

Par ailleurs, tous les codes juridiques qui ont des implications pour les opérations spatiales ne sont pas spécifiques à l'espace. Les traités généraux des Nations Unies, en particulier les régimes régissant l'usage de la force par les États et le droit à l'autodéfense, s'y appliquent également comme la Convention de l'Union Internationale des Télécommunications. Les accords de sécurité multilatéraux et bilatéraux (NTBT, START I, New START) imposent aussi des restrictions sur le placement, les essais et l'utilisation d'armes dans l'espace.

Aujourd'hui, les États concentrent leurs négociations sur des normes techniques, instruments généralement élaborés « en réponse à un besoin dans un domaine particulier, exprimé par les parties prenantes dans le cadre d'une approche ascendante » (OECD, 2016). C'est principalement au COPUOS que les résultats sont les plus fructueux avec la formalisation de lignes directrices reprises par des résolutions de l'Assemblée générale des Nations Unies. En particulier, le sous-comité scientifique et technique a mis au point un ensemble de lignes directrices relatives à la réduction des débris spatiaux, approuvées par l'Assemblée générale en

2007, et destinées à tous les acteurs du domaine spatial, qu'ils soient gouvernementaux ou privés. De même, un groupe de travail à visibilité à long terme des activités spatiales en place en 2007 (Bracht, 2012) a publié en 2019 des *lignes directrices du comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique aux fins de la viabilité à long terme des activités spatiales* (doc A/74/20, paragraphe 163 et annexe II) qu'il convient de rajouter à la représentation graphique ci-dessus [figure 3].

Pour autant, ce cadre réglementaire, résultat de négociations entre États, ne semble plus adapté aux dynamiques actuelles d'occupation de l'espace. L'intervention croissante des sociétés privées a mis en lumière de nombreuses ambiguïtés et lacunes dans le droit public international spatial existant. Bien plus, la perception d'un décalage entre le développement des activités spatiales et les grands principes du droit de l'espace mais également les préoccupations accrues de sécurité spatiale liées ont accéléré la demande normative. Pour pallier les lacunes et insuffisances du droit international, la nécessité de nouvelles normes pour compléter, préciser, prolonger les principes spatiaux en vigueur s'impose sur la scène internationale avec comme conséquence une pluralité de sources de réglementation. D'autres acteurs de normativité émergent : initiatives nationales, acteurs privés, agences spatiales. À titre d'exemple, mentionnons la publication par le ministère de la défense états-uniens en mars 2023 de « Principes d'un comportement responsable dans l'espace et comportements spécifiques associés », ou encore le moratoire d'interdiction « auto-imposée » des tests de missile antisatellite à ascension directe annoncé par Kamala Harris en avril 2022. Ce dernier exemple est intéressant dans la mesure où cette décision nationale s'est également déplacée sur la scène collective via la résolution 77/41 de l'Assemblée générale des Nations Unies et internationale puisqu'à date 37 États ont suivi et procédé à une déclaration de même type, contribuant à former peut-être un précédent constitutif de règles coutumières. Parallèlement, des associations ou consortium d'industriels occidentaux (Space Safety Coalition, CONFERS3, Satellite Industry Association, etc.) élaborent des principes de « bonnes pratiques » ou œuvrent pour une transparence (Space Data Association par exemple) qui, pour certains, sont repris dans des normes ISO. La norme ISO 24330 « Opérations de proximité et de rendez-vous et services sur orbite — Principes et pratiques programmatiques — » est ainsi issue des recommandations de CONFERS, ce dont la DARPA4 s'est félicitée le 5 juillet 2022 via un tweet déclarant également que cette nouvelle norme, allait favoriser « une économie spatiale durable, sûre et diversifiée ».

Cette normativité par les standards ou par acte unilatéral est d'origine principalement états-uniennes – la DARPA est à l'origine de CONFERS, et le NOAA5 et la NASA sont les deux seules agences publiques membres de la Space Data Association –. Cela interroge la place actuelle accordée aux enceintes collectives pour assurer une sécurité spatiale qui soit justement collective et questionne l'ambition des États-Unis de normer le monde spatial à l'aune de ses intérêts, en dehors de toute enceinte collective de discussion du droit de l'espace, même si certains experts soutiennent que ces normativités élaborées en dehors du cadre intergouvernemental collectif sont de nouvelles voies pertinentes à explorer (HASIN, 2023).

Du côté des agences spatiales c'est principalement dans le cadre de leurs travaux au sein du « Comité consultatif pour les systèmes de données spatiales » (CCSDS) qui œuvre à développer des normes pour les systèmes de données afin d'une part de promouvoir l'interopérabilité et le support entre les différentes agences spatiales et d'autre part de réduire les coûts opérationnels en partageant les installations. Dans ce cadre, il remarquable de noter que le dernier « livre vert », *Security Threats against Space Missions*, témoigne d'un consensus international sur des notions telles que celle de « menaces », « agents de menaces » ou encore sur l'identification des sources et types de menace par type de mission spatiale (observation, télécommunication, navigation, etc.). Il identifie également les procédures d'évaluation de la menace et les mécanismes pour les contrer. Par ailleurs, il spécifie qu'il est applicable à toutes les missions spatiales qui se conforment aux normes CCSDS dans un contexte où l'on ne peut plus penser que les missions civiles sont moins susceptibles d'attaques que les missions militaires (CCSDS, 2022).

Au final, le paysage réglementaire des activités spatiales comprend bien des composantes et

<div><div> </div><div>Si c'est bien le droit international qui régule avant tout l'espace extra-atmosphérique, il est un droit aux composantes publiques, privées, d'origine internationale et interne, un droit pluriel à certains égards disparate (Bories, 2021, p. 48).</div></div>
--

Cet aspect est renforcé par la complexité des discussions internationales pour élaborer un cadre juridique international public.

Des discussions internationales complexes au processus ralenti par les oppositions entre puissances

La question de la sécurisation de l'espace n'est pas récente – elle a pris forme à la fin des années 1970 – mais les importantes mutations de l'écosystème spatial ont modifié les termes du débat. Alors que dans les années 60 et 70 la scène spatiale comptait deux grandes puissances spatiales, les États-Unis et l'URSS, et le traité sur l'espace est le résultat principalement des négociations entre ces deux États, aujourd'hui, 10 nations sont considérées comme puissances spatiales, c'est-à-dire ayant *stricto sensu* une capacité autonome d'accès à l'espace sur toutes les orbites (États-Unis, Russie, Europe, Chine, Japon, Inde), ou au moins l'orbite basse (lanceurs israéliens, iraniens et des deux Corées). Certains adjoignent également la Nouvelle-Zélande mais son cas est assez particulier car si effectivement c'est l'État responsable des lancements Electron, ceux-ci sont le fait d'une société nord-américaine, Rocket Lab. Par ailleurs le nombre de pays ayant des intérêts dans l'espace s'est multiplié (plus d'une centaine) et la place des acteurs privés s'est considérablement accrue. Cette multiplication des acteurs aux intérêts parfois très divergents complexifie les discussions internationales déjà fracturées entre les visions du bloc occidental et celles du bloc sino-russe.

Dans la pratique diplomatique internationale, la sécurité spatiale est un processus qui se construit sur la régulation complexe des débris et du trafic spatial ainsi que des ressources du spectre et des espaces orbitaux au sein du COPUOS, de l'IADC et de l'UIT, quand les négociations sur la militarisation et l'arsenalisation de l'espace sont confiées à la Conférence du Désarmement. La place des acteurs privés dans ces discussions – au mieux observateurs – alors même qu'ils pèsent de plus en plus lourd dans les activités spatiales et que certaines de leurs activités sont des éléments de sécurité nationale et internationale n'est pas l'unique problématique dans un contexte d'exacerbation des discordances dans les discussions internationales sur les moyens de la sécurisation de l'espace et la réalité des politiques, stratégies et programmes nationaux. La montée en puissance des instruments de *Soft Law* dans le champ spatial (Smith, 2021) témoigne de ces difficultés d'articulation entre scène internationale et politique nationale. S'agissant d'essayer de faire tenir ensemble les intérêts stratégiques, la souveraineté politique, l'ordre international et la durabilité de l'espace extra-atmosphérique en tant qu'environnement, la *Soft Law* est apparue de fait comme plus pragmatique, facile d'usage et possiblement facilitatrice d'accords contraignants ultérieurs (Abbott et Snidal, 2000). Constituée d'instruments dynamiques, adaptables selon des circonstances plus ou moins incertaines, elle est en particulier modulable selon les préférences, les intérêts ou les valeurs des acteurs et leur force d'influence (Chatzistavrou, 2005). Ce qui explique en partie les consensus sur des lignes directrices spatiales au sein du COPUOS.

Cependant, alors que la prévention d'une course aux armements dans l'espace devient une priorité puisque le droit existant n'apparaît n'est pas suffisant pour l'interdire, la Conférence du désarmement et la Première Commission de l'ONU sont bloquées par les oppositions entre partisans d'une approche capacitaire et partisans d'une approche comportementale. Les efforts multilatéraux, au titre de la « Prévention d'une course aux armements dans l'espace extra-atmosphérique » (PAROS), incluent ainsi principalement des projets de traités pour le contrôle des armements (approche capacitaire) et des mesures de transparence et de confiance (TCBM, approche comportementale). Un traité est proposé conjointement par la Russie et la Chine depuis 2008, le « Traité sur la prévention du placement d'armes dans l'espace extra-atmosphérique, la menace ou l'emploi de la force contre des objets spatiaux » (PPWT), modifié en 2014. Les principaux points de désaccord des pays occidentaux portent sur l'absence de mécanismes appropriés de surveillance, de vérification et de conformité, de définition d'une arme spatiale mais également sur le fait qu'il n'interdit pas l'usage de la force depuis le sol. Le test ASAT chinois de janvier 2007, le test américain de février 2008, indien de 2019 et russe de 2021 ne seraient pas concernés par un tel traité.

Plus récemment, deux initiatives ont créé les conditions d'un possible dialogue entre États au sein de la 1^{ère} Commission. Cependant, ces deux initiatives ont conduit à l'adoption de deux résolutions concurrentes par l'Assemblée générale des Nations unies – concurrentes car ces initiatives sont avant tout l'expression des rivalités géopolitiques qui n'ont cessé de prévaloir dans cette enceinte – et à la mise en place de deux processus de négociation antagonistes.

L'un, porté par la Russie depuis 2017, met en place un groupe d'experts gouvernementaux afin d'envisager de « Nouvelles mesures pour la prévention d'une course aux armements dans l'espace » (Résolution 72/250). Réuni en 2018 et 2019 puis reconstitué à nouveau pour 2023 et 2024 (Résolution 77/250), ce groupe doit

<div><div> </div><div>étudier de nouvelles mesures concrètes de prévention d'une course aux armements dans l'espace, dont il faudra tenir compte dans la recherche de telles mesures, en particulier dans les négociations qui seront menées à l'avenir dans le cadre de la Conférence du désarmement au sujet de l'instrument international juridiquement contraignant</div></div>
--

Tout récemment, la résolution 78/38 adoptée le 22 décembre 2023 demande la réunion d'un groupe de travail à composition non-limitée (OEWG) chargé d'examiner les éléments fondamentaux d'un instrument international juridiquement contraignant adoptant en cela le mécanisme de l'initiative concurrente porté par les occidentaux.

En effet, pour sortir de l'impasse des négociations internationales sur un traité tout en ne fermant pas la porte aux instruments juridiques contraignants, un processus visant à « *Réduire les menaces spatiales au moyen de normes, de règles et de principes de comportement responsable* » (Résolution 75/36) a mis en place un groupe de travail à composition non limitée (Résolution 76/231) dont la dernière session s'est tenue fin août 2023. Bien que permettant d'ouvrir sur la reconnaissance que les approches non juridiquement contraignantes ont leur place dans les discussions de la Première commission et que cela témoigne d'une tentative de compréhension collective des risques, menaces et comportements menaçants et déstabilisants en orbite, les travaux se sont conclus sans qu'aucun rapport ne puisse être adopté, la Russie ayant systématiquement mis son veto. La Chine et la Russie soulignant par ailleurs que l'approche TCBM n'est pas suffisamment juridique et est détachée de l'agenda du désarmement fondé sur des traités. Les discussions PAROS et les propositions connexes sont ainsi systématiquement ralenties par le jeu diplomatique des grandes puissances, aux priorités nationales incompatibles.

Conclusion

Les perspectives sur le plan international d'aboutir à un accord sur les objectifs et moyens d'une sécurité spatiale collective et la prévention d'une course aux armements dans l'espace ne rendent pas très optimistes dans le contexte actuel. La scène spatiale internationale tente aujourd'hui de conjuguer des approches nationales de la sécurité spatiale avec une approche collective, sous l'égide d'un droit international qui tente de s'adapter au nouvel environnement stratégique. La problématique majeure est que les processus pour sécuriser l'espace ne sont finalement que les reflets d'une géopolitique bien terrestre, des ambitions nationales de sécuriser les intérêts stratégiques et la souveraineté politique. La dimension de préservation de l'ordre international et la durabilité de l'espace extra-atmosphérique en tant qu'environnement sert d'argumentation officielle mais la coexistence problématique de l'utopie des utilisations pacifiques avec un espace outil et vecteur de sécurité nationale conduit à des tensions entre le national et l'international, qui impactent les modes actuels d'articulation, pris en étau, figeant les processus législatifs internationaux (Hasin, 2023). Dans un contexte où la gouvernance spatiale se caractérise de plus en plus par la juxtaposition d'ordres juridiques internationaux, régionaux et nationaux, de normativités issues d'entités étatiques et non-étatiques, possiblement complémentaires mais également concurrents (Degrange, 2021), préserver la sécurité dans l'espace demande de dépasser la défense d'un pur intérêt national pour considérer que l'espace est avant tout un lieu d'interdépendance internationale et favoriser ainsi la prééminence de l'approche collective.

Bibliographie

Abbott K. W. , Snidal D. , 2000, « Hard and *Soft Law*in international governance », *International Organization* , Vol. 54, n° 3, Summer 2000, p.420-456, https://www.researchgate.net/publication/4770665_Hard_and_Soft_Law_in_International_Governance

Bonnal C., 2016, Pollution spatiale : l'état d'urgence, Belin, 240 p.

Bories C., 2021, « Le droit international au défi de l'espace extra-atmosphérique », Société Française pour le Droit International, Toulouse, p.15-64.

Bracht G., 2012, « The origins of the "Long-term Sustainability of Outer Space Activities" initiative at UN COPUOS », Space Policy 28 , p. 161-165.

CCSDS , 2022, Security Threats against Space Missions , Green Book Report, <https://public.ccsds.org/Pubs/350x1g3.pdf>

Chatzistavrou F., 2005, « L'usage du *Soft Law* dans le système juridique international et ses implications sémantiques et pratiques sur la notion de règle de droit », Le Portique, 15 | 2005 – mis en ligne le 15 décembre 2007 <http://journals.openedition.org/leportique/591>

DARPA, TWEET, – <https://twitter.com/DARPA/status/1547973471992291328>

Degrange V., 2021, « Nouveaux acteurs, nouvelle gouvernance: faire du droit spatial à l'ère du New Space » in Deuxième âge spatial: concurrence et complémentarité des acteurs stratégiques à l'ère du New Space, Stratégique N° 126-127, p.153-172

Euroconsult, 2023, "Smallsat market keeps growing despite supply challenges and Starlink moving to larger form factors", <https://www.euroconsult-ec.com/press-release/smallsat-market-keeps-growing-despite-supply-challenges-and-starlink-moving-to-larger-form-factors/>

- Falle A., Wright E., Boley A., Byers M., 2023, "One million (paper) satellites Radiofrequency filings warn of more congestion in space, but also offer possible remedies", Science, Vol 382, Issue 6667, pp. 150-152
- Gaillard-Sborowsky F., 2002, « La construction symbolique de l'espace européen », Hermès, n° 34, p.105-120
- Gaillard-Sborowsky F., Sourbès-Verger, Pasco X., Achilleas P., Facon I., 2016, Sécuriser l'espace extra-atmosphérique : éléments pour une diplomatie spatiale à l'horizon 2030, rapport d'étude au profit du CSFRS, 372 p.
- Gaillard-Sborowsky F., Sourbès-Verger I., Tortora J.J., 2018, Petits satellites- Petits lanceurs : Etude des évolutions technologiques et économiques, analyse de leurs implications stratégiques et du positionnement français/européen, Rapport d'étude au profit du CSFRS.
- Gaillard-Sborowsky F., 2021, « La politique spatiale émiratie : un développement en accéléré et multi-facettes », La Revue diplomatique, EGA n° 13, p.55-59
- Gaillard-Sborowsky F., 2023, Géopolitique de l'espace : à la recherche d'une sécurité spatiale, Cavalier Bleu, 208 p.
- George K.W., "The Economic Impacts of the Commercial Space Industry", Space Policy, Volume 47, 2019, Pages 181-186.
- Goldsen J. M. (ed), 1963, Outer Space in World Politics, Praeger, New York, London, 1963, 180 p.
- Hasin G., 2023, "Controlling Decisions on Anti-Satellite Weapons: A Policy-Oriented Perspective", Journal of Law & Innovation Vol. 6 N° 1.
- Krepon M., Thompson J. (ed), 2013, Anti-satellite Weapons, Deterrence and Sino-American Space Relations, Stimson, 141p.
- Lignes directrices relatives à la réduction des débris spatiaux du Comité pour les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, Annexe I, A/62/20, rapport de la 50e session du CUPEEA, 20 juin 2007 – https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/COPUOS_GuidelinesF.pdf
- Little A.D., 2019, The Space Agency of the Future, <https://www.adlittle.com/se-en/insights/viewpoints/space-agency-future>
- Martin E.A., « Un changement de paradigme pour l'Europe spatiale », Editoriaux de l'Irfi, 11 mars 2021, <https://www.ifri.org/fr/publications/editoriaux-de-lifri/un-changement-de-paradigme-leurope-spatiale>
- McCurdy H. E., 2001, Faster, Better, Cheaper : Low-Cost Innovation in the U.S. Space Program, Baltimore, Johns Hopkins University Press, 192 p.
- McDowell J., 2024, "Enormous ('Mega') Satellite Constellations", data update 24 January 2024 <https://planet4589.org/space/con/conlist.html>
- McDowell J., 2024, Space Activities in 2023, mis en ligne le 5 janvier 2024, <https://planet4589.org/space/papers/space23.pdf>
- NASA, Office of Inspector General, 2021, « Nasa's Management of the International Space Station and Efforts to Commercialize Low Earth Orbit », Report No. IG-22-005, <https://oig.nasa.gov/docs/IG-22-005.pdf>
- National Security Decision Directive Number 42, National Space Policy, July 4, 1982, <https://irp.fas.org/offdocs/nsdd/nsdd-42.pdf>
- National Security Decision Directive Number 94, Commercialization of Expendable Launch Vehicles, May 16, 1983, <https://irp.fas.org/offdocs/nsdd/nsdd-094.htm>
- OECD, 2014, La politique de la concurrence et ses effets macroéconomiques, <https://www.oecd.org/daf/competition/2014-fiche-information-concurrence-online.pdf>
- OECD, 2016, Recueil de pratiques des organisations internationales : Œuvrer à l'élaboration d'instruments internationaux plus efficaces – <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/f454d7ba-fr/#endnotea3z6>
- OECD, 2022, OECD Handbook on Measuring the Space Economy, <http://oe.cd/il/space22>
- OCDE, 2023, The Space Economy in Figures: Responding to Global Challenges, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/fa5494aa-en>
- Pasco X., 2017, Le nouvel âge spatial, de la guerre froide au New Space, CNRS Editions, 192 p.
- "Presidential Directive on National Space Policy," February 11, 1988, https://aerospace.org/sites/default/files/policy_archives/National%20Space%20Policy%20Feb88.pdf
- Régnaud I., 2023, « Satellites : comment l'astrocapitalisme congestionne l'espace », 26 octobre 2023, <https://usbeketrica.com/fr/article/un-million-de-satellites-en-papier>
- Saint-Martin A., 2023, « Une astronautique "frugale" ? », Socio, 17 | 2023 p. 187-213, mis en ligne le 24 novembre 2022 <http://journals.openedition.org/socio/14177>
- Saint-Martin A., 2019, « L'histoire longue des promesses du New Space », mis en ligne le 19 novembre 2019, blog Humanités Spatiales, <https://humanites-spatiales.fr/histoire-longue-des-promesses-du-new-space/>
- Smith L.J., 2021, « L'espace, un nouveau champ pour la Soft Law », SFDI, Toulouse 2021 pp. 169-179.
- Space Power, Doctrine for Space Force 2020), Space Capstone Publication, 2020, 41 pages, https://www.spaceforce.mil/Portals/1/Space%20Capstone%20Publication_10%20Aug%202020.pdf
- SpaceTech Database, 2024, https://spacetechnology.com/companies/startups/f/tags/anyof_space%20tech_not_outside%20techindustries/anyof_space
- Sourbès-Verger I., 2022, « L'espace extra-atmosphérique, nouvelle frontière du XX^e siècle » in Nicolas Beaupré et Florian Louis, Histoire mondiale du XX^e siècle, PUF, 1152 p.
- Sourbès-Verger I., 2023, géopolitique du monde spatial, Eyrolles, 183 p.
- Steer C., Herscheds M., 2021, War and Peace in Outer Space: Law, Policy, and Ethics, Oxford University Press, 336 p.
- Sultan B., 2023, « Techno-Geopolitics: Unearthing the Future Landscape through the Lens of Technology », mis en ligne le 30 août 2023 <https://moderndiplomacy.eu/2023/08/30/techno-geopolitics-unearting-the-future-landscape-through-the-lens-of-technology/>
- Taylor M., 2023, « at SpaceX, worker injuries soar in Elon Musk's rush to Mars », Reuters Investigation, <https://www.reuters.com/investigates/special-report/spacex-musk-safety/>
- The Economic Times, 2023, India's private space sector skyrockets, mis en ligne 1er octobre 2023 <https://economictimes.indiatimes.com/tech/startups/indias-private-space-sector-skyrockets/articleshow/104081004.cms?from=mdr>
- UK Space Agency blog, 2024, « 2024: The Year of the Space Entrepreneur », mis en ligne le 9 janvier 2024, <https://space.blog.gov.uk/2024/01/09/2024-the-year-of-the-space-entrepreneur/>

Notes

- 1 Entendue comme le fait de placer des armes dans l'espace.
- 2 NASA : National Aeronautics and Space Administration ; FAA : Federal Aviation Administration ; OSHA : Occupational Safety and Health Administration.
- 3 CONFERS : Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations.
- 4 DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency.
- 5 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration.
- 6 Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 24 décembre 2017, A/RES/72/250 <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n17/468/87/pdf/n1746887.pdf?token=4IXu4iGVraTivBbUE&fe=true>.

Résumés

Assurer la sécurité de l'espace extra-atmosphérique est devenu un enjeu crucial pour un écosystème spatial en transformation avec la multiplication des acteurs, le développement d'enjeux commerciaux et la dépendance croissante des sociétés et des Etats aux systèmes spatiaux. Une diplomatie spatiale existe, construite sur l'élaboration d'un droit international de l'espace. Cependant, pris en tension entre la défense de l'intérêt national et la nécessaire approche multilatérale, les processus diplomatiques sont ralentis par les oppositions entre grandes puissances spatiales, oscillant entre concurrence, compétition et rivalités. D'autres normativités montent en puissance bousculant le cadre traditionnel de réglementation. Le défi actuel est celui de la construction d'une sécurité spatiale, permettant un usage sûr et durable d'un milieu atypique, dans un contexte de tensions multiples.

Ensuring the security of outer space has become a crucial issue for a transforming space ecosystem, characterized by the proliferation of actors, the development of commercial interests, and the growing dependence of societies and States on space systems. A space diplomacy has emerged, built upon the development of international space law. However, caught between the defense of national interests and the necessary multilateral approach, diplomatic processes are slowed down by oppositions between major space powers, oscillating between competition, rivalry, and antagonism. Alternative normative frameworks are gaining prominence, challenging the traditional regulatory paradigm. The current imperative is the construction of a comprehensive space security framework that facilitates the safe and sustainable utilization of this unique environment, amidst a context of multifaceted tensions.

Index
Mots-clés : espace, satellite, sécurité, gouvernance, droit de l'espace, géopolitique
Keywords : outer space, satellite, security, governance, space law, geopolitics
Auteur
Florence Gaillard-Sborowsky

Maître de recherche
Fondation pour la Recherche Stratégique
f.gaillard@frstrategie.org

La nouvelle économie spatiale à la croisée de plusieurs enjeux sécuritaires : Une analyse des politiques d’innovation en Europe et aux États-Unis

The New Space Economy at the Intersection of Multiple Security Challenges: An Analysis of Innovation Policies in Europe and the United States

Patrick Schembri

Introduction

Depuis 20 ans, on observe un renouveau de la conquête spatiale et la volonté des États d’associer des acteurs du secteur privé à l’observation et l’exploitation de l’espace. Puisqu’il n’est plus possible de financer les projets spatiaux par les seuls fonds publics, la réglementation en vigueur est alors adaptée afin de permettre aux agents privés d’investir dans ces projets à travers le développement d’activités commerciales. Dans ce contexte, de nouveaux acteurs arrivent parmi lesquels les pays en développement qui entrentvoient l’opportunité de devenir de véritables puissances spatiales. Nous pensons notamment à la Chine, à l’Inde, au Japon et aux Émirats Arabes Unis qui souhaitent jouer un rôle important sur ces nouveaux marchés. Le développement rapide de ce secteur s’opère dans un environnement qui lui est favorable : besoin d’applications dans les domaines de l’agriculture et la gestion de l’eau, de l’énergie (réseaux et synchronisation), de la robotique et de la sécurité par référence notamment à la gestion des risques environnementaux, de la politique publique, des transactions bancaires, ainsi que des activités d’assurance : une réglementation qui favorise les partenariats publics-privés. Selon le Space Report, les revenus du secteur de l’aérospatial sont passés de moins de 200 milliards de dollars en 2005 à plus de 400 milliards en 2022, avec un taux de croissance de 8 % par rapport à 2021 et près de 91 pays « travaillant » dans l’espace (Space Foundation, 2023). Selon les prévisions proposées par la banque américaine Morgan Stanley, le marché pourrait atteindre près de 1 000 Milliards de dollars à l’horizon 2040, bien plus que l’aviation commerciale et le transport logistique terrestre. Dans ce contexte particulièrement porteur, l’enjeu réside dans le financement privé des investissements requis. En 2022, les applications spatiales ont reçu près de 216,5 milliards de dollars d’investissements contre seulement 18 milliards en 2014¹. Cela étant, les acteurs privés dépendent encore fortement des États qui garantissent près de 90 % de leurs revenus.

Dans la perspective d’un passage vers une économie spatiale développée à grande échelle (*Big Space*) et grandement autosuffisante, la transition du domaine public au domaine privé (*Commercial Space*) paraît être un objectif incontournable pour la plupart des acteurs concernés. À ce titre, sur la période récente, les progrès technologiques qui autorisent pareille transition ont été exceptionnels (Metzger, Muscatello, Meuller et Mantovani, 2013). En effet, les politiques d’innovation conduites dans le secteur de l’aérospatial reposent désormais sur la création de nouveaux marchés. Les agences publiques telles que la NASA² et l’ESA³ développent ces politiques avec pour objectif de répondre aux grands défis sociétaux et à l’émergence d’une nouvelle vague d’entreprises intervenant dans le secteur, tenant compte de la tendance globale vers la montée en puissance des industries interconnectées. Le développement de cette « nouvelle économie spatiale » (*NewSpace*) se traduit par un élargissement/enchevêtrement des enjeux de sécurité en lien notamment avec le marché et la société, qui témoigne de nouvelles imbrications entre les domaines public et privé. Pareille dynamique nous conduit à étudier les approches américaines et européennes et à comparer les politiques conduites par les agences spatiales en matière d’innovation technologique. Ces dynamiques entraînent un changement dans la nature même des politiques d’innovation portées par le secteur public (Robinson et Mazzucato, 2019). Traditionnellement, ces politiques étaient orientées vers des défis et objectifs clairement identifiés avec une approche centralisée des systèmes d’innovation. Aujourd’hui, les défis sont évoqués dans un sens plus large et les systèmes d’innovation sont définis de manière décentralisée combinant les dimensions ascendante et descendante pour définir les problèmes. Les objectifs visés par les agences portent alors davantage sur la mise en relation et le renforcement des liens entre les acteurs et les secteurs. Toutefois, ces mêmes agences révèlent des différences notables quant à la manière de conduire la politique d’innovation et au regard des enjeux sécuritaires qui définissent son orientation.

Cet article a pour objet d’étudier la dynamique de développement de la nouvelle économie spatiale, laquelle est caractérisée par des tendances communes aux différentes approches, mais aussi par des différences qui reposent notamment sur le modèle d’organisation sociale des activités économiques⁴ et la manière dont les questions de sécurité sont traitées. L’article est structuré en deux temps. Tout d’abord, les grandes tendances partagées de la dynamique de développement du secteur sont analysées par référence à un cadre d’analyse centré sur la notion de sécurité. Dans un second temps, une analyse comparative du rôle des Agences spatiales américaine et européenne dans le développement de l’économie spatiale souligne la diversité des approches.

Les enjeux sécuritaires de la nouvelle économie spatiale

Les questions de sécurité interrogent la nature des activités et des produits du secteur de l’aérospatial. Or il est difficile de définir la notion de sécurité, laquelle est souvent approchée par référence à son contraire, celle d’insécurité. La sécurité désignerait alors l’absence de menaces (Serfati, 2009). De surcroît, il s’agit d’une notion qui fait intervenir à la fois la réalité d’une situation et sa perception. Traditionnellement, la sécurité renvoie à l’échelle nationale, et demeure principalement centrée sur les menaces militaires extérieures (Serfati, 2024 ; Dufour, 2021). Pareille sécurité doit alors être assurée par les États souverains dans la tradition des travaux de Max Weber (1904, 1917, 1919 ; Du Gay et Scott, 2011). On peut observer une première rupture après la seconde guerre mondiale, avec le développement du droit international et la création d’institutions en charge de son application⁵. La seconde rupture remonte aux années 1980, avec l’émergence de nouvelles notions telles que la sécurité universelle, commune ou sociétale qui excèdent la seule dimension militaire. L’accent est alors porté sur les phénomènes d’interdépendance entre les États (Gleditsch et Ward, 2006), mobilisant une approche plurielle de la sécurité. Au demeurant, c’est durant la décennie 1990 que la notion de sécurité humaine apparaît (PNUD, 1994), laquelle vise la protection contre les menaces chroniques et contre tout évènement brutal susceptible de perturber la vie quotidienne. Cette approche de la sécurité appelle une nouvelle forme de gouvernance globale qui ne peut reposer sur la seule souveraineté des États et la séparation traditionnelle entre sécurité extérieure et sécurité intérieure. Toutefois, la période actuelle marquée par des dynamiques de transformation profonde des activités économiques dans un contexte de crises, de conflits et d’urgence au regard des différents agendas environnementaux, interroge la notion de sécurité face aux poly-risques et autres menaces hybrides. En effet, les menaces contre la sécurité ne sont plus seulement militaires, mais également d’ordre économique, social, sanitaire et environnemental. Ces préoccupations sécuritaires qui fournissent aux gouvernements l’opportunité de réaffirmer une certaine primauté de la sécurité nationale, mettent en cause les protocoles de sécurité actuels et les modalités courantes de gestion des risques. Elles imposent une relecture des principaux enjeux sécuritaires par référence notamment aux évolutions d’ordre géopolitique en lien avec les droits humains, ainsi qu’au rôle des acteurs territoriaux dans la définition et la mise en œuvre des politiques publiques qui accompagnent la transformation. À ce titre, la reconfiguration des politiques de sécurité sont issues d’un double mouvement caractérisé par la prise de conscience des acteurs de la société civile de leur vulnérabilité face certains risques qui renforce le sentiment d’insécurité et par l’élargissement des missions définies et mises en œuvre par les États au titre de l’agenda en matière de sécurité nationale.

Dans ce contexte, le cadre d’analyse proposé pour traiter de la nouvelle économie de l’espace et de la diversité des approches en matière de politique d’innovation, évoque une économie politique fondée sur l’hypothèse que les dynamiques structurelles et institutionnelles, ainsi que les rapports de pouvoirs qui sont à l’œuvre dans le contexte actuel, justifient le caractère prioritaire des enjeux de sécurité. Il repose également sur les interactions entre les facteurs économiques, qui témoignent de la conjoncture historique générée par le mode d’organisation social des activités, et politiques par référence aux rapports de pouvoir qui sont à l’œuvre (Serfati, 2009). À cet égard, les dynamiques de transformation que l’on observe actuellement tracent les contours d’une nouvelle trajectoire historique du capitalisme et de ses modes de régulation (Agiletta, 2019 ; Aglietta et Espagne, 2024).

Les tensions relevées à l’échelle mondiale sur la période récente, font écho à l’importance des risques de nature systémique qui résultent notamment de la numérisation des économies, de l’instabilité climatique et de la rupture des approvisionnements en ressources vitales, critiques ou stratégiques. Dans certains secteurs d’activité tels que l’énergie et l’espace, l’intérêt porté sur la résilience requise des entités critiques conduit à un rapprochement entre la sécurité d’approvisionnement et la politique de défense. À l’échelle de l’Union européenne, l’adoption d’une position commune sur les questions de sécurité demeure difficile car ces dernières relèvent de la souveraineté des États-membres et de la diversité des approches⁶. Le cas des États-Unis est quelque peu différent à la fois en termes d’agenda de sécurité et quant à leur statut dans les relations économiques et géopolitiques internationales. Dès la fin de la seconde guerre mondiale, le mobile sécuritaire porte principalement sur des facteurs économiques, dans la continuité de l’objectif de sécurité économique établi durant la période du New Deal⁷. La sécurité nationale (1947) remplace alors la défense nationale (1946) dans la perspective de maintenir l’ordre économique international et ses fondements. Nous retrouvons pleinement cet agenda sécuritaire dans la première dynamique de conquête spatiale par référence notamment au programme Apollo qui a été conduit par la NASA durant la période 1961-1972.

La conquête spatiale et son évolution récente

C’est en 1967 que naît le droit international de l’espace. Pour les deux puissances économiques et militaires de l’époque que sont les USA et l’URSS, il s’agit de garantir la non-appropriation du corps céleste par le premier arriv. Puisque la course à la Lune était sur le point de se terminer et que les acteurs ne savaient pas qui allait emporter la conquête spatiale, il fallait clarifier les règles du jeu dans un contexte de guerre froide et éviter une guerre dans l’espace. Deux principes fondateurs sont inscrits dans ce premier traité. Tout d’abord, celui qui a trait à la *propriété de l’espace* – À qui appartient l’espace –, qui interdit toute forme d’appropriation. Ensuite, le principe de *l’utilisation de l’espace* extra atmosphérique, lequel porte notamment sur le développement des activités militaires. Au bilan, l’un des premiers motifs de la conquête spatiale durant cette période était de montrer la puissance. Toutefois, la recherche scientifique a également été un vecteur important de l’exploration spatiale. À cet égard, les « missions Apollo » ont générées des retombées particulièrement importantes en matière d’innovations technologiques et organisationnelles. De surcroît, pareil exercice de résolution de problèmes à très grande échelle a reposé sur une forte coopération entre les pouvoirs publics, les entreprises et les universités aux niveaux national et international (Mazzucato, 2021). À titre d’exemple, on peut citer le *Committee on Space Research* (COSPAR) créé en 1958 par le Conseil international pour la science⁸. Il s’agit d’un groupe scientifique international dont l’objectif est d’organiser les travaux scientifiques en relation avec l’exploration spatiale⁹. Dans le contexte de la guerre froide, la création du COSPAR avait pour vocation de développer des coopérations Est-Ouest dans le domaine scientifique.

En 1979, une extension au traité de l’espace est proposée, laquelle vise à définir ce dernier comme l’expression d’un patrimoine commun de l’humanité. Cet accord inédit est proposé après l’annonce de la fin du programme lunaire des États-Unis. Il porte principalement sur la Lune et ses ressources. Il impose un *partage équitable* de ces dernières et des revenus tirés de leur exploitation¹⁰. Or le concept de *patrimoine commun de l’humanité*¹¹ n’a pas été pleinement compris. Bon nombre d’États n’ont donc pas ratifié le traité de 1979. Ce dernier est interprété comme un obstacle à l’exploration spatiale, alors que l’ambition visée était aussi de protéger les pays en développement, lesquels n’avaient pas les moyens (financiers, technologiques et humains) d’accéder à l’espace (Nakahodo, 2021)¹². Le concept d’utilisation pacifique de l’espace et des ressources spatiales n’interdit pas les activités spatiales militaires¹³ (Gaillard-Sborowsky, 2023). Dès les années 1960, les deux puissances lancent des satellites d’observation à des fins militaires. De surcroît, ces activités militaires interviennent comme des leviers importants pour développer l’industrie spatiale. Il s’agit principalement de contrats captifs : lorsqu’un pays ouvre un programme spatial militaire, il s’agit d’un programme/contrat pour son industrie. Au demeurant, les activités spatiales sont très risquées. Par conséquent, toutes les activités publiques ou privées réalisées dans ce domaine doivent être réalisées sous le contrôle et la responsabilité internationale des États, (activité sans risque pour les personnes, les biens et l’environnement).

Traditionnellement, les développements et autres applications technologiques qui sont principalement financés par le gouvernement et les corps institutionnels, concernent de faibles niveaux d’activité caractérisés par des coûts unitaires de production particulièrement élevés. L’attention porte alors principalement sur des technologies haut de gamme qui révèlent un haut niveau de fiabilité. Quant aux marchés, ils sont de petite taille, proposant des services de type « entreprise à gouvernement » ou « entreprise à entreprise ». Le secteur public y intervient au titre de financeur et d’usager principal avec pour objectif premier de fournir des biens publics tels que la sécurité nationale, la fierté nationale et la science fondamentale, lesquels ne seraient pas suffisamment « produits » s’ils étaient laissés au marché. À cet égard, la NASA a été fondée dans la perspective de fournir de tels biens dans un contexte de guerre froide. Sa structure de commandement et de contrôle a été conçue en fonction de cet objectif¹⁴. Toutefois, le modèle centralisé révèle des problèmes d’efficacité en matière d’allocation des ressources, d’agrégation des informations et d’incitation à l’innovation sur des marchés faiblement concurrentiels (Weinzierl, 2018). Pareils problèmes ont conduit, dans un premier temps, à une décentralisation partielle de certaines activités spatiales¹⁵. En effet, durant la décennie 1980, après la phase d’exploration, des activités commerciales autour des satellites de communication se développent. Or le secteur du satellite fut pendant longtemps le domaine réservé d’organisations internationales, principalement financées sur fonds publics. La tutelle étatique des opérateurs internationaux était alors assurée par les opérateurs téléphoniques nationaux qui étaient aussi leurs seuls clients. À ce titre, le consortium Intelsat en était l’illustration, lequel contrôlait les marchés américain et transatlantique des communications par satellite. La création, au début des années 1980, de l’opérateur privé PanAmSat va fortement bouleverser l’organisation du secteur (Blom, Sennequier, 2000). Pareil changement qui concerne bon nombre d’applications en lien avec l’espace, explique pour une bonne part la dynamique de privatisation des activités spatiales. Dans ce contexte, les États vont accompagner le développement d’un secteur commercial en intégrant les principes du traité international de l’espace dans leur droit national. L’espace devient alors plus facilement accessible avec près d’une cinquantaine de pays qui ont lancé au moins un satellite, sans disposer d’un moyen de transport spatial. Les activités de construction et de transport des satellites dans l’espace connaissent également un développement notable. Il s’agit aussi d’une époque particulièrement intéressante pour l’Europe avec Ariane¹⁶.

La période actuelle est marquée par l’émergence d’acteurs privés, lesquels investissent également dans les domaines militaires et de la sécurité. Leur importance éclaire de manière notable l’évolution récente des relations entre l’État et le marché. Cette dynamique de privatisation des fonctions de sécurité prend la forme d’une délégation d’activité dans le cadre d’une relation contractuelle entre l’État et une entreprise. Cette relation d’agence qui se traduit par une externalisation de fonctions, révèle un enjeu d’ordre financier. Elle permettrait aussi un déploiement plus vélocé de l’activité. Pareille dynamique interroge la capacité des États et la

performance publique dans l'exercice de production de la sécurité traitée ici au titre d'un bien collectif. La délégation d'activité contribue-t-elle à compléter ou affaiblir la puissance publique ?

Depuis les années 2000, on observe des dynamiques particulièrement structurantes en lien avec la privatisation des ressources spatiales et l'entrepreneuriat privé. Ces dynamiques sont portées par des initiatives réglementaires très fortes aux États-Unis et au Luxembourg qui visent à attirer des industriels et des entreprises non spécialisées dans le spatial, pour développer des projets spatiaux¹⁷. Cette période est également marquée par l'arrivée de nouveaux acteurs privés issus principalement de la *silicon Valley*, qui proposent des projets particulièrement innovants, mais également des méthodes de management qui rompent avec l'industrie spatiale traditionnelle. L'inspiration vient notamment du monde du numérique à l'image du modèle de la start-up avec pour volonté de réduire très fortement le coût des technologies (d'Arnagac et al., 2021 ; Bailletti, 2012). Selon Space Foundation (2023), la grande majorité des revenus qui proviennent des activités spatiales, lesquels s'élèvent à hauteur de 464 milliards de dollars en 2022, est liée à la technologie des satellites pour les télécommunications et d'autres services, (près de 362 milliards de dollars). Le reste est constitué des budgets spatiaux des gouvernements (États-Unis et autres) et des revenus commerciaux des services spatiaux hors satellites. Cette domination du secteur des satellites dans les revenus de l'espace devrait se maintenir dans un avenir prévisible, compte tenu notamment des projections de croissance substantielle des petites constellations de satellites pour l'observation de la Terre¹⁸. Au demeurant, dans une perspective de long terme, on anticipe des revenus croissants liés à la production dans l'espace ou à l'extraction minière sur des astéroïdes. Ces deux domaines font l'objet de recherches à des fins commerciales lesquelles sont financées par des acteurs privés. Au bilan, de fortes incertitudes demeurent quant aux gains économiques tirés d'un accès à moindre coût à une infrastructure permettant de travailler dans l'espace.

L'essor des acteurs privés dans le secteur de l'aérospatial témoigne de manière notable d'un processus plus global de reconfiguration des domaines dédiés au marché et à l'État depuis près de trois décennies. Sur le plan de l'analyse économique, le champ de l'économie publique et le cadre d'analyse pigouvien fondent la lecture traditionnelle par la « défaillance » des marchés quant à la fourniture de certains biens (publics), qui justifie l'intervention publique¹⁹. Depuis le courant des années 1970, d'autres approches dénoncent au contraire les « défaillances gouvernementales » et le comportement opportuniste des représentants de l'État qui justifieraient l'introduction du marché et une transformation du rôle de la puissance publique, laquelle devrait alors principalement veiller à la mise en place et au maintien des règles du jeu marchand. En matière de sécurité, la question porte désormais sur le type d'activités qui pourrait faire l'objet d'une privatisation et sur la localisation de la frontière entre les diverses formes de régulation marchande et publique. A cet égard, les courants de pensée qui reposent sur la théorie des coûts de transaction²⁰ et la théorie de l'agence²¹ proposent un fondement théorique aux politiques gouvernementales qui visent à mettre en place des partenariats de type public-privé. La délégation de l'État (le principal) à l'agent (l'acteur privé) doit s'opérer dans un contexte où les transactions marchandes font l'objet d'une réglementation particulière. Toutefois, des questions demeurent quant aux coûts associés aux conditions de contractualisation et aux régimes de concurrence sur les marchés dédiés ; certains dénoncent des marchés qui ne sont pas suffisamment concurrentiels ou « contestables » au sens de William Baumol²² pour permettre une véritable baisse des coûts à l'entrée. De surcroît, la délégation permet-elle à l'État de se concentrer sur ses missions fondatrices en matière de sécurité ? Là également, certains soulignent que des acteurs privés vont au-delà de leur mission, débordant sur les domaines réservés à l'action publique²³ (Singer, 2004). Dans le secteur de l'aérospatial, les forces armées et l'industrie de la défense dépendent de manière croissante de technologies civiles qui sont déployées dans le cadre de marchés de plus en plus diversifiés. Dans le même temps, les entreprises civiles achètent des technologies qui révèlent un intérêt certain pour les entreprises du secteur de la défense. Par ailleurs, les besoins croissants exprimés sur les marchés pour répondre aux grands défis sociétaux actuels influencent de manière notable l'industrie, laquelle joue un rôle significatif en matière de développement technologique dans de nombreux domaines. Ces dynamiques conduisent les entreprises du secteur privé et les administrations publiques à développer de nouvelles stratégies dans le domaine des technologies à double usage²⁴ (Institut Montaigne, 2023), également appelées technologies duales dans le sens où elles peuvent être utilisées à des fins civile et militaire.

La reconfiguration des activités de sécurité pose la question des relations entre l'économie et le politique dans un contexte actuel marqué par le retour en force de certains enjeux en matière de sécurité nationale. Cette question demeure au cœur des débats quant au niveau optimal de privatisation de ces activités. Par ailleurs, le capitalisme définit ici en tant que forme d'organisation sociale des échanges et de la production fondée sur l'autonomie entre l'économie et le politique, s'inscrit dans une perspective historique qui témoigne de changements quant au rôle respectif de l'État et du marché dans la régulation des activités économiques (Serfati, 2024 ; 2009). Ces changements résultent aussi de dynamiques transnationales qui font écho à la financiarisation des économies, à l'innovation technologique dans le secteur du numérique et aux problèmes globaux d'environnement. Ces dynamiques exercent une influence importante sur le mode d'organisation sociale de la production. Elles contribuent notamment à reconsidérer les différents niveaux de gouvernance de la sécurité, qui vont du local au global, et les relations de pouvoir entre ces derniers.

Les ruptures associées au développement de la nouvelle économie spatiale

La transition vers la nouvelle économie spatiale résulte de pressions qui s'exercent sur les acteurs et les activités. Tout d'abord, des pressions internes issues de contraintes budgétaires qui imposent de valoriser les biens et les services produits en termes économiques. La commercialisation des services spatiaux et la création d'activités marchandes deviennent alors prioritaires. Les agences spatiales doivent orienter leurs activités dans la perspective de produire des biens et des services commercialisables, de créer des emplois et de permettre l'émergence de nouvelles entreprises, contribuant ainsi à la croissance économique du pays (Besha et McDonald, 2016). Ces activités ont contribué à déplacer la demande croissante de technologies spatiales, d'infrastructures et de services intermédiaires vers les applications situées en aval de la chaîne de valeur, à destination de l'utilisateur final. Toutefois, cette dernière reste encore étroitement liée aux activités amont, lesquelles sont au cœur des compétences essentielles des agences spatiales publiques. Ces pressions internes résultent aussi de la concurrence croissante des nouvelles nations spatiales non européennes et des entreprises spatiales. En effet, aux côtés des acteurs nationaux ou régionaux traditionnels tels que les États-Unis et la NASA par référence notamment au projet *Perseverance* dédié à l'exploration de Mars²⁵, de nouveaux pays émergents apparaissent à l'image des Émirats Arabes Unis²⁶, de la Chine, de l'Inde et de Dubaï.

De surcroît, le secteur est fortement influencé par de nouvelles formes d'innovation qui se déploient à grande échelle dans d'autres secteurs d'activité. Ces retombées, appelées effets de *spin-in*, résultent de la dynamique de transformation des modes de production impulsée par la révolution digitale qui génère des industries plus de plus interconnectées, labellisées sous l'expression *Industrie 4.0*. De surcroît, la volonté de répondre aux grands défis sociétaux actuels, (tels que la migration, le changement climatique et la sécurité alimentaire), génèrent de nouvelles pressions auquel le secteur doit faire face. Dans ce contexte, les agences spatiales doivent s'adapter aux pressions internes au secteur en améliorant l'efficacité de leur mode d'allocation des ressources dans un contexte de concurrence mondiale accrue, tout en répondant aux défis et aux opportunités qui apparaissent à l'échelle de la société. Ces agences agissent au sein d'un système de gouvernance qui met en relation les autorités politiques et les acteurs de l'innovation, créant des politiques et des programmes d'innovation qui relient les objectifs stratégiques des gouvernements aux activités spécifiques des acteurs de l'innovation dans le secteur²⁷.

Ces diverses pressions engendrent une nouvelle économie des applications spatiales caractérisée par l'émergence d'une chaîne de valeur mondiale qui fait intervenir de nouveaux acteurs, mais également par une diversité des modèles d'affaire conçus par des entreprises qui considèrent l'espace comme l'un des moyens de répondre aux besoins de leur clientèle (Barbaroux, 2016). Ces acteurs révèlent une certaine forme de rapidité et d'agilité, proposant des systèmes évolutifs qui demeurent en rupture avec la tradition²⁸. A ce titre, les gains les plus élevés sont attendus dans le traitement, la diffusion et la fourniture des données. Parelles activités sont effectuées par des start-ups à croissance rapide qui proposent de nouvelles idées afin d'exploiter les données issues de l'Observation Terrestre (OT). Par ailleurs, en matière de politique d'innovation, la nouvelle économie de l'espace se caractérise aussi par des changements notables passant d'une approche centrée sur la mission visant des retours sur investissement garantis (en lien avec la réalisation de la mission), à une approche beaucoup plus souple pilotée orientée vers le marché, avec des potentiels de gains qui demeurent plus diffus, en lien notamment avec le développement d'un secteur de l'aérospatial privé particulièrement dynamique (Robinson et Mazzucato, 2019).

Parmi les caractéristiques les plus notables de la nouvelle économie de l'espace, les connexions recherchées entre l'usage en aval, les acteurs intermédiaires et les chaînes d'approvisionnement spatiales témoignent d'une grande diversité des relations entre le secteur de l'aérospatial et les autres secteurs (Hertzfeld, 2013). À ce propos, le marché des nouvelles applications spatiales tend à privilégier les services de type « entreprises à usagers », à travers notamment l'imagerie satellitaire fournie au titre d'un service qui résulte d'un accord entre une entreprise du secteur de l'aérospatial et une entreprise du secteur du numérique. Il s'agit là d'un véritable changement de paradigme²⁹. Les agences envisagent désormais une *approche non patrimoniale*³⁰, portée par la commande de services, des activités spatiales en confiant des contrats commerciaux à des agents privés. Cette approche est source d'attractivité pour ces entrepreneurs qui ont désormais pour perspective la commande publique et son caractère particulièrement rémunérateur, qui incite à des investissements privés financés par du capital risque (Baumann et al., 2018). L'ambition visée est de vendre un service complet à travers une logistique spatiale comprenant à la fois le lanceur, la capsule et les produits dérivés. L'entreprise SpaceX en est la parfaite illustration, laquelle réutilise ses lanceurs pour déployer une constellation de satellites de télécommunication à grande échelle³¹ (Agan, 2013)

Cette forte réduction des coûts repose sur un montage financier particulier qui s'inscrit dans le cadre d'un partenariat public-privé contribuant à financer les activités de ces start-ups par des contrats publics passés avec l'agence publique spatiale, telle que la NASA³² pour les États-Unis. En d'autres termes, la puissance publique, en l'occurrence le gouvernement américain, contribue grandement au financement des activités spatiales, (à l'image d'une forme de subvention). Les acteurs institutionnels sont donc toujours incontournables dans la nouvelle économie de l'espace. La commande publique représente encore plus de 90 % de la demande. En revanche, la période actuelle est marquée par l'émergence de nouveaux acteurs du secteur privé, à l'image de ces entrepreneurs milliardaires, qui sont prêts à investir massivement dans l'espace et ses nouvelles applications³³. Cela étant, la nouvelle économie de l'espace ne porte pas seulement sur cette nouvelle génération d'entrepreneurs. En effet, des entreprises bien établies comme Airbus, Boeing, Eutelsat³⁴, Orbital Sciences et Thales restent encore aujourd'hui des acteurs importants du secteur³⁵. De surcroît, elle ne saurait être réduite à la seule image de revenus en forte croissance. Elle évoque plutôt une nouvelle approche. Dans le modèle centralisé, les entreprises privées travaillant avec l'agence publique spatiale sont en grande partie couvertes contre le risque d'échec des investissements réalisés dans l'espace par le biais de *contrats à prix coûtant majoré*. En revanche, cette assurance contre pareil risque a pour contrepartie le faible accès aux gains potentiels d'un marché spatial commercialisé. À l'inverse, l'approche fondée sur le modèle décentralisé permet aux entreprises privées de partager à la fois les risques et les gains (potentiels) des investissements réalisés dans le secteur³⁶ (Saran et Weinzierl, 2021 ; Weinzierl et Accolla, 2016).

Ce changement de paradigme a déplacé le risque initialement supporté par la puissance publique vers les entreprises privées, réduisant ainsi la nécessité pour l'agence spatiale d'utiliser des dispositifs combinant une surveillance accrue des activités spatiales et des contrats à prix coûtant majoré pour contrôler les coûts et encourager l'innovation. Dans le cadre du modèle décentralisé, les entreprises privées ont donc la liberté de concevoir et de fabriquer leurs produits comme elles l'entendent, l'État n'apparaissant plus comme un agent de surveillance mais plutôt comme une organisation fournissant des informations. Par ailleurs, de nouvelles formes de contractualisation sont proposées, lesquelles permettent aux acteurs privés de conserver la propriété intellectuelle des innovations créées³⁷, alors que dans le cadre du modèle centralisé, le contrat qui détermine la relation entre l'acteur (privé) qui « remplit » la mission et celui (l'État) qui la commande, octroie le droit de propriété intellectuelle au second en raison même de son statut de commanditaire.

Les programmes de partenariat public-privé ont stimulé l'activité et l'innovation, fournissant ainsi un nouvel élan à l'activité de lancement commercial privé qui repose sur la « réutilisation », c'est-à-dire la capacité d'utiliser plusieurs fois des composants de véhicules de lancement et d'engins spatiaux³⁸. La réutilisation permet la rentabilité de l'activité et demeure particulièrement rémunératrice pour financer d'autres projets encore plus ambitieux en matière d'exploration spatiale. De surcroît, le service proposé renvoie à des enjeux sociétaux importants tels que la fracture numérique et les besoins en matière de défense³⁹. Avec cette nouvelle mission visant à orienter les investissements privés vers les infrastructures et les services spatiaux (Mazzucato, 2018), l'État peut conduire de nouvelles formes d'achat (passation de marchés) pour créer un marché destiné à des lanceurs construits et exploités par le secteur privé. A ce titre, les exemples récents de lanceurs et d'utilisation de la Station Spatiale Internationale montrent que l'agence spatiale américaine est passée d'un contrôle fort de la construction et de l'exploitation de grandes infrastructures spatiales publiques à la délégation du pouvoir pour définir les orientations quant à l'usage et la construction de ces d'infrastructures, lesquelles sont financées par des fonds publics transmis au secteur privé ; les profits éventuels de ces activités revenant au seul secteur privé.

La perspective de gains importants qu'autorise le modèle décentralisé attire de nombreux acteurs extérieurs lesquels souhaitent investir dans le secteur spatial et ses nouvelles applications. Selon Bryce Space & Tech⁴⁰ (2023), les investissements extérieurs dans les nouvelles entreprises du secteur spatial sont passés de moins de 500 millions de dollars par an entre 2001 et 2008 à près de 8 milliards de dollars 2022. Dans ce contexte, le modèle décentralisé introduit un *éthos de l'industrie de masse* fondée sur des modèles d'affaire caractérisés par des flux de production élevés et des coûts unitaires faibles. Parelles modèles n'imposent pas la fiabilité comme premier critère de la performance⁴¹ ; l'effet de masse tend à privilégier le modèle du « prêt à porter » qui vise l'accès au plus grand nombre au détriment de celui du « tailleur » exigeant sur la qualité et bien plus coûteux (Denis et al., 2020). De nouveaux acteurs tentent alors de pénétrer les marchés malgré des coûts à l'entrée importants. Ces coûts baissent avec l'arrivée de nouveaux acteurs qui proposent des équipements, des plateformes satellitaires et des services avec la volonté de verticaliser la chaîne de valeur⁴², ce qui génère une grande variété de modèles d'affaire (Attour et Barbaroux, 2016). Par ailleurs, la forte diminution des coûts repose sur la *miniaturisation* nécessaire des technologies et des objets dédiés aux applications spatiales, ce qui demeure une constante de l'industrie spatiale (Denis et al., 2020). En revanche, le secteur de l'aérospatial exige toujours une dotation importante en *capital humain* par référence à des niveaux de qualification requis particulièrement élevés. En effet, la connaissance fine des technologies spatiales et des contraintes associées aux activités dans l'espace contribue à la crédibilité des acteurs concernés, laquelle représente un véritable avantage concurrentiel dans le contexte de marchés fortement concentrés.

L'éthos de l'industrie de masse renvoie également à la dynamique de *diversification* des activités spatiales ouvertes à la commercialisation (Crane et al., 2020). Parmi les principales entreprises actuellement actives dans la commercialisation de l'espace, on peut citer celles spécialisées dans « l'accès à l'espace » qui œuvrent au lancement de personnes et de charges utiles dans l'espace. Par ailleurs, les sociétés de « télé-détection » fournissent des images de la Terre et sont étroitement liées aux sociétés « de données et d'analyse satellitaires », qui s'adressent à d'autres clients. A cet égard, le satellite⁴³ qui demeure une activité traditionnelle, repose sur des enjeux économiques en lien avec les grands défis sociétaux et le développement des télécommunications qui peuvent contribuer à y répondre. On y ajoute désormais les technologies d'observation de la terre à des fins militaire, environnementale et de gestion des catastrophes naturelles. D'autres technologies sont également concernées, lesquelles concernent la filière de l'imagerie optique et de l'imagerie radar, qui permettent une observation nuit et jour, et les satellites de navigation pour le système de positionnement mondial, (à l'image du système américain *Global Positioning System* ou GPS). Les revenus potentiels les plus importants sont associés à la collecte et au traitement des données qui révèlent des enjeux importants en matière de diffusion et de transmission de l'information⁴⁴. L'idée serait de constituer un continuum internet terre-espace via des méga-constellations de satellites, ce qui pose la question de la manière dont on opère les liens entre les satellites, mais aussi entre les satellites et la terre. Pareil continuum serait facilité par la constitution d'un *cloud spatial*, (assurant la connectivité entre la terre et l'espace). Sur un plan concurrentiel, il y a la volonté d'être plus rapide que les communications terrestres.

Les satellites du secteur privé peuvent être utilisés à des fins multiples couvrant les trois communautés d'usagers que l'on recense aujourd'hui dans le secteur du spatial : les scientifiques, les militaires et les acteurs

économiques. L'enjeu réside ici dans la diversité des usages pour un même satellite, contribuant à la rentabilité de l'activité et de production de données. Ces usages qui ont trait à l'observation terrestre et spatiale, peuvent contribuer à la connaissance scientifique tout en répondant à différents enjeux en matière de sécurité. Ces usages renvoient désormais à de nouveaux secteurs et enjeux. Ils peuvent contribuer à la gestion des ressources naturelles à des échelles nationale, territoriale et locale. Ils concernent aussi les télécommunications, le traitement et la diffusion des données, ainsi que le GSM orbital qui représente la norme numérique pour le téléphone mobile. Au demeurant, ils peuvent intégrer des enjeux environnementaux, sociaux et de gouvernance. L'imagerie satellitaire peut alors fournir des données relatives aux activités des entreprises et à leurs impacts, contribuant ainsi à l'orientation des investissements. De surcroît, les applications satellitaires peuvent contribuer à la surveillance des émissions de gaz à effet de serre des entreprises, des villes et des régions, aidant alors les services publics et les collectivités territoriales à optimiser les infrastructures d'énergie renouvelable et les activités d'exploitation minière. Ces applications permettraient également d'anticiper les impacts du changement climatique et des politiques climatiques sur certaines industries ou secteurs d'activité. Enfin, face à la difficulté croissante rencontrées par certaines agences gouvernementales pour suivre les débris orbitaux, les entreprises privées pourraient contribuer à la surveillance et à la gestion de ces déchets spatiaux potentiellement catastrophiques. Il s'agit là encore d'une demande potentielle importante.

Parmi les autres activités du secteur, les entreprises spécialisées dans les « habitats et stations spatiales » prévoient de fournir des installations sécurisées pour la fabrication, la recherche et même le tourisme en « orbite terrestre basse », (l'espace compris entre 160 km et 2 000 km d'altitude). À ce titre, les premiers projets d'engins et de vols suborbitaux remontent aux années 2000. On pense notamment au projet Virgin galactique qui propose en 2021 un vol de 45 minutes, avec le franchissement de l'espace atmosphérique permettant au touriste de prendre le statut d'astronaute pour un coût de 200 000 dollars. Il s'agit également du transport spatial privé vers des orbites basses habitées, telles que la Station Spatiale Internationale qui a déjà accueilli des touristes sur des vols publics. Il va s'agir désormais de proposer des vols privés pour des personnes privées qui vont séjourner dans la station. On pense ici à l'entreprise *Axiom Space* qui souhaite créer le premier « hôtel spatial » ; la première station spatiale privée proposant un tourisme orbital et non suborbital. Dans ce domaine, la question de la sécurité des vols demeure centrale pour le déploiement de l'activité touristique.

Des entreprises du secteur visent des activités situées « au-delà de l'orbite terrestre basse », avec des objectifs allant de la fabrication spatiale à l'extraction minière sur des astéroïdes, en passant par la colonisation de la Lune et de Mars. Actuellement, les programmes d'exploitation des ressources extraterrestres portent principalement sur une exploitation dans l'espace avec pour ambition d'implanter l'être humain sur des sites extraterrestres. Ces ressources seraient alors exploitées pour construire les structures d'accueil sur place et pour produire du carburant. Pareille forme d'exploitation nécessite de mettre en place des escalas afin d'alimenter en ressources et énergies les projets spatiaux. Pour réduire le coût du lancement et du transport spatial, il s'agirait établir des zones de ravitaillement sur la Lune45. Ces activités contribueraient au développement d'une *nouvelle économie de l'espace dans l'espace* avec des services dédiés aux futures stations spatiales, aux usines de production dans l'espace, et aux futures chaînes logistiques qui seraient implantées dans l'espace avec pour fonction de desservir des objets qui transitent dans l'espace (vers la Lune et Mars). Enfin, certaines ressources rares particulièrement intéressantes sont présentes sur les astéroïdes, pas seulement sur les corps célestes46. Actuellement, l'activité d'extraction de métaux rares sur ces astéroïdes et leur transfert sur terre demeurent particulièrement difficiles et coûteuses. La perspective de moyen-long terme serait de prendre possession de ces corps et de les rapprocher de l'orbite terrestre pour permettre leur exploitation et le retour des ressources extraites sur terre. À ce titre, la question de la compatibilité de ces activités avec le traité de l'espace et son premier principe est posée. Comment encadrer juridiquement les activités d'extraction minière ? Ce sont des activités qui entrent en contradiction avec le traité de 1979. Or ce traité n'a été que peu ratifié. Par ailleurs, certains disent qu'il n'y a pas de contradiction puisque, dans les années 1970, il était impossible d'anticiper de telles avancées sur la période récente, lesquelles transforment en profondeur le secteur, les modèles qui lui sont associés, ainsi que les acteurs.

Au demeurant, avec la démultiplication du nombre d'objets et autres satellites dans l'espace, les activités de suivi, de maintenance et de démantèlement devraient se développer. La nécessité de se débarrasser des débris de l'espace apparaît comme une opportunité : « éboueurs » ou « recycleurs » de l'espace spécialisés dans la captation et valorisation d'objets spatiaux47.

Le rôle de l'innovation dans la nouvelle économie spatiale

Les priorités et autres enjeux sécuritaires évoluent selon les contextes géopolitique et économique, ainsi que selon la perception des agents et le cadre institutionnel dans lequel ils décident et agissent. A ce titre, la nouvelle économie de l'espace et les stratégies récentes portées par les agences spatiales révèlent des particularités qui témoignent de la diversité des formes d'organisation sociale des échanges et de la production (Pasco, 2017) ; une diversité qui permet d'éclairer certaines des différences relevées entre les approches américaine et européenne, mais également des divergences au sein même de l'Europe entre la France, l'Allemagne et l'Italie quant aux grandes orientations de leur politique spatiale (Damis, 2020, 2021).

La littérature qui traite de la diversité des capitalismes s'est fortement développée depuis les travaux de Shonfield (1965), avec de nombreuses contributions de l'école française de la régulation (Aglietta, 1976 ; Boyer, 1986, 2003 ; Amable, 2005, 2009). Notre attention vise principalement celle centrée sur la notion de crise qui se développe à partir des années 1990, laquelle traite de l'émergence de nouveaux modèles de production et de la diversité des institutions collectives créées pour répondre aux grandes questions de société. Partant d'une typologie des capitalismes fondée sur la structure des États et sur le degré de planification des activités économiques, le dualisme traditionnellement relevé entre la logique de « l'État fort » et celle de « l'État faible » repose sur des structures institutionnelles, (telles que les systèmes bancaire et financier, les entreprises publiques, les représentations salariales,…) , qui influencent grandement les mécanismes de coordination et autres procédures de décision aussi bien dans le domaine public que dans le domaine privé. Ces structures impriment également leur marque sur les dynamiques technologiques qui sont à l'œuvre, générant ainsi une grande diversité des trajectoires historiques nationales et régionales (Piore & Sabel, 1986). La notion de crise est alors associée à l'évolution des techniques et au contexte institutionnel dans lequel elle s'opère. Elle exprime un point de bifurcation ou encore l'expression d'un « clivage industriel » entre plusieurs stratégies ou politiques de production et de diffusion de l'innovation, lesquelles doivent être accompagnées par des mécanismes de gouvernance/régulation multiveaux.

La diversité des activités spatiales et des politiques d'innovation

Dans ce contexte, la nouvelle économie spatiale révèle une diversité quant aux modalités de régulation et aux politiques qui sont mises en œuvre. Si l'on considère la gouvernance des risques et la conception de l'assurance, on peut alors opposer *l'assurance alpine* fondée sur le principe de solidarité et la neutralisation des risques48 à l'assurance anglo-saxonne d'origine maritime49 qui s'appuie sur « le prêt à la grosse aventure » et sur une gestion spéculative du risque (Albert, 1991a ; Diemer, 2010). Ces deux conceptions de l'assurance permettent d'éclairer la diversité des modèles d'affaire qui sont à l'œuvre dans le secteur du spatial. D'un côté, une approche européenne plutôt centrée sur le temps long qui privilégie le modèle de *l'entreprise communautaire* et l'esprit d'appartenance à une communauté d'intérêt. De l'autre, l'approche américaine caractérisée par *l'entreprise marchandise*, mettant l'accent sur l'actionariat et le profit, lesquels sont étroitement liés à la réussite individuelle. Ces deux approches se distinguent aussi quant à l'importance qu'elles accordent aux biens marchands qui dépendent principalement des conditions du marché, et aux biens mixtes qui relèvent pour partie de l'initiative publique (Hall et Soskice, 2001). Au demeurant, elles témoignent de l'hétérogénéité des institutions qui contribuent à la régulation des activités économiques. Aux côtés de l'État et de l'entreprise, les associations officielles telles que les chambres de commerce et d'industrie, les communautés et autres réseaux informels tels que les groupements d'entreprises, ainsi que les entreprises institutionnelles qui créent une certaine forme de communauté interne, peuvent compléter ou même remplacer le marché (Crouch et Streeck, 1996). Les liens formels et informels que ces institutions initient et développent peuvent révéler une certaine efficacité dans les domaines de la production et de l'innovation technologique50.

Cette diversité croissante des activités spatiales influence grandement le système d'innovation et sa dynamique. Pareille dynamique repose sur de nouveaux arrangements institutionnels entre les différentes nations spatiales, le secteur public et le secteur privé, l'industrie spatiale et d'autres industries, ainsi qu'entre le secteur spatial et la société qui est confrontée à de nouveaux défis allant du changement climatique à l'immigration (McGrath et al., 2014 ; European Commission, 2013). À cet égard, le développement d'une *économie spatiale décentralisée* qui repose sur une commercialisation plus poussée de l'espace, dépend de la nature des relations entre les secteurs public et privé ; faut-il renforcer les partenariats public-privé ou, à l'inverse, séparer plus clairement les deux secteurs ? Cette question interroge le rôle des agences publiques spatiales sur les dynamiques d'industrialisation de l'espace commercial, ainsi que sur leur capacité à produire des biens publics en réponse aux grands défis sociétaux.

Dans ce contexte, les agences publiques visent notamment à *corriger* différentes formes de défaillances en lien, tout d'abord, avec la présence d'externalités positives qui ne sont pas prises en compte par les marchés. En effet, les activités spatiales sont à l'origine *d'effets de report* consécutifs sur d'autres activités économiques. Or le taux de retour sur investissement engendré par les technologies spatiales demeure très difficile à évaluer en raison notamment de la nature diffuse du « retour » positif sur la société, de sa référence au temps long et de son caractère hautement incertain. Ce problème d'évaluation témoigne de la forte *complémentarité*51 entre les activités (Brynjolfsson et Milgrom, 2013). De nombreuses entreprises de la nouvelle économie spatiale proposent des modèles d'affaire qui n'ont de sens que lorsque d'autres activités sont déjà en place. Les lancements seraient chers s'il n'y avait que peu à faire et nulle part où aller dans l'espace. Par conséquent, les technologies qui contribuent à la commercialisation de l'espace52 ne peuvent révéler un rendement élevé qu'en tant que composantes d'un ensemble plus large qui comprend d'autres technologies et activités. Toutefois, la possibilité de tirer profit de ces complémentarités peut inciter certains acteurs à intégrer différents segments de la chaîne de valeur de manière à bénéficier d'économies d'échelle et de gamme, lesquelles peuvent conduire, en retour, à une concentration plus forte des marchés et à une acuité plus faible de la concurrence sur ces derniers. De telles dynamiques sont bien connues dans le secteur de l'aérospatial. À ce titre, les récents efforts de la NASA pour coordonner la commercialisation de l'espace ont remporté quelques succès. En effet, le programme COTS53 et ceux associés n'ont pas seulement subventionné les lanceurs commerciaux, ils ont également maintenu une structure de marché concurrentielle grâce à un ensemble diversifié de contrats d'attribution.

Les asymétries d'information, le niveau de risque élevé et le problème quant à la prise en compte de telles complémentarités appellent à une *coordination* de ces activités par l'entremise des agences publiques spatiales. Ces dernières peuvent alors contribuer à renforcer les relations entre les différents acteurs des systèmes d'innovation, contribuant ainsi à en améliorer l'efficacité. Au demeurant, les agences publiques peuvent intervenir de manière à « *corriger* » l'orientation des activités d'innovation, par la mise en place de politiques centrées sur des objectifs, avec pour perspective d'initier un changement transformatif qui répondrait aux grands défis sociétaux (Mazzucato, 2017). Ces politiques permettraient alors de créer de nouveaux marchés qui n'auraient pu émerger via la seule correction des défaillances des marchés et des systèmes d'innovation. Cela étant, des questions demeurent quant à la politique publique qu'il s'agirait de mettre en œuvre. Si l'on entrevoit un soutien par voie de subvention à ces technologies interdépendantes, quelle serait alors la forme de subvention la plus efficace, (un partage des coûts, des garanties de revenus ou un prix) ? Comment le surplus d'un tel système pourra-t-il être partagé entre les acteurs ? Si la fourniture de ces technologies engendre une situation de monopole naturel, comment les décideurs politiques devraient-ils réagir ?

L'approche américaine

L'approche américaine porte principalement l'attention sur le développement de l'économie spatiale décentralisée, autorisant en cela l'exploitation à grande échelle de l'espace dans toutes ses dimensions, avec une interrogation toutefois quant à la manière de prendre en compte l'intérêt public (Hertzfeld, 2007). En effet, la dynamique de commercialisation des produits et services spatiaux, ainsi que l'efficacité des marchés qui leur sont associés, ne garantissent en rien l'alignement entre les intérêts privé et public et le respect de jugements d'ordre éthique exprimés dans le domaine public. Il s'agit d'une approche fondée sur les valeurs d'usage qui doit arbitrer les éventuels conflits d'intérêt entre les différents « usagers » de l'espace. À ce titre, Krolikowski et al. (2021) évoquent le conflit potentiel entre les tenants de l'intérêt commercial pour les astéroïdes et ceux qui portent un intérêt pour ces mêmes astres au titre de l'exploration scientifique ou de la colonisation de l'espace ; l'exploitation minière peut détruire le matériel d'intérêt pour les scientifiques tout en extrayant des ressources qui pourraient être utiles aux futurs colons. La question qui est alors soulevée réside dans la manière d'octroyer des droits d'usage, faisant appel à la réglementation pour réguler ces derniers.

À cet égard, les traités spatiaux internationaux existants n'approuvent ni n'interdisent l'utilisation privée des ressources dans l'espace. Depuis 2015 et l'adoption du *Commercial Space Launch Competitiveness Act*, les États-Unis autorisent la possibilité d'accorder un droit de propriété sur les ressources d'un corps planétaire à celui qui « y arrive le premier » (Leon, 2018). Il s'agit d'un régime d'autorisation nationale de licence qui permet l'exploitation des ressources extraterrestres. Ce traitement par la loi des droits de propriété reflète le principe selon lequel le premier acteur à utiliser une ressource gagne le droit de « posséder, transporter, utiliser et vendre ». À ce propos, la loi américaine de 2015 s'inspire grandement de celle fédérale en lien avec la conquête de l'ouest, (*the Home State Act*, 1852). Les Américains sont persuadés que la conquête spatiale s'inscrit dans la continuité de la conquête de l'ouest (Achilleas, 2016 ; de Man, 2016). En d'autres termes, ils appliquent à l'espace des principes qui régissaient la conquête de l'ouest. Même si pareil droit de propriété accordé de la sorte peut être utilisé d'une manière qui s'oppose aux intérêts de la société, l'absence de ce dernier révèle aussi un coût d'opportunité en lien avec des ressources qui ne seraient pas exploitées. Aux côtés des États-Unis, le Luxembourg et d'autres pays considèrent que les lois nationales qui régissent les activités d'exploitation des ressources spatiales n'entrent pas en contradiction avec le traité de l'espace de 1967, car ce dernier ne porterait que sur les corps célestes, non sur les ressources de ces corps54. Il ne s'agit donc pas de privatiser la Lune et d'autres astres, mais bien d'autoriser des acteurs économiques à exploiter les ressources spatiales au nom de la liberté de l'espace. Ces pays évoquent aussi les opportunités que pourrait générer ces activités d'exploitation des ressources spatiales. Ces dernières contribueraient à développer bon nombre de marchés dédiés à la donnée spatiale, à l'orbite basse et au grand nombre de satellites qu'il s'agirait de lancer dans l'espace pour répondre à diverses demandes en lien notamment avec les grands défis sociétaux. Au demeurant, ces activités permettraient davantage d'autonomie vis-à-vis des ressources terrestres pour la conquête spatiale.

Selon Weinzierl (2018), une solution à ce conflit serait offerte par John Locke (1689) et la « provisio lockéenne » proposée par le philosophe Robert Nozick (1974). Selon cette théorie de la propriété, l'appropriation d'une ressource peut être justifiée si chaque individu connaît un niveau de bien être similaire à celui observé dans un monde où toutes les ressources étaient restées sans propriété. Cette justification demeure au cœur de la position portée par les partisans de la loi américaine de 2015. Il n'en demeure pas moins que les questions relatives à la répartition des gains et des ressources tirés de l'exploitation de l'espace, lorsqu'elle est définie dans le cadre de structures de régulation non coordonnées, demeurent hautement controversées. Ces questions ont également trait au régime de concurrence à l'œuvre entre les acteurs privés et parmi les nations, avec le risque d'une course vers le « bas » de la réglementation. Dans pareil contexte, quelle devrait être la meilleure structure de droits de propriété de l'espace qui serait définie et mise en œuvre sous un

contrôle d'ordre politique veillant au respect de l'intérêt public ? Par ailleurs, les activités spatiales ne sont pas entre les seules mains des acteurs privés. Certains pays ont privilégié la création de droits de propriété dans l'espace, arguant que les ressources spatiales non appropriables devraient être la propriété commune de l'humanité. Les négociations internationales qui se déroulent actuellement au sein du comité du traité de l'espace, une institution des Nations Unies dédiée au développement du droit de l'espace, prennent une dimension hautement diplomatique. Les États-Unis ne veulent pas engager de discussion avec des pays qui ne seraient pas en accord avec leur approche, (il s'agit notamment de la Russie et de certains pays en développement55). En parallèle, ils ouvrent des négociations bilatérales dans le cadre du programme Artémis56, proposant des partenariats si le partenaire potentiel s'engage à reconnaître l'interprétation américaine du traité de l'espace. Il faut donc épouser les mêmes valeurs si l'on souhaite exploiter les ressources extraterrestres. Ces valeurs communes sont partagées par un certain nombre de pays tels que l'Italie, l'Australie, le Luxembourg, l'Ukraine, les Émirats Arabes Unis, le Canada, le Royaume-Unis et le Japon. La Chine, quant à elle, demeure relativement silencieuse, dans l'attente du « bon moment » pour affirmer son intérêt vis-à-vis des ressources extraterrestres, avec pour perspective de possibles conflits autour de l'accès à ces ressources plus ou moins concentrées dont la disponibilité reste limitée (Goswami, 2018).

Pendant près de cinquante ans, la NASA a occupé une position centrale dans le « système d'innovation » spatial américain, contribuant au financement direct de l'innovation technologique pour réaliser ses propres missions. De surcroît, cette position l'a conduit à fixer les orientations du changement et à superviser les entreprises du secteur privé qui fournissait les technologies. Toutefois, après deux accidents tragiques, avec la navette Challenger en 1986 et la navette Columbia en 2003, l'approche s'est détournée de la navette57 et du modèle centralisé qu'elle représentait. La Commission présidentielle qui détermine les grandes orientations de la politique d'exploration spatiale des États-Unis (2004) a précisé que le rôle de la NASA devait être limité aux seuls domaines où il existe une démonstration irréfutable que seul le gouvernement peut exécuter l'activité proposée. La stratégie de décentralisation qui est alors adoptée par le gouvernement américain durant les années 2000 et 2010, concerne principalement les services de transport orbitaux, la commercialisation de l'orbite terrestre basse et l'utilisation de la Station spatiale internationale. L'évolution du système d'innovation spatiale civil qui en résulte repose sur le partenariat public-privé et des arrangements institutionnels qui permettent à l'agence spatiale américaine d'adopter un rôle plus ciblé avec pour priorités l'exploration spatiale et les sciences fondamentales (Hertzfeld, H.R., 2002) ; il s'agit de biens publics dont la production relève de ses compétences de base. En revanche, elle délègue le développement économique de l'espace en grande partie au secteur privé, même si le degré de décentralisation diffère selon les composantes du système d'innovation spatiale.

Avec sa nouvelle approche des achats pour les lanceurs, la NASA confie la responsabilité de la conception et de la livraison au secteur privé, tout en accordant des prêts et en garantissant les ventes à l'avance58. Pareille approche permet à l'agence de mobiliser/lever des capitaux privés pour fournir ses services de transport à un coût nettement inférieur à celui des vols précédents de la navette spatiale59. Deuxièmement, elle permet à la NASA de réorienter son temps et son budget vers des projets visant à créer un *actif stratégique* autour des lanceurs, fondé sur la tarification au *coût marginal* de l'usage de ses installations et sur de nouvelles modalités en matière d'indemnisation du risque, (à l'image de la garantie proposée sur les ventes). En laissant la direction du développement et la décision quant à la fourniture des services de lancement au secteur privé, la NASA s'éloigne d'un rôle de direction fort, où la conception et le développement étaient sous sa seule responsabilité, vers une approche plus souple où le secteur privé devient un acteur de premier plan, non seulement dans la production de technologies et de services sous contrat, mais aussi en décidant de l'orientation du développement technologique et de celles ayant trait à certaines parties du système d'innovation spatiale (Deleidi et Mazzucato, 2021 ; Mazzucato et Robinson, 2017). En mars 2017, le secteur spatial américain a décidé d'aller plus loin dans la décentralisation avec la signature du *NASA Transition and Authorization Act*, lequel demande désormais aux fournisseurs commerciaux privés d'effectuer des missions de l'Agence spatiale américaine, telles que le transport de personnes et de charges utiles vers la Station spatiale internationale. Ce cadre juridique permet également au secteur de céder la direction des activités en orbite terrestre basse à des fournisseurs spatiaux commerciaux. Concernant l'usage de la Station spatiale internationale, le Center for the *Advancement of Science in Space* (CASIS), une organisation à but non lucratif créée en 2011, a pour mission de gérer près de 50 % des activités du Laboratoire national de la Station, *the ISS US National Laboratory*, ainsi que les masses amont et aval associées. Ce dernier fournit gratuitement au secteur privé (et à tout autre acteur) 50 % de la charge utile du lanceur, 50 % du temps scientifique de ses astronautes à bord de la Station et 50 % de la livraison de la charge utile de retour, sans qu'il soit nécessaire de fournir un retour à la NASA. Dans le cadre de cet arrangement institutionnel novateur, les conditions d'utilisation de la Station spatiale internationale repose sur une *délégation du contrôle* confiée à des organisations intermédiaires qui négocient les accords entre l'agence et les usagers potentiels60. La NASA paie généralement la facture en fournissant un accès à l'espace grâce à ses lancements vers la Station spatiale, ainsi qu'un accès gratuit au Laboratoire national américain. Le CASIS agit comme un *courtier* dans cette allocation avec un rôle décisionnel fort et un pouvoir quant à l'usage de la partie américaine de la Station spatiale internationale. Là également, l'Agence spatiale américaine s'éloigne de son rôle de directeur dominant des activités de recherche et développement (Foray et al., 2012), privilégiant des politiques davantage axées sur la diffusion (Chiang, 1991), avec pour perspective de soutenir la création des conditions propices à l'émergence des marchés.

L'approche européenne

Au regard du contexte actuel, la politique spatiale européenne prend une dimension importante, prenant part à la couverture de plusieurs enjeux sécuritaires en lien avec le climat, l'énergie, l'alimentation, la santé et la défense, lesquels font écho à la multiplication récente de crises qui ont frappé le continent (Madan et Halkias, 2020). Pareille politique contribue à la construction d'une vision géopolitique commune qui viendrait appuyer la transition vers des modèles économiques qui répondent aux divers agendas environnementaux et de développement. Elle est principalement financée par le Programme spatial de l'Union européenne, le Programme-cadre pour la recherche et l'innovation et, depuis 2021, le programme d'Infrastructure de Résilience, d'Interconnectivité et de Sécurité par satellite, (IRIS). La coordination des activités de recherche et de développement est assurée par l'Agence spatiale européenne (ESA) ; une agence publique paneuropéenne qui fournit également des infrastructures dédiées aux opérations spatiales européennes. Dans la Convention signée en 1975 qui définit les contours de ses missions, l'ESA avait pour objectif majeur de définir et mettre en œuvre la politique industrielle du secteur spatial en Europe61. Il s'agissait alors de construire une industrie européenne compétitive fondée sur les activités de recherche et développement et l'efficacité dans le recours à des sous-traitants externes. Cette politique centrée sur la « correction des défaillances du marché », se concentrait sur les activités amont à fort investissement et à haut risque. Par la création d'une véritable chaîne d'approvisionnement, l'Agence spatiale européenne contribua à la croissance de bon nombre des plus grandes entreprises aérospatiales européennes.

Sur la période récente, l'attention porte sur *l'autonomie stratégique* de l'Union européenne62 par référence aux dépendances et autres vulnérabilités qui peuvent affecter les infrastructures spatiales, mais aussi la société. A cet égard, l'autonomie stratégique s'applique aux différents domaines de la navigation par satellite, avec Galileo63 et EGNOS64, et l'observation de la terre (OT), par référence au programme Copernicus65. Elle concerne également les capacités en matière de télécommunication gouvernementale qui contribuent à la protection des infrastructures critiques dans les secteurs de l'énergie, de la santé et du spatial. Cette mission s'inscrit dans une dynamique de développement des activités de commercialisation qui accordent une attention croissante aux applications, produits et services situés en aval des diverses chaînes de valeur spatiales. Pareille dynamique résulte de la volonté d'inclure dans la politique européenne d'innovation des produits et services destinés aux consommateurs, ainsi que des biens publics qui répondent aux défis de société, en plus de la fourniture traditionnelle des technologies et des services scientifiques. Toutefois, la politique d'innovation n'a pas pour finalité de promouvoir les activités marchandes en tant que telle, mais plutôt de solliciter ces dernières comme une source importante *d'effets de report (retombées) à long terme*. L'ESA s'oriente vers une approche plutôt centrée sur les défis sociétaux (Clomann, 2021). À ce titre, l'effort réalisé dans l'observation de la Terre et la fourniture de données en libre accès qui profitent au monde entier en est une illustration.

Cette attention portée sur l'aval (services et applications), plutôt que sur l'offre (satellites, lanceurs et autres technologies et infrastructures), apparaît comme une rupture dans la politique spatiale européenne. Les agences spatiales civiles européennes doivent alors définir les services et les applications souhaitables, rechercher des stratégies pour soutenir la création de chaînes de valeur s'étendant de l'amont à l'aval, et les créer de manière à combiner la fourniture de biens publics, ainsi que la création d'une industrie spatiale européenne forte et compétitive à l'échelle mondiale qui apporte des emplois, de la croissance et d'autres avantages aux citoyens européens ; une mission clairement énoncée dans sa Convention fondatrice. Dans ce contexte, l'exigence d'autonomie revendiquée par l'Union européenne sur l'ensemble des chaînes de valeur, conduit à privilégier les prestataires européens, sans déroger toutefois aux engagements internationaux. Par ailleurs, de nouvelles réglementations visent à établir les conditions d'une *concurrence loyale* vis-à-vis des pays tiers66. L'enjeu de la politique spatiale européenne réside alors dans la manière d'atteindre ce double objectif : se rapprocher de l'utilisateur final via la commercialisation des applications spatiales, tout en répondant aux besoins des acteurs gouvernementaux en matière de défense et de sécurité, lesquelles émergent aujourd'hui comme les nouveaux piliers de la stratégie spatiale européenne67. À ce titre, la recherche de synergies entre les domaines privé et public s'inscrit dans la volonté de renforcer la résilience collective de l'Union, laquelle nécessite une *réponse commune* aux menaces et la protection des biens et des services spatiaux. Dans ce registre, la stratégie adoptée par l'ESA consiste à soutenir des systèmes d'innovation régionaux destinés à répondre aux défis sociétaux. Il s'agit ici d'entretenir et de développer des pôles qui peuvent rivaliser à l'échelle mondiale sur chacun des segments de la chaîne de valeur spatiale. Toutefois, les politiques spatiales européennes doivent s'inscrire dans la nécessité de répondre à des objectifs d'ordre national, tout prenant part à des cadres communs de collaboration. Or, sur la période récente, de grands pays membres de l'Union européenne tels que l'Allemagne et l'Italie ont développé une politique spatiale dans un contexte de redéploiement des questions sécuritaires autour d'enjeux nationaux68. De surcroît, l'Union européenne souhaite également aligner la politique spatiale à des enjeux de sécurité en lien avec l'autonomie stratégique recherchée. Cette dynamique de *fragmentation* du paysage européen dans le secteur du spatial risque fort de pénaliser les acteurs économiques qui sont confrontés à forte concurrence mondiale (Damis, 2021).

Partant de l'idée qu'il est dans l'intérêt des partenaires européens de travailler ensemble, plutôt que dans un cadre purement national, l'ESA fonde sa politique d'innovation sur les technologies satellitaires d'observation de la Terre et de l'exploitation des données spatiales. Les données et leurs applications apparaissent au cœur des transformations du secteur spatial. Jusqu'à une date récente, les activités d'OT avec satellites étaient entièrement financées par le secteur public69, en particulier à des fins de défense, lequel couvrirait l'ensemble des risques en termes de débouchés. En revanche, depuis une période récente, le secteur privé contribue au financement des satellites OT, sans qu'il n'y ait d'accord préalable avec le secteur public pour que ce dernier achète des images70, ce qui implique un transfert du risque vers le domaine privé. Dans ce contexte, l'émergence de grandes entreprises de métadonnées, agrégeant et ajoutant de la valeur aux images de l'espace, et le développement des fabricants privés de satellites pour l'OT, contribuent à la création d'une chaîne de valeur qui demeure désormais dominée par le secteur privé71. Toutefois, le marché de l'OT reste hautement concentré avec quelques acteurs principalement soutenus par le secteur public72. Afin de rendre les marchés davantage « contestables », la politique spatiale européenne propose une nouvelle approche en matière de soutien de l'industrie du spatial, encourageant l'entrée de nouveaux acteurs et une meilleure prise en compte du risque. À ce titre, l'initiative CASSINI73 lancee tout récemment par la Commission européenne fournit différents dispositifs et autres outils d'appui à l'entrepreneuriat spatial. Elle s'adresse à tous les acteurs de la filière, couvrant à la fois l'amont et l'aval des chaînes de valeur. Elle doit aussi permettre un meilleur accès aux marchés publics pour les nouveaux entrants, contribuant ainsi à une diminution des coûts à l'entrée. L'approche par la *passation de marchés en ligne*, appelée *Dynamic Purchasing System* (DPS), proposée tout pour garantir des *conditions dites équitables d'accès* pour l'ensemble des fournisseurs européens de données OT, ainsi que l'initiative *Flight Ticket* visant à répondre aux besoins en services de lancement et en validation des technologies utilisées dans l'espace, s'inscrivent pleinement dans cette volonté de développer une économie des applications spatiales centrée sur les marchés, avec toutefois l'Union européenne comme client de référence (*anchor customer*).

Le programme Copernicus de l'ESA s'inscrit pleinement dans cette dynamique, lequel est désormais ouvert au dispositif de passation de marchés en ligne. Ce programme est le produit d'efforts combinés de l'ESA, de la Commission européenne et de l'Union européenne pour construire une constellation de satellites et d'instruments de classe OT pour surveiller la Terre. L'objectif du programme est de *garantir un accès continu* aux données sur les problèmes d'environnement et de sécurité, via des plateformes d'OT spatiales dédiées connues sous le nom de Sentinel. À l'échelle de l'Union européenne, l'enjeu en matière de sécurité est important. Il s'agit de disposer d'une information à la fois *unique* et *indépendante* qui contribuera notamment à évaluer l'efficacité des politiques publiques visant à répondre aux besoins sociétaux74. De surcroît, l'Union européenne veut apparaître comme une référence mondiale dans le suivi des actions qui s'inscrivent dans le respect des grands agendas. Le mobile sécuritaire qui fonde le programme autour de la surveillance des maux et autres biens communs75, repose sur une *mise à disposition gratuite* des données pour tout utilisateur partout dans le monde. Or la production de ces données au titre de la fourniture de biens collectifs, nécessite des investissements importants, sans aucune garantie quant à leur taux de retour. Ce dernier dépend notamment de l'utilisation de ces images, lesquelles peuvent faire l'objet d'une valorisation économique via le développement d'algorithmes spécifiques dédiés à leur application. Cette valorisation résulterait aussi d'effets d'entraînement sur d'autres industries ou d'autres secteurs qui peuvent bénéficier de l'imagerie à haute résolution. L'enjeu réside alors dans la volonté d'approcher de nouveaux usagers au sein des systèmes industriels76, tout en s'assurant que ces derniers utilisent les données produites par l'Union européenne, et dans le décloisonnement souhaité des transitions écologique et numérique (Frischauf et al., 2018). Toutefois, comment susciter ces effets d'entraînement tout en garantissant la gratuité de l'accès aux données ? La gratuité ne risque-t-elle pas de réduire les perspectives de débouchés sur d'autres marchés qui proposent des produits ou services similaires ? Pareille gratuité pourrait-elle engendrer une pression à la baisse sur le prix de l'image spatiale ?

L'approche proposée par l'Agence spatiale européenne consiste à « rapprocher » l'observation terrestre de la demande initiée par les grands défis sociétaux. Il s'agit de créer un système d'innovations et de services liés à l'OT qui permettrait de valoriser/capitaliser le système Sentinel et autres plateformes, en générant de la valeur à l'échelle mondiale. A cet égard, la disponibilité gratuite et ouverte des services de Copernicus pourrait améliorer la prise de conscience de l'existence d'une large gamme de produits issus de l'OT, augmentant ainsi la demande pour des produits similaires tels que les images à plus haute résolution, et celles de produits ou services à haute valeur ajoutée situés en aval de la chaîne de valeur77. À ce titre, Copernicus propose une nouvelle plateforme publique d'accès aux données d'OT, lesquelles pourront alimenter les systèmes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique des utilisateurs (Rapport Schuman, 2023). Ce rapprochement repose également sur une réorientation de la stratégie de spécialisation des systèmes régionaux d'innovation (Foray et al. 2009). L'intelligence stratégique recherchée réside alors dans la manière d'associer, à l'échelle d'un territoire, les chaînes d'approvisionnement spatiales et les besoins socio-économiques qui découlent de ces défis78. À cette fin, l'ESA s'appuie sur un *réseau de courtiers* qui jouent le rôle d'intermédiaires entre les utilisateurs potentiels et l'offre technologique issue des activités de l'Agence. Ces courtiers qui sont répartis dans près de 15 pays, sont également utilisés pour évaluer les besoins du marché dans lesquels il existerait un potentiel d'effets de retombée de type *spin-off* (Winch et Courtney, 2007 ; Klerx et Leeuwis, 2009). Ils apparaissent alors comme des acteurs majeurs du transfert de technologies spatiales des programmes spatiaux de l'ESA vers d'autres secteurs. Toutefois, Robinson et Mazzucato (2019) soulignent que ce transfert doit s'opérer selon un mélange de politiques verticale – la direction du changement – et horizontale – les conditions de l'innovation – visant à générer une expérience *ascendante*, qui intègre la demande et les opportunités de *spin-in* au niveau des territoires. Pareille dynamique peut être à l'origine de nouveaux arrangements institutionnels entre les domaines public et privé79 qui devraient permettre une mutualisation de la charge d'investissement, ainsi que des gains et des risques qui leur sont associés (Laplane et Mazzucato, 2020). Dans ce contexte, la valorisation économique de la donnée spatiale traitée ici au titre d'un actif créé par des fonds publics soulève la question du partage des risques et des avantages de l'approche européenne, dans un contexte où d'autres régions du monde révèlent des compétences certaines pour exploiter un tel actif80. Ce partage nécessite la mise en place de politiques dédiées qui doivent proposer des mécanismes alternatifs de valorisation des investissements réalisés. Parmi les mécanismes évoqués, on peut citer l'application d'un prix plafond pour les services utilisant des infrastructures financées par des fonds publics et son application aux services proposés par le secteur privé qui exploite la donnée spatiale. Il peut également

Conclusion

Le développement récent de l'économie spatiale s'inscrit dans un contexte où les questions de sécurité ont beaucoup évolué durant les dernières décennies, partant de l'échelon national avec la menace militaire extérieure comme préoccupation première, à l'échelle mondiale par référence à des situations qui associent plusieurs menaces de nature différente. Cette évolution témoigne aussi d'une reconfiguration des domaines public et privé, laquelle est partagée entre les « défaillances » du marché et celles des États quant à la régulation efficace des activités économiques. À ce titre, la nouvelle économie spatiale révèle des particularités communes aux différents modèles. Elle témoigne de ruptures d'ordres technologique, managérial et téléologique si l'on considère les projets qui sont proposés. Un consensus apparent semble donc s'établir quant à l'émergence d'un nouveau paradigme porté par les États-Unis qui affecterait l'ensemble des activités spatiales. Toutefois, la nouvelle économie spatiale révèle aussi une grande diversité des modalités de régulation et des politiques qui sont mises en œuvre. L'approche américaine fondée sur la promotion et la correction des marchés contribue à créer une nouvelle génération d'entrepreneurs spatiaux. Cette approche permet de générer un véritable effet de masse qui concourt fortement à la rentabilité de l'industrie spatiale américaine. Cependant, des interrogations demeurent concernant les perspectives de débouchés, les risques associés à la commercialisation des produits et services sociaux, et le rôle de la NASA concernant les activités spatiales commerciales qui s'étendent désormais au-delà de l'orbite terrestre basse. L'approche européenne, quant à elle, vise à orienter les marchés vers les grands défis sociétaux actuels et les enjeux de sécurité qui leur sont associés. Le développement de la nouvelle économie spatiale repose sur des systèmes d'innovation décentralisés qui révèlent un véritable ancrage territorial afin de mieux répondre à la demande. Dans le cadre de cette approche, le nouvel élan de la conquête spatiale paraît indissociable de l'esprit d'appartenance à une communauté d'intérêt. Or les initiatives nationales et communautaires récentes tendent à fragiliser pareil esprit, laissant entrevoir certaines vulnérabilités qui pourraient être dommageables dans une perspective de long terme. À l'échelle de l'Europe, le développement des activités spatiales dépend de l'effort combiné de l'ESA, de la Commission européenne et de l'agence de l'Union européenne pour le programme spatial⁸¹.

En plus des défis d'ordre économique et institutionnel que nous venons d'évoquer, la nouvelle économie spatiale doit tenir compte des différents agendas environnementaux dictés par l'urgence. Reprenant les travaux de Piore & Sabel (1986), la période actuelle annoncerait l'arrivée d'un troisième « clivage industriel » en lien avec la recherche d'un nouveau régime de croissance qui doit respecter les conditions de la transition écologique. Pareille rupture centrée sur l'exigence de sobriété nécessite de penser l'innovation au regard du couple « technologie-usage » et de l'importance des cas d'usage pour orienter les choix en matière de technologie, ainsi qu'au désinvestissement programmé des actifs carbonés (De Perthuis, 2023). Ce clivage interroge de manière notable le critère de compétitivité qui repose traditionnellement sur une massification rapide et conséquente de la production, à l'image du modèle des « *gigafactories* », et des usages, par référence à la taille des marchés, afin de réduire le coût des technologies. Cet effet d'échelle qui suppose une forte croissance de l'offre et de la demande, impose d'établir un calendrier des usages, (on commence par quoi ?), tenant compte du rôle des infrastructures et des institutions, (avons-nous vraiment le temps ?). À ce titre, le caractère hautement inerte des infrastructures témoigne de l'importance des spécificités locales et du poids de l'histoire sur les trajectoires futures. Par ailleurs, la diffusion de l'innovation et les conditions de son déploiement dépendent des effets d'expérience et de complémentarité entre les activités concernées. Enfin, au regard de l'exigence de sobriété, la massification ne peut revêtir qu'un caractère « local », puisant sa « légitimité » dans la disparition programmée d'autres usages et d'activités jugés désormais impropres vis-à-vis des grands agendas environnementaux. Les politiques d'innovation dans le secteur de l'aérospatial devront donc surtout miser sur les effets qualité et composition, bien moins sur l'effet volume, afin permettre le déploiement des solutions proposées ; en seront-elles capables ?

Bibliographie

- Agan, T., 2013. What SpaceX Can Teach Us About Cost Innovation. Harvard Business Review.
- Aglietta M., 1976. Régulation et crise du capitalisme. Editions Calmann-Lévy. Réédition chez Odile Jacob, 1997.
- Aglietta M., 2019. Pour une croissance inclusive et soutenable, in *Capitalisme. Le temps des ruptures*, M. Aglietta (ed.). Paris. Editions Odile Jacob, pp. 463-562.
- Albert M. 1991. Capitalisme contre capitalisme, Points Seuil.
- Achilleas P., 2016. Le New Space ou la privatisation des ambitions spatiales des États – Réflexions sur le droit de l'espace à l'heure de l'innovation entrepreneuriale. *Annuaire Français de Droit International*. 62. pp. 499-518.
- Albert M., 1991a. Capitalisme contre capitalisme. Éditions Seuil. Biographies l'Histoire immédiate. 320 p.
- Albert M., 1991b. L'avenir de l'assurance : modèle alpin ou modèle maritime ?. *Assurances*. 59/3. pp. 303-320.
- Amable B., 2005. Les cinq capitalismes. Editions du Seuil.
- Amable B., 2009. Les spécificités nationales du capitalisme. *Cahiers Français, Le capitalisme, mutations et diversité*, n° 349, p. 57-62.
- Attour, A., Barbaroux, P., 2016. Naissance des écosystèmes d'affaires : une articulation des compétences intra et inter organisationnelles. *Gestion 2000 Volume 33*, 59–76.
- Badie, B., 1999. Un monde sans souveraineté. Les États entre ruse et responsabilité. Éditions Fayard. 304p.
- Bailetti, T., 2012. What Technology Startups Must Get Right to Globalize Early and Rapidly. *Technology Innovation Management Review* 5–16.
- Barbaroux, P., 2016. The metamorphosis of the world space economy: investigating global trends and national differences among major space nations' market structure. *Journal of Innovation Economics Management* n° 20, 9–35.
- Baujard A., 2017. « L'économie du bien-être est morte. » Vive l'économie du bien-être !, dans : Gilles Campagnolo éd., *Philosophie économique. Un état des lieux*. Paris, Éditions Matériologiques, « E-économiques », p. 77-128. DOI : <https://doi.org/10.3917/edmat.campa.2017.01.0077>.
- Baumann, I., Bajjati, H.E., Pellander, E., 2018. NewSpace: A Wave of Private Investment in Commercial Space Activities and Potential Issues Under International Investment Law. *The Journal of World Investment & Trade* 19, 930–950. <https://doi.org/10.1163/22119000-12340115>
- Baumol, W.J., 1982. Contestable Markets: An Uprising in the Theory of Industry Structure. *The American Economic Review* 72, 1–15.
- Berle, A.A., 1935. The New Deal and Economic Liberty. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science* 178, 37–47.
- Berle, A.A., Means, G.C., 1991. The modern corporation and private property. Transactions, New Brunswick London.
- Besha, P., MacDonald, A., 2016. Economic development of low Earth orbit. National Aeronautics and Space Administration (NASA). NP-2016-03-2140-HQ
- Blom M-H., Sennequier N., 2000. L'espace privatisé : les transitions originales au secteur privé de l'opération de satellites. *Annales des Mines*. Novembre. pp. 10-15.
- Bodin J., [1583] 1993. Les six livres de la République. Un abrégé du texte de l'édition de Paris de 1583. Paris. Librairie générale française/Le Livre de poche. 607 p.
- Boyer R., 1986. La théorie de la régulation, une analyse critique, Alma, La découverte.
- Boyer R., 2003. Variétés du capitalisme. L'Année de la Régulation, n° 6, Presses de Science Politique.
- Bryce Space and Technology, 2017. Start-Up Space: Update on Investment in Commercial Space Ventures. (The Space Start-up Report.) Bryce.
- Brynjolfsson, E., Milgrom P. 2013. Complementarity in Organizations. Chap. 1 The Handbook of Organizational Economics, edited by Robert Gibbons and John Roberts, 11–55. Princeton University Press.
- Brynjolfsson, E., Milgrom P. 2013. Complementarity in Organizations. Chap. 1 The Handbook of Organizational Economics, edited by Robert Gibbons and John Roberts, 11–55. Princeton University Press.
- Chanin M-L., 2008. L'École de l'Espace, le service d'aéronomie 1958-2008. CNRS. 509 p.
- Chiang, J.-T., 1991. From "mission-oriented" to "diffusion-oriented" paradigm: The new trend of US industrial technology policy. *Technovation* 11(6), 339–356.
- Clormann, M., 2021. Switching between worlds apart: Negotiating European space sector cultures through innovation. *Science and Public Policy* 48, 521–530. <https://doi.org/10.1093/scipol/scab038>
- Coase, R.H., 1937. The Nature of the Firm. *Economica* 4, 386–405. <https://doi.org/10.2307/2626876>
- Crane, K.W., Linck, E., Lal, B., Wei, R.Y., 2020. Estimates of Economic Output Associated with Space, Measuring the Space Economy: Institute for Defense Analyses.
- Crouch C., Streeck W., 1996. Les capitalismes en Europe, La Découverte.
- d'Armagnac, S., Al Ariss, A., N'Cho, J., 2022. Talent management in turbulent times: Selection, negotiation, and exploration strategies for talent management in the aeronautics and space industries. *The International Journal of Human Resource Management* 33, 2767–2799. <https://doi.org/10.1080/09585192.2021.1879205>
- Dabila A., 2021. L'émergence des « Armées de l'Espace » et la « martialisation » des programmes spatiaux. *Stratégique*. 2021/2-3. 126-127. p. 121-136. DOI : <https://doi.org/10.3917/strat.126.0121>.
- Damis, J.-P., 2019. The New Space Economy: Consequences for Space Security in Europe, in: *Handbook of Space Security: Policies, Applications and Programs*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–13. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22786-9_74-1
- Damis, J.-P., 2020. The New Space Economy: Consequences for Space Security in Europe, in: Schrogl, K.-U. (Ed.), *Handbook of Space Security: Policies, Applications and Programs*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1499–1510. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23210-8_74
- David, T., 2019. Blockchain empowers the digital-era state. Medium. URL <https://medium.com/@TorbenDavid/blockchain-empowers-the-digital-era-state-1ad51508750a> (accessed 3.30.22).
- De Bandt O., 2018. Mise en œuvre et limites de l'approche pigouvienne de la finance. *Revue d'économie financière*. 2018/3 (N° 131), p. 171-188. DOI : <https://doi.org/10.3917/ecofi.131.0171>.
- De Man P., 2016. The exploitation of asteroids and the non-appropriation principle: reflexions on the nature of property rights in light of the US space resource act of 2015. *Journal of Space Law*, volume 41, 2015-2016, pp. 1-55.
- De Perthuis, C., 2023. Carbone fossile, carbone vivant : vers une nouvelle économie du climat. Paris. Éditions Gallimard.
- Deleidi, M., Mazzucato, M., 2021. Directed innovation policies and the supermultiplier: An empirical assessment of mission-oriented policies in the US economy. *Research Policy* 50, 104151.

<https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.104151>

Denis, G., Alary, D., Pasco, X., Pisot, N., Texier, D., Toulza, S., 2020. From new space to big space: How commercial space dream is becoming a reality. *Acta Astronautica* 166, 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.08.031>

Diemer A., 2011. La diversité du capitalisme : quelles perspectives ? Colloque Heurs et Malheurs du capitalisme, Clermont-Ferrand, 45 p.

Du Gay P., Scott A. 2011. Transformation de l'État ou changement de régime ? De quelques confusions en théorie et sociologie de l'État. *Revue française de sociologie*. 2011/3 (Vol. 52), p. 537-557. DOI : <https://doi.org/10.3917/rfs.523.0537>.

Dufour, I., 2021. Stratégie de défense nationale et sécurité extérieure : les approches globales à l'épreuve des faits. *Revue Défense Nationale*. 10 (845), p. 56-60. DOI : <https://doi.org/10.3917/rdna.845.0056>.

Elvis, M., Krolikowski, A., Milligan, T., 2021. Concentrated Lunar Resources: Imminent Implications for Governance and Justice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2188) Royal Society.

Elvis, M., Krolikowski, A., Milligan, T., 2021. Concentrated Lunar Resources: Imminent Implications for Governance and Justice.

Espagne E., Aglietta M., 2024. Pour une écologie politique : au-delà du capitalocène. Paris. Editions Odile Jacob

European Commission, 2013. EU Space Industrial Policy, releasing the Potential for Growth in the Space Sector. (2013/2092(INI))

Fauvaud S., 2018. Sécurité spatiale et militarisation : vers une arsenalisation de l'espace ? *Revue Défense Nationale*, 2018/10 (N° 815), p. 94-99. DOI : <https://doi.org/10.3917/rdna.815.0094>.

Foray, D., David, P. A., & Hall, B., 2009. Smart specialisation—the concept. *Knowledge economists policy brief*, 9(85), 100

Foray, D., Mowery, D.C., Nelson, R.R., 2012. Public R&D and social challenges: What lessons from mission R&D programs? *Research Policy* 41(10), 1697–1702.

Frischauf, N., Horn, R., Kauerhoff, T., Wittig, M., Baumann, I., Pellander, E., Koudelka, O., 2018. NewSpace: New Business Models at the Interface of Space and Digital Economy: Chances in an Interconnected World. *New Space* 6, 135–146. <https://doi.org/10.1089/space.2017.0028>

Gaillard-Sborowsky F., 2023. La surveillance spatiale. in : Géopolitique de l'espace. À la recherche d'une sécurité spatiale, sous la direction de GAILLARD-SBOROWSKY Florence. Paris, Le Cavalier Bleu. p. 161-171.

Gleditsch, K.S., Ward, M.D., 2006. Diffusion and the International Context of Democratization. *International Organization* 60, 911–933. <https://doi.org/10.1017/S0020818306060309>

Goswami, N., 2018. China in Space: Ambitions and Possible Conflict. *Strategic Studies Quarterly* 12, 74–97.

Hall P., Soskice D. 2001. Varieties of Capitalism, the Institutional Foundation of Comparable Advantage, Oxford University Press.

Henry, Caleb. 2016. "Euroconsult Study Says SmallSat Market Could Be Worth \$22 Billion over Next 10 Years." *Via Satellite*, July 7.

Hertzfeld, H. R. 2007. Globalization, Commercial Space and Space power in the USA. *Space Policy*, 23(4): 210–20.

Hertzfeld, H.R., 2002. Measuring the Economic Returns from Successful NASA Life Sciences Technology Transfers. *The Journal of Technology Transfer* 27, 311–320.

Hertzfeld, H.R., 2013. The State of Space Economic Analyses: Real Questions, Questionable Results. *New Space* 1, 21–28. <https://doi.org/10.1089/space.2013.0003>

Hess C., Ostrom E., 2007. Understanding Knowledge as a Commons. The MIT Press.

Institut Montaigne, 2023. Innovation de défense : des instruments à renforcer. Rapport. 87 p.

Klerkx, L., Leeuwis, C., 2009. Establishment and embedding of innovation brokers at different innovation system levels: Insights from the Dutch agricultural sector. *Technological Forecasting and Social Change* 76(6), 849–860.

Laplane, A., Mazzucato, M., 2020. Socializing the risks and rewards of public investments: Economic, policy, and legal issues. *Research Policy*, Articles initially published in *Research Policy*: X issue 2 49, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.100008>

Lavarde C., Paoli-Gagin V. 2023. L'exploitation des ressources spatiales. Rapport d'information du Sénat. 668(2022-2023). 177 p.

Leon, A.M., 2018. Mining for Meaning: An Examination of the Legality of Property Rights in Space Resources. *Virginia Law Review* 104, 497–546.

Locke, J. 1689. "Of Property." Chap. 5 of *Second Treatise of Government*.

Logsdon, J. M. 2015. After Apollo: Richard Nixon and the American Space Program. Palgrave Macmillan.

Madan, B., Halkias, D., 2020. Success Factors for European Commercial Activities in NewSpace: An Integrative Literature Review (SSRN Scholarly Paper No. ID 3802541). Social Science Research Network, Rochester, NY. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3802541>

Mazzucato M., 2021. Mission Economy: A Moonshot Guide to Changing Capitalism, Allen Lane, London, 272 p.

Mazzucato, M., 2018. Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. *Industrial and Corporate Change* 27, 803–815. <https://doi.org/10.1093/icc/dty034>

McGrath, C. H., Horvath, V., Baruch, B., Gunashekar, S., Lu, H., Culbertson, S., Pankowska, P., & Chataway, J. (2014). The international dimension of research and innovation cooperation addressing the grand challenges in the global context. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2014. http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR725.html.

Morgan Stanley, 2023. The Space Economy's Giant Leap: <https://www.morganstanley.com/Themes/global-space-economy>.

Nakahodo, S.N., 2021. Should Space Be Part of a Development Strategy? Reflections Based Upon the Brazilian Experience. *New Space* 9, 19–26. <https://doi.org/10.1089/space.2021.0002>.

NASA. 2014. Commercial Orbital Transportation Services: A New Era in Spaceflight. <https://www.Nasa.gov/sites/default/files/files/SP-2014-617.pdf>.

Nozick, R. 1974. *Anarchy, State, and Utopia*. Basic Books.

Ostrom E., 2014. A polycentric approach for coping with climate change. *Annals of Economics and Finance*. 15/1. pp. 97-134.

Ostrom V., 1999. Policentricity. In McGinnis M. D. (ed). *Polycentricity and Local Public Economies: Readings from the Workshop in Political Theory and Political Analysis*. University of Michigan Press. Pp. 52-74.

Ostrom, V., Tiebout, C. M., & Warren, R., 1961. The organization of government in metropolitan areas: a theoretical inquiry. *American political science review*, 55(4), 831-842.

Paladini, S., Saha, K., Pierron, X., 2021. Sustainable space for a sustainable Earth? Circular economy insights from the space sector. *Journal of Environmental Management* 289, 112511. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112511>

Pasco, X., 2017. Le nouvel âge spatial. De la Guerre froide au New Space. CNRS.

Phillips, P.J., Pohl, G., 2020. Space Junk: Behavioural Economics and the Prioritisation of Solutions. *Defence and Peace Economics* 0, 1–16. <https://doi.org/10.1080/10242694.2020.1772552>

Phillips, P.J., Pohl, G., 2021. Space Junk: Behavioural Economics and the Prioritisation of Solutions. *Defence and Peace Economics* 32, 956–971. <https://doi.org/10.1080/10242694.2020.1772552>

Pigou A. C., [1920] 2013. *The Economics of Welfare*. Palgrave Macmillan. 876 p.

Piore M., Sabel C. 1986. *The Second Industrial Divide, Possibilities for Prosperity*, Basic Books. Traduction française, *Les chemins de la prospérité*, Hachette.

Pomeroy, C., Calzada-Diaz, A., Bielicki, D., 2019. Fund Me to the Moon: Crowdfunding and the New Space Economy. *Space Policy* 47, 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2018.05.005>

Profiliotis, G., Loizidou, M., 2019. Planetary Protection Issues of Private Endeavors in Research, Exploration, and Human Access to Space: An Environmental Economics Approach to Backward Contamination. *Space Policy* 50, 101332. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2019.08.002>

Ramaswami, V.K., 1967. Andrew Shonfield: Modern Capitalism — The Changing Balance of Public & Private Power. Oxford University Press, 1965, 55 Sh. *The Indian Economic & Social History Review* 4, 94–97. <https://doi.org/10.1177/001946466700400106>

Rao, A., Burgess, M.G., Kaffine, D., 2020. Orbital-use fees could more than quadruple the value of the space industry. *PNAS* 117, 12756–12762. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921260117>

Rapport Schuman sur l'Europe, 2023. L'état de l'Union 2023. Edition Fondation Robert Schuman.

Robinson, D.K.R., Mazzucato, M., 2019. The evolution of mission-oriented policies: Exploring changing market creating policies in the US and European space sector. *Research Policy*, *New Frontiers in Science, Technology and Innovation Research from SPRU's 50th Anniversary Conference* 48, 936–948. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.10.005>

Rouillon, S., 2020. A Physico-Economic Model of Low Earth Orbit Management. *Environ Resource Econ* 77, 695–723. <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00515-z>

Sadat, M., 2020. Space: New Threats, New Service, New Frontier An Interview with Mir Sadat. *Strategic Studies Quarterly* 14, 6–17.

Serfati, C., 2009. *Une économie politique de la sécurité*. Karthala, Paris.

Serfaty, C., 2024. Un monde en guerres. Coll. Petite encyclopédie critique. Éditions Textuel. 348 p.

Shonfield, A., 1965. Modern Capitalism: The Changing Balance of Public and Private Power. Oxford University Press.

Singer, P.W., 2004. Corporate Warriors: The Rise of the Privatized Military Industry. 1st Edition. Better World Books [WWW Document], n.d. URL <https://www.abebooks.fr/edition-originale/Corporate-Warriors-Rise-Privatized-Military-Industry/31014610092/bd> (accessed 3.28.24).

Space Foundation. 2023. The Space Report: <https://www.thespacereport.org/>.

SpaceX. 2015. "Reusability: The Key to Making Human Life Multi-Planetary." June 10. <http://www.spacex.com/news/2013/03/31/reusabilitykey-making-human-life-multi-planetary>.

Torben, D., 2017. Distributed Ledger Technology: Leveraging Blockchain for ESA's Success. ESA HQ, Strategy Department. <https://www.esa.int>

Weber M., [1904-1905] 2003. L'Éthique protestante et l'Esprit du capitalisme, Paris, Gallimard, (trad. Jacques Chavy).

Weber M., [1917] 1980. Wahlrecht und Demokratie in Deutschland. In J. Wincklemann (hrsg.), Gesammelte politische Schriften, Tübingen, J.C.B. Mohr, pp. 233-279 [publié en anglais : Suffrage and democracy in Germany. Weber political writings. P. Lassman, R. Speirs (eds.). Cambridge. Cambridge University Press, 1994]

Weber M., 1919. Politik als Beruf, traduction française dans Le savant et le politique. La Découverte.

Weinzierl, M., 2018. Space, the Final Economic Frontier. Journal of Economic Perspectives 32, 173–192. <https://doi.org/10.1257/jep.32.2.173>

Weinzierl, M., Acocella A. 2016. "Blue Origin, NASA, and New Space." Harvard Business School Case Space Foundation. 2018. The Space Report. Available at: <http://hbr.org/product/Blue-Origin--NASA--and-Ne/an/716012-PDF-ENG>.

Weinzierl, M., Sarang, M., 2021. The Commercial Space Age Is Here. Harvard Business Review.

Winch, G.M., Courtney, R., 2007. The organization of innovation brokers: An international review. Technology Analysis & Strategic Management 19(6), 747–763.

Zell, J. L., 2006. Putting a Mine on the Moon: Creating an International Authority to Regulate Mining Rights in Outer Space. Minnesota Journal of International Law. 99. 15/2. pp. 489-519.

Notes

1 Space Capital, 2023 : <https://www.spacecapital.com/quarterly>.

2 La *National Aeronautics and Space Administration*, plus connue sous son acronyme NASA, est l'agence fédérale responsable de la majeure partie du programme spatial civil des États-Unis.

3 L'Agence spatiale européenne (*European Space Agency* - ESA) est une organisation internationale qui compte 22 États membres. Sa mission consiste à façonner les activités de développement des capacités spatiales européennes et à faire en sorte que les citoyens européens continuent à bénéficier des investissements réalisés dans le domaine spatial.

4 Le mode d'organisation sociale des activités de production et de consommation fait écho aux modalités de création et de partage des revenus et des formes de régulation, marchande ou étatique, qui président à la dynamique économique.

5 Il s'agit notamment de la Cour Internationale de Justice, créée par la déclaration des Nations Unies du 26 juin 1945, et de l'article 42 de la Charte des Nations Unies. Au regard de la notion de souveraineté, le développement du droit international met en perspective la dimension dite interne, celle des États fondée sur un principe de hiérarchie que l'on retrouve dans les écrits de Jean Bodin (1583), et celle dite externe qui renvoie à la charte des Nations Unies (art. 2 § 1) et à un principe d'égalité souveraine entre les États qui ne tiendrait pas compte des inégalités entre ces derniers. On peut également relever le développement d'organisations régionales à l'image de l'Union Européenne qui dispose d'un ordre juridique propre auquel un droit de décision peut être transféré. À ce titre, certains interrogent la notion de souveraineté par référence à une responsabilité partagée par différents acteurs qui couvrirait un spectre plus large que celui des seuls États (Badie, 1999).

6 Dans ce contexte, la France a créé le Commandement de l'espace (CDE) en 2019. Il s'agit d'un service interarmées de l'Armée française dépendant du Chef d'état-major de l'Armée de l'air et de l'espace. Son objectif est de « disposer d'une défense spatiale renforcée » et d'une autonomie stratégique spatiale (Dabila, 2021).

7 Il s'agit d'un programme proposé par le gouvernement américain durant les années 1930, qui vise à sortir l'économie américaine de la grande dépression par une politique d'investissement public de grande ampleur et par une réforme innovante des marchés financiers (Berle, 1935).

8 Le Conseil international des unions scientifiques est une organisation non gouvernementale internationale fondée en 1931 pour promouvoir l'activité scientifique internationale dans les différentes branches des sciences et techniques et son utilité sociale pour l'humanité.

9 En France, on peut citer le service d'aéronomie, un laboratoire du CNRS qui a été créé en 1958 (Chanin, 2008). Il s'agit du premier laboratoire français dédié à la recherche scientifique depuis l'espace. Il développe ou contribue au développement de nombreux instruments embarqués. En 2009, le laboratoire fusionne avec le Centre d'étude des environnements terrestres et planétaires (CETP) pour former le Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS).

10 Il s'agit principalement des ressources en eau pour les équipages, de la production de carburant et de ressources plus rares comme l'hélium 3.

11 Il s'agit d'un concept issu du droit international public qui a émergé à partir de la deuxième moitié du 20^e siècle. Il s'inscrit dans la volonté de réglementer l'accès aux ressources situées au-delà des juridictions nationales des États.

12 Le traité de l'espace s'inspire grandement des régimes existants en droit terrestre. Il s'agit des régimes qui s'appliquent à l'Antarctique et à la haute mer, dans lesquels on retrouve les deux principes, (traité de Washington, 1959 ; convention des Nations Unies, 1982).

13 À l'heure actuelle, la surveillance de l'espace est principalement assurée par les États-Unis. L'histoire de l'US Space Force remonte à 1954, lorsque l'US Air Force a créé une division chargée de superviser les missiles balistiques de l'armée américaine. Cette division a évolué à plusieurs reprises au cours des décennies suivantes. Toutefois, c'est en 2019 qu'elle est véritablement créée, dans la continuité du *National Defense Authorization Act*, devenant ainsi la première nouvelle branche des forces armées américaines depuis 1947. Cette création résulte de l'idée que l'espace devient un impératif de sécurité nationale. Combiné à la menace croissante posée par de nouveaux concurrents stratégiques dans l'espace, il paraît alors nécessaire d'avoir une force militaire principalement dédiée au contrôle du domaine spatial. En 2023, le 75^{ème} escadron d'intelligence, de surveillance et de reconnaissance est créé, lequel a pour mission de collecter des renseignements avancés sur les capacités spatiales de pays hostiles, dans la perspective éventuelle de les détruire.

14 Cependant, après la dernière des missions Apollo en 1972, la NASA – et donc le secteur spatial américain – a eu du mal à trouver un deuxième acte. Une partie de la raison était que le lien étroit entre le programme Apollo et la concurrence avec l'Union soviétique rendait le budget de la NASA vulnérable au sentiment que la mission avait déjà été accomplie (Logsdon, 2015).

15 Au début de l'ère de la navette, le président Ronald Reagan a signé le *Commercial Space Launch Act* en 1984, déclarant : « L'un des objectifs importants de mon administration a été et continuera d'être l'encouragement du secteur privé dans les efforts de l'espace » (cité par Weinzierl, 2018). Cette même année a vu la création de l'*Office of Commercial Programs* de la NASA et de l'*Office of Commercial Space Transportation du Department of Transportation* (NASA, 2014).

16 Le programme Ariane est le nom générique d'une famille de lanceurs civils européens de satellites. Il trouve son origine dans la volonté politique des pays européens d'accéder d'une façon autonome à l'espace. Il est lancé en 1973 par le Centre National des Etudes Spatiales.

17 À ce titre, la NASA propose un projet en 2019 visant à retourner sur la lune. Il ne s'agit pas d'une nouvelle version du programme Apollo. Il s'agit d'un projet qui se veut pérenne avec une attention portée sur les ressources de manière à assurer la durabilité dans le temps du projet spatial dans la perspective aller sur mars. L'enjeu est de garantir l'autonomie du projet vis-à-vis des ressources terrestres, (voir le projet ARTEMIS 1).

18 À ce titre, les prévisions récentes (Henry, 2016) prévoient des revenus à hauteur de 22 milliards de dollars au cours de la prochaine décennie.

19 L'approche pigouvienne fait référence à l'économiste britannique A. C. Pigou (1920) qui a fortement contribué à l'économie du bien-être en lien avec la notion d'externalité (Baujard, 2017). Par référence à l'économie publique qui étudie la formation des décisions publiques à travers les rapports entre l'État et le marché, l'intervention publique doit répondre à des situations où les mécanismes de marché ne fonctionnent pas correctement, (défaillances de marché ou market failures), dans le sens où ils ne prennent pas en compte les conséquences involontaires de l'activité économique ; il s'agit notamment des problèmes de pollution et des transactions financières par référence à la crise financière de la fin des années 2000 et au risque financier systémique (de Bandt, 2018). La prise en compte des externalités repose sur un régime fiscal particulier comprenant une taxe définie à hauteur des dommages subis par la société. L'instrument fiscal a pour vocation de modifier les comportements économiques tout en restant dans le cadre de mécanismes de marché.

20 Cette théorie repose sur les travaux de l'économiste britannique Ronald Coase (1937), lequel a montré que le recours au marché génère un certain nombre de coûts liés à la coordination entre les agents économiques ; il s'agit associés à la collecte de l'information, à la négociation des contrats, etc.

21 La théorie de l'agence issue de la nouvelle microéconomie, tire son nom de la relation d'agence ou de délégation entre deux agents (ou groupe d'agents). Elle suppose la présence d'une asymétrie d'information. Cette théorie situe donc la détention de l'information et son partage entre les contractants au cœur de l'analyse de l'entreprise. Elle s'inspire notamment des travaux de Berle et Means (1932, réédition en 1991).

22 Nous faisons référence à la théorie de marchés contestables proposée par l'économiste américain William Baumol, lequel étudie des marchés sur lesquels se trouvent des entreprises en situation de monopole ou quasi-monopole, qui sont animées par la crainte que des concurrents potentiels ne soient attirés par la rente de monopole, ce qui les amène à modérer leurs prix (Baumol, 1982).

23 Nous pensons notamment au rôle Elon Musk dans le conflit ukrainien.

24 À ce propos, on peut relever que le système américain *Global Positioning System* ou GPS propose une résolution différente selon l'usage.

25 Astrobiologie/origine de la vie.

26 La mission martienne des Émirats ou Al-Amal est une sonde spatiale appelée Hope lancée en orbite autour de Mars.

27 Réagissant aux pressions décrites ci-dessus, la NASA a chargé un groupe d'économistes d'analyser les défis liés à l'implication de la NASA dans la création d'une économie spatiale en orbite (Besha et Macdonald, 2016). Dans la même veine, et suivant peu après la publication de cet ouvrage, le groupe *Space Economy* de l'Agence spatiale européenne a commandé une étude sur les enjeux de la création de marchés dans le secteur de l'aérospatial (Robinson et Mazzucato, 2019).

28 L'entreprise américaine Planet Labs peut être un exemple. Il s'agit d'une société qui exploite un certain nombre de nouveaux modèles commerciaux dans l'imagerie satellitaire, lesquels s'inscrivent en rupture avec les approches traditionnelles. Planet Labs, un opérateur d'imagerie spatiale qui vend aussi des services, crée des satellites de très petite taille qui sont lancés via des lanceurs superposés et payants. Ils peuvent être également lancés depuis l'ISS via le lanceur NanoRacks cubesat. Le modèle économique consiste à créer de nombreux satellites petits et bon marché, qui peuvent être facilement remplaçables en cas de défaillance. Planet Labs a récemment acquis une entreprise satellitaire européenne importante, RapidEye, qui dispose de plateformes d'observation terrestre en orbite.

29 Ce changement de paradigme résulte de la difficulté pour les États-Unis de reposer sur un schéma dans lequel ils ne sont plus indépendants pour accéder à l'espace et à la station spatiale internationale. Le pays dépendait principalement des fusées russes. La recherche d'une alternative a débouché sur l'émergence de sociétés de services de lancement, non de lanceurs.

30 L'achat patrimonial vise à développer des capacités spatiales que les agences opèrent elles même.

31 Il s'agit du projet Star Link qui a trait au lancement de près de 1200 satellites de télécommunication.

32 A cet égard, Weinzierl (2018) rappelle que le principal canal par lequel la NASA et le secteur émergent du *NewSpace* se sont réunis pour résoudre le problème d'accès à l'espace – et ainsi fournir un exemple de la façon dont la décentralisation peut fonctionner – était un ensemble de partenariats public-privé appelés Commercial Orbital Transportation Services (COTS). En 2005, le Congrès a financé le COTS avec 500 millions de dollars (moins de 1 %) du budget quinquennal de la NASA, dans le but de « défier l'industrie privée pour établir des capacités et des services qui peuvent ouvrir de nouveaux marchés spatiaux tout en répondant aux besoins de transport logistique de la Station spatiale internationale » (NASA, 2014).

33 Nous pensons notamment à Elon Musk, Jeff Bezos, Richard Branson, Paul Allen et d'autres – qui ont utilisé leur richesse pour surmonter les barrières à l'entrée à coûts fixes élevés, lançant des entreprises fondées sur de nouvelles approches en matière de technologie et de gestion de l'accès à l'espace.

34 Eutelsat est une société française qui développe ses propres satellites sans passer par la commande publique.

35 On doit aussi souligner le rôle majeur des sociétés de capital-risque et des grandes entreprises, à l'image de Google, Apple, Facebook, Virgin, qui contribuent grandement au financement du secteur.

36 Aux États-Unis, l'innovation clé du programme *Commercial Orbital Transportation Services* était de faire de la NASA un client et un partenaire, non un superviseur, de ses sous-traitants privés. En particulier, les contrats COTS qui ont remplacé les achats conventionnels à prix coûtant majoré, ont permis de commercialiser des produits sur la base d'une tarification fixe, laquelle contribue à renforcer la capacité de livraison, d'élimination ou de retour de la cargaison et de transport des équipages en orbite terrestre basse.

37 Aux États-Unis, il s'agit notamment de la forme contractuelle COTS.

38 À ce titre, Elon Musk avait déclaré : « Si l'on peut trouver un moyen de réutiliser efficacement les fusées tout comme les avions, le coût d'accès à l'espace sera réduit d'un facteur cent. Un véhicule entièrement réutilisable n'a jamais été fait auparavant. C'est vraiment la percée fondamentale nécessaire pour révolutionner l'accès à l'espace » (SpaceX, 2015). Les démonstrations réussies par SpaceX concernant la réutilisation de son lanceur (en 2016), de sa capsule cargo (en 2017) et plus récemment de son lanceur lourd (en 2018) ont donc été considérées comme des moments décisifs à la fois dans la technologie aérospatiale et la commercialisation de l'espace.

39 Le projet d'Elon Musk révèle une ambition qui va au-delà de la seule connectivité avec Google et Alphabet qui n'est autre que la maison mère de Google, laquelle avait pris des parts dans SpaceX depuis 2015 et dans Sky Box Imagin devenu depuis Planet Labs, avait trouvé un accord avec Google pour alimenter son moteur de recherche à l'aide des données issues de l'imagerie spatiale. Ce projet apparaît comme un futur de l'information sous toutes ses formes (imagerie, radar,...), permettant l'accès et la diffusion de l'information via Star Link.

40 Bryce Tech, Bryce Start Up Space Report: Update on Investment in Commercial Space Ventures 2023, p.3. file:///Users/patyasschembri/Downloads/Bryce%20Start%20Up%20Space%202023.pdf

41 À titre d'exemple, la société Planet Labs développe une offre à grande échelle de nano satellites bon marchés qui peuvent être facilement remplacés s'ils ne fonctionnent pas de manière souhaitée.

42 À ce titre, l'entreprise SpaceX contrôle l'ensemble de la chaîne.

43 Rappelons que le premier spoutnik est apparu en 1957.

44 Selon le bureau d'études Euroconsult, le chiffre d'affaires passerait de 300 milliards de dollars en 2018 à 500 milliards de dollars en 2028 (Henry, 2016).

45 Voir le film de James Gray, *Ad Astra*, 2019, dans lequel la Lune est présentée comme un grand centre commercial.

46 Les astéroïdes contiendraient de l'or, du fer, du platine, du titane, du nickel, de l'aluminium, des traces de cobalt, ainsi que des métaux rares tels que le gallium, le rhodium, le silicium et le palladium. Ces ressources qui apparaissent dans la composition des technologies dites vertes et digitales qui sont déployées à grande échelle dans le contexte des transitions écologique et numérique actuelles, s'amenuisent rapidement sur Terre.

47 Dans le présent article, nous ne traitons pas de la littérature abondante sur les débris spatiaux, laquelle a trait aux problèmes de congestion, de valorisation économique des activités de traitement, ainsi que des problèmes d'ordres scientifique et géopolitique (Paladini et al., 2021 ; Phillips et Pohl., 2020 ; Rao et al., 2020 ; Rouillon, 2020).

48 Il s'agirait de la plus ancienne origine, laquelle se situe dans les hautes vallées des Alpes où les villageois ont organisé les premières sociétés de secours mutuel (Albert, 1991b). Ce modèle d'assurance est donc d'origine continentale. Il apparaît au tournant du XV^e et du XVI^e siècle. On retrouve pareille filiation dans l'organisation communautaire de la prévoyance : guildes, corporations, syndicats professionnels, mouvements judiciaires. Par référence à ce modèle d'assurance, Michel Albert évoque le capitalisme « rhénan », celui d'une économie sociale de marché que l'on retrouve notamment en Allemagne, aux Pays-Bas, en Belgique, en Autriche, dans des pays du Nord de l'Europe, ainsi qu'en Suisse (Albert, 1991a, chap. 4). Un modèle de capitalisme qui comporterait des ressemblances avec le Japon.

49 L'assurance d'origine maritime se développe à partir du XIV^e siècle, à l'initiative des négociants florentins, génois et flamands. C'est « l'Ordonnance sur la marine » rédigée en 1681 à l'initiative de Colbert qui pose les grands principes de l'assurance maritime actuelle. Toutefois, l'expansion maritime de l'Angleterre, à partir du XVII^e siècle, contribue à imposer le droit anglo-saxon issu des usages commerciaux et de décisions judiciaires. Les règles de droit maritime anglais, codifiées en 1906 sous le nom de *Marine Insurance Act*, ont fortement influencé l'assurance maritime mondiale (Albert, 1991b). Dans son ouvrage, M. Albert (1991a) souligne l'ancrage américain du capitalisme anglo-saxon, qu'il qualifie aussi de modèle « néo-américain ». L'auteur relève qu'il n'y a pas de modèle européen au sens étroit du terme. Un constat qui sera partagé par d'autres auteurs tels que B. Amable (2005) et R. Boyer (2003).

50 À ce titre, le modèle allemand fondé sur la cogestion à travers celui de l'entreprise communauté, a révélé une capacité à solliciter une main d'œuvre qualifiée et à produire des biens de qualité, ce qui lui permet d'échapper à la concurrence par les prix. En 2018, le secteur de l'aérospatial allemand initie trois grandes initiatives industrielles autour de la technologie des lanceurs avec pour ambition de positionner l'Allemagne comme un acteur majeur du marché. Il s'agit de trois start-up : Hympluse issue du Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique, Isar Aerospace qui est un produit de l'université technique de Munich, et Rocket Factory Augsburg. Ces initiatives qui résultent d'effets de report (*spin-off*) importants, témoignent de cette volonté pour l'Allemagne de se positionner en *champion national* en misant sur la qualité de son industrie. En Europe, l'Italie révèle une ambition similaire avec le programme de lanceur Vega porté par le constructeur italien Avio. Côté français, on peut citer la start-up MaiaSpace.

51 Ces problèmes sont souvent illustrés en théorie des jeux via le jeu de la chasse au cerf dans lequel un équilibre inférieur mais moins risqué est sélectionné plutôt que l'équilibre coordonné plus efficace. Dans ce jeu, deux individus partent à la chasse. Chacun doit choisir de chasser un cerf de grande valeur ou un lièvre de faible valeur. Alors que le choix d'un lièvre garantit la réussite, le choix d'un cerf ne peut réussir que si l'autre personne choisit également « cerf ».

52 Il s'agit de technologies qui permettent le lancement fréquent et peu coûteux, la fabrication dans l'espace, les habitats évolutifs, l'extraction de ressources dans l'espace et la collecte d'énergie, une protection fiable contre les rayonnements et la diminution des débris.

53 Voir la note 32, page 10 du présent texte.

54 Voir l'article 2 du traité de 1967 qui ne mentionne pas ces ressources.

55 Dans le contexte du traité international de 1979 sur la Lune et les autres corps célestes, le désaccord repose sur l'interprétation du concept de patrimoine commun de l'humanité (Zell, 2006). Les États-Unis portant la voix de l'Occident, proposent une interprétation du concept qui autoriserait l'appropriation et l'exploitation de l'espace à condition que cela soit fait à des fins pacifiques et que l'humanité en profite d'une manière ou d'une autre. En revanche, les pays en développement soutiennent que le concept devrait interdire toute forme d'appropriation et exigent que les bénéfices tirés de l'exploitation doivent être répartis de manière égale entre toutes les nations. Au regard du contexte actuel caractérisé par l'arrivée des acteurs économiques et l'émergence de nouvelles puissances spatiales, le *Space Act* témoigne d'une volonté de prise d'initiative unilatérale des États-Unis, comme l'illustre fort bien le programme Artemis. Les accords de coopération qui en résultent, lesquels sont issus de négociations bilatérales entre les États-Unis et chaque pays partenaire, participent d'une vision commune de l'utilisation et de l'exploitation de l'espace (Lavarde et Paoli-Gagin, 2023). La Chine et l'Inde ne figurent pas dans les pays signataires. On notera aussi que l'Allemagne ne fait pas partie des 24 signataires. La France a signé l'accord en 2022.

56 Il s'agit du nouveau programme lunaire américain qui a été lancé le 16 novembre 2022 avec le premier décollage de la fusée SLS. Ce programme s'inscrit dans cette nouvelle conquête spatiale qui oppose notamment les États-Unis et la Chine.

57 Le programme de la navette a été annulé en 2011, laissant les États-Unis dans la position embarrassante de ne plus pouvoir transporter des humains depuis le sol national.

58 En 2005, la création du Bureau du programme d'équipage et de fret commercial de la NASA (C3PO) a donné lieu à deux programmes qui offrent au secteur privé national une capacité de transport de fret et d'équipage vers la Station spatiale internationale. Le premier programme était le Programme de services de transport orbital commercial (COTS), qui a été lancé en 2006 pour assurer le transport de fret vers la station spatiale. Le second était le Commercial Crew Development Program (CCDev), lancé en 2009 pour assurer le transport des équipages vers l'ISS, après le programme Shuttle (NASA 2014).

59 A ce titre, Weinzierl (2018) rapporte que selon la NASA, le coût total pour livrer un kilogramme de fret à la Station spatiale internationale était d'environ 89 000 \$ via SpaceX et 135 000 \$ via Orbital Sciences, un tiers et demi du coût estimé de 272 000 \$ par kilogramme qui aurait été possible avec la navette spatiale.

60 A ce propos, en appliquant les *Space Act Agreements* (SAAs) aux programmes COTS et CCDev, l'Agence spatiale américaine peut transférer à l'entreprise sous-traitante la charge du contrôle de la conception et du développement ; les procédures et le prix associé sont alors définis par l'entrepreneur privé, lequel doit livrer à temps s'il veut être payé. En octroyant à l'entreprise la liberté de définir et de fournir un service ou une capacité technique, la NASA réduit de manière notable son implication dans le processus, engendrant ainsi une réduction plus large des coûts.

61 Il s'agit de l'article II.d de la Convention. Par ailleurs, l'article VII de cette même Convention précise la mission de l'ESA en matière de politique industrielle.

62 Selon Thierry Breton, commissaire européen en charge du marché intérieur, l'autonomie stratégique serait l'expression d'un compromis vertueux : ni autarcie, ni dépendance, mais la promesse pour l'Europe de conserver sa liberté d'action et la maîtrise de son destin (Rapport Schuman sur l'Europe, 2023, p. 141). De surcroît, cette quête d'autonomie répond à de nouveaux enjeux sécuritaires concernant l'espace comme lieu de conflictualité, avec la nécessité de pouvoir *agir dans l'espace* afin de se défendre.

63 Galileo est un système de positionnement par satellites lancé par l'Union européenne dans le cadre du programme de même nom. Le déploiement de la première génération de satellites devrait s'achever en 2024. Il annonce l'arrivée d'une seconde génération de satellites.

[64](#) EGNOS est employé pour améliorer la performance des systèmes mondiaux de navigation par satellite, tels que le GPS et Galileo. Il est déployé pour fournir des services de navigation en toute sécurité aux usagers aériens, maritimes et terrestres dans la majeure partie de l'Europe.

[65](#) Copernicus est un programme de l'Union européenne qui collecte et restitue des données de qualité et actualisées de manière continue aux citoyens européens concernant l'état de la planète et la protection de l'environnement. Copernicus joue un rôle clé dans l'observation de la terre, de la mer et de l'atmosphère pour aider à comprendre le changement climatique ainsi que l'environnement européen. Il est ainsi conçu pour accompagner les politiques climatiques et soutenir l'aide humanitaire et le bien-être général des citoyens européens.

[66](#) Il s'agit d'appliquer un *principe de réciprocité* dans l'accès aux marchés publics, excluant les entreprises qui fausseraient la concurrence en recevant des subventions de la part d'États tiers.

[67](#) Cette nouvelle stratégie a été adoptée durant le premier semestre 2023.

[68](#) L'essor des activités spatiales observés en Allemagne et en Italie se reflète fort bien dans le budget annuel alloué au secteur de l'aérospatial ; pour l'année 2023, il est de l'ordre de 3,9 milliards d'euros en Allemagne contre 2,9 milliards en Italie, sachant qu'en France, le CNES dispose d'un budget de 3 milliards d'euros. À l'échelle mondiale, l'ESA dispose d'un budget de l'ordre de 7,3 milliards d'euros issu des versements réalisés par les 22 États membres, alors que celui de la NASA s'élève à hauteur de 24 milliards de dollars. On comprend mieux la raison pour laquelle l'industrie spatiale américaine repose grandement sur les marchés gouvernementaux pour son développement, alors qu'en Europe, les acteurs privés du spatial dépendent plutôt des marchés commerciaux, lesquels souffrent d'une faible demande.

[69](#) Par exemple, pour Spot Image, les cinq premiers satellites ont été entièrement financés par le secteur public avec ce dernier comme premier client.

[70](#) Il s'agit notamment des satellites Spot 6 et Spot 7 avec Atrium comme principal financeur.

[71](#) Dans ce secteur en forte croissance, des entreprises comme Orbital Insight, se spécialisent dans la transformation de l'imagerie terrestre en intelligence stratégique, dans l'achat de satellites Rapid Eye produits par Planet Labs, et dans le lancement de leurs propres satellites « jetables ». Il est clair que la croissance du traitement des métadonnées, (*big data analytics*), à l'image de ces entreprises spécialisées dans les métadonnées issues de l'observation terrestre, contribue grandement à la diversification de la chaîne de valeur.

[72](#) Le marché mondial de l'image spatiale est dominé par DigitalGlobe, une entreprise basée aux États-Unis qui est devenue le leader mondial des images spatiales. Le modèle de croissance de l'entreprise repose principalement sur des contrats de vente avec des organismes publics, notamment la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), qui fait partie du département américain de la Défense. En Europe, les principaux acteurs sont Astrium et e-GEOS, lesquels contrôlent près de 70 % du marché.

[73](#) L'initiative CASSINI vise à soutenir les entrepreneurs innovants, les start-ups et les PME de l'industrie spatiale sur la période 2021-2027. Elle couvre l'ensemble du cycle entrepreneurial, de la génération d'idées à la commercialisation et aux conditions de financement. En 2022, plus de cent entreprises ont bénéficié de ce soutien.

[74](#) Le programme Copernicus permettra de suivre la réalisation des objectifs nationaux en matière de décarbonation des activités économiques en lien avec les politiques climatiques qui sont mises en œuvre pour respecter l'Accord de Paris sur le climat.

[75](#) La notion de bien commun fait référence à des ressources partagées par plusieurs usagers qui font l'objet de dilemmes sociaux (Hess et Ostrom, 2007). Ces dilemmes font écho à un risque de compétition entre les usagers qui, en l'absence de règles d'usage acceptées, peuvent conduire à la dégradation de ces ressources. Dans ce cadre d'analyse, le climat révèle les propriétés de ces communs de grande dimension ou d'accès potentiellement universel, tels que les mers, les pôles et l'atmosphère, qui nécessitent des modes de gouvernance adaptés (Ostrom, 2014). À cet égard, dans la continuité des travaux de V. Ostrom, E. Ostrom préconise un mode de gouvernance polycentrique par référence à la multiplicité requise des niveaux de décision et d'action (V. Ostrom et al., 1961 ; V. Ostrom, 1999). Les données d'observation qui portent sur des échelles spatio-temporelles de plus en plus fines devraient alors contribuer à améliorer la performance publique dans la gestion des biens communs, lequel concernent aussi les ressources en eau et en énergie, la qualité des sols et la biodiversité. Pour les « maux communs », le raisonnement demeure quelque peu le même. Il s'agirait de proposer des règles d'usage afin d'éviter que la somme des comportements individuels n'aboutisse à des pollutions ou des dommages irréversibles dont le monde entier souffrirait. Le réchauffement climatique en est une illustration. Dans cet ordre d'idées, la surveillance des transactions financières devrait permettre d'éviter une crise systémique.

[76](#) Certains secteurs ou domaines d'activité commencent à prendre conscience de l'utilité des données spatiales lorsqu'elles sont associées avec d'autres données d'ordre public ou privé. Nous pensons notamment à l'urbanisme, à l'agriculture numérique, aux services d'assurance et aux transactions financières dont certaines sur la *blockchain* (David, 2019 ; Torben 2017) ou le *crowdfunding* (Pomerois et al., 2019).

[77](#) À cet égard, l'agence européenne pour le Programme spatial (EUSPA) a fortement contribué à l'adoption par le marché de Galileo. Le travail conjoint avec l'industrie mondiale des microprocesseurs permet aujourd'hui d'assurer la compatibilité de plus de 3,5 milliards de smartphones avec Galileo. L'agence œuvre actuellement à la diffusion des programmes EGNOS et Copernicus à travers les différents marchés concernés.

[78](#) À titre d'illustration, on peut citer le réseau des centres d'incubation d'entreprises (BIC) de l'ESA, actuellement situé sur 16 sites européens, lequel contribue à l'essor des technologies spatiales de l'ESA par le biais d'une approche plutôt centrée sur l'offre dans la tradition du *technology push*.

[79](#) Robinson et Mazzucato (2019) évoquent à titre d'exemples les districts spatiaux comme Harwell (Royaume-Uni) pour les applications satellitaires et Aerospace Valley (France).

[80](#) Cette situation est particulièrement évidente aux États-Unis, et ne se limite pas à l'imagerie, avec la montée en puissance d'entreprises telles que Planet Labs, SpaceX et Nanoracks.

[81](#) L'EUSPA qui a été créée en 2004, a pour objectif de gérer les intérêts publics relatifs aux programmes européens de système global de navigation par satellite (GNSS), au système européen de navigation par recouvrement géostationnaire (EGNOS), à Galileo, à l'observation de la terre, au programme Copernicus et au programme de télécommunications gouvernementales par satellite (Govsatcom). Elle doit s'assurer que l'UE réalise ses objectifs en matière de système global de navigation par satellite (GNSS) et que les citoyens tirent pleinement parti du système européen de navigation par satellite (EGNOS et Galileo).

Résumés

Le développement récent de l'économie spatiale s'inscrit dans un contexte où les questions de sécurité ont beaucoup évolué durant les dernières décennies. Tenant compte de ce contexte, l'article a pour objet d'étudier la dynamique de l'innovation dans le secteur de l'aérospatial. Même si des tendances communes peuvent être relevées, l'analyse souligne des différences importantes entre les approches américaines et européennes en matière d'innovation. L'article est structuré en deux temps. Tout d'abord, les grandes tendances partagées de la nouvelle économie spatiale sont analysées par référence à un cadre d'analyse centré sur la notion de sécurité. Dans un second temps, une analyse de la politique d'innovation conduites par les Agences spatiales américaine et européenne souligne la diversité des approches.

The recent development of the space economy takes place in a context where security issues have evolved significantly over the last decades. With respect to this context, the paper aims to study the dynamics of innovation in the aerospace sector. Although common trends can be noted, the analysis highlights important differences between American and European approaches to technological innovation. The article is structured in two parts. Firstly, the major shared trends of the new space economy are analyzed with reference to an analytical framework focusing on the notion of security. Secondly, a study of the innovation policy implemented by the American and European space agencies highlights the diversity of approaches.

Index

Mots-clés : sécurité, diversité des capitalismes, politique d'innovation, chaîne de valeur, risque, secteur de l'aérospatial

Keywords : security, diversity of capitalism, innovation policy, value chain, risk, aerospace sector

Auteur

Patrick Schembri

Économiste, Université Paris-Saclay, UVSQ, CEARC (UR 4455/OVSQ)

patrick.schembri@uvsq.fr

The Sovereignty of Sovereignities: On the Satellitization of Planet Earth

La souveraineté des souverainetés : sur la satellitisation de la planète Terre

Brad Tabas

Introduction

The word “satellite” has the meaning of “follower or attendant of a superior person”. This term came into English from Middle French satellite, from the Latin *satelles* “attendant, companion, courtier, accomplice, assistant”. However, it seems that the Latin word came from the Etruscan “*zatlath*”, where “*zatl*” is the axe, and the suffix *ath* is a morpheme that indicates “who is doing”. The meaning is therefore “he, who wields the axe”, the Latin “*lictor*”, the bodyguard to magistrates. (Sparavigna, 2016: 1)

The spatiality of power in the Anthropocene is only inadequately expressed by the notion of the globe. With respect to the economy in particular, the distinction is breaking down between geopolitics and astropolitics, and the latter can no longer be confined to a discipline concerned with using science fiction to “get a glimpse of” (Wright, 2019: 15) the shape of extraterrestrial warfare, but is becoming crucial for understanding the flow of capital as well as the ways in which terrestrial warfare is waged. Space history no longer belongs to the future or to the category of the future past (Koselleck, 1979) , just as it is no longer appropriate to treat extraterrestrial space as an infinitely extended and featureless cosmic alterity, as the environmental dimension of debris-clogged orbital space has become a clear and distinct concern. The increasing dominion of terrestrial powers over astrographically delimited zones of congested extraterrestrial space needs to be integrated into the horizon of political analysis, just as the extraterrestrial needs to be included within accounts of the great acceleration of anthropogenic globalization that has taken place since Sputnik (McNeill and Engelke, 2014) . But leaving the global absolute behind implies accepting a paradigm shift within historical and political analysis. This paper explores how we can think this new spatiality, with a particular focus on how moving beyond the globe impacts how we think about the biopolitical dimension of sovereign power.

More narrowly, the following traces a process that Alexander Geppert and I have called “satellitization” (Geppert and Tabas, 2023) . It provides an ex-orbital account of the history of the planet and its satellites which lays stress on the idea that the New Space age is in no way a return to space exploration, but rather marks the consolidation of the terrestrial dependency on satellite infrastructure. It places particular emphasis on the current scramble to develop space-based space surveillance (SBSS) systems and other attempts to control space from space, systems which enable the exercise of control over “astrographically” delimited areas of responsibility (AOR) (Shaw et al., 2022) , as in effect consolidating practical dominions within extra-territorial space, and so bringing about a change in the spatial logic of sovereign power that has implications for what Foucault (2004a) called biopolitics. Satellites were instrumental in the biopolitics of the period that led up to the 1999 baptism of the term ‘Anthropocene’ (Davies, 2016: 42) , and they remain critical to the Earth monitoring efforts within our current moment understood as a period of biopolitical crisis. Yet in the pre-Anthropocene period, terrestrial economic growth was in a pre-Anthropocene era thought to globally align with the aims of biopolitics. This is no longer thought to be the case, but the emergent paradigm of governance for Earth-Space sustainability is sometimes seen as a way forward (Yap and Truffer, 2022) . This new Earth-Space paradigm opens a new horizon within the logic of biopolitics, separating its spatiality from the globe, or at least from the living biosphere, while at the same time subsuming earth system data and the limits of the planet within a re-parametered biopolitical machine, permitting at least the hope of a reconciliation between economic growth and planetary life.

Tracing the emergence of astrographic dominions as a new form of biopolitics demands moving the horizons of the political beyond the globe. That means not only narrating political history since Sputnik in such a way as to re-frame much recent globalization as part of a process of infrastructural extra-terrestrialization; it also involves engaging in a concerted effort to deconstruct global bias within our language and our analytic frameworks. For example, when we think the local as dialectically opposed only to the global, then we forget satellites and the dominion over them, leaving space as a vast and undifferentiated cosmos filled only with heavenly bodies that exercise power over us in ways that are either mysterious or uncontrollable. But, to cite a phrase of Hannah Arendt’s that will orbit back again and again in the following: “the man-made satellite was no moon or star, no heavenly body which could follow its circling path for a time span that to us mortals, bound by earthly time, lasts from eternity to eternity” (Arendt, 1998: 1) . Sputnik was, in other words, historical, but it was not on the globe. Historical thinking, to remain historical, must follow, even if biological life remains, by and large, tied to the ground.

Approach

The methodology employed here is interdisciplinary. It draws on at least three distinct disciplines: the post-structuralist analysis of biopolitics, the strategic literature on astropolitics, and the eco-marxist literature on the Anthropocene. The approach applied here is also post-phenomenological. The term is borrowed from Don Ihde (1997) . He used it to name a pragmatic approach to thinking which he took to be necessary because global warming had been confirmed by satellite observations, not by phenomenological reductions. This need for epistemic ecumenicalism is a diagnosis shared by Hess (2023) , who in the course of his essay emphasizing the value of thinking the environment phenomenologically—from an embodied “first person point of view”—nevertheless concedes the necessity of relying on objective data regarding the states of the changing planetary system at key points in his exposition. Right now, the Global Climate Observing System currently identifies 54 essential climate variables (ECVs). Satellite data address about 60% of these variables, making satellites a vital component for monitoring and understanding our planet’s climate (Meftah et al., 2023) . Post-phenomenology thinks with this data, recognizing that if humans require satellites to gather the data, and computers to process and model it, they nevertheless also employ humanistic discursive categories to make this data significant and to grasp its practical relevance. Thus, this text includes significant historical and conceptual analysis of political categories and concepts such as biopolitics and sovereignty.

Organization

Satellitization has been a three-stage process. Each section in the following focuses on one phase, describing paradigmatically different relationships between terrestrial politics and satellite infrastructures. The first phase of satellitization involved often overblown speculations regarding how one might exploit an extraterrestrial technology to augment national power. But misplaced expectations in no way hampered efforts to put additional satellites into orbit. The second phase began when various forms of leverageable information from beyond the globe began iterating between Earth and space, enabling satellite-endowed states to exercise power over the planet. Over the course of this phase, extraterrestrial infrastructure began informing planetary life, and life on the planet took on such forms as to yield additional extraterrestrial infrastructure. The final phase of satellitization began when knowledge of the orbital domain, astrographical as opposed to geographical, became a source of power. Efforts began to be made to exercise that power not from land, but from satellite to satellite. This final phase is still emergent, but its key characteristic is a growing awareness that the limits of sustainable orbital holding capacity are determined by the limits to existing space surveillance capacity, such that the nation that has that knowledge now can be seen to exercise a new form of post-biowater over an orbital dominion.

If the phases are presented and emerged to salience in temporal succession, they are not, strictly speaking, linear but cumulative. All three are simultaneously part of the contemporary politics of satellitization, and each played a key role in the emergence of the ongoing reconfiguration of the logic of sovereignty set in motion by the growth of the new space economy. Each section begins by outlining the phase of satellitization, then focuses on the technological capacities of the satellites and the politics driving their deployment, before concluding with an excursus on the larger significance of these evolutions.

Starting Satellitization

“There is something that is more important than any ultimate weapon. That is the ultimate position—the position of total control over the Earth that lies somewhere out in space” (Johnson, 1963) .

The first phase of satellitization was marked by prognostications, grand visions of how satellites might be exploited to the ends of power politics. It was also marked by a yawning gap between the power alleged to follow from the growth of space infrastructure and the capacity to influence the forms of planetary life provided by existing technologies. In the first stage of satellitization, satellites were often imagined as having the potential to become some sort of “superweapon” (Dienst, 1959: 2) , yet they were ultimately only a powerful symbol of power.

Beep

Sputnik just went beep. That beeping performed little of utility for controlling the planet other than announcing the satellite was there. The American first, *Explorer I* , did slightly more—it discovered the Van Allen radiation belts—but its capacities were still radically limited (Laurius and Jenkins, 2014) .

In geopolitical terms, satellites that just went beep were not doing nothing: “Sputnik shock” motivated American politicians to increase their space efforts (Dickson, 2019) , it inspired admiration worldwide for Russian technological prowess, and at the very least demonstrated the launch capabilities of both superpowers. A full account of satellitization might detail the evolution of early launches, especially the different experimental strategies employed as engineers sought ways of transforming the potential of satellites into a functioning means of transforming life on planet Earth. But one can quickly enough classify the period by saying that it was dominated by experimentation and geo-orientation. Those who financed satellite launches were primarily interested in planet Earth. This was not at all the understanding of the potential of satellites among early Astrofuturists. Von Braun, for example, had anticipated that satellites would be manned space stations serving as waypoints between Earth and deeper space (Millard, 2017) . But planet Earth, and the power over it that satellites seemed capable of delivering, was more attractive. Some thought that satellites would be useful for observation, others thought that they might be weapons, others still thought they should be used as tools for world peace (Singh, 2017: 143) . But the consensus was that satellites were going to be about the globe.

The Politics of the Global Viewpoint

Arendt’s 1958 book, *Conditio Humana* , began by hailing the launch of Sputnik as a historical event “second in importance to no other” (1998: 1) , then went on to provide an account of political modernity focused around what she called the quest for the Archimedean standpoint. This had been—up until Sputnik—a purely theoretical leverage point, ever located “willfully, and explicitly, outside of the Earth” (11) . Yet if such viewpoints from nowhere were theoretical fictions, she also believed that they explained the power of modern science, having served as the levers for changing what Mészáros has called the “social metabolism” (2018) of human societies. They revolutionized social and ecological relations. They led to what we now call the Anthropocene. As Arendt put it: “we have found a way to act on the earth and within terrestrial nature as though we dispose of it from outside, from the Archimedean point” (1998: 262) .

One example of how such a view from the outside could fuel domination is to be found in cartography. Arendt detailed how the mapping and navigation charts of the early stages of the modern age “shrunk” the earth into a “ball,” thus anticipating the “the technical inventions through which all earthly space has become small and close at hand” (1998: 250) . Mapping always involved imagining a view from the outside. The power of the map flowed from the efficacy of this abstraction. As Lacoste (1985) once noted, the first purpose of doing geography is war, and a good map could play a critical role in battlefield strategy. More generally, over the era in which globalization was carried out by sea and land, accurate maps aided attempts to expand influence by conquest or commerce. This doubtless explains why the iconography of the globe, and the trope of the global gaze, as Cosgrove has so exhaustively illustrated, was associated with sovereign power and dreams of “dominion over the terrestrial globe” (Cosgrove, 2001: 5) . Yet we must not forget that the symbolic power accorded to the global view was also political theatre. The potential to exercise power given a gaze on a globe is only actualizable if one knows how to exploit the data. Thus, even photographic images of the Earth, which the Americans had possessed since 1946 (Edgington, 2012) , well before the famed 1972 *Blue Marble* image, were limited in their power (if not their perceived promise) to actually remake life on Earth. Contrary to the icons, it is not the possession of such images alone which allows Archimedean leverage over the globe. The deciphering of the messages, as well as much misreading, would occur within the second phase of satellitization.

It is worth observing a fundamental disanalogy between the traditional iconography of power, the idea or ideal of the Archimedean point, and the satellite viewpoint. Within traditional representations of the global view, the figure of the sovereign is at once on the globe, and yet is depicted as at once outside of it and greater than it. Consider the iconography of the frontispiece of Hobbes *Leviathan* . This is often taken as illustrating the “idea of the work” (Agamben, 2017: 265) , which would in turn make it a leading iconographical candidate to paradigmatically illustrate modern biopolitical sovereignty. Bosse’s drawing presents an inversion of more traditional imperial iconography. It does not depict the sovereign holding the globe as seen from a third person point of view but rather the personification of sovereignty as seen from the point of view of the globe. But we can nevertheless see that he looks down upon a globe, because its curvature distinctively forms part of the horizon of the image’s foreground. The place on the outside is occupied by the sovereign, whose body is relatively smaller than in some representations—presumably to signify that he is the creature of a nation and not of a global empire—yet into his body is compressed the people, all of whom are staring back at the globe, as if to

confirm that it is through knowledge of the planet’s nature that sovereign power within that nation can be both derived and justified.

Now let us think about the satellite view on the planet. There is no longer space to imagine and represent that figure without rupturing the spatial logic opened by the world historical event that was the launch of Sputnik. Sputnik takes the place of the Leviathan, but is not the Leviathan, is not, as the Leviathan was, an imaginary artificial construction, but is an artificial thing that is not imaginary, to which people attribute great power, which, unlike Hobbes’ Leviathan, it must deliver by mechanical means. Where the faces of the people might have been, there is now the thing, Sputnik. Employing remote sensors, it sees what the people might have seen, but it sees for them, or they see through it, even if it is also not them, and the viewers only belong to a single nation or group. Arendt, though she stood at the very dawn of the Space Age and so had no sense of the significance that this would have, obscurely grasped this point and its importance, announcing, with great pregnancy, and with no little ambiguity, that Sputnik was “no heavenly body” (1998: 1) .

The Second Phase of Satellitization

“*The American way of life is fueled by space*” (Dickinson, 2021) .

The second phase of satellitization arrived when satellites began transforming terrestrial forms of life. It came to fruition at the point when one could say, without absurdity, that the American way of life was fueled by space. Arguably, the first satellite reconnaissance missions marked its onset. By 1968, Johnson, then President, remarked of the photos of Russia provided by the CORONA satellites:

I wouldn’t want to be quoted on this, but we’ve spent 35 or 40 billion dollars on the space program. And if nothing else had come out of it except the knowledge we’ve gained from space photography, it would be worth 10 times what the whole program has cost. Because tonight we know how many missiles the enemy has and, it turned out, our guesses were way off. We were doing things we didn’t need to do. We were building things we didn’t need to build. We were harboring fears we didn’t need to harbor. Because of satellites I know how many missiles the enemy has. (Clark, 1968)

In that atomic-age context in which American geopolitical strategy was increasingly being understood in terms of what Schelling had called “the influence that lies in latent force” (2020: 31) , knowing the others’ latent force—or lack thereof—was a source of influence and thus power. Yet images of the enemy and their relative strength were only the beginning of the new forms of power-knowledge relations generated by the second phase of satellitization. They are not the most relevant for attending to biopolitics. What Americans and other powers produced via satellitization were infrastructural dependencies: situations in which it was not the destructive power of arms, but a dependence on American satellites for everyday life, including access to information regarding the vital processes of the planetary system, which offered the keys to dominance. The culmination of this influence, the point at which it was translated into sovereign power, occurred when space services became system critical to citizens and governments around the world. Many commentators now suggest that such a state has been attained with respect to both cyberspace and the global economic system (Dawes, 2018; Klein, 2023) , to this list should be added planetary environmental monitoring. These existential dependencies constitute the basis of ex-orbital biopolitical governance.

The Outer Space Treaty, which was embraced by both the United States and Russia, and which forbade sovereign claims in orbital space, (now, arguably) establishing it as a global common, should be seen as part of this strategy. **1** This ceding of territorial claims enabled “legal oversight of any location on the Earth” (Raymond, 2020: vi) . This is now recognized as one of the foundations of American space power, because this means that power over the orbital domain is power over the entire planet. One way of glossing this is to suggest that the politics of satellitization enabled a new form of (post)colonialization. Thanks to satellites, powers no longer needed to annex territories to exercise biopolitical power over them. They could use the *de jure* common, but *de facto* exclusive, control of orbital space above to liberally dole out ‘benefits’ which were also dependencies. **2** This post-globalization of the political order is a function and culmination of the second phase of satellitization. To the extent that biopolitical sovereignty is entangled with space infrastructure, it seems fair to say that if humankind in the Anthropocene does not live in space, it does live with space, or in such a way that the current state of life on the globe could not have been attained without the Archimedean leverage exercised by satellites.

Satellitization brings about a rupture within the logic of globalization. If that phenomenon was already manifest in the 19th century, and was fueled by technologies such as steam locomotives and global shipping (Osterhammel, 2011) , those technologies could not have brought about the specific form of capitalist order that emerged on the planet over the course of the late twentieth century. For example, the compression of planetary time-space such that distances have seemed to become ever smaller as information moves more rapidly around the globe, what Münkler has described as a “space revolution [*Raumrevolution*]” (2023: 18) (a term first employed by Schmitt (2008) to describe the effects of naval technology on the globalizing political order), has been massively inflected by satellite infrastructure. While the likes of Arendt and Jünger had talked about the globe shrinking before the Space Age, space technology allowed forms of time space compression that are literally unthinkable in terrestrial terms. In 1872 Verne presented an eighty-day global circumnavigation as a wonder, while today astronauts circle the planet 16 times per day aboard the ISS. In terms of data transfer, Space X’s constellation can transmit a message around the globe 40 percent more rapidly than land-based fiber optics. Moreover, the role of space technologies with respect to time-space compression was in no way concealed, it was rather dramatized as part of space politics. As the media theorists Evans and Lundgren (2023) have pointed out, communications satellites helped to raise cultural awareness of time-space compression by enabling live global television emissions which precisely announced to viewers that they were global and live because they were being transmitted by satellite. **3**

Nevertheless, there is an ironic face to this spatial revolution. As everything accelerated on the globe, the post-global technologies which enabled these accelerations seemed to recede from view, scholars talked of globalization, rarely pausing to remark the difference between the old and the new globalization, and when they did tending to suggest that the new globalization emerged precisely as a result of the devitalization of space resulting from the “end of the interplanetary adventure” (Virilio, 1999) .

Satellites and Terrestrial Life

The second phase of satellitization largely overlapped with the rise of the United States to global hegemony, which also overlapped with the emergence of new concerns about the ecological future of the planet. If Russia had led in the early phases of satellitization, and if many other nations, England, France, India, and China eventually began seriously investing in satellite technologies, the United States emerged as, and remains, the leading space actor.

Focusing on those satellites that most impacted everyday life on Earth, it is possible to establish three broad functionally differentiated families of orbital infrastructure, each broadly bifunctional or dual-use, insofar as they have both civilian and military applications. **4** These are: satellites that observe the Earth and so produce geospatial information, so Earth System Science and GIS in the civilian version, and GEOINT for the military version; satellites that communicate information around the Earth for both military and civilian purposes; and satellites such as GPS and Galileo that use their orbital positions to generate logistically useful information.

With respect to the civilian uses of satellites, the American government pursued a politics arguably similar to the commercial strategy employed by the leading actors in what Zuboff (2020) has called “surveillance capitalism.” It offered services for free, and in so doing reinforced its own ideology, power, and leadership. This approach paradoxically seemed to function for market domination by working against the market. Communications infrastructure provides an edifying case in point. At least since Eisenhower, achieving dominance in satellite communications had been a government priority (Butrica, 1997) . This dominance was accomplished by as early as the 1970’s. By that point, the US had global communications coverage, while Russia, its closest competitor, had only national coverage (Gosselin, 2021) . This enabled America to exert influence on its allies who lacked such infrastructure by extending assistance, as was the case for Britain in the Falklands conflict (Bowen, 2022) . As Parks has shown, American satellite infrastructure also exerted pro-market soft power by beaming images of the American dream—the hit T.V. show *Dallas*—even into the Outback (Parks and Schwoch, 2012; Parks, 2005) . This was accomplished because America pursued open-source and common use politics. Kennedy actively opposed the commercialization of communications constellations, for fear that this would yield a concentration of satellites over the U.S. and Europe, leaving the rest of the planet vulnerable to Soviet propaganda (Slotten, 2002: 330) . One sees a similar open access strategy at work with GPS and also with environmental sensing data (Borowitz, 2017) . As is sometimes said of the internet, “if it is free, you are the product,” in this case we might modify the logic, saying of satellite data, that if it was free, it was because the users were now subjects.

From the point of view of biopolitics—a concept which we will clarify below—and certainly from the point of view of the Anthropocene, the most important aspect of satellitization was Earth observation. From the very first, the civilian side of space surveillance included weather satellites and studies of the planetary environment. Satellite images were superior to airplane images for these tasks, as they were repeatable and global, and so allowed scientists to track changes over time. Thanks to the globality of their data, as Edwards has noted, constructing data-driven planetary climate models became feasible (Edwards, 2010: 11) . As a National Academy report from 1982 explained: “with the recognition that the solid earth, its oceans and atmosphere, and its life forms are governed by processes that act on a planetary scale has come an awareness that further understanding of these processes will require coordinated global observations and theories that integrate these observations. Many of the needed measurements can be made naturally and most efficiently from space. The view of the Earth from space is necessarily global in perspective” (Board, 1982: 1) .

Early LANDSAT satellites catalogued renewable energy resources, tracked the movement of water on land to learn about the hydrological cycle, and measured land use (Leshner and Hogan, 2019) . All of this can be understood as aimed at not only producing scientific knowledge of the Earth, but also at demonstrating that space assets could be useful for rendering land more productive. By the early 1980’s, and in the wake of deep space explorations that had determined that Mars and Venus were both far less habitable than had been initially believed, but had also shown they had undergone long-term climatic change away from what had likely been conditions more propitious for the formation of life, NASA began transferring its expertise in planetary modeling techniques, including the method of studying the planet from the outside that had been the default approach when studying alien planets, towards the study of the Earth itself (Grinspoon, 2016; Frank, 2018; Lorenz, 2019) . Presumably the expectation was that knowledge of the globe would yield global economic growth and reinforce American sovereign power. As one report explained: “Earth science, by its very nature, is charged with societal goals that are equal in importance to the scientific goals. The Earth supplies man with much of the energy and all the raw materials that he consumes at an accelerating rate; a major goal of earth science is to characterize the global inventory of resources and to understand the process of resource emplacement” (1982: 9) . To fulfil the objective of understanding life of the planet, what Margoulis and Lovelock were to call Gaia, in her words, “symbiosis as seen from space” (1998: 2) , US-funded scientists set out to use satellites to study the global atmospheric circulation, atmospheric and climate history, ocean dynamics, atmosphere ocean interaction, the global ice and hydrological cycle, major chemical cycles, plate dynamics, evolution of the earth’s crust, sedimentary cycles, the earth’s internal structure, and the earth’s magnetic field. Quite rapidly, the focus shifted to include the study of the role of human beings within these changing systems. A key step along this path was the creation by NASA of the Bretherton Model, the first attempt to study the planet that explicitly foregrounded the place and the role of human beings (Steffen et al., 2020) . Also critical was the launching of Mission to Planet Earth, an initiative that had the goal of obtaining “a comprehensive scientific understanding of the entire Earth System, by describing how its various components function, how they interact, and how they may be expected to evolve on all time scales” (Ride, 1987: 7) .

It seems fair to suggest that the expectation was that this research would contribute to American power by aiding all nations of the planet to benefit from American data as it was translated into what came to be known as sustainable development. **5** However, the ultimate irony for American power was the confirmation that human beings, and in particular those human beings who lived in the most technologically advanced carbon-fueled civilizations, were effectively deregulating the climate (Conway, 2008; Edwards, 2010; Grevsmühl, 2014; Leshner and Hogan, 2019) . We now call this discovery the birth of the Anthropocene (Chakrabarty, 2021) . **6** That said, in 1982, long before the popularization of the term Anthropocene, the NASA scientist Jack Goody had made essentially the same point: “Earth is a planet characterized by change, and it has entered an epoch in which one species, the human race, has achieved the ability to alter its environment on a global scale” (Leshner and Hogan, 2019: 58) . The role of satellites within this discovery thus has a kind of poignant irony. While they discovered the greatest threat to the biopolitical legitimacy of sovereign power, they also provided the last avenue for its salvation, for satellites themselves when deployed at a reasonable scale, pose acceptable dangers to the planetary environment (Chevrier, 2023: 133) , while the data that derives from them is of massive value for protecting the planet against the existential risks unleashed by the carbon economy, and for this reason provide biopolitical legitimacy to the nations that possess them.

The Post-Globalization of Biopower

The term biopower was introduced by Foucault in the 1970’s as a way of thinking about changes in the logic of sovereign power over the course of the modern era in light of the same developments in technoscience that had interested Arendt (Seguin, 2019) . Foucault understood the life sciences as having brought about a paradigm shift with the logic of sovereignty from “the old right [*droit*] to put to death [*faire mourir*] and allow to live [*laisser vivre*]” towards a new capacity in which sovereigns were able to “make life [*faire vivre*] and abandon to death [*rejeter dans la mort*]” (1976: 181) . Foucault in no way invented the term. It was already being used by German geopoliticians such as Von Kohl in the 1920’s to describe a politics oriented less towards spatial expansion (“geopolitics”) than towards vertical growth (Lemke, 2016: 10) . One source that has been pointed to as crystallizing this new paradigm is Leibniz, who wrote that “the power of a land [*regionis*] consists in ground [*terra*], things [*rebus*], and men” (Vogl, 2015: 25) , a statement which would seem to amount to the claim that having more things and men equates with having greater power. As Vogl has shown, the dominant interpretation of what counted as a good approach to rule within the biopolitical thinking of the modern vision of politics was one in which the “growth of capital” and the “growth of the population” (2015: 60) are seen to be complementary categories which the art of rule sought to coordinate. In the pursuit of this double growth, modern states sought to leverage scientific and economic knowledge in the biopolitical pursuit of development, which in this context ought to be understood as a means of legitimating the existing order regardless of the existing inequalities and injustices that it manifested, since when such growth appeared, the state could seem to have been blessed by providence, and could also be seen to be developing in such a way as to allow the negative effects of inequality to progressively be mitigated. The allusion to providence here, a clearly theological category, is hardly coincidental. This theological political dimension in biopolitical governance, as well as its links to the employment of space science for the planet, lies at the heart of the arguments made by American theologian Kenneth Cauthen in his *Christian Biopolitics: A Credo & Strategy for the Future* (1971) . For

Caution, making life by using space technologies for the flourishing of the planet is precisely the governmental strategy sanctioned by Christian theology. As we will deal with it here, the pursuit of biopolitical power ought to be understood as a legitimization strategy. That is to say that if a pretender to sovereign power can stimulate growth, then that power’s claim to rule appears legitimate.

In this light, consider the opening lines of *Our Common Future* , the first U.N. Report on Sustainable Development. One finds evoked the critical importance of “seeing the planet from space for the first time,” and likewise an insistence on how this vision from orbit has allowed us to “look deeper into and understand natural systems” by “studying the Earth as an organism” so that we can “reconcile human affairs and thrive in the process” (1987: 11) . All of this suggests a global consent to the idea that American remote sensing technologies could be used as an Archimedean lever to reinforce its quasi-colonial power just so long as this fostered perpetual growth, with growth here comprehending both the economic and ecological resonances of the term. By initiating and participating in such efforts, America and other developed powers were putting a new satellite-empowered twist on the biopolitical dimension of the sanitation and nature-preservation efforts that had already been present in 19th century colonial governance (Osterhammel, 2011; Blanc, 2020) .

Noteworthy is the clearly biopolitical dimension in the forms of modernization through space expansion pursued by many post-colonial nations. In this regard, the Indian space program (ISRO) is particularly exemplary. As Yash Pal (former Secretary General of the Second United Nations Committee on Peaceful Uses of Outer Space (1981–82), and one of the founders of the Indian Space Program) bragged, ISRO was “probably the only rocket programme in the whole world which was started not by the army” but rather by an agency whose vocation was “people, education, and agriculture” (Organization, 2015: 78) . What this meant in practice was that India employed the orbital viewpoint to drive what it called the Green Revolution. Indian scientists studied their territory from space, seeking ways of making the land more productive by analyzing yields, tracking plant diseases, and measuring exploitable acreage, before transmitting this information to villages via instructional television shows (Organization, 2015: 485) . What this yielded was not necessarily legitimization thanks to growth from space—because the flourishing only arguably arrived, but nevertheless a clear attempt at accomplishing this. [Z](#)

Yet the limits and difficulties associated with such projects came to the fore in the Anthropocene. For much of the modern period, it was assumed that the economic and the ecological faces of biopolitical power, when pursued through scientifically informed governance, were compatible: to grow the one, was to grow the other, with all seeming incompatibilities being resolvable through progress ad infinitum, with all this progress magically yielding support for biopolitical states. But with the dawn of the Anthropocene, and this was particularly clear given the evidence provided by space data, it became clear that far too much of what had been counted as economic growth had been a product of an unsustainable and ecocidal relationship with fossil fuels (Foster et al., 2010) . To return to the quote that we have placed in exergue, if the American way of life is fueled by space, it is also, and perhaps more literally true that it is fueled by oil. Indeed, it is little exaggeration to say that the socially dominant order was made up of, to use Stephanie LeMenager’s felicitous phrase, “living oil” (2014) . This introduced a logical contradiction within the order of the world that particularly bore on the logic of biopower as providing a form of sovereign legitimation. In effect, the economically advanced nations of the world, and above all the United States, were now no longer making life on the planet with their growth, the carbon democracy (Mitchell, 2013) that they had pursued had instead been unmasked as a way of making death. As Bonneuil and Fressoz put it in a book that has been critical to introducing the Anthropocene idea to a broader audience, “the Anthropocene is the sign of our power [*puissance*], but also of our impotence [*impuissance*]” (2013: 1) . However, if certain aspects of their reign now appeared illegitimate, they still had a sole source of justification within their technological armory which remained life-engendering, and so legitimacy producing, and that was their space technology.

Thus, in the wake of the Anthropocene, satellites and space expansionism now seem to offer up a horizon of salvation not only for protecting the planet from the existing order and its need for market growth, but also to offer a horizon for that order to save itself by pursuing such growth. Satellites and the emergence of a space economy thus open up a horizon for negating the negation of biopolitical legitimacy emergent as a product of attempting to use satellite data to model and monitor the planet. In other words, if the economy and ecology were no longer compatible on planet Earth, then states, to remain legitimate, would need to sponsor the growth of the space economy, which would bring about a decorrelation of the now apparently incompatible spheres of the economical and the ecological. Within this new order, the private investors whose wealth had come at greatest cost to the planet could now appear as its saviors. I quote Jeff Bezos:

Earth will end up zoned residential and light industry. It’ll be a beautiful place to live. It’ll be a beautiful place to visit. It’ll be a beautiful place to go to college and to do some light industry. But heavy industry and all the polluting industry—all the things that are damaging our planet—will be done off Earth. (2020: 249)

Noting this emerging decorrelation between the extraterrestrial sphere of capital and the planetary sphere of most urgent ecological concern has important implications for the analysis of the political implications of satellites.

Consider Paul Virilio’s (1999) essay “Global Tele-surveillance.” Written in response to the creation of the American National Imagery and Mapping Agency (NIMA), it argues that the satellitization of the planet is catastrophically creating a “panoptic and totalitarian” planetary order, one dominated by the “globalitarian vision” of American free market liberalism. Despite being written in the same year as the coining of the term Anthropocene, Virilio shows little awareness of climate change, and no sense of the key role that was even then being played by satellite data in fracturing the belief in the spirit of the spatial compatibility of economy and ecology. He also, and this is critical, treats the globe as the ultimate and all-structuring limit for thinking the political, deriving this conclusion precisely from his interpretation of the significance of space history. As he had already written in 1976: “since the lunar missions...there are no other lands for a single humankind, the world, disappears as an infinite horizon of all possible experiences, and reappears as a theological field” a closed “miniaturized earth” (Virilio, 2023: 128) . This paradoxical derivation of history from space while denying historicity to space is reflected in Virilio’s choice of analytic models, the panopticon. Foucault, in *Surveiller et punir* , a 1975 book dedicated to exploring the relationship between observational knowledge and power, explained the panopticon as an apparatus capable of producing disciplinary power (what he would only later call biopower), by producing an asymmetrical relation between power and knowledge:

A panopticon is closed space, cut up, monitored at all its points, where individuals are inserted in a fixed place, where the slightest movements are controlled, where all events are recorded, where an uninterrupted work of writing connects the center and the periphery, where power is exercised without sharing, according to a continuous hierarchical figure, where each individual is constantly identified, examined and distributed among the living, the sick and the dead – all this constitutes a compact model of the disciplinary system (1975: 230) .

Without calling into question the adequacy of the panopticon as a model for thinking the imaginary of power in other contexts, especially in periods in which the view from the outside was virtual and came down to differences located at the level of the possession of theoretical knowledge, it is vital to lay stress on the difference made by the empirical occupation of that outside place by satellites. When the outside in which the sovereign is located is an abstraction, the masters, as was the case in the old iconography of imperial power over the globe, stand on the outside and on the inside. In the new satellite order, they do not do this. They are inside their panoptic prison themselves, and what is outside is a thing, and not a thought construction. They both submit to the power of their satellite and find themselves alienated from their power by this extraterrestrial thing, a phenomenon that we have seen become manifest in the spatial splitting of economy from ecology. In this model, an absolute asymmetry in terms of the relation between knowledge and power is assumed, but as we have seen, within the (post)colonial biopolitics of sustainable development, as well as within the broader logic of platform dependency deployed in surveillance biopolitics, it is sharing information which enables the politics of influence and the ultimate consolidation of sovereign power through the latent threat of critical infrastructural dependencies. Virilio, however, takes up Foucault’s figure as a transcendental operator, not grasping that the process of satellitization does not quite fit within the model, and thus not grasping the ways in which satellites bring about a historical shift within the spatial logic of knowledge-power relations. He thus writes:

With this domination from an orbital point of view, the putting into orbit of an infinite number of observation satellites tends to favor the global vision. To “direct” your life, it is no longer a question of observing what is happening in front of you but above you. The zenithal dimension outweighs by far – or rather from above – the horizontal, and this is no small matter since this “Sirius point of view” then erases all perspective (1999) .

Virilio is not wrong in laying stress on the epistemic authority granted to the satellite gaze. More recently, Chateauraynaud and Debaz have also claimed that within contemporary culture satellite data forms a kind of “transcendental” (2019: 21) , a truth whose truth is not questioned, and our analysis of satellite data within the constitution of the Anthropocene as a new biopolitical paradigm only reinforces this diagnosis. Yet the term transcendental also misleads: the power of the satellites flows from the fact that their view precisely is not a transcendental or speculative viewpoint, a view from nowhere. This immanence matters in ways that undercut Virilio’s analysis. He holds the satellite view outside of the sphere of history, aligning their local positions in orbital space with an alien from the speculative fiction that is Voltaire’s *Micromégas* . Yet the satellites are neither figures from science fiction nor alien gods, they are, as Arendt saw perfectly, “no heavenly bodies.” It is on this point that Virilio’s analysis collapses. Virilio’s suggestion that an “infinite” number of satellites tends to produce an ever more total “global vision” may be true in metaphysics, but in orbit, what it leads to is Kessler syndrome, a chain reaction in which satellites strike one another until all have been rendered inoperative. It is this problem, establishing the limits to growth with respect to satellites in orbit, that stands at the core of contemporary developments in extraterrestrial post-biopolitics. Grasping this point implies definitively leaving the global absolute behind.

The Third Phase of Satellization

And if we want to realize (concrétiser) this objective of sovereignty, the only way to go (passage oblige), the sovereignty of sovereignties, is space (Macron, 2022) .

A third phase of satellization has begun: satellites orbit with the vocation of observing and obtaining knowledge about other satellites and their orbits. This marks a break with previous surveillance satellites, which were—except in the case of space telescopes—launched with the aim of producing global information. Their launch implies a further shift in the logic of knowledge/power relations. A new Archimedean leverage point has emerged, one that no longer overlaps with the global viewpoint but ex-orbitally supplements it. This initiates a new development in the logic of biopower, which becomes post-biopower. This form of sovereignty remains biopolitical to the extent that the primary aim of observing satellites from other satellites is to ensure their ‘health’ and ‘protection,’ with the health and protection of the global order now depending on the health of this abiotic zone. That said, language in part fails us here: for if what we are talking about is a logic that resembles biopolitics, it is also critical to remind ourselves that the health, security, and sustainability of orbital space can only metaphorically be described in terms of health and life. Moreover, at least in part what is kept alive by protecting these satellites is not the life of the planet, but the life of the form of social life dedicated to the belief in economic growth, such that preserving the ‘life’ and ‘health’ of orbital space amounts to preserving many of the structural inequalities currently ordering everyday lives on planet Earth, which is not to say the catastrophic annihilation of ‘life’ in space would not cost lives back on the home planet.

Satellites Observing Satellites

The desire for space domain awareness dates back to the earliest phases of satellization (Sturdevant, 2008) . However, the specific employment of satellites as opposed to land-based means of monitoring the space domain is so recent that most of the technical details are classified. The first American effort at Space Based Space Surveillance (SBSS) took place in 1996. That was a test meant to validate the feasibility and efficacy of using satellites to provide better data on orbital trajectories (Sharma et al., 2002; Gaposchkin et al., 2000) . That test was sufficiently successful that the US launched the SBSS Block 10 in 2011. A larger block of four satellites—Block 20—was later cancelled. Yet that was before the New Space boom. The reasons typically given for this acceleration are various—running from reusable rockets to the nanosat boom in LEO—all of which have significantly reduced launch costs (Pasco, 2017) . The effect of this has been increasingly crowded orbits associated with a globalization of space (Moltz, 2014) , with this being doubtless a product of both an awareness of the economic desirability of orbital investments, and a growing recognition among other nations that depending on American space assets poses a risk to security and sovereignty (López and Cerda, 2024) . In any case, efforts to launch SBSS systems and to reinforce terrestrial approaches to space asset surveillance are accelerating. In 2023, the United States Space Force launched the Silentbarker constellation. Unclassified documents state that they have the “capability to search, detect, and track objects from a space-based sensor for timely custody and event detection” (Force, 2019) . Other space-to-space observation, or even space-to-space direct action systems exist or are under development in other countries. The Russian Cosmos 2558 is known to have SBSS capabilities, while the EU and France are developing a system called YODA (Friedling and Veber, 2023) . China likewise has space junk removal satellites and has at the least conducted studies towards the construction of a SBSS constellation. Commercial SBSS systems are also springing into existence. MAXAR Worldview 3 satellites are equipped with cameras which allow them to photograph other satellites, with the explicit aim of allowing operators to assess, and hypothetically to repair from orbit, space-debris generated damage.

It would be hubristic to believe that much can be said regarding the significance of this new Archimedean viewpoint, or the long-term efforts to ‘care’ for space. Yet what the development of such systems does say a great deal about is the evolution of attitudes towards the power of satellites and the historicity of the orbital domain. Simply put, the effort being put into monitoring orbits shows that satellites are no longer out of this world.

Extraterritorial Post-Biopolitics

The third phase of satellitization initiates a post-global transformation in the logic of biopolitical sovereignty. To return to Arendt and the metaphor of the Archimedean lever, what emerges as a product of the new phase of satellitization are extraterrestrial spaces and places, I will call them dominiums as opposed to territories, over which sovereign power is exercised. Dominiums, or to use the language of Shaw, Purgason and Solleau of the US Space Force, extraterrestrial Areas of Operations (AOR), are novel because their spatial horizons are “not defined by geographic lines on a map,” as is the case in geography, which, as they note, is Greek for “drawn on Earth,” but rather by domains set by space surveillance capacity which are in effect “drawn on the stars” (2022: 38) . Dominia are not cosmic but rather local, and they remain connected at a second degree to the Earth. More to the point, it is not the stars as such which explain their features, but rather information dominance over the domain from where terrestrial information dominance is exercised. Dominia are not territorial. They remain, to a certain extent, commons. Power is exercised over them in the form of cultivated critical dependencies with respect to technologies on which other nations are critically dependent. Nevertheless, it seems

not wrong to say, with the French President Emmanuel Macron, that exercising dominance over space now constitutes the “sovereignty of sovereignties” (2022) . This statement ought to be glossed in such a way as to bring out its peculiar character. To exercise sovereignty over space is in a certain way to exercise sovereignty over no one and nothing, but ceding sovereign control over one’s space assets is tantamount to losing of control over one’s national territory.

This phrase expresses a rupture within the biopolitical logic of sovereignty. Within global accounts of sovereign power, at least as it was introduced by Foucault (2004b) , biopolitical sovereignty was explicitly linked to territorial security, and so to the land and the life that it supports. Yet within the new space domain there is no ‘*terre*’ , ‘there is also no biological life. Dominion over space is territorial, and by extension biopolitical only at a second degree. Nothing grows in orbital space, even if pollution does accumulate, and as it accumulates, it takes on a ‘life’ of its own. Yet at the same time, the space domain is not cut off from the logic of the life of the planet, and in particular the logic of capital and capitalization, and in this way, it plays a role within the metabolism of the planetary social order. Growing ‘life’ in space thus emerges as a kind of pharmakon capable of exercising saving power over planetary life, which from all other perspectives seems incapable of reconciling the twin demands of allowing capital to grow and continuing to allow biological life on the planet to flourish. Moreover, a new discourse is emerging whereby the growth of knowledge from space and about space can be said to give life to the planet by giving knowledge about life on the planet. As Mustapha Mefah explains in a recent book entitled *L’espace et le NewSpace au service du climat* , government support for private space efforts “is a win-win proposition” (2022: 7) . Satellite infrastructure can both fuel economic ‘growth’ and ameliorate our understanding of how life on the Earth system grows. Thus, dominion over the extraterritorial domain amounts to a kind of meta-biopolitics which can heal the diremption between the economy and the ecology, but to do this it must also assume the burden of accepting and monitoring abiotic space as a ‘living’ habitat and ‘territory.’

Orbital space, then, is to a certain extent coming to life. While an abstract awareness that extraterrestrial environments were environments and could be polluted is hardly new (Rand, 2019) , and the specific problem of Kessler syndrome was named and so already preoccupied in 1978, the perceived criticality of protecting this domain is only as recent as the Anthropocene-era rush to expand the economy out beyond the globe, which itself was deeply entangled with the acknowledgment that terrestrial life was fueled by space in existentially critical ways. Describing the dynamics at play with respect to the growth of SBSS infrastructure, historian Luca Thannei (2023) has pointed to a persistent gap between what he calls surveillance capacity—the ability to know what is in space and what it is doing there—and existing ways of calculating orbital capacity—in other words, ways of establishing safe limits to and for extraterrestrial growth. The SBSS technology addresses this gap while simultaneously contributing to the problem. Yet the very paradox of a solution to problems creating new problems is precisely critical to grasping the logic of this new post-biological form of biopolitics, in which it is ‘life’—namely confronting problems such as orbital pollution—which drives the ‘growth’ of the space economy (Saint-Martin, 2016) . Put otherwise, junking up space is precisely a means of bringing space to life, as it is likewise a means of stoking the need for new forms of surveillance domination and post-biopolitical governance over the orbital domain. As James Shaw, a leading strategist and Deputy Commander of the Space Force has explained, the primary task of that organization is to ensure “space sustainability” for all users (Staff Reporter, 2023) . This posture echoes the language and the sovereign logic of biopolitical power as exercised over the globe, but it also constitutes a fundamental rupture with each of its terms because it leaves behind both life and territory.

Thomas Kuhn, writing in 1965 of the paradigm shifts that constitute scientific revolutions, analogized the experience of encountering a new paradigm to being “transported to another planet where familiar objects are seen in a different light and are joined by unfamiliar ones as well” (2012: 111) . This metaphor is helpful for understanding the post-global paradigm shift that is taking place, this in two senses.

On the one hand, Kuhn’s idea of extraterrestrialization describes well the situation in which the analyst finds themselves with respect to these new forms of (post)biopolitics. Having arrived on an alien planet, the analyst confronts objects which have no names, or with respect to which existing names only fit with a significant degree of imprecision, and with respect to which other names, those derived from the old paradigm, seem actively misleading. Hardt and Negri (2000) , for example, employed the Deleuzian conceptual couple of deterritorialization and reterritorialization to describe the dialectical biopolitical logic of global sovereign power. Yet these terms evoke relationships of take-off and landing, ever returning to the Earth. For this reason, they seem to offer no option to express the kind of extraterritorial, albeit supplemental, domination which is emerging with the third wave of satellitization, in fact directing analytical attention away from these changes and back to the Earth. Such a redirection is partially necessary: the emergence of a new post-geopolitical struggle for the sovereignty of sovereignty only matters with respect to humans on the ground. Yet if we focus our analysis only at that level, we precisely risk misunderstanding the phenomenon.

It is regarding conceptual quandaries like this one that Kuhn’s comment is equally interesting. In 1965, the space race was in full swing. The anticipated future in space then correlated with the one that Kuhn himself imagined: landing on an alien planet. With respect to such landing, as is currently the case with the impending return to the moon, terms like deterritorialization and reterritorialization, even notions such as globalization, fit reasonably well. Yet what Kuhn did not anticipate, and in a way what our concepts make it hard for us to grasp, is that there are other forms of political order and power relationships that emerge within radically alien environments and with respect to novel technologies such as the satellites. When we rely on our anticipations—and our logics for categorizing the world, on our given notions of life, of territory, even of power—we may be blinding ourselves from grasping what is happening right there above our heads.

To return once again to Arendt, satellites are not heavenly bodies. They are also, and for this very reason, not out of time, out of history, and what we see here is that they are now, in the form of space junk, making clear their own historicity, their own difference from the unchanging and celestial.

Conclusion

One might think from the preceding that it is the satellite which has now stepped into the place of the sovereign. But it would be too simple to say that the planet is enslaved by satellites, just as it is far too naïve, as Deudney (2020) has shown, to suggest that we will be saved by space expansionism. This paper has addressed confusions regarding the temporality of New Space and the spatiality of the Anthropocene. The principle target has been the figure of the globe, which all to many—to quote Cosgrove—take to be “interchangeable” with the planet earth, with the two terms differing not in terms of spatiality or history, but only in “resonance” (2001: 7) . If the analyses above are correct, such ideas introduce analytic bias, and in so doing they lead to a misunderstanding of not only the spatial horizons in play in the politics that led up to the Anthropocene, but also prompt us to misunderstand the spatiality of the logics of power playing out in the present moment.

In this light, I want to close by proposing a slightly different way of representing the planet that is doubtless more appropriate for understanding the spatiality of the political, including the politics of life, in the Anthropocene. It resonates with a great deal of recent discussion on the place of outer space within the iconography of the Anthropocene. This has often focused on the 1972 *Blue Marble* photo, sometimes called the photo of the century, and highlighted as an iconic representation of planetary ecological consciousness (Poole, 2008; Heise, 2008) . Bénédicte Ramade, for example, has claimed that the extraterrestrial viewpoint is “the worst possible point of view [*s’il s’agit du pire point de vue qui soit*],” because it is “derealizing [*dérealisant*],” and this has “logically led the public to feel a lack of responsibility [*à se déresponsabiliser*]” for the plight of the planet (2022: 254) . The environmental historian Sebastian Grevs Mühl has suggested that the “visiotype of the Earth seen from space” “invites a radically simplifying interpretation of the world, a grotesque reduction of complexity” (2014: 210) . The philosopher Emile Hache, for her part, has speculated that it is perhaps because we habitually employ what she, referring to work done by Frédérique Aït-Touati (2011) , calls the “exterior point of view [*point de vue extérieur*],” that we “no longer have the right metaphors [*des bonnes métaphores*], and the right [*bon*] stories and right [*bon*] concepts” to respond to the Anthropocene (2014: 12) . Finally, Jason Moore has highlighted that this icon represents a persistence of the “Promethean gaze,” manifesting the continuing power of the unholy “trinity of science, capital and empire” and a manifestation of what he calls “oculocentric technics” (2023: 7) . All these criticisms continue to think the space of politics as the space of the globe, and they take the locations which are now being contested by space actors as standing outside of politics or our space of responsibility. That tendency is precisely a product of the *Blue Marble* photo, which shows, in the words of Lazier, “a terraqueous planet suspended in the void” (2011: 606) . But already in 1972, the idea that there was only planet and void was misleading. By then orbital space was cluttered with hundreds of Earth-observation satellites. There was already, around the orbital location at which the photo was taken, no void, but a globe and a nascent orbital domain. It was not an image of the outside, but an image from the outside that was already becoming part of the interior of the biopolitical order, just not in ways that—in 1972—were evident. The confusions which the critics attest to precisely speak to this.

Perhaps the following image would be more appropriate. Unlike *Blue Marble* , which was taken by an astronaut, it is a computer-generated visualization created by the ESA (2019) to show the mass of satellites and space junk around the planet:

Figure 1



ESA, 2019

One notes right away that what one sees is not a sphere or a globe. The satellites are concentrated over certain areas, this irregularity reflects global geographies of power and wealth, with the very density and complexity of this mass prompting us to attend to, and wonder about, the ways in which planetary existence and the exercise of power is already massively entangled with the orbital domain. In the image there is little void, and likewise no global overview. What we see is more than the terrestrial planet, but no ‘ultimate position,’ no ‘position of total control.’ The edges of the rotating mass are cropped on the left and bottom image planes, reminding the viewer of the persistent gap between surveillance capacity and orbital holding capacity. The orbiting of the satellites, as this is a video but not a still shot, conveys a kind of ambiguous vivacity, even as those objects—artificially illuminated and out of scale to draw our attention to them—remain mere machines in abiotic space. One reproach against this image is that it is out of date. In 2019 the total number of operating satellites was 9034, while the total number as of the end of 2022 was 14599—with almost three thousand more objects having been launched in 2023 (UNOOSA, 2023) . Simply put, we should see more junk, and less planet. Yet perhaps the most important fact about this image is that it is computer generated and made to be shown on a computer screen. It shows a situation that is real, but at the same time which we cannot even hope to see with our bare eyes, even if the light reflected off the satellites does mist the beauty of the nightscape, clouding the constellations from our eyes. Yet the fact that this image itself raises no natural viewpoint on the order of the world matters to the extent that it leaves many questions that need to be asked unreconciled. Where is sovereign power in this picture? In the satellites? In the information? In Gaia? On Computers? In Capital? In the people? In the White House? Out there in deeper space? I propose no answers, but I would suggest that obvious answers, such as returning to the sensual terrestrial viewpoint, are themselves likely dangerous simplifications.

But let us end with this. If satellitization, to orbit back to Arendt, has been an event “second in importance to no other,” that may at least in part be because we know that satellites and other technological objects are no heavenly bodies, and yet we also know that they have been capable of recreating the spatiality of the logic which rules our world.

Bibliography

AGAMBEN G., 2017, Homo Sacer Omnibus, Palos Altos, Stanford University Press.

AÏT-TOUATIF., 2011, Contes de la lune : Essai sur la fiction et la science modernes , Paris, Gallimard.

ARENDT H., 1998, The human condition, Chicago, University of Chicago Press.

BEZOS J., 2020, Invent and Wander, New York, Harvard Business Review.

BLANC G., 2020, L’invention du colonialisme vert : pour en finir avec le mythe de l’édén africain Paris, Flammarion.

BOARD S.S., 1982, A Strategy for Earth Science From Space, Report, Washington D.C., National Research Council.

BONNEUIL C. and FRESSOZ J.-B., 2013, L’Événement Anthropocène La Terre, l’histoire et nous , Paris, Seuil.

BOROWITZ M., 2017, Open space: the global effort for open access to environmental satellite data, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press.

BOWEN B., 2022, Original Sin: Power, Technology, and War in Outer Space, London, Hurst & Company.

BRUNDTLAND G.H., 1987, Our Common Future, Report, New York, United Nations.

BUTRICA A.J., 1997, Beyond the ionosphere: fifty years of satellite communication, Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration.

CAUTHEN K., 1971, Christian Biopolitics: A Credo & Strategy for the Future, New York, Abingdon.

CHAKRABARTY D., 2021, *The climate of history in a planetary age*, Chicago, The University of Chicago Press.

CHATEAURAYNAUD F. and DEBAZ J., 2019, *Intelligence Artificielle Et Technologies Spatiales - Une Enquête Exploratoire*, Report, Paris, GSPR/CNES.

CHEVRIER R., 2023, *Les saccageurs de l'espace*, Paris, Buchet Castel.

CLARK E., 1968, *Satellite Spying Cited by Johnson*, The New York Times, March 17.

CONWAY E.M., 2008, *Atmospheric science at NASA: a history*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.

COSGROVE D.E., 2001, *Apollo's eye: a cartographic genealogy of the earth in the western imagination*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.

CRAVEN M., 2019, 'Other Spaces': Constructing the Legal Architecture of a Cold War Commons and the Scientific-Technical Imaginary of Outer Space, *European Journal of International Law* 30(2), 547-572.

DAVIES J., 2016, *The birth of the Anthropocene*, Oakland, California, University of California Press.

DAWES L., 2018, *War in Space The Science and Technology Behind Our Next Theater of Conflict* Cham, Springer.

DEUDNEY D., 2020, *Dark skies: space expansionism, planetary geopolitics, and the ends of humanity*, New York, NY, Oxford University Press.

DICKINSON J., 2021, *Never a Day Without Space: Commander's Strategic Vision*. Washington D.C.: United States Space Force.

DICKSON P., 2019, *Sputnik: the shock of the century*. Lincoln: University of Nebraska Press.

DIENST N., 1959, *Sowjetrakete 100000 Kilometer jenseits des Mondes*, Die Welt, January 5, 1-3.

EDGINGTON R., 2012, An 'all-seeing flying eye': V-2 rockets and the promises of Earth photography, *History and Technology* 28(3), 363-371.

EDWARDS P.N., 2010, *A vast machine: computer models, climate data, and the politics of global warming*, Cambridge, Mass., MIT Press.

ESA, 2019, *Distribution of space debris around Earth*. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/2010/Distribution_of_space_debris_around_Earth.

EVANS C. and LUNDGREN L., 2023, *No Heavenly Bodies: A History of Satellite Communications Infrastructure*, Cambridge MA, MIT Press.

FORCE A., 2019, PE 1206425F / *Space Situation Awareness Systems*. In: Force A (ed). Washington D.C., 7.

FOSTER J.B., CLARK B. and YORK R., 2010, *The ecological rift: capitalism's war on the earth*, New York, Monthly Review Press.

FOUCAULT M., 1975, *Surveiller et punir*, Paris, Gallimard.

FOUCAULT M., 1976, *La volonté de savoir, L'usage des plaisirs et Le souci de soi*, Paris, Gallimard.

FOUCAULT M., 2004a, *La naissance de la biopolitique*, Paris, Seuil.

FOUCAULT M., 2004b, *Sécurité, Territoire, Population*, Paris, Seuil.

FRANK A., 2018, *Light of the stars: alien worlds and the fate of the Earth*, New York, W.W. Norton & Company.

FRIEDLING M. and VEBER M., 2023, *Commandant de l'espace*, Paris, Robert Laffont.

GAPOSCHKIN E., BRAUN C. and SHARMA J., 2000, Space-Based Space Surveillance with the Space-Based Visible, *Journal of Guidance Control and Dynamics - J GUID CONTROL DYNAM* 23, 148-152.

GEPPERT A.C.T. and TABAS B., 2023, *Planetizing History*. In: NYU Space Talks.

GOSELIN K., 2021, *A Beneficial and Striking Success: Diplomatic Spacepower and Communication Satellites in the Early Space Age (1958-1972)*, *Space Force Journal*(1).

GREVSMÜHL S., 2014, *La terre vue d'en haut*, Paris, Editions du Seuil.

GRINSPOON D., 2016, *Earth in human hands: shaping our planet's future*, New York, Grand Central.

HACHE E., 2014, *Introduction : Retour sur Terre*, In: Hache E (ed) *De l'univers clos au monde infini*. Paris: Dehors, pp. 11-25.

HARDT M. and NEGRI A., 2000, *Empire*, Cambridge, Mass., Harvard University Press.

HEISE U.K., 2008, *Sense of place and sense of planet: the environmental imagination of the global*, Oxford New York, Oxford University Press.

HESS G., 2023, *Conscience cosmique : Pour une écologie en première personne*, Paris, Dehors.

IHDE D., 1997, *Whole Earth Measurements*, *Philosophy & Technology* 2(2), 61-72.

JOHNSON L., 1963, *Proceedings and Debates of the 88th Congress*. Washington D.C.: United States Congress.

KLEIN J., 2023, *Fight for the Final Frontier: Irregular Warfare in Space*, Washington D.C., Naval Institute Press.

KOSELLECK R., 1979, *Vergangene Zukunft: zur Semantik geschichtliche Zeiten*, Frankfurt am Main, Suhrkamp.

KUHN T.S., 2012, *The structure of scientific revolutions*, Chicago The University of Chicago Press.

LACOSTE Y., 1985, *La géographie, ça sert, d'abord, à faire la guerre*, Paris, Editions La Découverte.

LAIA K., 2021, *The cold war, the space race, and the law of outer space: space for peace*. Routledge studies in modern history. Milton Park, Abingdon, Oxon; New York, NY: Routledge., 1 online resource.

LAUNIUS R. and JENKINS D., 2014, *To Reach the High Frontier: A History of U.S. Launch Vehicles*, Lexington, University Press of Kentucky.

LAZIER B., 2011, *Earthrise; or, The Globalization of the World Picture*, *The American Historical Review* 116, 602-630.

LEMENAGER S., 2014, *Living oil: petroleum culture in the American century*, New York, NY, Oxford University Press.

LEMKE T., 2016, *Biopolitik zur Einführung*, Berlin, Junius.

LESHNER R. and HOGAN T., 2019, *The View from Space: NASA's Evolving Struggle to Understand Our Home Planet*, Lawrence, University Press of Kansas.

LÓPEZ L. and CERDA V., 2024, *Space security in the Americas can no longer go overlooked*, *Space News*, January 5.

LORENZ R., 2019, *Exploring planetary climate: a history of scientific discovery on Earth, Mars, Venus, and Titan*, Cambridge; New York, NY, Cambridge University Press.

MACRON E., 2022, *Stratégie spatiale européenne : le discours du Président Emmanuel Macron depuis Toulouse*.

MARGULIS L., 1998, *Symbiotic planet: a new look at evolution*, New York, Basic Books.

MCNEILL J.R. and ENGELKE P., 2014, *The great acceleration: an environmental history of the anthropocene since 1945*, Cambridge, Belknap

MEFTAH M., 2022, *L'espace et le NewSpace au service du climat : Une opportunité pour relever les défis du changement climatique* Kindle edition, Books on Demand GmbH.

MEFTAH M., CLAVIER C., SARKISSIAN A., et al., 2023, *Uvsq-Sat NG, a New CubeSat Pathfinder for Monitoring Earth Outgoing Energy and Greenhouse Gases*, *Remote Sensing* 15(19), 4876.

MÉSZÁROS I., 2018, *Beyond Capital: Toward a Theory of Transition*, New York, Monthly Review Press.

MIGNOLO W., 2011, *The Darker Side of Western Modernity: Global Futures, Decolonial Opotions*, London, Duke University Press.

MILLARD D., 2017, *Satellite: Innovation in Orbit* London, Reaktion.

MITCHELL T., 2013, *Carbon Democracy: Political Power in the Age of Oil*, New York, Verso.

MOLTZ C., 2014, *Crowded Orbits: Conflict and Cooperation in Space*, New York, Columbia University Press.

MOORE J., 2023, *Between the Devil & the Deep Blue Marble: Capitalism, Nature and the Promethean Gaze, from Mercator to the Space Age*, In: Schönegg K and Levin B (eds) *Image Ecology*. Leipzig: Spector.

MÜNKLER H., 2023, *Welt in Aufruhr: Die Ordnung der Mächte im 21. Jahrhundert*, Berlin, Rowolt.

ORGANIZATION I.S.R., 2015, *From Fishing Hamlet to Red Planet: India's Space Journey*, HarperCollins.

- OSTERHAMMEL J., 2011, *Die Verwandlung der Welt: eine Geschichte des 19. Jahrhunderts*, Beck.
- PARKS L., 2005, *Cultures in orbit: satellites and the televisual*, Durham, Duke University Press.
- PARKS L. and SCHWOCH J., 2012, *Down to earth: satellite technologies, industries, and cultures*, New Brunswick, N.J., Rutgers University Press.
- PASCO X., 2017, *Le nouvel âge spatial – De la guerre froide au New Space*, Paris, CNRS Editions.
- POOLE R., 2008, *Earthrise: how man first saw the Earth*, New Haven Conn., Yale University Press.
- RAMADE B., 2022, *Vers un art anthropocène*, Paris, Les presses du réel.
- RAND L.R., 2019, *Wasted Space: The History of Orbiting Junk*. In: *Science History Institute*, .
- RAYMOND J.W., 2020, *Space Capstone Publication: Spacepower Report*, Washington D.C., United States Space Force.
- RIDE S., 1987, *Leadership and America's Future in Space*, Report, Washington D.C., NASA.
- SAINT-MARTIN A., 2016, *Du big sky à l'espace pollué : l'effet boomerang des débris spatiaux*, *Mouvements* 87(3), 36-47.
- SHELLING T., 2020, *Arms and Influence*, New Haven, Yale University Press.
- SCHMITT C., 2008, *Land und Meer: eine weltgeschichtliche Betrachtung*, Stuttgart, Klett-Cotta.
- SEGUIN E., 2019, *Hannah Arendt's Political Theory of Science. From Cosmos to Power*. In: Sari Y (ed) *The Bloomsbury Companion to Hannah Arendt*. London: Bloomsbury.
- SHARMA J.J., STOKES G.H., BRAUN C.V., et al., 2002, *Toward Operational Space-Based Space Surveillance*, *Lincoln Laboratory Journal* 13(2), 309-332.
- SHAW J., PURGASON J. and SOILEAU A., 2022, *Sailing the Wine-Dark Sea: Space as a Military Area of Responsibility*, *Aether: A Journal of Strategic Airpower & Spacepower* 1(1), 35-45.
- SHIVA V., 2016, *Soil, Not Oil: Climate Change, Peak Oil and Food Insecurity*, New York, Bloomsbury.
- SINGH G., 2017, *The Indian Space Programme: India's incredible journey from the Third World towards the First*, London, Astrotalkuk Publications.
- SLOTTEN H., 2002, *Satellite Communications, Globalization, and the Cold War*, *Technology and Culture* 43, 315-350.
- SPARAVIGNA A.C., 2016, *The Word Satellite, Its Origin From Etruscan And Its Translation Into Greek*, Philica 2016.
- STAFF REPORTER U.S.S.C.P.A., 2023, *USSPACECOM deputy commander: how security ensures sustainability*, Report, June 17.
- STEFFEN W., RICHARDSON K., ROCKSTRÖM J., et al., 2020, *The emergence and evolution of Earth System Science*, *Nature Reviews Earth & Environment* 1(1), 54-63.
- STURDEVANT R.W., 2008, *From satellite tracking to space situational awareness: the USAF and space surveillance, 1957-2007*, *Air Power History* 55, 4+.
- THANE I., 2023, *When Surveillance Fails. A Historical Perspective on Near-Earth Space's Orbital Carrying Capacity*.
- TRUMP D., 2020, *Executive Order Encouraging International Support for the Recovery and Use of Space Resources*. In: *States OotPotU* (ed), Washington D.C.
- UNOOSA, 2023, *Cumulative number of objects launched into outer space – UNOOSA*. United Nations Office for Outer Space Affairs.
- VRILIO P., 1999, *Télé-surveillance globale*, *Monde diplomatique*.
- VRILIO P., 2023, *La fin du monde est un concept sans avenir : Œuvres (1957-2010)*, Paris, Seuil.
- VOGL J., 2015, *Der Souveränitätseffekt Berlin*, *Diaphanes*.
- WRIGHT J., 2019, *Deep Space Warfare: Military Strategy Beyond Orbit*, New York, McFarland.
- YAP X.-S. and TRUFFER B., 2022, *Contouring 'earth-space sustainability'*, *Environmental Innovation and Societal Transitions* 44, 185-193.
- ZUBOFF S., 2020, *The age of surveillance capitalism: the fight for a human future at the new frontier of power*, New York, PublicAffairs.

Notes

- 1 On this see (Lai, 2021; Craven, 2019). The question of whether orbital space is a global common is a vexed one, and has currently been much debated since Trump announced that the United States does not view space "as a global commons" (Trump, 2020). This challenged the previous consensus, as established by the OST. There has been much ink spilled on this point by juridical theorists as well as by others worrying that the current, and largely uncontrolled, acceleration of space activities is driving us towards a tragedy of the extraterrestrial commons. These debates are peripheral—if profoundly interesting—to my argument. No specific territorial claims have yet been made over zones of space, even if the establishment of space-to-space surveillance over specific astrophysical operational domains is a step in this direction, and the frequency with which U.S. Space Force generals refer to orbital space as the "coast" seem also to be steps in this direction. Nevertheless, there are significant legal issues which might be raised by taking this literally. Territorializing orbital space would risk generating conflicts relative to existing usages of orbital space which depend on the right to legally observe the globe from afar without this being a territorial violation. Thus sovereign power here operates in a kind of "gray zone" (Klein, 2023: 69), such that there is dominion over the common, but this is not exactly territorial, and so not exactly colonial, while having most of the effects of both.
- 2 It is interesting to note that work on biopolitics from the late 1990's and early 2000's, most notably Hardt and Negri's *Empire*, has no discussion of satellites, seeming to align power over the globe only with the power of capital and markets. Yet it is certainly more coherent from a spatial point of view to understand that even the spread of market capitalism depended on specific technologies. One of the benefits of focusing on satellites and space is thus that it offers a more coherent picture of the Space Age logic of colonialism, since it allows one to at once acknowledge that the biopolitics as well as the market politics of the period after Sputnik were in a certain way colonial—as has been pointed out, for example, by Mignolo (2011)—while not falling into confusions stemming from the differences between the colonialism of the old territorial type and the new forms generated by extraterrestrial infrastructure.
- 3 It is true that subsequent technologies such as undersea fiber optic cables later performed these functions, in part because of the increased latency of the early satellites, which were largely located in GEO. That said, the issue with cables is that it is far more difficult to achieve global coverage, which is precisely why Musk, Bezos, and other new space investors are so focused on launching mega-constellations of communications satellites in LEO, a position that for reasons of space sustainability has significant drawbacks, but which does offer lower latency and, thanks to increasingly well-networked constellations, increased terrestrial coverage.
- 4 I leave aside the categories associated with space-based weapons and newer satellites associated with space junk. The first because they are officially banned by the OST so their existence remains at best speculative, and the latter because their interest only becomes evident within the third phase of satellitization.
- 5 It is interesting to note that the analytic standpoint assumed by Hardt and Negri, no doubt in part because it only thinks of reality in global terms, assumes that the growth of the market and the growth of biopower which accompanies it are "unlimited." See, for example, (Hardt and Negri, 2000: 135, 225, 299).
- 6 In this sense, space technologies played a significant role in the discovery of climate change, moving the idea of global warming from a hypothesis first proposed by Svante Arrhenius to a well-documented and modeled phenomenon.
- 7 The relative (lack of) success of these efforts has been noted by several critics, perhaps most notably by Shiva (2016).

Abstracts

The essay explores the emergence of a new paradigm in biopolitical power which is proper to the Anthropocene. Characteristic of this new form of biopower is that it neither exercises direct control over life nor over territory, but rather derives power from knowledge relevant to sustaining the 'life' of satellites in abiotic extraterrestrial dominions. By tracking the historical process of satellitization, in other words, the different forms of dependency of terrestrial political power on satellites since Sputnik, this article shows that these lifeless orbiting machines are deeply entangled with how capital has formed our unsustainable lives on this planet. But it also shows that saving orbital space can contribute to saving life on earth, even if such salvation implies a degree of complicity with the existing order of power. The primary objective of the paper is to show that this amounts to a paradigm shift within the spatiality of biopolitical analysis, and a broadening of the horizons of ecocritical concern. What it means is that we can no longer think about environmental politics in global terms, nor think about the planet as merely the inverse of the globe. In the Anthropocene, planet is a planet in a space that is not void but politicized, increasingly animated with inanimate bodies nevertheless connected to our terrestrial lives. To attend to the contemporary struggle for sovereignty over this politicized space, to bring the struggle for the sovereignty of sovereignties into Anthropocene imaginary, this paper proposes a new figure for imagining the planet. Rather than the *Blue Marble*, or *Das Große Gehege*, it offers up the earth ringed round with commercial and military constellations and space junk. Not because that is beautiful, but rather because that is where we are.

Cet essai soutient que nous sommes maintenant à un moment cosmopolitique : à savoir un moment où le développement futur de l'espace orbital et l'avenir de la surveillance de la Terre depuis l'orbite se situent à un point d'inflexion, où l'inaction pourrait se terminer en tragédie, et l'engagement cosmopolitique collectif pourrait accomplir une victoire historique pour la liberté et la démocratie. Cependant, le succès n'est en aucun cas donné d'avance. Pour saisir ce moment, nous devons repenser notre propre histoire, abandonner les idées sur le sens de l'ère spatiale sous-tendant les récits de la globalisation. Cet article tente donc de repenser la signification historique et politique de l'ère spatiale avec un accent particulier sur le lien entre les satellites dans l'espace orbital et l'aube de l'Anthropocène. Elle montre que la réflexion sur la relation entre la planète et l'occupation de l'espace orbital ne s'oppose en rien aux efforts visant à assurer l'habitabilité durable de notre planète. La conclusion qui émerge de ces observations est l'affirmation selon laquelle, dans l'Anthropocène, les horizons de l'histoire politique mondiale sont désormais orbitaux, et non globaux. De même, l'article suggère qu'une grande partie de la prétendue désorientation politique de notre époque, des prétentions qui justifient attaques contre la validité de la pensée historique moderne, découlent d'une imaginaire historique qui ne sépare pas la planète du globe, un refus de l'histoire qui n'est pas seulement paralysante politiquement, mais qui risque, en encourageant les tentatives idéologiquement motivées de limiter le champ politique de l'écologie à la surface et à l'atmosphère de la Terre, de rendre notre avenir sur la planète encore plus catastrophique.

Index
Mots-clés: satellites, biopolitique, souveraineté, l'environnement globale, anthropocène, astropolitique
Keywords: satellites, biopolitics, sovereignty, globalization, anthropocene, astropolitics
Author

Brad Tabas

Maître de conférences en sciences de l'éducation, laboratoire Foap (EA 7529), ENSTA Bretagne
Brad.tabas@ensta-bretagne.fr

Observation de la Terre et du Soleil depuis l'espace : vers un changement de paradigme

Earth and Sun space observations: Towards a new paradigm

Philippe Keckhut, Mustapha Meftah et Laurence Croizé

Introduction

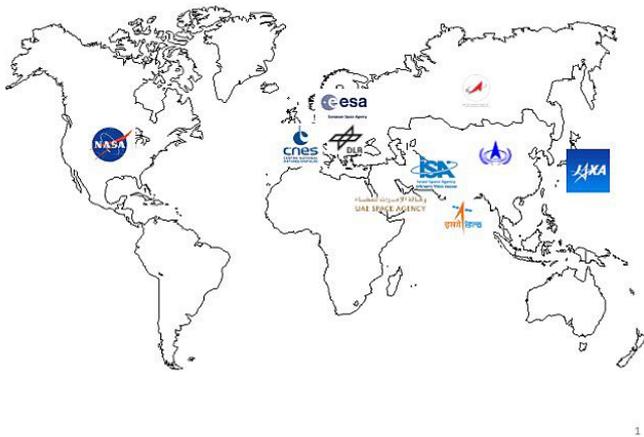
Longtemps, en permettant une couverture globale, l'espace a ouvert des opportunités déterminantes pour l'observation de la Terre. Aujourd'hui, les enjeux soulevés par la question du changement climatique renforcent le besoin d'une observation toujours plus précise, afin de comprendre les processus physico-chimiques mis en jeu et leurs possibles évolutions sous l'effet des activités anthropiques. Ouvrant de nouvelles opportunités pour étudier et surveiller notre planète, de nouveaux types de plateformes émergent depuis la fin des années 1990, à l'instar des *cubesats* ou des dirigeables stationnaires (en anglais HAPS : High-Altitude Platform Station). Parallèlement, le secteur spatial est en pleine mutation, ce qui se traduit par une implication grandissante des acteurs industriels et commerciaux, en complément des principales agences gouvernementales traditionnelles (Figure 1), mais également par des pratiques différentes. Cette évolution n'est pas sans conséquence sur la recherche scientifique faisant émerger de nouvelles opportunités.

Si le développement du secteur spatial a toujours oscillé entre compétition et collaboration, il est aujourd'hui au centre des préoccupations géopolitiques, qu'elles soient d'origine commerciales ou militaires. C'est dans cette perspective qu'avait été créé le *Committee on Space Research* (COSPAR), en 1958, afin de maintenir une collaboration pacifique entre les États ; le COSPAR poursuit toujours aujourd'hui cette mission (Coustenis, et al., 2019). Par ailleurs, le changement climatique conduit les pouvoirs politiques à prendre des mesures destinées à répondre aux enjeux environnementaux, en particulier par la définition d'un cadre légal approprié mais également un besoin grandissant d'observations pour comprendre et réguler les activités polluantes.

Dans ce contexte, comment la recherche scientifique peut-elle profiter de ces diverses évolutions pour améliorer l'observation de la Terre et mieux documenter les défis liés aux changements de notre environnement, lesquels nécessitent toujours plus d'observations et, corrélativement, le développement de nouveaux outils techniques et scientifiques ?

Dans cette publication nous détaillerons les enjeux scientifiques associés à l'observation de la Terre, les solutions depuis l'espace réalistes qui sont à notre disposition, et la manière d'appréhender les différentes échelles de temps. Nous montrerons que les nouvelles plateformes émergentes peuvent apporter une aide précieuse pour mieux comprendre les processus physico-chimiques de petites échelles et mesurer l'impact de l'application – plus ou moins effective – des dispositifs réglementaires actuels et futurs.

Figure 1. Localisation des principales agences spatiales en rapport avec le budget dédié aux opérations spatiales



Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:Astronautique>.

Stratégie d'observation de la Terre depuis l'espace

Pour observer la Terre, il convient de distinguer deux types d'orbite. L'orbite « géostationnaire », comme son nom l'indique, permet au satellite de tourner autour de la Terre à la vitesse de rotation de la Terre et ainsi être placé toujours au-dessus de la même région. D'une part, cette position est stratégique à plusieurs titres, notamment pour des applications quotidiennes. Elle permet d'assurer la communication au-dessus d'un territoire donné avec des antennes simples et fixes en permanence pointées vers le satellite, dispositif idéal pour la diffusion radio-télévisée, la téléphonie et le positionnement. D'autre part, cette position éloignée mais fixe permet de produire des images fort utiles de la Terre et notamment centrées au-dessus des territoires sous le satellite. Nous connaissons tous ces images montrant le déplacement des nuages (très utile pour l'étude météorologique) et aussi pour la surveillance du territoire. Ce type d'orbite est donc très adapté aux applications centrées sur les besoins d'un pays ou d'une région et donc partie intégrante de l'infrastructure d'un pays et de sa politique de développement. D'un point de vue scientifique, elle présente en revanche quelques limites. La limitation principale de cette orbite est qu'elle se situe à 36 000 km de la surface de la Terre. Beaucoup d'informations provenant de la Terre et de son environnement sont transmises à distance par les ondes électromagnétiques (rayons X, lumineux et ondes radioélectriques) dont l'intensité varie selon le carré de la distance. Cette orbite, si elle permet un poste d'observation stable au-dessus d'un point de la Terre, n'est pas adaptée à une mesure précise. En outre, la recherche scientifique concernant la Terre comme un ensemble cohérent en interaction permanent avec des fluides et gaz en mouvement nécessite souvent une observation globale.

L'autre type d'orbite utilisée est appelé « basse orbite » et se situe typiquement entre 400 et 1200 km. Depuis cette altitude, il est évident que l'observation fine de notre atmosphère et de sa surface s'en trouve facilitée avec des signaux environ 1000 fois plus intense. Les plateformes positionnées sur cette orbite présentent la particularité de tourner autour de la Terre, permettant de voir défiler tout le globe, en particulier si le satellite passe par les pôles. Dans ce cas précis, il s'agit d'une orbite dite « héliosynchrone ». C'est souvent cette configuration qui est choisie pour les satellites scientifiques d'observation de la Terre, sauf si des observations spécifiques autour des pôles ou de la bande tropicale sont prioritaires. Dans ce cas, l'observation est donc globale. Le satellite fait 12 à 14 fois le tour de la Terre par jour et peut donc produire une carte journalière par interpolation des mesures d'une orbite à l'autre réalisées dans la même journée. Si l'on souhaite une mesure spatialement résolue, c'est-à-dire avec une empreinte au sol réduite et pas extrapolée spatialement entre deux orbites successives et décalées, alors plusieurs jours sont nécessaires avant de repasser au-dessus d'un même point. Pour résoudre ce problème, certains satellites sophistiqués sont pourvus d'un dispositif de balayage permettant de superposer les observations d'une orbite à l'autre (Clerbaux et al., 2009). La nécessité d'observation scientifique rejoint aujourd'hui les besoins commerciaux et sécuritaires qui investissent de plus en plus ces orbites basses avec des constellations de plusieurs centaines de satellites afin de couvrir un marché et des besoins globaux.

Les observations pour la recherche atmosphérique

Afin de représenter notre atmosphère, les scientifiques utilisent des modèles numériques permettant de résoudre les équations gouvernant le déplacement des masses d'air, les réactions physico-chimiques, et les interactions du rayonnement avec les différentes couches de l'atmosphère et la surface de la planète. L'atmosphère est ainsi divisée en une multitude de petites boîtes ayant des caractéristiques moyennes qui interagissent entre elles à une fréquence temporelle donnée, par le biais des lois atmosphériques mentionnées (Jacobson, 2005). La taille de ces boîtes donne les limites des résolutions spatiales de ces modèles dit eulériens. Les modèles de climat ont typiquement des résolutions entre 100 et 1000 km. Ces résolutions sont limitées par la puissance de calcul des ordinateurs mais s'améliorent en permanence. Certains des processus de petites échelles dits « sous mailles » (microphysique des nuages, échange avec la biosphère, ondes de petites échelles) ne sont pas représentés explicitement, mais leur effet moyen est simulé car ils peuvent parfois avoir une contribution importante (Stensrud, 2007).

Pour obtenir des observations, afin de valider les modèles, des réseaux d'observation ont été développés, sous la forme de stations si possible réparties régulièrement sur le globe (Bösenberg et al., 2002 ; Seidel et al., 2009 ; Staehelin et al., 2018 ; Calbet et al., 2022). Les observations peuvent être utilisées afin de corriger ou forcer la trajectoire du modèle via des processus connus sous le nom d'assimilation de données (Kalnay, 2002 ; Ash et al., 2016). Les informations en fonction de l'altitude sont fournies pour la météorologie ou la surveillance de l'ozone stratosphérique par des sondages météorologiques réguliers par ballon couvrant un domaine allant du sol jusqu'à 20-30 km d'altitude. Des campagnes d'inter-comparaisons sont organisées régulièrement afin d'assurer une cohérence spatiale (Keckhut et al., 2004 ; Nash et al., 2006). En revanche, les évolutions instrumentales réalisées sur les sondes induisent parfois des ruptures dans les séries, rendant la connaissance de l'évolution décennale parfois incertaine (Gaffen, 1994). Pour compléter ces sondages verticaux, dans les années 1970-80, il avait été imaginé de réaliser des vols de ballons de longue-durée afin de compléter le maillage (Lally et Lichfield, 1969). Cependant l'émergence d'observations globales depuis l'espace (Vaughan et Dale, 1994) a rendu cette option obsolète. En effet, l'intérêt des mesures depuis l'espace permet d'observer l'ensemble du globe avec un même instrument alors que les sondages *in situ* par ballon nécessitent un nouveau capteur à chaque observation. Cette caractéristique est bien adaptée pour les questions climatiques, bien que la durée de vie dans l'espace des instruments soit limitée dans le temps du fait de l'hostilité du milieu dans lequel évoluent les satellites (changement de température, vide, rayonnement intense et vieillissement prématuré). Pour le domaine de l'atmosphère au-dessus du plafond permis par les ballons, des fusées sondes ont été utilisées principalement par les États-Unis et l'Union Soviétique des années 1960 aux années 1990. Ces données, bien que très utiles pour décrire cette région, présentent les mêmes difficultés et des coûts d'opération importants (Schmidlin, 1981).

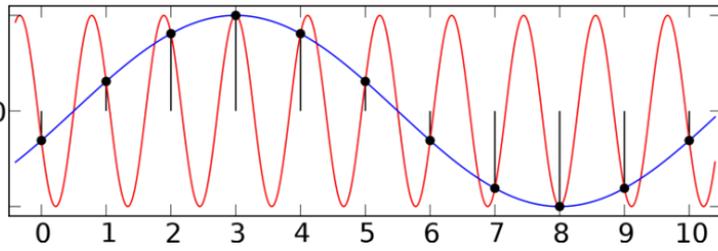
Les couches atmosphériques supérieures, qui composent l'ionosphère (>100 km), sont également stratégiques car c'est dans ces couches qu'évoluent les satellites. Cette région, principalement pilotée par les fluctuations du champ magnétique et électrique de la Terre, est fortement influencée par l'activité solaire et les éjections de particules associées, et dans une moindre mesure par les couches atmosphériques plus basses. Ces fluctuations sont surveillées afin de protéger les satellites, et éventuellement les équipements électroniques sur Terre, et sont connues sous le vocable de météorologie de l'espace (*Space Weather*). Le soleil dans son ensemble doit donc être étudié et surveillé car la vie sur Terre et notre économie aujourd'hui en dépendent de manière importante. Très stable, le soleil a toutefois connu des périodes anormales qui ont déclenché des hivers rigoureux (Miyahara et al., 2010). Il présente une activité cyclique, notamment pour son rayonnement ultra-violet (UV) qui ne peut être observé que hors de l'atmosphère (Meftah et al., 2014).

Échantillonnage et variabilité atmosphérique

Les phénomènes extrêmes ou violents comme les cyclones, les éruptions volcaniques ou les tempêtes se développent sur des temporalités variables, allant de quelques heures à quelques jours ; ces phénomènes nécessitent une observation marquée par une répétabilité plus soutenue que la journée afin de suivre leur développement et anticiper leur impact. Le constat d'une telle nécessité est identique pour suivre des problèmes de pollution de nature anthropique (marée noire, émissions polluantes dans l'eau ou l'atmosphère).

De plus l'atmosphère connaît des cycles rapides notamment associés au cycle diurne. Du fait de la rotation du soleil, les processus atmosphériques varient en fonction de l'heure car pilotés par la lumière solaire (effet thermique, dissociation photochimique). Cette variation cyclique peut être constatée pour l'humidité, la température, la couverture nuageuse et les systèmes dépressifs (Chadalavada et al., 2022), la pollution, ou l'ozone à plus haute altitude (Kechkut et al., 2021) et de nombreuses autres variables. Si l'on observe une variable à une fréquence donnée et qu'il existe des variations de fortes amplitudes à des périodes plus petites que la fréquence d'échantillonnage, alors il apparaît un signal avec une fréquence apparente plus importante. Cet effet est connu sous le nom de théorème de Shannon, et est illustré par la figure 2. Ce schéma montre que si les observations sont réalisées à une périodicité plus grande que la demi-période des fluctuations naturelles, alors des signaux de plus grandes périodes apparaissent avec une mauvaise période sans que l'on puisse les séparer des fluctuations réelles à cette même période (Shannon, 1986). On parle de signaux « fantômes ».

Figure 2. Simulation illustrant le théorème de Shannon

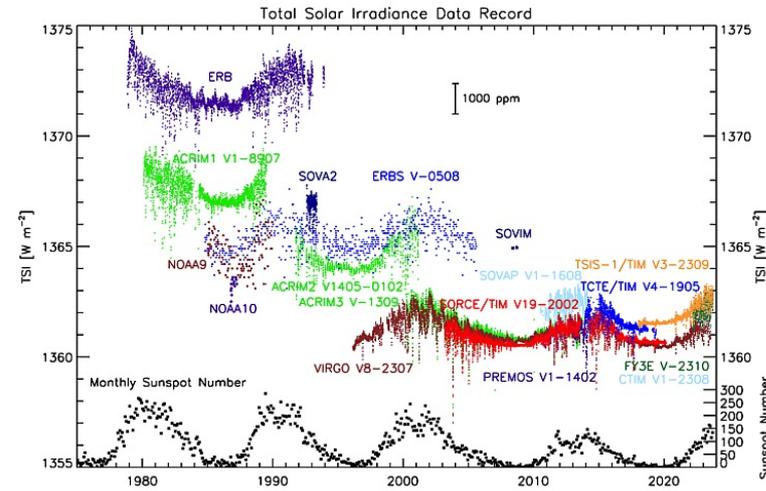


Une observable ayant un cycle journalier par exemple (courbe rouge) si elle est observée avec une période plus grande (point noir) fera apparaître une fluctuation fantôme (artificielle) de même amplitude que le cycle annuel mais avec une période plus longue (courbe bleue), dans cet exemple avec une période de 10 jours

Source : réalisation des auteurs, illustration réalisée à partir du théorème de Shannon, 1986.

Les satellites d'observation se perfectionnent toujours plus et un soin particulier est apporté aux instruments embarqués afin de garantir leur fonctionnement dans l'espace et permettre une mesure absolue. Malgré les efforts importants déployés pour atteindre ces objectifs de qualité, la surveillance n'est souvent possible qu'avec des instruments au sol, indispensables pour faire le lien entre les instruments qui se succèdent dans l'espace. L'observation des faibles variations à détecter par rapport à la variabilité naturelle reste souvent un défi difficile à relever. La continuité est souvent difficile à obtenir avec des instruments en évolution, utilisant des techniques différentes, et avec parfois des performances en amélioration constante. Ceci est un défi considérable lorsque que l'on s'intéresse aux changements climatiques ou à notre environnement. C'est ce type d'exercices qui fait l'objet de rapports scientifiques internationaux, comme ceux réalisés pour l'ozone (World Meteorological Organization, 2022) ou la mise en évidence des changements climatiques (Masson-Delmotte et al., 2021). Un autre exemple concerne l'éclairement solaire total qui est mesuré depuis la fin des années 1970 (figure 3). Plusieurs instruments spatiaux dont *Total Irradiance Monitor* (TIM) ou *Solar Variability Picard* (SOVAP) (Meftah et al., 2014) ont permis de suivre cette variable climatique essentielle depuis l'espace. Cette mesure doit se réaliser depuis l'espace, car une partie du spectre est absorbée par l'atmosphère. Ces observations sont des données essentielles pour l'évolution de la planète, mais de nombreux autres domaines font face à des difficultés de raccordement entre les observations similaires.

Figure 3. Observation d'Irradiance Solaire Totale (en anglais TSI) par des capteurs de haute technologie embarqués sur des plateformes successivement mises en orbite depuis 1978



Le cycle de 11 ans et les fluctuations plus rapides sont bien reproduites d'un capteur à l'autre mais les différences de mesures moyennes sont imputables à la calibration des différents instruments illustrant la difficulté de fournir des séries d'observation cohérente.

Source : d'après Kopp 2018.

Les satellites ont une durée de vie limitée dans l'espace. Au début de l'ère spatiale, les instruments étaient des prototypes de conception différente rendant la continuité de l'observation difficile. Pour répondre à cette problématique de surveillance, notamment pour les problématiques climatiques, l'European Space Agency (ESA) a identifié des instruments standards appelés « sentinelles » (Sanguy, 2014). Il s'agit d'instruments basés sur des technologies ayant fait leur preuve et permettant la mesure d'une variable dite essentielle (pour le climat). Les agences spatiales travaillent ensemble et s'assure qu'un instrument du même type est en permanence en orbite pour assurer la continuité. Si un grand champ de vue est utilisé alors les traces au sol se chevauchent pour deux orbites successives, et en une journée l'ensemble du globe sera couvert mais avec une résolution horizontale de plusieurs milliers de kilomètres correspondant à la distance entre deux orbites. Si le champ de vue est réduit, lors d'une journée un grand espace entre deux orbites ne sera pas sondé et il faudra attendre plusieurs jours pour repasser au-dessus d'un même point. Dans les deux cas, cette approche ne permet pas de garder une résolution horizontale fine. Dans la plupart des cas, si la mise en orbite d'un instrument similaire sur des plateformes successives permet d'assurer une certaine continuité de mesure, l'échantillonnage reste souvent insuffisant pour accéder aux résolutions spatio-temporelles correspondantes aux échelles des processus sous maille, et n'évite pas les interférences avec les cycles diurnes. Une façon de contourner ce problème, qui a largement été mobilisée par la météorologie, consiste à utiliser des modèles qui assimilent les observations et peuvent ainsi digérer des observations hétérogènes obtenues à des fréquences diverses. Cependant cette méthode reste insatisfaisante car elle ne fournit pas d'observations directes et dépend de la qualité du modèle numérique utilisé. Il apparaît en conséquence nécessaire de produire des observations plus fréquentes au-dessus d'un même point à la surface. C'est dans ce cadre que la constellation de satellite est apparue comme une solution. Comme présenté dans l'introduction, cette option a été choisie pour des besoins de télécommunications et, dans certains cas, par la météorologie, à l'instar de l'instrument interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge (IASI) (Clerbaux et al., 2009) qui est prévu avec six instruments envoyés successivement, permettant d'avoir plusieurs instruments en orbite simultanément. Mais la multiplication des plateformes augmente les coûts de manière importante, ce qui – bien souvent – n'est pas compatible avec les budgets de la recherche.

Il n'est pas possible d'avoir une observation au-dessus d'un même point à une distance proche de la Terre pour réaliser des observations bien résolues. Il n'est pas possible de maintenir des plateformes sur des orbites inférieures à une altitude de 350-400 km sans les motoriser pour compenser leur chute. En revanche, aujourd'hui émergent des solutions à partir de ballons ou d'avions légers autonomes pouvant stationner dans la stratosphère (10-50 km) au-dessus d'une région. Dans la stratosphère, les avions sont portés par le vent et peuvent être maintenus en altitude pendant plusieurs semaines, faisant plusieurs tours de la Terre. Pour rester au-dessus d'une même région, il est donc nécessaire de compenser la poussée du vent. En basse stratosphère, les vents sont de plusieurs dizaines de m/s. Il est donc nécessaire de minimiser leur extension verticale et utiliser l'énergie solaire pour compenser le vent d'où l'idée d'utiliser des ballons allongés type dirigeable ou des avions avec de grandes ailes type planneur. Une optimisation permanente est possible en se déplaçant à la verticale pour trouver les vents minimums ou contraires à différentes altitudes afin de rester au-dessus d'une même région.

Qu'il s'agisse d'utiliser des petites plateformes en grand nombre ou de les embarquer sous ballon ou drone avec un poids minimal, cette perspective nécessite de miniaturiser les capteurs et leur environnement. Ces deux approches nouvelles et complémentaires répondent aux nouveaux besoins car, d'une part, les ballons stationnaires en pouvant redescendre permettent un ré-étalonnage des instruments au sol et, d'autre part, les constellations en multipliant les observations permettent avec une approche d'intelligence artificielle d'accéder simultanément à la variabilité et aux défauts ou recalages des instruments entre eux.

Intérêt des cubesats

L'approche habituellement utilisée par la communauté scientifique, disposant jusque-là d'un seul prototype, nécessitait d'obtenir une mesure irréprochable et l'accès à une mesure absolue. En effet, l'instrument devait fournir la même qualité tout au long de ses orbites autour de la Terre, mais également fournir une mesure ne nécessitant pas d'étalonnage ou bien un étalonnage en vol intégré à la plateforme, du fait qu'il était impossible d'accéder physiquement à l'instrument. Obtenir une mesure dite « absolue » relève de la métrologie et est toujours un défi considérable car il est nécessaire que soit l'environnement de s'assurer que la mesure soit corrigée de tous les défauts et compense toutes les perturbations rencontrées. Cet objectif conduit à des instruments complexes, lourds, demandant un temps de développement long et donc coûteux. De ce fait, cette approche n'était pas favorable à la prise de risque. Des technologies ayant fait leur preuve sont, dans ce contexte, préférées à de nouvelles technologies non validées dans un environnement spatial. Ces instruments ont permis des observations globales mais comme indiqué dans le paragraphe 3, ils présentent des limites concernant l'échantillonnage en étant biaisés par les fluctuations de plus courtes périodes qui se trouvent sous-échantillonnées et sont parfois malgré tout sujettes à des dégradations dans le temps et des dérives des mesures. Souvent des observations, dites annexes, obtenues depuis le sol depuis des sites stratégiques sont associées à l'instrument dans l'espace pour s'assurer de son bon étalonnage.

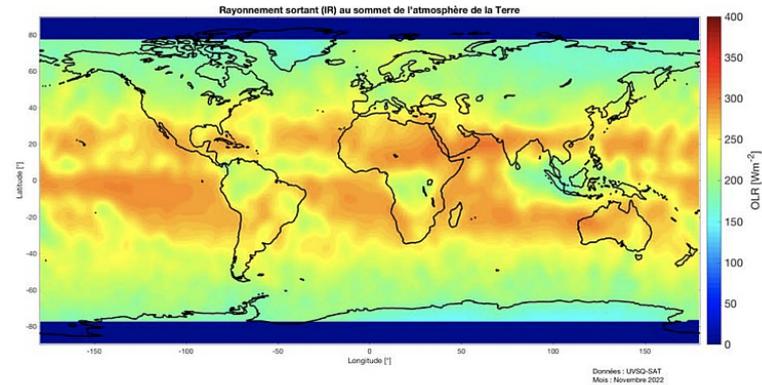
La miniaturisation des plateformes permet de réduire les coûts, en premier lieu au lancement, du fait que le prix de revient est indexé sur le poids mis en orbite (Jones et al. 2020). Le coût du lancement reste une partie importante même si le coût a été divisé par dix avec les nouveaux lanceurs réutilisables. Dès lors que l'on mise sur la multiplication des instruments plutôt que sur la fourniture d'une mesure absolue, il est possible de miniaturiser les instruments en utilisant des capteurs plus simples tout en ayant une bonne sensibilité.

L'une des révolutions associées aux petites plateformes, appelées nanosats, dans la gamme de poids typique de 1-10 kg, est la définition d'un standard, en 1999, à l'initiative de Jordi Puig-Suari (CalTech University) et Bob Twiggs (Stanford University), qui ont l'idée de développer des plateformes à base de cubes de 10 cm de côté. L'intérêt de ce standard est, d'une part, d'offrir la possibilité d'utiliser un largage par la fusée via un système standardisé à base d'un ressort pour la mise en orbite puisque la section du satellite est un multiple de 10 cm. D'autre part, cette approche permet de développer des modules de base et des cartes électroniques standardisées à ce format permettant de dupliquer à l'identique des développements ayant fait leur preuve dans l'espace, mais également de commercialiser ces fonctions de base. Cette approche a pour conséquence de participer à l'abaissement des coûts et des délais de développement de la plateforme et du lancement.

Avec ce type de capteurs miniaturisés montés sur un petit satellite placé sur une orbite basse héliosynchrone (et donc défilante), il est possible d'établir une carte globale comme le montre l'exemple de la figure 4 concernant l'émission infra-rouge (IR) de la Terre. Le même capteur, observant la Terre tourner, permet de donner une image cohérente mais sans prétendre donner une valeur absolue par rapport aux capteurs plus sophistiqués et plus gros.

Lorsque l'on échantillonne un champ atmosphérique donné, avec une excellente résolution, avec un satellite, il apparaît qu'en interpolant les données d'une journée entière, la carte obtenue ne restitue pas un certain nombre de structures (voir les exemples simulés pour le rayonnement IR renvoyé par la Terre, dans Mefah et al., 2020, 2022). Pour répondre au sous-échantillonnage, il est donc nécessaire d'utiliser simultanément plusieurs plateformes sur des orbites complémentaires pour revenir plus fréquemment au-dessus d'un même point. La multiplication des plateformes permet également de résoudre la cohérence des différents capteurs. Comme cela est réalisé en météorologie, le processus d'assimilation de données se fait avec un modèle numérique qui permet de tester la cohérence et la qualité des observations en même temps que les données guident le modèle (Milan et al., 2015). Les orbites des plateformes se croisent régulièrement, il est donc possible avec des outils d'intelligence artificielle d'assurer un étalonnage croisé. Ceci correspond donc à un paradigme nouveau pour l'observation. On se contente de systèmes moins performants, concernant leur capacité à fournir une mesure absolue, mais plus nombreux. L'utilisation d'un capteur plus performant n'est pas en contradiction et s'avère très utile pour compléter le dispositif ainsi que les observations opérées depuis le sol.

Figure 4. Carte des émissions infra-rouges (IR) donnée par les capteurs du Nanosat UVSQ-Sat



Mefah et al., 2021.

Les coûts réduits des petites plateformes, du fait de la miniaturisation et de leur standardisation, permettent d'envisager le déploiement de constellations scientifiques avec de nombreuses plateformes, permettant des visites plus fréquentes. Si chaque satellite est placé sur une orbite décalée par rapport à la précédente plateforme alors il passera quelques heures après au-dessus d'un même point. On peut citer la constellation de petits satellites d'étude du bilan radiatif (Mefah et al., 2022), ou les projets associés à la pluie et aux systèmes dépressifs (Peral et al., 2015, Blackwell et al., 2018) mais aussi aux problématiques d'étude de la densité de la thermosphère, qui a bénéficié d'un grand nombre d'observations grâce à la constellation QB50 (Asma et al., 2020) même si, dans ce cas-là, il ne s'agit pas d'une constellation mais de l'accumulation des données de plusieurs satellites.

Un autre enjeu porte sur la réception de données, la collaboration universitaire ou la participation de la communauté des radio-amateurs dans certains cas, lors d'utilisation de fréquences qui leur sont réservées permettant ainsi d'assurer une collecte des données plus fréquente, ce qui illustre l'intérêt de la collaboration internationale. Cette contribution, pouvant être modeste si elle est multipliée par plusieurs partenaires, permet aussi une implication dans les projets spatiaux d'un plus grand nombre d'acteurs. L'implication d'une communauté plus large est également une évolution nouvelle que l'on observe dans de nombreux domaines comme l'encyclopédie numérique, la science participative pour le comptage d'espèces pour la biodiversité, la récupération de météorites. L'accès du domaine spatial à une plus large communauté apparaît comme une évolution évidente, notamment quand il s'agit de problématiques liées à des enjeux universels comme le climat et plus généralement la surveillance de notre environnement.

Figure 5. Réseau d'antenne déployé par le réseau universitaire INSPIRE



Source : réseau INSPIRE <https://asp.colorado.edu/inspire/>

Ces petits satellites ont déjà permis d'adresser des questions scientifiques comme l'étude du cycle de l'eau (Peral et al., 2019), les émissions X du soleil (Moore et al., 2018), ou le bilan radiatif de la Terre (Mefah et al., 2020). Aujourd'hui ils se perfectionnent et pourront se déplacer (Tummala and Dutta, 2017) et se désorbiter de manière autonome et laisser des orbites propres et réutilisables.

Intérêt des High-Altitude Platform Station (HAPS)

Les plateformes géostationnaires sont également très utiles pour la surveillance de notre planète en permettant de suivre rapidement les évolutions que ce soit pour des questions de changements environnementaux, de météorologie, de catastrophes naturelles, d'événements de pollutions (délibérés ou non), ou de sécurité. Cependant, la mécanique céleste ne permettant d'avoir des plateformes géostationnaires qu'à 36 000 km d'altitude, cet éloignement n'est pas propice à une observation de qualité. D'où l'idée d'avoir des plateformes évoluant dans la stratosphère (10-50 km) où, en permettant de se maintenir autour d'une région afin d'assurer une surveillance permanente mais de grande qualité grâce à la relative proximité (1000 fois meilleure que les satellites géostationnaires). La difficulté majeure pour maintenir une plateforme stationnaire à cette altitude porte sur la compensation du vent. Il est donc nécessaire de disposer d'un vecteur muni de moteur et pouvant rester en position quasi-stationnaire pendant des durées significatives et en autonomie. Aujourd'hui les projets concernent les drones (Schuyler and Guzman, 2017) et les plateformes stationnaires – de type planeur ou ballon dirigeable (Frulla, 2002 ; Goraj et al., 2004). Dans les deux cas, l'instrumentation a besoin d'être limitée en taille et en consommation pour que la charge scientifique ne rajoute pas de contraintes trop fortes au vecteur lui-même.

Impact géopolitique et perspectives pour la recherche

Les nouveaux défis et les nouveaux vecteurs d'observation montrent que l'observation obéit à de nouveaux paradigmes. Il est nécessaire de multiplier les observations afin de fournir une résolution spatio-temporelle compatible avec les objectifs de surveillance climatique et environnementale. Ces besoins pour l'étude et la surveillance de la planète sont proches des besoins sécuritaires qui nécessitent également des visites fréquentes d'une même région. Cette stratégie est aujourd'hui envisageable grâce aux nouvelles plateformes spatiales. Il s'agit soit de multiples petites plateformes (nanosats), soit de plateformes stationnaires (HAPS). Les nouveaux outils numériques, notamment, permettent de gérer un flux de données important, à partir desquelles il est possible de tirer une information largement supérieure en croisant intelligemment l'information. À la suite des développements de systèmes sophistiqués et donc encombrants, consommateurs d'énergie, longs et coûteux à développer, est apparue la nécessité de disposer de capteurs miniaturisés adaptés aux conditions spatiales. Le concept de *cubesat* mériterait d'être généralisé et ce standard pourrait être utilisé sur d'autres plateformes en cours de développement, comme les HAPS, ballon en tous genres (stationnaire, captifs ou défilants), rovers, bouées, train, avion de ligne. Le cube de 10 cm pourrait être décliné avec d'autres dimensions si besoin. Cette approche standardisée permettrait de faire naître un marché plus grand et de renforcer le processus de réduction des coûts. Ceci donnerait un accès plus facile – et à un plus grand nombre – à ce type d'instrumentation. La communauté scientifique et les startups profiteront d'outils pour une meilleure exploration et finalement pour la production d'un grand nombre d'observations pour l'étude de la planète et son évolution, comme l'a recommandé le GEOSS (Ryan and Ochiai, 2017).

Au-delà de la multiplication de plateformes pas toujours propices à une démarche environnementale recommandée, les plateformes commerciales (satellites, trains, autocars, bateaux) pourraient embarquer des capteurs d'observation comme une contribution à l'intérêt général de surveillance. Pour l'intérêt de la recherche, il existe déjà des exemples de cette démarche, comme l'installation de capteurs par la communauté scientifique sur des avions de ligne (Marenco, 2000). Ceci pourrait demain être considéré comme une obligation compensatoire (au moins partielle) de l'utilisation d'un espace publique. Les nouvelles plateformes type

nanosat, maintenant qu'elles ont fait la preuve de leur utilité et participé à créer un marché de sous-systèmes miniaturisés et génériques, les plateformes commerciales pourraient également être utilisées. Afin de réduire le nombre de plateformes en orbite, la communauté scientifique – avec ses capteurs miniaturisés – pourrait bénéficier de ces constellations commerciales qui se multiplient, ce qui réduirait l'encombrement des orbites.

L'apparition de satellites de petites tailles et l'émergence de plateformes stationnaires dans la stratosphère, couplées à des outils d'intelligence artificielle, ouvrent de nouvelles perspectives pour disposer d'informations supplémentaires sur la variabilité climatique et environnementale. Alors que les outils utilisés par la communauté scientifique impliquée dans l'observation de la Terre étaient encadrés par une stratégie nationale et gouvernementale, il s'opère un rapprochement croissant entre la recherche académique, l'industrie et les applications commerciales dans la mise à disposition de ces outils nouveaux. Cette synergie ne s'arrête pas à ces nouvelles plateformes et sous-systèmes, mais s'étend tout au contraire aux capteurs et données pouvant avoir des utilisations duales. La recherche autour du système Terre porte sur des paramètres permettant de mieux comprendre son fonctionnement et son évolution, mais également des observables stratégiques dans un contexte réglementaire qui se renforce, et un contexte géopolitique qui se durcit.

Conclusions

En montrant l'intérêt des petits satellites et en développant avec des partenaires industriels des solutions afin de réaliser des observations à moindre coût, la communauté scientifique a été disruptive. L'utilisation de nouveaux types de plateformes est recherchée par la communauté scientifique pour étudier, à l'échelle globale, les phénomènes rapides de temps caractéristiques inférieurs à la journée et avec une extension spatiale réduite de quelques 100 kilomètres. Ces plateformes, complémentaires des plus imposantes aujourd'hui existantes en orbite, nécessitent de miniaturiser les capteurs et instruments scientifiques et profitent de standards comme ceux des *cubesats*. Grâce à elles, il sera possible d'augmenter le nombre d'observations et de développer des approches d'analyse de mesure répondant à un nouveau paradigme ou le nombre d'observations, manipulé avec les outils d'analyse d'intelligence artificielle, compensera la qualité (mesure absolue) qui était le Graal des scientifiques développant des instruments spatiaux. Ces nouvelles approches s'inscrivent dans une évolution qui, à certains égards, est similaire à celle du domaine commercial, et devraient faire émerger des synergies publiques/privés plus importantes.

Bibliographie

- Asch, M., M. Bocquet et M. Nodet, 2016, *Data Assimilation: Methods, Algorithms, and Applications*, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN: 9781611974539
- Blackwell, WJ, Braun, S, Bennartz, R, et al. An overview of the TROPICS NASA Earth Venture Mission. *Q J R Meteorol Soc.* 2018; 144 (Suppl. 1): 16–26. <https://doi.org/10.1002/qj.3290>
- Bösenberg, J. et al., 2002: EARLINET: Establishing the European Aerosol Research Lidar Network. In: L. Bissonnette, G. Roy, and G. Vallée (eds), *Lidar Remote Sensing in Atmospheric and Earth Sciences*, 535–539, Defence R&D Canada – Valcartier.
- Calbet, X., Carbajal Henken, C., DeSouza-Machado, S., Sun, B., and Reale, T.: Horizontal small-scale variability of water vapor in the atmosphere: implications for intercomparison of data from different measuring systems, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 7105–7118, <https://doi.org/10.5194/amt-15-7105-2022>, 2022.
- Cem Asma, Jonathan Naviaux, Gaëtan Kerschen, Roedeger Geinhard and Jean Muyaert, Orbital Dynamical Characteristics of a QB50 CubeSat performing atmospheric reentry, AIAA 2010-7812. *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, August 2010.
- Clerbaux, C., Boynard, A., Clarisse, L., George, M., Hadji-Lazaro, J., Herbin, H., Hurtmans, D., Pommier, M., Razavi, A., Turquety, S., Wespes, C., and Coheur, P.-F.: Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6041–6054, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>, 2009.
- Cousteris, A., Krminek, G., Hedman, N., Ammanito, E., Deshevaya, E., Doran, P.T., Grasset, O., Green, J., Hayes, A., Lei, L., Nakamura, A., Prieto-Ballesteros, O., Raulin, F., Rettberg, P., Sreekumar, P., Tsuneta, S., Viso, M., Zaitsev, M., Zorzano-Mier, M.-P., 2019 b. The COSPAR Panel on Planetary Protection role, structure and activities. *Space Res. Today*, vol. 205, August 2019, pages 14-26, <https://doi.org/10.1016/j.srt.2019.06.013>.
- Frulla G. Preliminary reliability design of a solar-powered high-altitude very long endurance unmanned air vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2002;216(4):189-196. doi: <https://doi.org/10.1243/09544100260369722>
- Goraj et al., High altitude long endurance unmanned aerial vehicle of a new generation – a design challenge for a low cost, reliable and high performance aircraft, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*. Vol. 52, no. 3. Z., 2004.
- Gaffen D. J., 1994 : Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records, *J. Geophys. Res.*, 99, 3667 – 3676, doi : <https://doi.org/10.1029/93JD03179>.
- Jacobson M.Z., *Atmospheric Science and Meteorology, Mathematic, Earth and Environmental Sciences, Fluid Dynamics and Solid Mechanics*, Cambridge University Press, 2005, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139165389>.
- Jones H.W., The Recent Large Reduction in Space Launch Cost, Albuquerque, New Mexico: 48th International Conference on Environmental Systems, ICES-2018-81, July 8-12, 2018, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20200001093.pdf>.
- Kalnay, E., 2002, *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 341 pp.
- Keckhut, P., S. McDermid, D. Swart, T. McGee, S. Godin-Beekmann, A. Adriani, J. Barnes, J.-L. Baray, H. Bencherif, H. Claude, G. Fiocco, G. Hansen, A. Hauchecorne, T. Leblanc, C.H. Lee, S. Pal, G. Megie, H. Nakane, R. Neuber, W. Steinbrecht, and J. Thayer, Review of ozone and temperature lidar validations performed within the framework of the Network for the Detection of Stratospheric Change, *J. Environ. Monit.*, 6, 721-733, 2004.
- Keckhut, P., A. Hauchecorne, M. Meflah, S. Khaykin, C. Claud and P. Simoneau, Middle-atmosphere temperature monitoring addressed with a constellation of cubesats dedicated to climate issues, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, American Meteorological Society, 2021, (vol. 38, no. 3).
- Kopp G., Earth's Incoming Energy: The Total Solar Irradiance, Chapter 5 in *Comprehensive Remote Sensing*, Elsevier, Editor Shunlin Liang, Pages 32-66, 2018, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10366-5>.
- Lally, V.E.; Lichfield, E.W. (1969) Summary of status and plans for GHOST balloon project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **50** (11): 867–874, doi: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-50.11.867>.
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Meflah M., Dewitte S., Irbah A., Chevalier A., Conscience C., Crommelynck D., Janssen E., Mekaoui S., *SOVAP/Picard, a spaceborne radiometer to measure the Total Solar Irradiance*, *Solar Physics*, 2014, 289 (5), pp.1885-1899. DOI : <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0443-0>
- Meflah, M.; Damé, L.; Keckhut, P.; Bekki, S.; Sarkissian, A.; Hauchecorne, A.; Bertran, E.; Carta, J.-P.; Rogers, D.; Abbaki, S.; Dufour, C.; Gilbert, P.; Lapauw, L.; Vieau, A.-J.; Arrateig, X.; Muscat, N.; Bove, P.; Sandana, É.; Teherani, F.; Li, T.; Pradel, G.; Mahé, M.; Mercier, C.; Paskeviciute, A.; Segura, K.; Berciano Alba, A.; Aboullila, A.; Chang, L.; Chandran, A.; Dahoo, P.-R.; Bui, UVSQ-SAT, a pathfinder cubesat mission for observing essential climate variables, *Remote Sensing*, MDPI, 2020, 12 (1), art. 92 (24 p.). doi: <https://doi.org/10.3390/rs12010092>.
- Meflah M., T. Boutéraon, C. Dufour, A. Hauchecorne, P. Keckhut, A. Finance, S. Bekki, S. Abbaki, E. Bertran, L. Damé, J.-L. Engler, P. Galopeau, P. Gilbert, L. Lapauw, A. Sarkissian, A.-J. Vieau, P. Lacroix, N. Caignard, X. Arrateig, O. Hembise Fanton d'Andon, A. Mangin, J.-P. Carta, F. Boust, M. Mahe, C. Mercier, The UBSQ-SAT/INSPIRESAT-5 cubesat mission: first in-orbit measurements of the earth's outgoing radiation, *Remote Sensing*, MDPI, 2021, 13, pp.1449. <https://doi.org/10.3390/rs13081449>
- Meflah M., F. Boust, P. Keckhut, A. Sarkissian, T. Boutéraon, S. Bekki, L. Damé, P. Galopeau, A. Hauchecorne, C. Dufour, A. Finance, A.-J. Vieau, E. Bertran, P. Gilbert, N. Caignard, C. Dias, J.-L. Engler, P. Lacroix, K. Grossel, V. Rannou, S. Saillan, Y. Avelino, B. Azoulay, C. Brand, C. Dominguez, A. Haasz, A. Paskeviciute, K. Segura, P. Maso, S. Ancelin, C. Mercier, V. Stee, A. Mangin, D. Bolsée, C. Billard, INSPIRE-SAT 7, a second cubesat to measure the Earth's energy budget and to probe the ionosphere, *Remote Sensing*, MDPI, 2022, 14 (1), pp.186.
- Milan, M., and L. Haimberger (2015), Predictors and grouping for bias correction of radiosonde temperature observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 10,736–10,766, doi: <https://doi.org/10.1002/2015JD023635>.
- Miyahara, H. et al. Is the Sun heading for another Maunder Minimum? Precursors of the grand solar minima. *J. Cosmol.* 8, 1970–1982 (2010).
- Moore, C.S., Caspi, A., Woods, T.N. et al. The Instruments and Capabilities of the *Miniature X-Ray Solar Spectrometer* (MinXSS) CubeSats. *Sol Phys* **293**, 21 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1243-3>
- Marengo, A., MOZAIC: five in-service Airbus A340s evaluate impact of air traffic on atmosphere, *Air & Space Europe*, Volume 2, Issue 3, 2000, pp. 45-50, ISSN 1290-0958, [https://doi.org/10.1016/S1290-0958\(00\)80063-5](https://doi.org/10.1016/S1290-0958(00)80063-5).
- Nash, J.R. Smout, T. Oakley, B. Pathack, and Kurnosenko, 2006, WMO Intercomparison of high-quality radiosonde systems, Vacoas, Mauritius, 2-25 February 2005 (2006). WMO IOM Report No. 83 WMO TD-1303.
- NASA/AMES, *Small Spacecraft Technology - State of the Art*, NASA, octobre 2021, 428 p.: NASA/TP—20210021263
- Pardhasai Chadalavada, Atri Dutta, Regional CubeSat Constellation Design to Monitor Hurricanes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 60, pg. 1, (2022); doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3124473>
- Peral, E., Tanelli S., Statham S., Joshi S., Imken T., Price D., Sauder J., Chahat N., Williams A., RainCube: the first ever radar measurements from a CubeSat in space, *Journal of Applied Remote Sensing* 13, p 32504, 2019, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.032504>.
- Tummala, A.R.; Dutta, A. An Overview of Cube-Satellite Propulsion Technologies and Trends. *Aerospace* 2017, 4, 58. <https://doi.org/10.3390/aerospace4040058>
- Ryan, B., Ochiai, O. (2017), *The New 10-Year GEOSS Strategy for 2016 and Beyond*, In: Onoda, M., Young, O. (eds) *Satellite Earth Observations and Their Impact on Society and Policy*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3713-9_11
- Sanguy, M.-A., Sentinel 1A-Première pierre spatiale du Copernicuss, *Espace & Exploration n° 21*, p. 30-33, 2014.
- Schmidlin F.J., Repeatability and measurement uncertainty of the United States meteorological rocketsonde, *J. Geophys. Res.*, 86, 9599-9603, 1981.
- Schuyler T.J, Guzman M.I. Unmanned Aerial Systems for Monitoring Trace Tropospheric Gases. *Atmosphere*. 2017; 8(10):206. <https://doi.org/10.3390/atmos8100206>
- Seidel, D. J.; Berger, F. H.; Diamond, H. J.; Dykema, J.; Goodrich, D.; Immler, F.; Murray, W.; Peterson, T.; Sisterson, D.; Sommer, M.; Thome, P.; Vömel, H. & Wang, J., Reference Upper-Air Observations for Climate:

Rationale, Progress, and Plans. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90, 361–369, doi: <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2540.1>

Shannon C.E., Communication in the Presence of Noise, *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, n° 2, 442-446, 1986.

Staehein, J., I. Petropavlovskikh, M. De Mazière, S. Godin-Beekmann, The role and performance of ground-based networks in tracking the evolution of the ozone layer, *Comptes Rendus Geoscience*, v 350, Issue 7, 2018, pp. 354-367, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.08.007>.

Stensrud, D.J., *Parameterization schemes : keys to understanding numerical weather prediction models*, Cambridge University Press, 2007, 459 p. (ISBN 978-0-521-86540-1)

Tummala, A.R. ; Dutta, A. An Overview of Cube-Satellite Propulsion Technologies and Trends. *Aerospace* 2017, 4, 58. <https://doi.org/10.3390/aerospace4040058>

Vaughan W.W., and D.L. Johnson, *Meteorological Satellite. The Very Early Years, Prior to Launch of TIROS-1*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1994, p. 8

World Meteorological Organization (WMO). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278, 509 pp. ; WMO: Geneva, 2022

Résumés

Les plateformes satellites positionnées autour de la Terre ont permis d'obtenir une vision globale de notre planète. Toutefois, quelles que soient leurs performances, les satellites « traditionnels » sont insuffisants pour fournir les informations nécessaires à la compréhension des mécanismes mis en jeu afin de suivre les aléas climatiques, d'améliorer la prévision météorologique et la sécurité civile et militaire. Depuis quelque deux décennies, permettant de répondre à ces nouvelles questions scientifiques et sociales, de nouveaux vecteurs techniques apparaissent, notamment les constellations de petits satellites et les plateformes stationnaires comme les drones, planeurs et ballons. Cette évolution, correspondant à une approche à la fois complémentaire et en rupture avec l'approche précédente, favorise, en combinaison avec les outils de l'intelligence artificielle en plein développement, des observations plus nombreuses et de plus grande qualité.

Satellite platforms positioned around the Earth have made it possible to obtain a global vision of our planet. However, whatever their performance, "traditional" satellites are insufficient to provide the information necessary to understand the mechanisms involved in monitoring climatic hazards, improving weather forecasting and civil and military security. For some two decades, making it possible to answer these new scientific and social questions, new technical vectors have appeared, notably constellations of small satellites and stationary platforms such as drones, gliders and balloons. This development, corresponding to an approach that is both complementary and breaks with the previous approach, promotes, in combination with the tools of artificial intelligence in full development, more numerous and higher quality observations.

Index

Mots-clés : espace, cubesat, constellation, observation de la Terre

Keywords : space, cubesat, constellation, Earth observation

Auteurs

Philippe Keckhut

Géophysicien, LATMOS-IPSL, CNRS/INSU, UMR 8190, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Université Paris-Saclay
philippe.keckhut@latmos.ipsl.fr

Mustapha Meftah

Astrophysicien, LATMOS-IPSL, CNRS/INSU, UMR 8190, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Université Paris-Saclay
mustapha.meftah@latmos.ipsl.fr

Laurence Croizé

Physicienne des sciences de l'ingénieur, département optique et techniques associées (DOTA), ONERA
laurence.croize@onera.fr

Espace(s) de la géopolitique

La démocratisation de l'accès aux images satellite : un enjeu de citoyenneté ?

The Democratization of Satellite Imagery Access: A Matter of Civic Engagement?

Gwenaël Régnier

Introduction

Aujourd’hui, l’image satellite est devenue un « objet » banal tant sa diffusion touche un large spectre médiatique (des journaux télévisés aux jeux vidéo). Pourtant, en dehors du cas un peu particulier de la météorologie qui s’intéresse plus à l’atmosphère (couches nuageuses) qu’à la surface du globe, la diffusion des images satellite est longtemps restée relativement contrainte, soit que les données spatiales étaient associées à des enjeux de sécurité nationale soit que leur coût élevé en réservait l’utilisation à des besoins professionnels ou institutionnels spécifiques. C’est à partir du milieu des années 2000, à la faveur de l’avènement d’une « société numérique » animée par la circulation massive et rapide de données mises en réseau sur internet grâce à des microprocesseurs toujours plus puissants et des moyens de stockage de plus en plus performants que se démocratise l’accès aux images spatiales, entre initiatives privées (Google Earth) et mouvement d’ouverture des données publiques (*open data*).

Outil géographique (Verger, 1984) autant qu’outil stratégique (Soubès-Verger, 2002), l’image satellite est désormais un outil-citoyen à part entière. D’une part, parce que les images spatiales, en rendant compte objectivement des phénomènes qui se manifestent en tout point du globe, qu’ils soient d’origine anthropique ou non, constituent des informations d’intérêt public. D’autre part, parce qu’avec la démocratisation de l’accès aux données de télédétection spatiale à grand renfort d’applications qui en facilitent l’appropriation, cette information est à la portée de chaque citoyen de la planète. Qu’il s’agisse de documenter les effets du changement global ou la guerre en Ukraine, tout le monde est ainsi susceptible de pouvoir rechercher et analyser des images satellite, à condition d’être sensibilisé à leur utilisation.

Face aux grands enjeux planétaires qui appellent notamment à une plus grande prise de conscience des problématiques environnementales, dans un contexte de désinformation grandissant où la parole politique comme le discours scientifique sont remis en cause, une éducation à l’imagerie spatiale doit pouvoir trouver sa place à l’école, en particulier dans le cours de géographie, lieu privilégié de l’étude des territoires où les images sont omniprésentes. Or, en France, le potentiel des images satellite dans l’enseignement de la discipline semble encore mésestimé. Alors que dans le milieu des années 1980, l’introduction de l’imagerie spatiale s’est appuyée sur le traitement informatique selon une approche interdisciplinaire ambitieuse en l’état des moyens technologiques de l’époque (Armand, 1988 ; Vauzelle, 1988), le récent regain d’intérêt de l’institution scolaire pour les images satellite tient essentiellement à de l’image commentée (Geoimage1) à l’heure où il est possible de manipuler toute sorte d’images à partir d’un smartphone dont la puissance excède celle des micro-ordinateurs d’hier. Face à ce paradoxe, il semble utile de proposer, dans le cadre d’une recherche-action, des pistes méthodologiques visant à valoriser l’imagerie spatiale à travers des activités pédagogiques accessibles qui répondent aux injonctions des programmes tout en contribuant à une éducation à la citoyenneté mondiale (Unesco, 2018).

La démocratisation de l'accès aux images satellite

Une diffusion longtemps contrariée (1960-2005)

Prises à partir de la fin des années 1950, les images acquises par les satellites espions relèvent du plus grand secret d’un côté comme de l’autre de l’Atlantique. Aux Etats-Unis, peu de personnes, y compris dans le milieu politique et militaire, auront accès aux photographies prises par les satellites espions américains du programme Corona (Soubès-Verger, 2014) qui garderont leur caractère confidentiel jusqu’à ce qu’elles soient déclassifiées en 1995 par l’administration Clinton (Ruffner, 1995). La culture du secret en matière d’imagerie spatiale s’impose également en URSS où le secteur spatial est étroitement lié aux affaires militaires (Soubès-Verger, 2014). Il est toutefois intéressant de noter que ces images vont déjà jouer un rôle important en matière de transparence en cela qu’elles permettront à Washington et à Moscou de s’assurer du respect mutuel des accords SALT I/ABM (1972) et SALT II (1979) limitant le nombre des missiles stratégiques. Rappelons également qu’au début des années 1960, les images satellite acquises dans le cadre du projet Corona (1959-1972) évoluent le concept de « *missile gap* » qui surestimait l’arsenal balistique soviétique par rapport aux capacités américaines (Berkowitz, Suk, 2018).

Une première évolution est amorcée en 1972 avec la mise en œuvre du programme américain de télédétection spatial civil Landsat dont les premiers satellites permettent de visualiser les surfaces terrestres, habitées ou non, même si la précision est encore relativement médiocre (résolution spatiale de 80 mètres). Durant les années 1970, l’accès aux images Landsat se fait soit directement via la Nasa, le plus souvent gratuitement – dans le cadre notamment d’appels à projets visant à valoriser les données de télédétection, soit via un centre de données, le *Eros Data Center* (EDC), mis en place sous la responsabilité de l’Institut d’études géologiques des États-Unis (USGS), et donc sous le contrôle du gouvernement américain, à un tarif relativement abordable qui englobe les prix de reproduction et de distribution des images fixés par l’EDC (Draeger, Holm, Lauer, Thompson, 1997).

Cependant, dans un souci de réduction des dépenses publiques, le processus de privatisation des activités Landsat impulsé par l’administration Carter en 1978 est renforcé sous la présidence de Reagan (Mack, Williamson, 1998) : la commercialisation des données Landsat passe alors successivement sous la responsabilité provisoire de l’agence fédérale chargée de l’étude de l’océan et de l’atmosphère (NOAA) en 1979, puis sous la coupe d’une entreprise privée, la *Earth Observation Satellite Company* (Eosat), à l’occasion de l’adoption du *Land Remote-Sensing Commercialization Act* de 1984. A la même période, la Nasa met sur orbite deux nouveaux satellites (Landsat 4 en 1982 et Landsat 5 en 1984) capables d’acquérir des images de meilleure précision (résolution spatiale de 30 mètres).

La période d’exploitation du programme Landsat par le secteur privé, qui se prolongera jusqu’en 1992, voit notamment une forte augmentation des tarifs, pénalisant les établissements de recherche, les universités mais aussi les pays les moins développés pour l’accès aux données de télédétection spatiale (Harris, Krawec, 1993). Une situation que la remise en question du monopole américain sur le marché de l’imagerie spatiale avec le lancement en 1986 du satellite de télédétection français Spot (Satellite pour l’Observation de la Terre) ne change pas (Cervelle, 1989). Mis en place pour distribuer les données Spot, l’entreprise française Spot-Image assume ses ambitions commerciales, d’autant qu’elle propose des images à haute résolution (10 mètres de résolution en panchromatique). Par conséquent, comme pour les données Landsat, l’accès aux produits Spot est rendu difficile au milieu académique comme aux pays en développement sans le recours à l’aide des pays industrialisés (Draeger et al., 1997). La prise en compte de cette problématique avec la mise en place d’accès adaptés (bien que limités) à la recherche et à l’éducation est toutefois à souligner (Harris, Krawec, 1993).

Dans le sillage du *Land Remote Sensing Policy Act* de 1992, les années 1990 marquent le développement de la commercialisation des images satellite. La décennie est un tournant majeur dans l’utilisation et la diffusion des images satellite, passant d’un domaine largement dominé par le secteur public et les organismes gouvernementaux à un secteur ouvert à la concurrence privée proposant des images de plus en plus précises. La politique de commercialisation des images satellite outre-Atlantique est formalisée par l’Administration Clinton qui autorise en 1994 (Clinton, 1994) les compagnies américaines à vendre des images satellite à haute résolution à l’international (Williamson, Baker, 2004). C’est ainsi qu’en 1999, la compagnie GeoEye lance avec succès Ikonos, le premier satellite civil à offrir des images commerciales avec une résolution métrique2, identique à celle du satellite militaire Helios jusque-là considérée comme relevant de la sécurité nationale.

Néanmoins, bien que l’ouverture du marché ouvre des opportunités sans précédent pour l’exploitation commerciale de la télédétection par satellite, l’accès à ces images, en particulier dans le cas des images à haute et très haute résolution, reste onéreux à cause des coûts élevés des technologies spatiales ainsi que des frais associés à la collecte, au traitement et à la distribution des données de télédétection. De plus, la distribution des images satellite est réglementée par les gouvernements nationaux. Aux Etats-Unis, leur commercialisation est régie par le *National and Commercial Space Programs Act* (NCSIPA) de 2010 qui impose l’attribution d’une licence sous le contrôle du département du commerce américain (via la NOAA) avec à l’esprit un équilibre entre viabilité économique de l’activité commerciale et protection de « la sécurité nationale, la politique étrangère et les obligations internationales »3.

Vers la démocratisation de l'accès aux images satellite : l'ère de l'Open Data

A partir des années 2000, l’essor de l’internet, avec notamment la généralisation de l’accès au haut débit, dans un contexte où l’outil informatique est déjà largement répandu dans le quotidien professionnel comme personnel de la population (dans les pays industrialisés du moins), ouvre une nouvelle ère pour la diffusion des images satellite. Si l’acquisition d’images commerciales reste coûteuse, le futur géant du web, Google, vient bousculer le monde encore élitiste de l’imagerie spatiale en proposant en 2005 une application qui donne à voir gratuitement des images satellite détaillées du globe au grand public à la condition de disposer d’un ordinateur avec une connexion internet : Google Earth4. S’il est alors difficile de connaître la source des images et leur date d’acquisition, pour la première fois, l’imagerie spatiale, à très haute résolution dans le cas de certaines zones urbaines, est à portée de clics du commun des internautes.

La démocratisation de l’imagerie spatiale s’amplifie en 2008 lorsque l’USGS décide de rendre accessible gratuitement les données Landsat pour tous via Internet (Wulder, Roy, Radeloff, Loveland, 2022). Cette décision, motivée par la volonté de faciliter l’utilisation des données de télédétection du programme américain au bénéfice de l’intérêt public, s’inscrit dans le mouvement d’ouverture des données publiques (*open data*) qui naît de la convergence entre enjeux techniques et enjeux politiques en 2007 (Goëta, Mabi, 2014). C’est un succès : alors que jamais plus de 3000 images Landsat étaient vendues sur un mois donné de 1972 à 2008, c’est près d’un million d’images qui sont téléchargées sur la seule année 2009 (Zhu et al., 2019). La réussite de la politique de distribution libre et ouverte des données Landsat encourage certains pays à suivre l’exemple américain.

En adoptant une politique de données ouvertes totale en 2013 avec son programme Copernicus qui fournit une large gamme de données d’observation de la Terre (surveillance du climat, de la surface de la planète et de l’atmosphère), l’Union européenne poursuit, en la dépassant au regard de la quantité comme de la qualité des données mises à disposition (les satellites Sentinel 2 ont une résolution spatiale de 10 mètres), l’initiative américaine. La France a également suivi le mouvement en mettant à disposition du grand public en 2021 les archives de ses données Spot sur la période 1986-2015 (Spot 1 à Spot 5) dans le cadre de son service Spot World Heritage (SWH) piloté par son agence spatiale (CNES)5. Dans une démarche analogue bien que plus limitée, d’autres Etats partagent les données de leurs satellites avec la communauté des chercheurs, à l’instar de la Chine qui propose, via son Académie des Sciences, un accès aux données de son satellite dédié au développement durable, SDGSAT 1, depuis 2022.

Dans le secteur privé, certains distributeurs diffusent des images commerciales occasionnellement ou dans le cadre de programmes à but non lucratif (recherche, éducation). La société américaine Maxar diffuse librement des images à très haute résolution auprès de la communauté géospatiale à l’occasion de catastrophes6 tandis que Planet Labs ouvre l’accès à son catalogue d’images à haute résolution aux chercheurs voire même aux enseignants7. De plus, il est de plus en plus courant de voir dans la presse ou sur les réseaux sociaux des images commerciales déjà traitées pour couvrir des sujets aussi divers que des conflits (guerre en Ukraine) ou l’effet du changement global. Précisons que les données acquises par les satellites de reconnaissance, dans le cadre de programmes militaires, par nature « stratégiques », demeurent confidentielles et n’ont pas vocation à être diffusées.

Aujourd’hui, l’accès aux images satellite s’est largement démocratisé en ce sens qu’il est possible depuis son ordinateur (ou même depuis son smartphone) de voir, de manipuler, de comparer et de télécharger une très grande quantité d’images qui donnent à observer la surface de la planète sur un temps relativement long via des applications de plus en plus simples d’utilisation, à l’exemple de Sentinel Hub EO Browser8 (voir Ill.3), conçu par une start-up européenne (en cours de rachat par Planet Labs en 2023). L’originalité de ces nouvelles plateformes en ligne, par rapport à Google Earth notamment, réside dans le fait qu’elles mettent à disposition des utilisateurs un large éventail de données complémentaires, y compris des données « brutes »9 exploitables pour un traitement informatique, qu’il s’agisse d’images tout juste acquises par le satellite en orbite ou qu’il s’agisse des données archivées depuis maintenant plus de cinquante ans (1972-2023).

Le mouvement de l’*open data* dans le domaine de l’imagerie spatiale, parce qu’il donne à chacune et à chacun la possibilité d’appréhender les phénomènes qui se manifestent à la surface de notre planète, qu’ils soient d’origine anthropiques ou non, globaux ou locaux, contribue sans conteste à faire de l’image satellite un véritable outil-citoyen.

Un outil-citoyen pour mieux appréhender les enjeux sociétaux

L'image satellite : une source d'information objective

Les images satellite sont aujourd'hui largement utilisées dans les médias, en particulier dans des enquêtes journalistiques, le plus souvent pour venir appuyer un propos auquel elles apporteraient une caution scientifique, quand elles ne prétendent pas avoir valeur de preuve. Si la démarche de valider une information par l'image n'a rien d'exceptionnel, eu égard à son effet persuasif (Joffe, 2007), avec toutes les limites dont il faut tenir compte néanmoins (voir II.3), l'image satellite, en cela qu'elle présente des caractéristiques particulières, n'est pas tout à fait une image comme les autres.

L'image satellite, étant donné sa nature technique et son usage scientifique, se voit conférer une forme de crédit *a priori*. En effet, elle est le produit d'une technique de pointe, la télédétection spatiale, associée à des processus de traitement rigoureux s'appuyant sur l'expertise d'ingénieurs et de scientifiques, qu'ils répondent à des approches qualitatives ou quantitatives, qui en font un outil d'analyse privilégié dans de nombreux domaines de recherche à l'exemple de la cartographie ou des sciences de l'environnement.

De plus, les images acquises par le capteur du satellite correspondent à une observation neutre au moment du passage de l'orbiteur au-dessus d'un point à la surface de la planète. En ce sens, les données enregistrées sont factuelles. S'agissant des satellites à défilement qui enregistrent les données en continu (acquisition systématique) comme ceux des programmes de données ouvertes Landsat et Copernicus par exemple, l'information est d'autant plus objective que tout biais de sélection *a priori* est éliminé. A titre d'analogie, le satellite se distingue du photographe qui peut influencer sur un éventail de paramètres (distance, cadrage, instant) avant la prise de vue et choisir de privilégier certaines scènes plutôt que d'autres.

La traçabilité de la donnée est un autre point fort de l'imagerie spatiale en matière de contrôle de l'information. L'image peut en effet être authentifiée puisque chaque donnée brute produite est accompagnée d'indications permettant d'identifier le satellite comme les capteurs utilisés mais aussi la date, l'heure et les coordonnées du lieu d'acquisition. Ajoutons que le trajet d'un satellite étant connu du fait des propriétés physiques des engins en orbite, ces indications sont elles-mêmes vérifiables¹⁰. Un citoyen averti, sans nécessiter une grande expertise, est ainsi en mesure de pouvoir remonter à la source de l'image pour en confirmer l'origine.

Enfin, le nombre grandissant de satellites de télédétection en orbite autour du globe tend à sécuriser l'exactitude de l'information en donnant à comparer et à croiser les données de différentes sources, acquises par différents types de capteurs (optiques, radars). Déjà avantageuse pour contourner les obstacles naturellement liés à la télédétection optique (couverture nuageuse, temps de revisite trop long), l'approche multi-source est également un facteur de transparence qui favorise une utilisation objective des données spatiales.

Dans un contexte où la société humaine est de plus en plus confrontée à la désinformation et tend à remettre en cause un certain nombre de discours pourtant validés par la science, à l'instar de l'urgence climatique, l'imagerie spatiale, parce qu'elle donne à voir le monde tel qu'il est, peut apporter sa pierre à l'édifice fragile que représente la sensibilisation aux grands enjeux environnementaux.

La sensibilisation aux grands enjeux environnementaux

L'imagerie spatiale offre une perspective unique de la Terre. Les satellites de télédétection, en survolant de manière régulière les espaces terrestres, capturent des images qui révèlent les transformations passées et présentes en tout point du globe et à toutes les échelles. Ces images spatiales, acquises sur plusieurs décennies, constituent des séries temporelles qui permettent de mettre en évidence les phénomènes qui affectent la planète et les sociétés qui l'habitent comme l'accélération de la fonte des glaciers, l'ampleur de la déforestation ou encore les catastrophes naturelles. Or dans la plupart des situations, la comparaison d'images d'un même lieu à des dates différentes, sur un temps plus ou moins long, présente l'avantage d'être relativement explicite (dans le cas de l'imagerie optique du moins) et donc assimilable par le plus grand nombre. A titre d'exemple, sur une période étendue, la déforestation, phénomène très médiatisé depuis le Sommet de la Terre de Rio en 1992, est particulièrement intéressante à suivre avec les images satellite (figure 1).

Figure 1. Les images satellite mettent en évidence la déforestation à Novo Progresso (Brésil) entre 1984 et 2021



Image Landsat 4-5 (L2/TM/Vraies couleurs), 21 juin 1984.
Crédit : Sentinel Hub/U.S. Geological Survey



Image Sentinel 2 (L2A/MSI/Vraies couleurs), 20 juillet 2021.
Crédit : Sentinel Hub/Copernicus

Sur cette période, une surface de 1000 km² de forêt a été détruite dans la zone d'étude (2500 km²).

A l'heure où la problématique du changement global s'affiche plus que jamais sur le devant de la scène politico-médiatique, les images satellite permettent également de rendre concrets des phénomènes parfois difficiles à appréhender, notamment lorsqu'ils sont présentés à travers des études scientifiques bardées de statistiques. Comme on l'a vu, l'image satellite simplifie le message mais sans en limiter la portée. D'une part parce qu'elle est elle-même un outil scientifique et même parfois la source de ces données statistiques. D'autre part parce qu'il s'agit justement d'une image : elle véhicule un pouvoir émotionnel (Joffe, 2007) qui la rend plus persuasive auprès du grand public que les statistiques empilées dans des tableaux et des diagrammes qui s'adressent d'abord aux experts, dans un contexte où les discours scientifiques, en particulier sur la question du dérèglement climatique, sont régulièrement remis en question. A cet égard, il est fréquent de voir des images satellite accompagner des données sur la fonte des glaciers ou la déforestation des forêts équatoriales.

La large diffusion des images satellite, qu'elle relève des politiques publiques d'ouverture de la donnée (Landsat, Copernicus) ou d'initiatives ponctuelles en lien avec l'actualité (images commerciales), contribue à amplifier l'effet de sensibilisation du grand public aux problématiques environnementales. D'abord à travers le rôle des médias qui s'appuient de plus en plus sur ce type d'images pour traiter les sujets relatifs au changement global (incendies, inondations...) ou à d'autres préoccupations écologiques (gestion des ressources naturelles). Ensuite par le biais de citoyens avertis, experts ou amateurs, qui partagent des images spatiales sur les réseaux sociaux ou des blogs pour documenter l'actualité (citons parmi de très nombreux autres sur twitter @i_ameztoy, @sgascoin, @Pierre_Markuse, @kosmi64833127 ou encore @imgsat973), à l'occasion de catastrophes naturelles par exemple (figure 2), et dont certaines sont parfois reprises par les médias officiels. Enfin, dans le cadre de l'enseignement où les images satellite peuvent, comme nous le verrons plus loin, servir de support à des actions pédagogiques au service de la construction d'une conscience écologique chez les citoyens en devenir.

Figure 2. Les images satellite montrent l'ampleur des inondations à N'Djamena (Tchad) en octobre 2022

N'Djaména avant les inondations

N'Djaména après les inondations

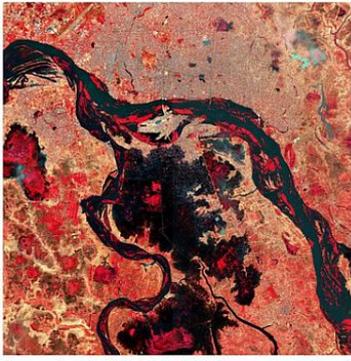
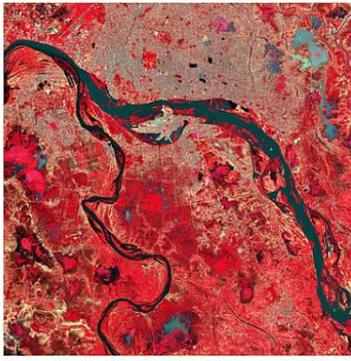


Image Sentinel 2 (MSI/L2A/Fausses couleurs),
30 septembre 2022.
Crédit : Sentinel Hub/Copernicus.

Image Sentinel 2 (MSI/L2A/Fausses couleurs),
4 novembre 2022.
Crédit : Sentinel Hub/Copernicus.

Ces intempéries exceptionnelles sont attribuées au changement global.

Les images satellite, en dévoilant sous nos yeux la réalité des défis environnementaux auxquels nous devons faire face à l'échelle du globe, peuvent inciter à soutenir un développement plus durable pour la planète. Mais leur rôle ne se limite pas à informer les citoyens sur les grands enjeux planétaires du XX^e siècle : la démocratisation de l'accès aux données invite aussi à s'engager dans une forme de surveillance citoyenne active.

L'imagerie spatiale au service d'une surveillance citoyenne : un enjeu de transparence

Dès son origine, l'imagerie spatiale, étroitement liée au renseignement militaire, sert aux Etats-Unis et à l'URSS à se surveiller mutuellement. Il faut dire qu'elle est par nature un outil d'exception par la capacité des satellites de télédétection à pouvoir observer régulièrement, avec plus ou moins de détails, de jour comme de nuit, la surface du globe, dès lors que l'on dispose des capteurs adéquats¹¹. Depuis l'espace, au-delà des limites de la souveraineté des Etats, hors de portée des moyens de coercition traditionnels, ils enregistrent l'ensemble des phénomènes, naturels ou anthropiques, sur les continents comme sur les mers dont ils rendent compte visuellement sous forme d'images numériques. L'image satellite se révèle ainsi être une source d'information incontournable (voir II.1) pour suivre et documenter les activités humaines à l'échelle locale comme à l'échelle globale ne relevant pas exclusivement du champ militaire. En ce sens, elle contribue à une forme de « surveillance citoyenne », pendant civil de la reconnaissance, au service de la transparence.

Dissipons tout malentendu : la notion de « surveillance citoyenne » s'emploie ici en référence à l'utilisation active et consciente des images satellite par les citoyens pour surveiller divers aspects de leur quotidien, qu'il se limite à leur territoire ou qu'il recouvre des enjeux planétaires. La « surveillance » renvoie d'abord à l'action du satellite (de l'anglais *monitoring*) dont l'image est le produit, s'écartant de la vision fortement sécuritaire à laquelle elle est très souvent associée dans la littérature. Parce qu'elle est « citoyenne », elle suppose une proactivité des individus qui les incite à s'emparer d'un outil technique, l'imagerie spatiale, qui répond à un besoin croissant de s'informer le plus factuellement possible. Or la démocratisation de l'accès aux images satellite, accompagnée et renforcée par la mise à disposition d'applications gratuites et simples d'utilisation (Google Earth, Sentinel Hub EO Browser, Copernicus Browser) qui permettent de trouver et d'analyser des images satellites en quelques « clics », facilite l'appropriation par chaque individu d'une source d'information objective par nature et plutôt réservée, jusqu'à une époque récente, aux militaires et aux scientifiques.

Aujourd'hui, tout le monde est susceptible de pouvoir s'appuyer sur des images satellite pour s'assurer de la crédibilité d'une information, qu'elle soit officielle ou non, ou encore pour suivre la mise en œuvre d'engagements divers par des acteurs publics comme privés. Concrètement, les citoyens peuvent par exemple utiliser des images satellite pour vérifier si les entreprises aurifères qui s'affairent en Guyane française procèdent comme leur impose la loi à la revégétalisation de leurs sites d'exploitation. En matière de contrôle de la parole politique aussi, les images satellite peuvent se révéler efficaces. Rappelons-nous l'ancien président du Brésil Jair Bolsonaro tentant de réfuter la réalité des données de télédétection spatiale mettant en évidence l'ampleur de la déforestation sous son mandat¹². Au-delà des sujets environnementaux, les images satellite diffusées par les sociétés américaines documentaient avec précision les préparatifs de l'invasion de l'Ukraine par la Russie¹³, tandis que le Kremlin niait toute velléité d'envahir son voisin.

Dans le contexte de l'*open data*, l'utilisation de l'imagerie spatiale s'applique aussi très bien à l'Open Source Intelligence (OSINT) – ou renseignement d'origine sources ouvertes en français – que l'on peut considérer comme une forme pointue de surveillance citoyenne, en cela qu'elle nécessite généralement des méthodes de travail rigoureuses et une certaine expertise technique. L'OSINT s'appuie sur des informations recueillies à partir de sources ouvertes et publiques qui peuvent inclure un large éventail d'informations allant des articles de presse et des réseaux sociaux à des rapports gouvernementaux et des travaux académiques. Des journalistes d'investigation s'appuient ainsi sur l'imagerie spatiale pour mener leurs enquêtes à l'instar des membres de la cellule « *Visual Investigations team* » du New York Times, plusieurs fois récompensés par le prix Pulitzer depuis sa création en 2017. L'analyse d'images satellite en accès libre Sentinel 2 réalisée par l'équipe du New York Times pour mettre en évidence l'utilisation d'une flotte fantôme par la Russie pour contourner les sanctions sur l'exportation de pétrole est une bonne illustration de ce type d'approche (figure 3). Plus généralement, il est fréquent que les comptes consacrés à l'OSINT qui fleurissent sur les réseaux sociaux ces dernières années diffusent des images spatiales pour informer la communauté numérique sur une grande variété de sujets allant des conflits armés à la déforestation de forêt tropicales humides.

Figure 3. Image satellite Sentinel 2 du programme européen Copernicus en Une du New York Times pour documenter l'utilisation illégale d'une flotte fantôme de pétroliers par la Russie

The New York Times

© 2023 The New York Times Company

SATURDAY, JUNE 3, 2023

iv



A satellite shows the Cathay Phoenix at the oil terminal in Kozmino, Russia. But the ship is sending a fake location signal that it's near Niigata, Japan.

How a Dark Fleet Moves Russian Oil

Several oil tankers are faking their locations while transporting supplies currently under Western sanctions, in an apparent effort to deceive their American insurer. PAGES A6-7

Crédit : The New York Times , 3 juin 2023.

Néanmoins, si l'outil satellitaire est neutre et que sa donnée est factuelle, l'interprétation que l'on peut faire des images reste sujette à des erreurs voire à des biais : la présentation en 2003 par le secrétaire d'Etat américain Colin Powell d'images satellite suggérant le refus de Bagdad de coopérer avec la Commission de contrôle, de vérification et d'inspection des Nations unies (Cocovinu) pour justifier une intervention militaire « préventive » en Irak est une bonne illustration de ce risque de biais d'interprétation. Précisons également qu'un opérateur peut faire le choix de ne pas diffuser une image, en particulier dans le cas de la distribution d'images commerciales, pour des raisons de sécurité nationale par exemple (voir I.1). Alors que les entreprises américaines Maxar Technologies et Planet Labs n'ont pas hésité à diffuser des images satellite mettant en évidence les exactions commises par le belligérant russe en Ukraine, il est légitime de se demander si l'initiative aurait été systématisée de la sorte si les images avaient permis de documenter des crimes de guerre perpétrés par les Etats-Unis.

Toujours est-il qu'en devenant aujourd'hui accessible (et intelligible) à quiconque disposant d'une connexion internet, l'imagerie spatiale s'invite dans la panoplie des outils de surveillance au bénéfice des citoyens, ouvrant des perspectives intéressantes en termes d'*empowerment* citoyen (ou « encapacitation citoyenne »). Dans le cadre de la démocratisation de l'accès aux images satellite, intrinsèquement liée à l'*open data*, la notion d'*empowerment* peut se comprendre comme la capacité donnée aux citoyennes et aux citoyens de pouvoir mieux s'informer via l'attribution de ressources (données satellitaires) par les autorités publiques (Badouard, 2017). Toutefois, la mise à disposition des données n'implique pas forcément que les individus puissent se les approprier. Samuel Goëta et Clément Mabi rappellent ainsi la nécessité pour les citoyens d'être « en capacité de s'emparer des données » et d'y être « formés notamment dans un cadre scolaire », notamment en exploitant « les données disponibles en open data dans les programmes scolaires pour illustrer par des cas réels des problèmes rencontrés en classe » (Goëta, Mabi, 2014).

Dans un monde de plus en plus soumis aux aléas de la désinformatio, une éducation à l'utilisation des images satellite semble donc aujourd'hui incontournable, qu'il s'agisse de sensibiliser les futurs citoyens aux problématiques environnementales à toutes les échelles (éducation au développement durable) ou de développer leur esprit critique dans un monde mouvant (éducation aux médias et à l'information), en particulier dans le cadre de l'enseignement de la géographie, discipline qui privilégie l'utilisation des images (Regnauld, 2015) et dont l'étude se consacre aux interactions entre les sociétés et leurs environnements. Si l'utilisation des images satellite dans l'enseignement secondaire n'est pas une nouveauté puisque c'est un sujet dont s'est emparée l'Education nationale dès le début des années 1980 (Estival, Hirleman, Vauzelle, 1985 ; Vauzelle, 1984), il paraît intéressant d'envisager, au regard des programmes scolaires actuels, des manières possibles d'utiliser ces images en classe dans un nouveau contexte marqué par l'explosion des usages numériques et la diffusion libre et gratuite de données satellitaires (*open data*).

Eduquer à l'imagerie spatiale dans l'enseignement secondaire : approche pratique en classe de géographie

Comparer des images satellite dans une étude de documents

L'étude de documents est une activité centrale dans la géographie scolaire où l'enseignement se tourne de plus en plus sur l'apprentissage par compétences, y compris au lycée (capacités)¹⁴. Dans le cadre de leur formation, les élèves sont ainsi amenés à être confrontés à des documents variés dans le but d'acquérir des compétences au collège qu'ils doivent consolider au lycée. Alors que les documents iconographiques, à l'instar des photographies, sont omniprésents dans ce type d'activités, en parcourant les manuels de géographie on remarque que les images satellite n'y sont généralement pas vraiment valorisées (ni vraiment bien référencées). Pourtant, l'accès facilité à de nombreuses images spatiales couvrant une grande partie du globe et acquises sur une période relativement longue (données en accès libre depuis 1972) doit pouvoir favoriser leur utilisation dans les études de cas, en particulier dans le cadre d'une analyse diachronique.

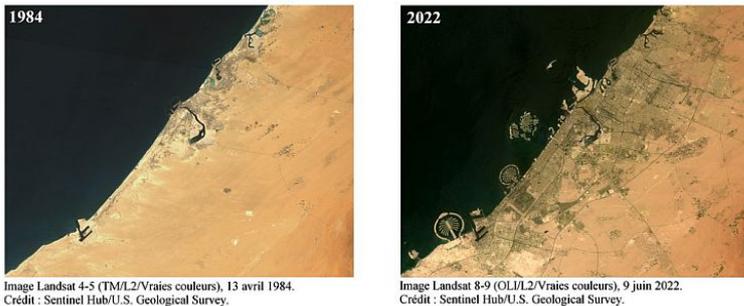
En proposant à la classe de comparer deux (ou plusieurs) images satellite d'un même lieu, acquises à des moments différents dans une étude de documents, l'enseignant a ainsi la possibilité de mettre en évidence les évolutions qui se déroulent à l'échelle du territoire étudié (déforestation, aménagements...) de manière relativement simple. Notons qu'en combinant les données enregistrées par le satellite de télédétection dans un ensemble de bandes spectrales variées, y compris dans l'infrarouge, il est possible d'enrichir les informations géographiques transposées sur l'image satellite dite alors en « fausses couleurs » (les éléments de l'image n'apparaissent plus dans leur coloration habituelle). Cette possibilité est particulièrement intéressante pour distinguer clairement les surfaces végétalisées, les surfaces en eau et les espaces urbanisés grâce à l'infrarouge. Si ce choix peut être déroutant pour les élèves, il donne aussi l'occasion à l'enseignant de les inciter à réfléchir à leur perception des éléments d'un paysage dans un référentiel modifié qui n'en exprime pas moins une vérité du terrain.

Dans le déroulé de l'étude de documents, les élèves sont guidés par des questions pour exploiter au mieux les images. Ils sont alors naturellement invités à comparer les images et à proposer des hypothèses pouvant expliquer les causes (et les effets) des transformations mises en évidence visuellement à l'aide des informations proposées dans des documents complémentaires. Les images satellite servent alors d'accroche efficace pour engager les élèves dans une démarche d'investigation qui va donner du sens à ce qu'ils observent et les amener à saisir les choix politiques à la manœuvre derrière les dynamiques territoriales. L'analyse diachronique mise ainsi en perspective en lien avec la problématique posée appelle les élèves à mobiliser leur esprit critique, à relever l'intérêt d'utiliser des satellites pour surveiller les activités humaines et à interroger les enjeux politiques qui les sous-tendent.

Cela peut aussi être l'occasion de traiter des situations au travers d'approches géopolitiques en invitant les élèves à se saisir de questions qui inscrivent les territoires dans des rivalités de pouvoirs ou d'influence. Les images peuvent ainsi mettre en évidence des événements très actuels et largement médiatisés, à l'exemple de la destruction du barrage de Kakhovka le 6 juin 2023, en Ukraine, dans le contexte du conflit opposant Kiev à Moscou, dont il faut saisir la dimension stratégique mais aussi environnementale, ou bien des phénomènes dont les médias se font moins l'écho comme l'assèchement du lac Hamrine, en Irak, illustration des effets à la fois du dérèglement climatique (chute des précipitations) et des conflits d'usages dans la région (barrages en Iran)¹⁵. Précisons qu'une telle approche peut tout à fait s'intégrer dans l'enseignement de la spécialité histoire-géographie, géopolitique et sciences politiques (HGGSP) instaurée dans le cadre de la réforme du lycée de 2019 et dont les enseignants sont généralement les mêmes que ceux qui sont chargés des cours de géographie.

A titre d'illustration générale, le cas de Dubaï est intéressant. Ville des sables devenue hub majeur de la mondialisation en l'espace de quelques décennies, la métropole émiratie, qui jouit d'un certain succès auprès des élèves grâce à son rayonnement amplifié par nombre d'influenceurs sur les réseaux sociaux, s'est développée et poursuit son extension sur le désert et la mer à portée de capteurs des satellites. Cette métamorphose mise en évidence par l'imagerie spatiale, loin de tenir au hasard, est le résultat d'une stratégie de marque étatique (*state-branding*) assumée par les Emirats Arabes Unis (Soubrier, 2020) qui contribue au *Soft power* du petit Etat du Golfe. Dans une étude de cas consacrée à la place grandissante de Dubaï dans la mondialisation en classe de première, les deux images satellite de 1984 et de 2022 (figure 4) pourraient alors servir de point de départ évocateur à l'analyse d'une expansion urbaine motivée par une quête de puissance sur la scène internationale.

Figure 4. Images satellite montrant l'extension de Dubaï sur le désert et sur la mer entre 1984 et 2022



Les deux images sont accessibles librement en ligne.

L'analyse diachronique à partir d'images satellite présente le double avantage de familiariser les élèves avec l'un des principaux intérêts de l'imagerie spatiale pour faire de la géographie tout en les amenant à développer une approche critique de l'étude des territoires, y compris dans une perspective politique voire géopolitique. Etape élémentaire de valorisation de l'image satellite, elle doit pouvoir se prolonger et se compléter par un travail dans lequel l'image est à la fois le médium central et l'expression visuelle des principales idées mises en avant dans l'étude documentaire préliminaire.

S'approprier l'image satellite : de l'image satellite au croquis

Savoir lire une image satellite et retranscrire dans un langage intelligible (ici le croquis) les informations pertinentes qu'elle met en évidence dans le cadre d'une analyse géographique ou géopolitique sont des compétences importantes pour permettre aux élèves de s'approprier un outil géographique mais plus encore, nous l'avons vu, constitutif d'une formation à la citoyenneté mondiale (Unesco, 2018). A cet égard, cette démarche, en amenant les futurs citoyens à interroger ce que montre l'image et à identifier des paysages caractéristiques à partir d'un travail d'interprétation rigoureux, contribue au développement de l'esprit critique, qualité essentielle dans leur éducation en général (et en géographie en particulier).

Dans le prolongement de l'étude de documents, il paraît donc intéressant d'initier les élèves à la lecture d'une image satellite sous la forme d'un exercice ludique dans lequel un élément de l'image doit être associé à une photographie du paysage auquel il correspond. Afin d'aider chacune et chacun à faire son choix parmi les propositions données, des indices sont glissés dans les commentaires explicatifs qui accompagnent chaque photographie. La démarche présente un avantage dans la manière d'appréhender l'exercice cartographique chez les élèves en cela qu'ils en comprennent le sens et donc plus facilement l'intérêt. Précisons que si la réalisation du croquis peut se faire intégralement à la main ou à partir d'un fond de carte existant, il est particulièrement intéressant de proposer aux élèves de travailler sur un document préparé par le traitement de l'image satellite à interpréter. C'est l'occasion alors d'avoir une approche « métier » en évoquant par exemple la géomatique.

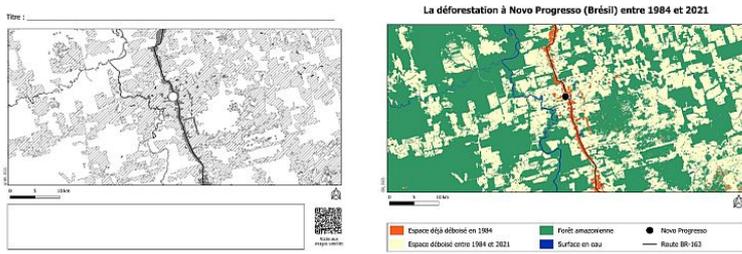
L'intérêt de cette activité est multiple puisqu'elle permet :

- d'entraîner les élèves à repérer des espaces (mer, forêt, ville...) et des infrastructures (aéroports, port, routes...) sur des images satellite, y compris en « fausses couleurs » ;
- de faire le lien entre l'image et le paysage ;
- de mettre en exergue des informations relevées dans l'analyse de documents ;
- de mettre en confiance des élèves en difficulté (en particulier au collège) ;
- de préparer les élèves à la réalisation d'un exercice de cartographie en autonomie.

S'agissant du dernier point, il est vrai que l'étude d'un espace géographique, qui plus est en s'appuyant sur une (ou plusieurs) image(s) qui a fait l'objet d'une analyse mettant en évidence des informations géographiques précises, ne peut faire l'économie d'une production cartographique, exercice par excellence de la géographie scolaire. Là encore, la compétence à travailler est clairement identifiée dans les programmes du collège¹⁶ comme du lycée¹⁷. L'interprétation préalable de l'image satellite avec le support des photographies est une étape pédagogique originale pour amener à réaliser ou à compléter un croquis en classe de géographie. La démarche présente un avantage dans la manière d'appréhender l'exercice cartographique chez les élèves en cela qu'ils en comprennent le sens et donc plus facilement l'intérêt. Précisons que si la réalisation du croquis peut se faire intégralement à la main ou à partir d'un fond de carte existant, il est particulièrement intéressant de proposer aux élèves de travailler sur un document préparé par le traitement de l'image satellite à interpréter. C'est l'occasion alors d'avoir une approche « métier » en évoquant par exemple la géomatique.

Car l'une des forces de l'image satellite ici réside dans sa nature particulière qui donne aux enseignants la possibilité de construire pour la classe des croquis adaptés à leurs besoins dans un système d'information géographique (SIG) sans pour autant nécessiter une expertise très avancée dans le domaine de la cartographie numérique. Il s'agit alors de créer des ressources personnalisées en fonction des thèmes et des exemples étudiés pouvant donner lieu à un exercice cartographique ou à intégrer dans une analyse de document (figure 5). Par exemple, le module d'extension « SCP » du logiciel QGIS permet de réaliser des fonds de croquis à partir du traitement d'une image satellite (classification non supervisée). L'ajout de figurés, si besoin, pouvant se faire sans difficulté avec les options intégrées de QGIS. Toutefois, s'il existe de très nombreux tutoriels pour se former par soi-même, la démarche demande tout de même un investissement personnel pour les enseignants plutôt issu de formation littéraire et pour qui la géomatique n'est pas une évidence.

Figure 5. Croquis diachronique de la déforestation à Novo Progresso (Brésil) entre 1984 et 2021¹⁸



Le fond de croquis et le corrigé ont été réalisés par traitement numérique à partir des images satellite de la figure 1.

Crédit : Gwenaél Régnier.

Parce que l'image satellite est d'abord une image numérique dont les caractéristiques, nous l'avons vu, invitent à ne pas en circonscrire l'utilisation à une simple illustration en classe, elle se prête naturellement à des activités numériques qui permettent aux élèves de mieux s'en approprier le potentiel (bandes spectrales, jeu d'échelles, diachronie...) grâce à des applications développées à cet effet.

Mettre en œuvre des activités numériques autour de l'imagerie spatiale avec la classe

Il existe aujourd'hui des outils en ligne qui permettent de travailler de manière simple et ergonomique avec les images satellite. C'est notamment le cas de l'application numérique Sentinel Hub EO Browser qui permet de trouver des images satellite en libre accès (Sentinel, Landsat) sur une période allant de 1972 à aujourd'hui (la dernière image acquise étant disponible peu après la revisite du satellite), de manipuler les bandes spectrales, de comparer les images dans le temps et de télécharger les données brutes pour un traitement éventuel dans un SIG. Ces nouveaux outils d'exploration de l'espace géographique se distinguent des globes virtuels comme Google Earth ou Geoportail dont le potentiel pédagogique a depuis longtemps été souligné (Genevois, 2007), puisqu'ils présentent l'originalité d'avoir été développés spécifiquement pour valoriser l'imagerie spatiale, en particulier les données satellitaires ouvertes, en proposant d'exploiter ses principales caractéristiques (séries temporelles, jeu d'échelle, combinaisons spectrales, traitement numérique). Plus que des outils de visualisation, ce sont donc des outils d'analyse de données géospatiales. Autre spécificité intéressante : à la faculté d'ubiquité s'ajoute celle d'une forme d'instantanéité qui donne à suivre les phénomènes qui impactent la surface de la planète en tout lieu et à tout moment.

Alors que depuis plusieurs années maintenant les programmes scolaires invitent à « utiliser le numérique » avec la classe, l'application Sentinel Hub EO Browser (mais aussi l'application Copernicus Browser) ouvre des perspectives intéressantes en matière d'utilisation d'un outil numérique dans l'enseignement de la géographie en ce sens qu'il donne à l'analyse géospatiale une forte dimension citoyenne. En pratique, les élèves peuvent ainsi travailler par exemple sur des thèmes du programme aussi variés que les effets du changement global ou la pression sur les ressources naturelles en seconde, l'étalement urbain dans les métropoles du Sud en première (figure 6) et même sur l'analyse géostratégique de l'utilisation des mers et des océans en terminale. L'idée est alors de les familiariser à l'utilisation de l'imagerie spatiale en leur montrant l'intérêt des images satellite pour étudier les territoires dans le cadre de l'enseignement de la géographie, qu'il s'agisse de travailler à l'échelle locale ou non, mais aussi pour appréhender des thèmes de la discipline parfois un peu rugueux selon une approche plus citoyenne (éducation au développement durable, éducation à l'information et aux médias, culture géospatiale). Dans le cadre d'une étude de cas sur l'espace proche, ce type d'activité se prête aussi particulièrement bien à l'organisation d'une sortie terrain.

Figure 6. Une élève de première du lycée Balata (Guyane française) compare deux images satellite de Port-au-Prince avec Sentinel Hub EO Browser pour évaluer l'ampleur de l'étalement urbain de la capitale haïtienne



Crédit : Gwenaél Régnier, 2023.

Du point de vue de la prise en main, l'expérience montre que contrairement aux SIG qui même si on se limite à quelques fonctions spécifiques peuvent rebuter les utilisateurs ne serait-ce déjà que sur la forme, l'application Sentinel Hub EO Browser ne pose pas de difficultés particulières. Ni pour les élèves qui parviennent généralement à travailler sur l'outil de manière autonome en deux à trois séances, au point de préférer l'activité numérique à l'approche plus classique de l'étude de cas. Ni pour les enseignants qui seraient déjà à l'aise avec l'utilisation des outils numériques dans leur pratique pédagogique. Sur ce point, précisons que des formations professionnelles visant à familiariser les enseignants du secondaire à l'utilisation de Sentinel Hub EO Browser dans la classe se mettent progressivement en place (Académie de Guyane, Académie de Nice, Université d'été du CNES). De plus, un grand nombre de tutoriels disponibles sur la toile numérique permet à quiconque le souhaite de se former sans peine.

Rappelons aussi que des initiatives visant à démocratiser l'utilisation des images satellite dans l'enseignement secondaire, en particulier en classe de géographie, ont été portées par le ministère de l'Éducation nationale depuis le milieu des années 1980. L'action de recherche sur l'introduction de la télédétection dans l'enseignement secondaire, privilégiant notamment le traitement informatique d'images spatiales et une approche interdisciplinaire, engagée à l'Institut national de recherche pédagogique (INRP) à partir de 1983 (Armand, 1988) a ainsi contribué à faire officiellement entrer l'imagerie spatiale dans le programme de géographie de seconde de la rentrée 1987-19 (elle en disparaîtra en 2010). Pourtant, malgré le déploiement de formations permettant la prise en main de logiciels développés par l'institution pour exploiter à des fins pédagogiques les données Spot (Titus) puis Pléiades (Terr'Image) distribuées aux enseignants, les images satellite n'ont pas trouvé une place prépondérante dans la discipline. Ce constat peut expliquer le choix de privilégier le commentaire d'images satellite (principalement des images commerciales Pléiades) sur le site Geoimage, mis en place conjointement par l'Éducation nationale et le CNES en 2017 sous l'impulsion de l'Inspection générale d'histoire-géographie, au détriment du traitement de l'image par exemple. Un choix qui interroge tout de même au regard des initiatives passées et du nouveau contexte marqué par une diffusion libre des données satellitaires à l'ère du numérique dont cette approche pratique a cherché à tenir compte.

Conclusion

La démocratisation de l'accès aux images satellite facilite la diffusion d'une source d'information factuelle qui aide à mieux appréhender les enjeux de la planète dans un monde de plus en plus complexe à décrypter, à l'heure où même la parole des scientifiques, sur les questions environnementales notamment, est remise en question. Qu'il s'agisse de sensibiliser les citoyens à l'impact du réchauffement climatique à l'échelle globale comme à l'échelle locale ou qu'elles permettent d'engager des individus dans une « surveillance citoyenne » active, l'image satellite, à l'origine outil du renseignement entouré du plus grand secret, est aujourd'hui devenue un outil-citoyen au service de la transparence.

Néanmoins, l'appropriation de l'imagerie spatiale par les citoyens suppose que les individus aient non seulement conscience de son intérêt social mais aussi qu'ils soient en mesure d'en faire un usage efficace et d'en évaluer les limites. En cela, une éducation à l'utilisation des images satellite doit pouvoir se développer dans l'enseignement secondaire, en particulier dans la classe de géographie, lieu où s'étudient, à grand renfort d'images en tout genre, les interactions entre les sociétés et leurs environnements. La pratique a montré qu'il était possible de valoriser l'imagerie spatiale dans le cadre d'activités pédagogiques relativement simples à préparer et à mettre en œuvre²⁰, y compris dans un format numérique. D'après les résultats d'un questionnaire qui leur a été proposé durant l'année scolaire 2022-2023, la très grande majorité des élèves de lycée engagés dans des activités pédagogiques construites autour des images satellite a non seulement affirmé avoir aimé l'exercice et vouloir renouveler l'expérience durant l'année, mais surtout – et c'est peut-être le plus important – qu'elle en a saisi l'intérêt.

Avec la promesse d'un accès à internet toujours plus rapide via des appareils électroniques toujours plus « intelligents » permettant d'utiliser des applications toujours plus conviviales, il fait peu de doute que les données satellitaires vont continuer à se disséminer largement avec la possibilité d'en extraire et d'en valoriser les informations les plus utiles sans nécessiter de compétences techniques particulières. Le développement d'outil tel que Google Earth Engine²¹ ou plus généralement l'intelligence artificielle, tendent à préparer le terrain à cet avenir déjà proche. Si l'évolution technologique semble prometteuse, elle pourrait néanmoins tendre à ce que l'information visuelle s'efface progressivement au profit de la donnée traitée (données statistiques par exemple), plus exposée à la critique. Plus encore, à mesure que l'intelligence artificielle continue de se développer, il est probable de voir émerger dans un avenir proche des outils sophistiqués capables de créer de fausses images satellites réalistes (Zhao, Zhang, Xu, Sun, Deng, 2021). Ce point soulève évidemment un autre risque : celui que même l'intégrité des images satellite puisse être mise en doute à terme.

Il n'en demeure pas moins que l'image satellite reste aujourd'hui une donnée factuelle, ne serait-ce que parce qu'elle est facilement traçable. Mais il apparaît urgent de cultiver une culture critique des données géospatiales dans un contexte où la société humaine est de plus en plus confrontée à la désinformation et tend à remettre en cause un certain nombre de discours pourtant validés par la science. De ce point de vue, l'enseignement secondaire a un rôle majeur à jouer.

Bibliographie

ARMAND, M., 1988, « L'image spatiale comme support pédagogique dans l'enseignement secondaire », *Revue de géographie de Lyon*, n° 2-3, p. 30-36.

BADOUARD, R., 2017, « Open government, open data : l'empowerment citoyen en question », in *Ouvrir, partager, réutiliser : Regards critiques sur les données numériques* [en ligne], Paris, Maison des sciences de l'homme, <http://books.openedition.org/editionsmslh9067> [consulté le 12 décembre 2023]

BERKOWITZ, B., SUK, M., 2018, *The National Reconnaissance Office At 50 Years: A Brief History*, Chantilly, Virginia, National Reconnaissance Office, Chantilly, Center for the Study of National Reconnaissance.

CERVILLE, B., 1989, *Spot, des yeux braqués sur la Terre*, Paris, Presses du CNRS.

CLINTON, W. J., 1994, « U.S. Policy on Foreign Access to Remote Sensing Space Capabilities », *Presidential Directive*, vol. 23, p. 7.

DRAEGER, W. C., HOLM, T. M., LAUER, D. T., THOMPSON, R. J., 1997, « The Availability of Landsat Data: Past, Present, and Future », *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63, n° 7, p. 869-875.

ESTIVAL, S., HIRLIMAN, A., VAUZELLE, M., 1985, « Télé-détection numérique et enseignement secondaire », *Bulletin de l'EPI*, n° 38, p. 40-53.

GENEVOIS, S., 2007, « NASA Worldwind, Google Earth, Géoportail à l'école : un monde à portée de clic ? », *Mappemonde* [En ligne], <https://mappemonde-archivage.mgm.fr/num13/interne/int07101.html> [consulté le 7 juillet 2023]

GOETA, S., MABI, C., 2014, « L'open data peut-il (encore) servir les citoyens ? », *Mouvements*, vol. 79, n° 3, p. 81-91.

HARRIS, R., KRAWEC, R., 1993, « Earth observation data pricing policy », *Space Policy*, vol. 9, n° 4, p. 299-318.

JOFFE, H., 2007, « Le pouvoir de l'image : persuasion, émotion et identification », *Diogenes*, vol. 217, n° 1, p. 102-115.

MACK, P. E., WILLIAMSON, R. A., 1998, « Observing the Earth from Space », in J. M. Logsdon (Éd.), *Exploring the Unknown: Selected Documents in the History of the U.S. Civil Space Program*, Vol.III: Using Space, Washington DC, Nasa.

REGNAULD, H., 2015, « L'image et la géographie : la progressive élaboration d'un nouveau régime épistémique », *L'Information géographique*, vol. 79, n° 4, p. 8-12.

RUFFNER, K. (Éd.), 1995, *CORONA: America's First Satellite Program*, Washington DC, Center for the Study of Intelligence.

SOUBRIER, E., 2020, « Les Émirats arabes unis à la conquête du monde ? », *Politique étrangère*, vol. Printemps, n° 1, p. 57-66.

SOURBES-VERGER, I., 2002, « Mythes et réalités de l'espace militaire », *Hermès*, vol. 34, n° 2, p. 169-182.

SOURBES-VERGER, I., 2014, « Repères, généalogie de l'observation de la Terre depuis l'espace », in *Observer la Terre depuis l'espace : enjeux des données spatiales pour la société*, Paris, Dunod, p. 27-65.

UNESCO, 2018, « Éducation à la citoyenneté mondiale », [En ligne] <https://www.unesco.org/fr/global-citizenship-peace-education> [consulté le 7 juillet 2023]

VAUZELLE, M., 1988, « L'imagerie de télé-détection : méthodologie de traitement en géographie », *Revue de géographie de Lyon*, vol. 63, n° 2-3, p. 37-45.

VERGER, F., 1984, « La télé-détection spatiale, outil géographique », *Espace géographique*, vol. 13, n° 3, p. 169-172.

WILLIAMSON, R. A., BAKER, J. C., 2004, « Current US remote sensing policies: opportunities and challenges », *Space Policy*, vol. 20, n° 2, p. 109-116.

WULDER, M. A., ROY, D. P., RADELOFF, V. C., LOVELAND, T. R., ANDERSON, M. C., JOHNSON, D. M., et al., 2022, « Fifty years of Landsat science and impacts », *Remote Sensing of Environment* [En ligne], vol. 280, p. 113195, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425722003054> [consulté le 7 juillet 2023]

ZHAO, B., ZHANG, S., XU, C., SUN, Y., DENG, C., 2021, « Deep fake geography? When geospatial data encounter Artificial Intelligence », *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 48, n° 4, p. 338-352.

ZHU, Z., WULDER, M. A., ROY, D. P., WOODCOCK, C. E., HANSEN, M. C., RADELOFF, V. C., et al., 2019, « Benefits of the free and open Landsat data policy », *Remote Sensing of Environment*, vol. 224, p. 382-385.

Sitographie

Geoimage : <https://geoimage.cnes.fr/fr/>

Google Earth Pro : <https://www.google.com/intl/fr/earth/versions/>

IMGSat : <https://www.satellite.grweb.fr/>

Sentinel Hub EO Browser : <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>

Spot World Heritage : <https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60>

Notes

1 Geoimage est un site institutionnel qui propose des images satellite accompagnées d'un dossier scientifique. Il est né de la collaboration de l'agence spatiale française (CNES) et du ministère de l'Éducation nationale. Il est accessible à cette adresse : <https://geoimage.cnes.fr/fr/>

2 Satellite Imaging Corporation (site web) : <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos/>

3 Bureau des affaires réglementaires en matière de télé-détection commerciale (NOAA) : <https://www.nesdis.noaa.gov/about/our-offices/commercial-remote-sensing-regulatory-affairs> [consulté le 28 mai 2023]

4 Le site web Google Earth en 2005 : <https://web.archive.org/web/20050629100622/http://earth.google.com/>

5 Pour l'accès aux archives Spot via SWH : <https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60>

6 Les données ouvertes de Maxar sont accessibles sur : <https://www.maxar.com/open-data>

7 Pour participer au programme à but non lucratif de Planet : <https://www.planet.com/nonprofit/>

8 Le lien vers l'application Sentinel Hub EO Browser : <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>

9 Les données brutes sont les données qui n'ont pas été traitées en vue d'en améliorer le rendu visuel ou de fournir un produit à valeur ajoutée.

10 Il existe même des sites internet qui permettent de suivre les trajets des véhicules spatiaux en temps réel.

11 Il existe une grande variété de capteurs pour observer le globe. Certains capteurs permettent d'identifier des éléments très fins du paysage (très haute résolution spatiale) tandis que d'autres peuvent distinguer d'étroites bandes spectrales (haute résolution spectrale). Contrairement à l'imagerie optique, l'imagerie radar permet de réaliser des observations quelles que soient les conditions climatiques.

12 « Accusé par Bolsonaro d'exagérer l'ampleur de la déforestation, il est limogé », *Le Point* [en ligne], 2 août 2019. Accessible sur : https://www.lepoint.fr/monde/accuse-par-bolsonaro-d-exagerer-l-ampleur-de-la-deforestation-il-est-limoge-02-08-2019-2328142_24.php [Consulté le 25 mai 2023]

13 Sicard Stéphane, « Ukraine : Des images satellites montrent le déploiement militaire pro-russe le plus important depuis la Guerre froide », *L'Indépendant* [en ligne], 6 février 2022. Accessible sur : <https://www.lindpendant.fr/2022/02/06/ukraine-des-images-satellites-montrent-le-deploiement-militaire-pro-russe-le-plus-important-depuis-la-guerre-froide-10092659.php> [Consulté le 25 mai 2023]

14 Compétence « Analyser et comprendre un document » (B.O. spécial n° 11 du 26 novembre 2015) au collège et capacité « Savoir lire, comprendre et apprécier une carte, un croquis, un document iconographique, une série statistique... » (B.O. spécial n° 1 du 22 janvier 2019 et B.O. spécial n° 8 du 25 juillet 2019) au lycée.

15 S'agissant du lac Hamrine, quelques ressources utiles pour la classe sont accessibles sur le site IMGSat : <https://www.satellite.grweb.fr/img-le-lac-hamrine-sous-pression> [consulté le 7 juillet 2023]

16 Compétence « Réaliser des productions graphiques et cartographiques », B.O. spécial n° 11 du 26 novembre 2015.

17 Capacité « Réaliser des productions cartographiques dans le cadre d'une analyse », B.O. spécial n° 1 du 22 janvier 2019 et B.O. spécial n° 8 du 25 juillet 2019.

18 Les activités complètes sur Novo Progresso pour le collège et le lycée sont disponibles ici : <https://www.satellite.grweb.fr/la-deforestation-a-novo-progresso-bresil/> [consulté le 7 juillet 2023]

19 B.O. spécial n° 3 du 9 juillet 1987, p.16-17.

20 L'ensemble des activités pédagogiques construites autour des images satellite et mises en œuvre en classe est disponible sur le site IMGSat à cette adresse : <https://www.satellite.grweb.fr/activites-pedagogiques/>

21 Google Earth Engine est accessible sur : <https://earthengine.google.com/>

Résumés

Ces dernières années, la diffusion massive d'images satellite pour documenter des catastrophes (incendies dévastateurs au Canada, tremblement de terre en Turquie) ou des conflits (guerre en Ukraine) sur les réseaux

sociaux et dans les médias, montre un tournant dans l'utilisation d'une source d'information longtemps circonscrite au renseignement ou à un usage professionnel spécifique en raison de son intérêt stratégique ou de son coût. Depuis le milieu des années 2000, la « révolution numérique » et avec elle Google Earth puis l'*open data* ont changé la donne. Cet article cherche à montrer comment cette démocratisation de l'accès aux images satellite peut contribuer à une meilleure prise de conscience des enjeux environnementaux mais aussi à une forme d'*empowerment* citoyen, compris ici comme la capacité donnée aux individus de pouvoir mieux s'informer en faveur d'une plus grande transparence, dans un monde bousculé par l'urgence climatique et la désinformation croissante. Il défend l'idée que l'image satellite peut être identifiée à un « outil-citoyen » et il s'appuie sur une recherche-action pour proposer une méthode visant à favoriser une éducation à l'imagerie spatiale dans l'enseignement secondaire, préalable à une appropriation citoyenne de l'outil. Après avoir rappelé les grandes étapes qui ont mené à la démocratisation de l'accès aux images satellites, il s'agira d'expliquer en quoi l'image satellite est un outil-citoyen qui permet d'appréhender les grands enjeux sociétaux d'aujourd'hui puis de voir comment une « éducation à l'imagerie spatiale » peut être mise en œuvre de manière pratique dans la classe de géographie en France. Alors que les pistes pédagogiques proposées à la lumière d'une recherche-action tendent à montrer que l'image satellite permet d'engager favorablement les élèves à développer des compétences aussi bien géographiques que transversales, l'article appelle à réfléchir à la place de l'image satellite dans l'enseignement secondaire en France dans une perspective citoyenne qui prolonge le cadre disciplinaire sur lequel il s'appuie (ici la géographie).

In recent years, the massive dissemination of satellite images to document disasters (such as devastating fires in Canada, earthquake in Turkey) or conflicts (like the war in Ukraine) through various medias, shows a turning point in the use of a source of information long restricted to intelligence or a specific professional use because of its strategic interest or its cost. Since the mid-2000s, the "digital revolution" and with it Google Earth and then open data have changed the situation. This article seeks to show how this democratization of access to satellite images can contribute to a better awareness of environmental issues but also to a form of citizen empowerment, understood here as the ability given to individuals to be able to better inform themselves in favour of greater transparency, in a world shaken by the climate emergency and growing spread of fake news. It defends the idea that the satellite image can be related to a "citizen-tool" and relies on action-research to propose a method aimed at promoting education in space imagery in secondary education, prior to an appropriation of the tool by the citizen. After recalling the main steps that led to the democratization of access to satellite images, it will focus on explaining how the satellite image is a citizen-tool that makes it possible to understand the today's major societal issues and then it will show how an "education in spatial imagery" can be implemented in a practical way in the teaching of geography. While the pedagogical paths proposed in the light of action research tend to show that the satellite image makes it possible to favourably engage students in developing both geographical and transversal skills, the article calls for questioning the place of the satellite image in secondary education in France from a citizen perspective that extends the disciplinary framework on which it relies (here geography).

Index

Mots-clés : images satellite, citoyenneté, environnement, surveillance, transparence, éducation, géographie

Keywords : satellite images, citizenship, environment, monitoring, transparency, education, geography

Auteur

Gwenaél Régnier

Professeur d'histoire-géographie dans l'académie de Guyane – Doctorant en Histoire des sciences, des techniques et des savoirs à l'EHESS

gwenael.regnier@ehess.fr

Enjeux socio-économiques et géopolitiques des observations depuis l'espace du sondeur atmosphérique IASI

The socio-economic and geopolitical implications of space-based observations of the IASI atmospheric sounder

Camille Viatte

Introduction : l'instrument satellitaire IASI

IASI est un Interféromètre Atmosphérique de Sondage dans l'Infrarouge¹ dédié à la météorologie opérationnelle² et la surveillance de la chimie atmosphérique et du climat³. C'est un instrument conçu par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et embarqué à bord de 3 satellites EUMETSAT de la série Metop. EUMETSAT est l'agence européenne de surveillance par satellite de la météorologie, du climat et de l'environnement depuis l'espace. Un premier instrument IASI a été lancé en 2006 à bord de Metop-A, puis un deuxième en 2012 à bord de Metop-B et un troisième a été lancé en 2018 à bord de Metop-C (Figure 1a). Les instruments IASI gravitent autour de la terre avec une orbite héliosynchrone à 817 km d'altitude pour réaliser des mesures de l'atmosphère partout dans le monde avec 14 orbites en une journée et un passage à 9h30 du matin et un vers 21h30 environ. Grâce à un balayage transversal toutes les 8 secondes de 48° par rapport à la trace du satellite, IASI a un champ de vision instantané d'environ 50 km x 50 km au nadir réalisé par une matrice de 2 x 2 pixels. Chaque pixel correspond à une empreinte au sol d'environ 12 km de diamètre au nadir (Figure 1b), ce qui est plus petit que les 14 km de son homologue américain AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) lancé en 2002 à bord du satellite Aqua.

Figure 1a. Orbites des 3 instruments IASI embarqués à bord de la série Metop

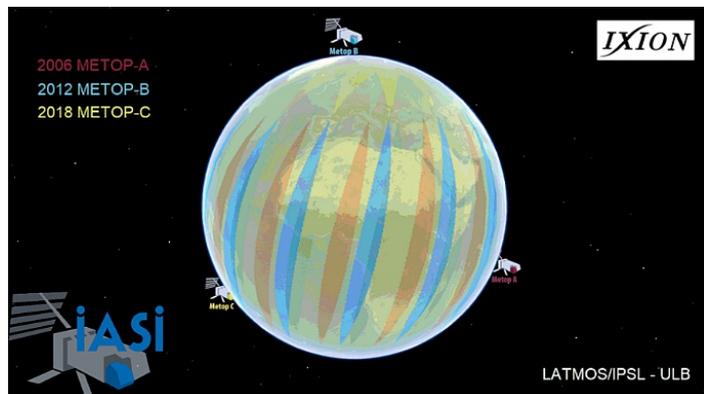
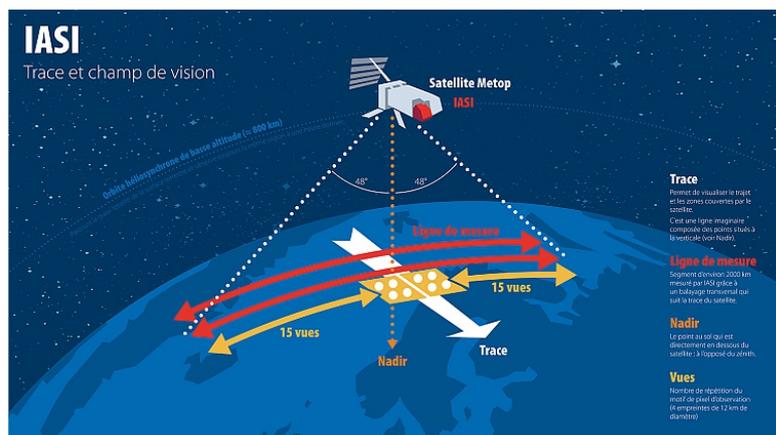


Figure 1b. Trace et champs de vision de IASI. crédit Gaëlle Katchourine



Les instruments IASI ont été conçus, à l'origine, pour restituer les paramètres météorologiques de l'atmosphère avec une précision inégalée : précision relative de 10 % pour l'humidité relative et avec une précision absolue de 1 Kelvin (K) pour la température avec une résolution verticale de 1 km. Il a été établi que IASI est le meilleur sondeur météorologique jamais développé. Grâce à la grande stabilité des radiances de IASI sur le long terme, il est devenu l'instrument de référence dans le système mondial d'inter-étalonnage des instruments satellitaires⁴ (Global Space-based Inter-Calibration System – GSICS). IASI mesure l'atmosphère partout dans le monde en une journée, ce qui constitue un grand jeu de données globales ; tandis que les stations sol et radiosondage vont fournir des mesures précises mais en quelques points du globe seulement. C'est pour cela que les données IASI représentent la principale source d'information pour élaborer les prévisions météorologiques en permettant d'affiner la localisation des zones pluvieuses et de mieux anticiper l'évolution des tempêtes, par exemple⁵.

Plus tard, les scientifiques se sont rendu compte qu'il était également possible de resituer la composition chimique de l'atmosphère à partir de ces observations. En effet, IASI permet de mesurer les concentrations atmosphériques de plus de 33 espèces chimiques impliquées dans les phénomènes de pollution et dans le changement climatique. On peut ainsi observer les concentrations des gaz émis par les industries, le trafic routier, l'agriculture, les volcans, et les feux de biomasses, entre autres.

La Terre émet naturellement du rayonnement infrarouge qui est modifié par l'absorption ou la diffusion des molécules et des particules présentes dans l'atmosphère. IASI mesure ce rayonnement infrarouge modifié sous forme de spectres. Chaque molécule présente dans l'atmosphère possède une signature spectrale spécifique résultant des transitions rotation-vibration lors de l'interaction rayonnement-matière. Dans ces spectres, chaque gaz a donc une signature propre : il absorbe toujours l'énergie de la même manière et est toujours à la même place dans le spectre, c'est comme leur empreinte digitale. Ces raies d'absorption peuvent être analysées pour en déduire la concentration du gaz présent dans l'atmosphère à l'instant de la mesure. Chaque instrument IASI réalise plus de 1 million de spectres soit 15 GB de données par jour.

IASI fournit des informations en quasi temps réel (moins de 3 heures après le passage du satellite), avec une excellente couverture géographique et avec une résolution spatiale assez bonne (12 km). Ces observations sont utilisées par les scientifiques pour étudier les concentrations et les variabilités de diverses molécules atmosphériques impliquées à la fois dans les phénomènes de pollution et dans le changement climatique. Les scientifiques qui suivent ces données en temps réel peuvent donc donner des alertes en cas d'évènement extrême.

Les observations IASI (cartes et données) sont fournies au lendemain de la mesure, et sont accessibles à tous publiquement via le site de AERIS⁶.

Cet article se concentre sur les applications concrètes des observations IASI, notamment en termes de suivi d'éruptions volcaniques, de surveillance de l'ammoniac dans l'atmosphère, et d'évènements extrêmes comme les vagues de froid ou les feux de forêts associés aux vagues de chaleur.

Suivi des éruptions volcaniques

Les volcans constituent une source importante de dioxyde de soufre (SO_2) et de cendres dans l'atmosphère. Les fines particules de cendres émises lors des éruptions sont susceptibles d'endommager les moteurs et l'électronique des avions et de réduire la visibilité des pilotes^{7,8}. L'instrument satellitaire IASI mesure les concentrations de SO_2 ainsi que les cendres dans les fumées des volcans afin de permettre une alerte rapide aux avions qui sont amenés à croiser les panaches. Environ 60 des 550 volcans actifs entrent en éruption chaque année⁹. Les éruptions explosives qui injectent des aérosols dans la stratosphère, où ils stationnent longtemps, font plusieurs tours de la Terre et induisent rapidement (quelques semaines) une distribution planétaire.

Figure 2. Suivi des panaches de SO_2 issues d'éruptions volcaniques



Crédit Maya George et Lieven Clarisse.

La figure 2 montre deux exemples de panaches des éruptions volcaniques majeures qui ont eu lieu en août 2008 et en juin 2011 à différents endroits (Kasatoshi aux Etats-Unis, Puhehue au Chili, et Nabro en Erythrée) et qui ont pu être cartographiés grâce aux mesures de IASI. Avec son passage deux fois par jour au même endroit, il est possible de visualiser en quasi temps réel l'évolution spatio-temporelle des panaches volcaniques qui peuvent parfois être transportés loin de leurs zones géographiques d'origine.

En avril 2010, le volcan islandais Eyjafjallajökull entre en éruption et cloue au sol un grand nombre de vols en Europe. Le suivi des déplacements du nuage de SO₂ et de cendres a permis de délimiter les zones à risque pour l'aviation. Par conséquent, le Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS)¹⁰, en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles (ULB), a développé des outils pour exploiter les radiances de IASI dans le but de surveiller les activités volcaniques aussi bien de jour que de nuit, et ainsi assurer le suivi temporel des panaches volcaniques tout autour du globe. Le but étant de mettre en place un système d'alerte rapide afin de réduire les risques induits par ces panaches pour l'aviation (dommages sur les moteurs et les équipements de l'avion, et réduction de la visibilité pour les pilotes).

Lorsqu'il y a une signature significative de SO₂ dans les spectres de IASI qui s'apparente à une éruption, une alerte comprenant les informations nécessaires (latitude, longitude, et heure de la mesure) est automatiquement envoyée. Ces alertes sont transmises aux Centres d'information sur les cendres volcaniques (VAAC - Volcanic Ash Advisory Centers), de Toulouse et à celui de Londres¹¹. Ces centres sont intégrés à l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI)¹² qui établit la faisabilité des vols. Ces alertes sont répertoriées et disponibles publiquement sur le site Web de l'Université libre de Bruxelles (ULB)¹³.

Cependant, les éruptions volcaniques peuvent entraîner des conséquences non seulement pour la sécurité aérienne, mais l'exposition à cette pollution atmosphérique peut avoir aussi des effets néfastes sur la santé respiratoire et cardiovasculaire, ainsi que d'autres effets tels que l'irritation oculaire et cutanée¹⁴. Les panaches volcaniques peuvent imposer des évacuations et des confinements de populations à cause de la toxicité des gaz émanant comme en décembre 2021 aux Canaries lors de l'éruption longue du volcan Cumbre Vieja.

La surveillance continue et automatique des panaches volcaniques par les observations satellitaires constitue une application déterminante pour la sécurité aérienne et les enjeux sanitaires.

Surveillance de l'ammoniac dans l'atmosphère

L'ammoniac est un polluant principalement émit par le secteur agricole. Il est également un précurseur mal connu de particules fines, nocives pour la santé humaine¹⁵. Ce gaz contribue également aux changements climatiques, à l'acidification et l'eutrophisation des écosystèmes, en retombant au sol avec la pluie. Cependant c'est un gaz difficile à mesurer et les observations sont encore peu nombreuses actuellement.

Grace aux mesures de IASI, les sources d'émissions locales d'ammoniac ont pu être cartographiées pour la première fois depuis l'espace¹⁶. En tout, 240 sources locales réparties dans 170 régions ont été identifiées à travers le monde. Les émissions d'ammoniac calculées à partir des observations satellitaires de IASI ont été comparées avec celles issues des inventaires d'émission. Ces travaux ont montré que les émissions provenant de ces sources étaient considérablement sous-estimées dans les inventaires actuels, et que deux tiers des sources ponctuelles identifiées par les observations IASI étant totalement absentes des inventaires. Cela montre qu'il est nécessaire de réévaluer les inventaires d'émissions d'ammoniac avec les mesures satellitaires disponibles pour contribuer à une meilleure évaluation des impacts environnementaux et atmosphériques et à la mise en place de stratégies efficaces de réduction des émissions de ce polluant.

Les mesures d'ammoniac de IASI peuvent également mettre en évidence des changements des sources locales dues à une modification de l'usage des sols, provoquée, par exemple, par le déplacement des populations lors de conflits, comme dans le cas de la guerre en Syrie¹⁷. La guerre civile syrienne a débuté en mars 2011 et a provoqué des bouleversements sociaux, politiques, économiques et environnementaux sur l'ensemble du pays. L'agriculture a été massivement touchée, ce qui a également affecté directement l'économie du pays. La crise a provoqué un déplacement massif de 13,2 millions de personnes à l'intérieur de la Syrie et vers d'autres pays. Naturellement, cela a entraîné des changements dans l'utilisation des terres, l'abandon ou l'expansion des terres cultivées et un effet direct sur les activités industrielles liées à l'agriculture, comme la production des engrais azotés.

Les observations satellitaires d'ammoniac de IASI ont permis d'examiner les changements survenus dans la région pendant le conflit. En outre, les effets de la guerre sur la variabilité habituelle de l'ammoniac dans l'atmosphère ont été évalués. Alors que le conflit est responsable de la réduction drastique des émissions d'ammoniac de certaines usines de production d'engrais, il est également responsable d'une augmentation des concentrations d'ammoniac dans le nord-est de la Syrie. En effet, la présence de l'État Islamique dans cette région entre 2013 et 2015 a modifié les pratiques agricoles et a contraint les agriculteurs à intensifier l'exploitation de leurs terres.

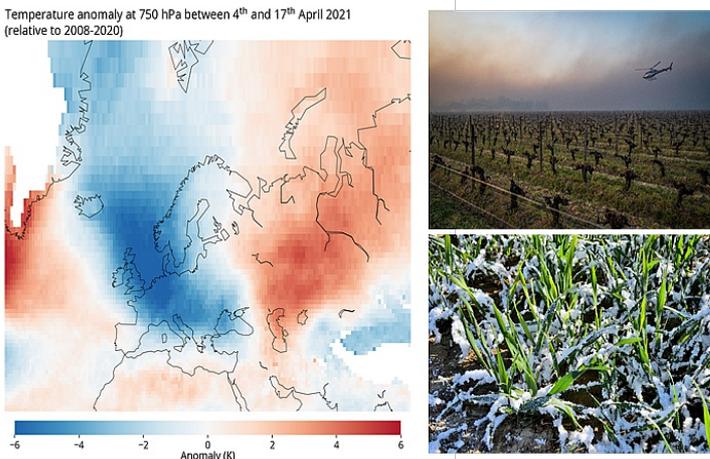
Les données d'ammoniac acquises depuis l'espace peuvent aider non seulement à la surveillance, mais aussi à l'évaluation des changements socio-écologiques à différentes échelles comme l'illustre ce dramatique épisode de mutation de l'espace politique.

Vagues de froid, canicules, et épisodes de feux associés

Les mesures satellitaires de IASI permettent de suivre depuis l'espace à la fois l'évolution des températures atmosphériques et les épisodes de feux qui ravagent des régions entières. D'après le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), le réchauffement climatique mène à l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des événements extrêmes¹⁸. La détection d'événements extrêmes, comme les vagues de froid, les canicules et les épisodes de feu associés est cruciale pour évaluer et appréhender les impacts du changement climatique sur notre environnement.

En 2021, une vague de froid est apparue tardivement en avril en Europe de l'Ouest, ce qui a engendré beaucoup de dégâts, notamment dans le domaine de l'agriculture où la plupart des bourgeons déjà écloés ont été brûlés par le gel. Cet épisode a été reconnu « calamité agricole » par le ministère de l'Agriculture en France. En effet, les agriculteurs et viticulteurs ont dû mettre en place des actions fortes (feux, canons à chaleur, hélicoptères) afin de lutter contre cet épisode de gel d'avril le plus froid depuis 1947 (Figure 3). On voit sur cette figure qu'en Europe de l'Ouest et en Europe centrale, les températures enregistrées par IASI à cette période étaient 6 degrés plus basses comparativement à la même période moyennée entre 2008-2020. En revanche, en Europe de l'Est, les températures étaient supérieures de 3 ou 4 degrés par rapport aux années précédentes.

Figure 3. Anomalie de température observée par IASI à 750 hPa (environ 3 km d'altitude) en Europe entre le 4 et le 17 avril 2021, par rapport à la moyenne 2008-2020

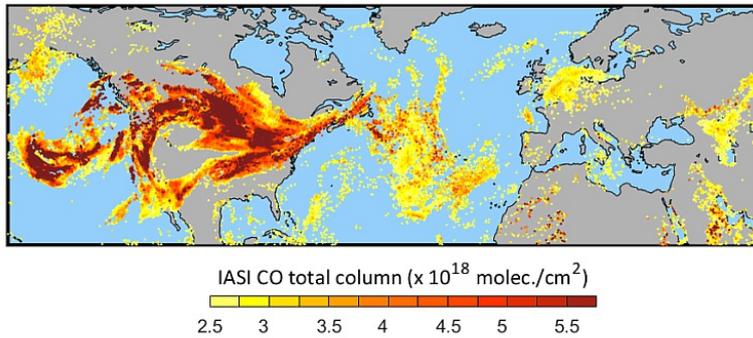


Credit Marie Bouillon.

La canicule survenue en août 2020 a engendré des feux intenses qui ont ravagé plus de 3 000 kilomètres carrés de terre en Californie. Grace à IASI, on peut mesurer les concentrations de monoxyde de carbone (CO) qui est un bon traceur de feu et qui permet de suivre les fumées des feux tout autour du globe. La Figure 4 montre les concentrations de monoxyde de carbone (CO) mesurées le 14 septembre 2020 à partir desquelles nous pouvons déterminer les démarrages des feux en Californie et le transport des panaches de fumée au-dessus des Etats-Unis et même de l'océan Atlantique. La détérioration de la [qualité de l'air](#) due aux incendies en Californie a provoqué la mort directe de 3 000 personnes.

Figure 4. Concentrations de monoxyde de carbone (CO) issues des observations de IASI le 14 septembre 2020 lors des incendies de Californie

CO 2020 09 14 day+night



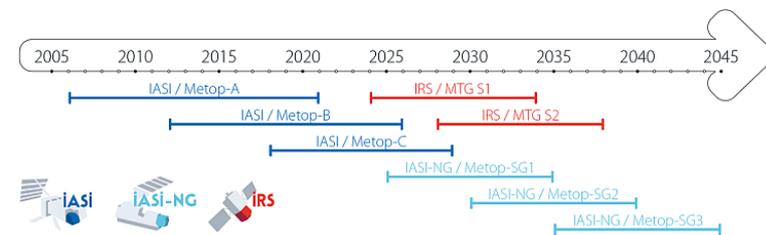
Crédit Maya Georges.

Conclusions et perspective

Les satellites ont apporté une contribution déterminante pour la surveillance des événements extrêmes. La mission IASI, qui perdure depuis 2006, permet de surveiller les paramètres météorologiques, ainsi que la composition chimique de l'atmosphère tout autour de la Terre. Avec l'analyse des variabilités spatio-temporelles des 33 gaz et aérosols observés avec IASI, la constitution de longues séries temporelles de plusieurs variables climatiques essentielles (températures, humidité,...) et de polluants permet de quantifier la pollution atmosphérique et d'étudier le changement climatique.

Des applications directes existent dans le domaine socio-économique telles que la détection automatique de panache volcaniques, le suivi des fumées de feux, la surveillance d'événements extrêmes et l'évaluation des inventaires d'émissions. L'analyse des mesures de IASI en quasi temps réel permet de fournir des informations utiles aux politiques publiques afin d'éviter les dangers des éruptions volcaniques pour l'aviation civile, d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'occurrence et l'intensité des événements extrêmes, d'évaluer l'impact des changements de l'usage des sols sur les émissions de polluants, et de mettre en place des réglementations efficaces de réductions d'émissions de polluants.

Figure 5. Calendrier des missions satellitaires IASI, IASI-NG, et IRS entre 2005 et 2045



Crédit Gaëlle Katchourine

La continuité de la mission IASI est assurée avec les instruments IASI-Nouvelle Génération (IASI-NG) et IRS (InfraRed Sounder) dont les lancements sont prévus à partir de 2024 sur les satellites Metop de deuxième génération (METOP-SG) et Météosat troisième génération (MTG) (Figure 5). Ses instruments auront une résolution spectrale plus fine (divisée par deux pour IASI-NG par rapport à IASI), un excellent rapport signal sur bruit (facteur deux pour IASI-NG par rapport à IASI), et d'une meilleure résolution spatio-temporelle de IRS (mesures toutes les 30 minutes au-dessus de l'Europe pour IRS au lieu de deux fois par jour pour IASI, avec un pixel de 4 km x 4 km pour IRS au lieu de 12 km pour IASI). L'analyse des mesures de ces sondeurs produira plus de 40 ans d'observations homogènes de l'atmosphère, ce qui permettra d'enrichir les recherches scientifiques et de développer davantage les applications concrètes des observations satellitaires sur les enjeux socio-économiques.

Bibliographie

- Blumstein, B., et al.: IASI instrument: technical overview and measured performances, Proc. SPIE 5543, Infrared Spaceborne Remote Sensing XII, <https://doi.org/10.1117/12.560907>, 2004.
- Coopmann, O., et al.: Update of Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) channel selection with correlated observation errors for numerical weather prediction (NWP), Atmos. Meas. Tech., 13, 2659–2680, <https://doi.org/10.5194/amt-13-2659-2020>, 2020.
- Clerbaux, C., et al.: Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, Atmos. Chem. Phys., 9, 6041–6054, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>, 2009.
- Hewison, T. J., Wu, X., Yu, F., Tahara, Y., Hu, X., Kim, D., & Koenig, M. (2013). GSICS inter-calibration of infrared channels of geostationary imagers using Metop/IASI. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(3), 1160–1170. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2013.2238544>
- Guidard, V., Fourrié, N., Brousseau, P. and Rabier, F. (2011), Impact of IASI assimilation at global and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes. Q.J.R. Meteorol. Soc., 137 : 1975-1987. <https://doi.org/10.1002/qj.928>
- <https://iasi.aeris-data.fr>
- RMET F. : « 14 au 21 avril 2010 : fermeture de l'espace aérien européen », Outre-Terre, 2013/1-2 (n° 35-36), p. 61-76. DOI : <https://doi.org/10.3917/oute.035.0061>. URL : <https://www.caim.info/revue-outre-terre4-2013-1-page-61.htm>
- Chen, W. R. and Zhao, L. R.: Review – Volcanic Ash and its Influence on Aircraft Engine Components, Procedia Eng., 99, 795–803, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.604>, 2015.
- Schmincke, HU. (2004). Volcanic Hazards, Volcanic Catastrophes, and Disaster Mitigation. In: Volcanism. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18952-4_13
- LATMOS (UMR 8190 CNRS/UVSQ/Sorbonne Université) <https://www.latmos.ipsl.fr/index.php/fr/>
- Site du VAAC Toulouse : <http://vaac.meteo.fr>
- https://www.icao.int/about-icao/pages/fr/foundation-of-icao_fr.aspx
- <http://cpm-ws4.ulb.ac.be/Alerts/index.php>
- Stewart, C., Damby, D.E., Horwell, C.J. et al. Volcanic air pollution and human health: recent advances and future directions. Bull Volcanol 84, 11, <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01513-9>, 2022.
- Sutton, M. A., Oenema, O., Erisman, J. W., Leip, A., Grinsven, H., & Winiwarer, W.: Too much of a good thing. Nature, 472 (7342), 159–161. <https://doi.org/10.1038/472159a>, 2011.
- Van Damme, M., Clarisse, L., Whitburn, S., Hadji-Lazaro, J., Hurtmans, D., Clerbaux, C. and Coheur, P.-F.: Industrial and agricultural ammonia point sources exposed, Nature, 564(7734), 99–103, doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0747-1>, 2018.
- Rimal Abeer, Cathy Clerbaux, Lieven Clarisse, Martin van Damme, Pierre-François Coheur, et al., A space view of agricultural and industrial changes during the Syrian civil war. Elementa: Science of the Anthropocene, 2021, 9 (1), pp.0043. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.000041>. insu-0349427
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.

Notes

- 1 Blumstein, B., et al.: IASI instrument : technical overview and measured performances, Proc. SPIE 5543, Infrared Spaceborne Remote Sensing XII, <https://doi.org/10.1117/12.560907>, 2004.
- 2 Coopmann, O., et al.: Update of Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) channel selection with correlated observation errors for numerical weather prediction (NWP), Atmos. Meas. Tech., 13, 2659–2680, <https://doi.org/10.5194/amt-13-2659-2020>, 2020.
- 3 Clerbaux, C., et al.: Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, Atmos. Chem. Phys., 9, 6041–6054, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>, 2009.
- 4 Hewison, T. J., Wu, X., Yu, F., Tahara, Y., Hu, X., Kim, D., & Koenig, M. (2013). GSICS inter-calibration of infrared channels of geostationary imagers using Metop/IASI. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(3), 1160–1170. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2013.2238544>

5 Guidard, V., Fourrié, N., Brousseau, P. and Rabier, F. (2011), Impact of IASI assimilation at global and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137 : 1975-1987. <https://doi.org/10.1002/qj.928>

6 <https://iasi.aeris-data.fr>

7 RIVET F. : « 14 au 21 avril 2010 : fermeture de l'espace aérien européen », *Outre-Terre*, 2013/1-2 (n° 35-36), p. 61-76. DOI : <https://doi.org/10.3917/oute.035.0061>. URL : <https://www.caim.info/revue-outre-terre4-2013-1-page-61.htm>

8 Chen, W. R. and Zhao, L. R.: Review – Volcanic Ash and its Influence on Aircraft Engine Components, *Procedia Eng.*, 99, 795–803, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.604>, 2015.

9 Schmincke, HU. (2004). Volcanic Hazards, Volcanic Catastrophes, and Disaster Mitigation. In: *Volcanism*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18952-4_13

10 LATMOS (UMR 8190 CNRS/UVSQ/Sorbonne Université) <https://www.latmos.ipsl.fr/index.php/fr/>

11 Site du VAAC Toulouse : <http://vaac.meteo.fr>

12 https://www.icao.int/about-icao/pages/fr/foundation-of-icao_fr.aspx

13 <http://cpm-ws4.ulb.ac.be/Alerts/index.php>.

14 Stewart, C., Damby, D.E., Horwell, C.J. *et al.* Volcanic air pollution and human health: recent advances and future directions. *Bull Volcanol* 84, 11, <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01513-9>, 2022.

15 Sutton, M. A., Oenema, O., Erisman, J. W., Leip, A., Grinsven, H., & Winwarter, W.: Too much of a good thing. *Nature*, 472 (7342), 159–161. <https://doi.org/10.1038/472159a>, 2011.

16 Van Damme, M., Clarisse, L., Whitburn, S., Hadji-Lazaro, J., Hurtmans, D., Clerbaux, C. and Coheur, P.-F.: Industrial and agricultural ammonia point sources exposed, *Nature*, 564(7734), 99–103, doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0747-1>, 2018.

17 Rimal Abeer, Cathy Clerbaux, Lieven Clarisse, Martin van Damme, Pierre-François Coheur, *et al.*, A space view of agricultural and industrial changes during the Syrian civil war. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2021, 9 (1), pp.0043. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.000041>. insu-0349427

18 Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Eds Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.

Résumés

Les données spatiales, comme celle du sondeur infrarouge IASI, sont non seulement utilisées dans les études en sciences exactes mais peuvent aussi offrir des applications au-delà de la recherche fondamentale. Elles peuvent être exploitées pour suivre les panaches des volcans et fournir des informations en temps quasi réel pour l'aviation civile. Elles permettent également de surveiller les événements extrêmes comme les vagues de froid accompagnées de dommages agricoles, ou les canicules et les feux associés. Les événements extrêmes impactent la composition atmosphérique et ont une incidence sur la qualité de l'air à l'échelle locale, régionale et globale selon leur intensité. Les panaches de feux ou d'émissions volcaniques peuvent faire le tour du monde et bloquer le trafic aérien comme dans l'ensemble de l'Europe dans le cas du volcan Eyjafjallajökull en Islande en 2010, ou impacter la qualité de l'air, avec des risques sanitaires pour les populations dans le cas des feux notamment.

Les mesures de IASI sont également utilisées pour vérifier et améliorer les inventaires d'émissions de polluants qui sont parfois très incomplets, notamment pour l'ammoniac. L'amélioration de ses inventaires d'émissions permettent de mettre en place des réglementations plus efficaces concernant la réduction des émissions de polluants.

Cet article illustre les performances du sondeur IASI, embarqué sur les satellites de la série Metop depuis 2006, pour surveiller l'atmosphère terrestre en temps quasi réel afin d'apporter des informations utiles pour l'analyse de l'espace politique.

Space-based data, such as the IASI infrared sounder, used in physical science studies have applications beyond fundamental research. They can be used to track volcano plumes and provide near-real-time information for civil aviation. They can also be used to monitor extreme events such as cold spells accompanied by agricultural damage, or heatwaves and associated fires. Extreme events impact atmospheric composition and affect air quality on a local, regional and global scales, depending on their intensity. Plumes from fires or volcanic emissions can travel around the world and block air traffic, as in the case of the Eyjafjallajökull volcano in Iceland in 2010, or impact air quality, with health risks for populations in the case of fires in particular.

IASI measurements are also used to verify and improve pollutant emission inventories, which are sometimes very incomplete, particularly for ammonia. Improved emission inventories enable more effective regulations to be put in place to reduce pollutant emissions.

This article illustrates the performance of the IASI sounder, which has been on board Metop satellites since 2006, in monitoring the Earth's atmosphere in near-real time, providing useful information for geopolitical analysis.

Index

Mots-clés : observations satellitaires, IASI, événements extrêmes, éruption volcaniques, feux, ammoniac

Keywords : satellite observations, IASI, extreme events, volcanic eruptions, fires, ammonia

Auteur

Camille Viatte

Physicienne, chercheuse à Sorbonne Université au Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales

Camille.viatte@latmos.ipsl.fr

Le faux miroir de l'objectif : enquête sur la fabrication des données spatiales

The false mirror of the lens: an investigation into the manufacture of spatial data

Marvin Freyne

Introduction

« My colleagues, every statement I make today is backed up by sources. Solid sources. Theses are not assertions. What we're giving you are facts and conclusions based on solid intelligence »¹. C'est ainsi que Colin Powell introduira son propos le 5 février 2003 lors de la 4701^e séance du Conseil de Sécurité des Nations Unies à propos de « la situation entre l'Iraq et le Koweït », avant de faire la part belle à de nombreuses images satellites pour étayer son propos. Si la géographie sert d'abord à faire la guerre, les données spatiales ont en ce sens toujours été un instrument permettant de projeter le pouvoir militaire. Les satellites et les drones sont producteurs de données spatiales servant différents contextes. Ces données sont collectées et traitées à la fois par les militaires et les civils. Cet article se concentrera en ce sens principalement sur les données et l'utilisation qui en est faite par les civils dans le monde humanitaire, notamment via des ONG de défense des droits humains. Depuis l'espace, ces outils sont censés permettre en temps de crise, la surveillance des espaces impactés par la maladie, les armes, le feu ou l'écume. En temps de paix, il est attendu d'eux qu'ils assurent par une veille permanente et un jeu de prédiction dans la préparation aux crises à venir. En outre, la carcasse froide de la machine serait censée permettre une « neutralité » idéalisée que les humains n'ont pas, voire lui permettre un rôle de vigie.

Avec l'objectif de contribuer aux recherches sur les données spatiales grâce à une enquête anthropologique de la fabrique même de leurs outils, il s'agit 1) de montrer comment se fabriquent ces données dans la sphère civile et humanitaire, 2) d'en offrir un panorama d'usages pour l'analyse de l'espace politique, notamment en matière d'information, de surveillance, de prévention des risques et des crises, puis 3) de s'interroger d'un point de vue critique sur la nature même de ces données spatiales, faux miroirs du réel et vécus comme tels par leurs utilisateurs, mais devenus de redoutables outils de pouvoir et de contre-pouvoir, voire des armes de guerre.²

Méthodologie

La méthodologie déployée se veut pluridisciplinaire, elle s'ancre principalement en géographie et en anthropologie. Des méthodes d'analyse d'images issues de l'histoire de l'art sont également mobilisées ainsi que certains concepts clefs de philosophie.

Cette recherche ayant été menée en grande partie dans un contexte de pandémie de Covid-19, elle fut amputée d'enquêtes de terrain initialement prévues au profit d'un terrain numérique. Si plusieurs espaces sont explorés, l'enquête se concentre majoritairement sur le territoire syrien en raison de sa multiplicité d'acteurs expérimentant divers outils technologiques.

Une série d'entretiens ont été réalisés en 2021, essentiellement à distance. Pour les besoins de cet article quatre d'entre eux seront mobilisés. Leurs profils se veulent variés et représentatifs des différents acteurs du champ des données spatiales avec à la fois des producteurs, des analystes et des utilisateurs. Ils s'inscrivent chacun dans le champ humanitaire, militaire, de l'ingénierie et des agences spatiales.

L'enquête B est un expert qui a une longue carrière dans la télédétection spatiale et qui a travaillé à la fois pour la défense, l'humanitaire et le civil. Il est reconnu pour ses capacités d'analyse d'images qui l'ont amené à traverser de nombreux champs qui utilisent ces données.

L'enquête C est une personne à la retraite qui a exercé de très hautes fonctions au sein du CNES et notamment dans la filiale SPOT Images jusqu'au début des années 2000. Il possède un regard précieux sur la genèse et l'histoire des données spatiales.

L'enquête D est un militaire de carrière qui a également traversé le monde académique et qui depuis peu œuvre pour le monde civil. Il a travaillé une grande partie de sa carrière sur l'usage des satellites à des fins de renseignements militaires. Après avoir traversé certains organismes européens, il est aujourd'hui à l'ESA où il est en charge de développer la capacité de nouvelles composantes spatiales de l'agence. Il offre un regard actuel sur les conditions de productions et d'utilisations des données spatiales.

L'enquête E est une personne travaillant pour la section française d'Amnesty International et qui a participé à des projets impliquant de l'imagerie satellites. Cette personne offre un regard concret sur les besoins de certaines ONG en matière d'imagerie.

Comprendre les outils de surveillance spatiale

Caractéristiques des objets

Jusqu'à 36 000 km d'altitude, il est possible de stationner une grande variété de satellites. C'est en fonction de la nature de l'objet observé que le choix du positionnement spatial d'un satellite va être déterminé entre l'orbite terrestre basse, moyenne et l'orbite géostationnaire. En fonction des besoins, il est possible d'observer différentes situations.

Le satellite à ceci d'original qu'en fonction de sa focale et de son placement dans l'espace, celui-ci est capable de balayer une très grande surface et avec une très grande précision. En général, il s'agit d'une surface de 25 à 100 km² avec une résolution de 30 cm à 30 m. S'il ne s'agit pas que d'un seul cliché mais que celui-ci est multiplié à une fréquence régulière, il est capable de rendre compte de mouvements massifs. C'est ainsi un puissant objet d'analyse et de surveillance spatiale.

Les satellites qui sont étudiés ici sont principalement les satellites civils qui se situent à environ 800 km d'altitude. Il s'agit d'une distance optimale pour limiter les effets de la traînée atmosphérique et pour observer, dans une utilisation classique, des feux de forêts, des inondations, des marées noires ou encore des bombardements. Il est aussi possible d'avoir une utilisation plus poussée des données spatiales dans des logiques de prévention. Le programme FEWS³ de l'USAID⁴ permet par exemple de surveiller l'état des plantations dans le monde afin de prédire et prévenir des famines plusieurs mois à l'avance.

Au-delà des drones peuvent représenter une autre solution dans la production de données spatiales. A moindre coût, ils peuvent couvrir 10 km² en une semaine pour collecter et traiter la donnée. A Dar-es-Salaam en Tanzanie, une carte des risques d'inondation a par exemple été produite via drones (Fabbri, 2016). Il s'agit d'une opération de cartographie d'une superficie de 88 km² avec une résolution moyenne de 5 cm pour 200 000 images optiques. C'est au total un fichier de 700 giga-octets de données qui est né. Leur utilisation peut être néanmoins très variés en fonction des besoins. Le tableau ci-dessous recense quelques utilisations possibles dans le domaine humanitaire.

Figure 1. Différentes utilisations de drones en contexte humanitaire

Études de cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Application	Cartographie des inondations en vue de réduire les risques de catastrophe	Livraison de charges médicales utiles	Analyse des dommages causés par le séisme	Modélisation spatiale des mines terrestres déplacées	Analyse des dommages causés par les ouragans	Analyse des dommages causés par les ouragans	Recoittement post-séisme	Gestion du camp	Information en temps réel après le typhon Haiyan	Évaluation des dommages causés par des catastrophes
Pays	Tanzanie	Papouasie-Nouvelle-Guinée	Népal	Bosnie-Herzégovine	Philippines	Haiti	Haiti	Haiti	Philippines	Vanuatu
Portée	Zone de cartographie : 88 km ²	Distance couverte par vol : 29 km	Zone de cartographie : 1,5 km ²	13 mapping locations, the largest with 2,9 km ² 13 sites de cartographie, 2,5 km ² pour le plus grand	Zone de cartographie : 48,6 km ²	Zone de cartographie : 2 km ²	Zone de cartographie : 30 km ²	En cours	Plusieurs missions	Zone de cartographie s/o
Résultats	Plans de ville numérique Modèles de surface 3D	Livraisons de fournitures médicales	Photographies et cartes aériennes	Photographies aériennes Modèles 3D	Photographies et cartes aériennes	Photographies aériennes Modèles 3D	Photographies et cartes aériennes	Photographies aériennes et modèles 3D	Vidéos HD diffusées en direct et images thermiques	Vidéo, photographies aériennes, modèles 3D
Agences de déploiement	World Bank et Humanitarian OpenStreetMap Team	Médicos Sans Frontières	UAViators	Belgian Royal Military Academy	Medair	IOM	IOM	IOM	DanOffice IT (with Team Rubicon and Palantir)	World Bank
Agences pilotes	Drone Adventures	Matternet	Formation d'étudiants de l'université de Kathmandu et de Kobensandu Living Labs	Belgian First Aid and Support Team (B-FAST)	Drone Adventures	IOM	IOM	IOM	DanOffice IT	Heliwest, Australia, and X-Craft, New Zealand, coordinated by UAViators
Types de drones	Sensefly eBee	Matternet One Prototype, Multi-copter Microdrone	DJI Phantom 3 Advanced	MD4-3000 Multi-copter Microdrone	Sensefly eBee	Sensefly Swinglet	Sensefly Swinglet and eBee	Sensefly Swinglet and eBee	Huginn X1 Quad-copter	Indago Multi-copter, 960L, DJI Phantom 2 Vision+, UKC

Extrait de *Drones et action humanitaire : Guide sur l'utilisation des systèmes embarqués lors de situations de crise humanitaire* servant d'exemple de temps de traitement et de taille des données.

Genèse des données spatiales

Les outils de surveillance spatiale ne sont pas récents, ils ont un héritage ancien. S'il ne s'agit pas dans ici de présenter l'histoire de ces outils, il est possible en revanche d'en relever quelques moments importants. D'après les informations récoltées en entretien, il y a eu un intérêt timide dans le domaine civil à partir du lancement du satellite LANDSAT en 1972 puis une intensification de leur utilisation avec le lancement de SPOT-1 en 1986 utile, selon ses promoteurs, en cas par exemple de feux de forêts ou d'inondations.

Toutefois il faut relativiser l'opérabilité des données produites par satellites avant les années 2000. En effet, pour plusieurs raisons explicitées ensuite et malgré de réelles avancées technologiques, la plupart des images étaient inexploitable en temps réel. A cela s'ajoute un cadre juridique et organisationnel encore trop brouillon qui relativisait l'intérêt de ces images pour le milieu civil.

Plusieurs enquêtes s'accordent à dire que la Charte internationale Espace et catastrophes majeures lancée en novembre 2000 fut un jalon important qui permit en ce sens de poser ce cadre manquant et de créer une coordination et une organisation beaucoup plus efficace entre les différentes agences spatiales et producteurs d'imagerie satellitaire. L'enquête B voit dans le tsunami en Indonésie en 2004 et l'ouragan Katrina en 2005

deux évènements saillants qui ont permis de démontrer son efficacité et qui furent également l'occasion pour de nombreux amateurs de prouver leur capacité d'analyse de ces données, aux côtés des institutions et des GAFAM nouvellement arrivés dans la course.

Par la suite, face à la quantité de données à traiter, le tremblement de terre à Haïti en 2010 fini d'imposer l'analyse par *crowdsourcing* dans la culture de l'imagerie satellitaire. Cette pratique a été popularisée notamment via Tomnod (Maxar Technologies) en 2014 suite à la disparition du Boeing 777 au-dessus de la mer de Chine méridionale puis réitéré à de nombreuses occasions. Nous nous situons actuellement à la fin de ce paradigme avec l'arrivée de l'intelligence artificielle permettant potentiellement de compléter voire de remplacer l'analyse par *crowdsourcing*.

En ce qui concerne l'usage des drones pour la production de données spatiales, l'histoire est moins ancienne. « La première utilisation de drones pour la surveillance et la reconnaissance militaires qui peut être décrite comme ayant eu un objet humanitaire fut le déploiement, en 1994, par les Etats-Unis, du Gnat 640, prédécesseur du Predator, au-dessus de la Bosnie. » (Sandvik & Jumbert, 2015). Par la suite, plusieurs expérimentations ont été faites au cours des années 2000 avec une intensification de leur utilisation depuis 2010 et les évènements à Haïti.

Néanmoins, leur déploiement dans les terrains humanitaires, souvent terrains de guerre n'est pas évident et leur présence suscite parfois des réticences et des résistances. Ainsi, lorsqu'en 2014 la Mission de l'Organisation des Nations unies pour la stabilisation en république démocratique du Congo (MONUSCO) voulait intervenir avec des Falco, des drones militaires, pour effectuer des missions de reconnaissances humanitaires, les ONG présentes se sont vivement opposées au déploiement des « gros moustiques », surnom attribué par la population. Ce serait comme « distribuer de l'aide alimentaire depuis un char d'assaut » avait répliqué Frances Charles responsable de la défense des droits pour l'ONG Vision Mondiale (The New Humanitarian, 2014). Ce qui est à craindre pour les ONG c'est de se figurer en militaire et d'accroître la méfiance à leur égard.

En interne, des mouvements parcourent les organisations comme celui du *Do no digital harm* (Ne pas nuire numériquement) (Hosttetter, Najih Besson, 2018) œuvrant pour limiter l'ajout de vulnérabilités aux vulnérables. Parallèlement, depuis 2014 l'ONU recommande aux humanitaires de ne pas utiliser de drones dans les zones de conflit et des ONG comme Médecins Sans Frontières refusent d'utiliser des drones dans ces espaces suites à de premiers déboires avec l'utilisation de Camcopter de Schiebel pour le sauvetage de personnes migrantes en mer Méditerranée (Delafoi, 2016 ; Hofman 2018). Il serait possible de privilégier l'utilisation de drones domestiques bien plus faciles d'accès et qui ne devraient pas bénéficier des images négatives des Predator et autres Reaper. L'utilisation exclusive de ces drones de petite taille pourrait être un moyen de rassurer et de désamorcer les craintes.

Une vision multiscale

Du drone au satellite, de 150 mètres à 800 kilomètres, les représentations du monde changent et ne traduisent pas la même chose. La technique choisie fait varier les échelles et transforme les réalités. En même temps que l'échelle rend visible des phénomènes, elle en invisibilise d'autres. Bernard Lepetit écrit en citant Merleau-Ponty (1988) « Les représentations à différentes échelles ne sont pas des projections de réalités qui se trouveraient derrière elles. "Derrière elles, il n'y a que d'autres 'vues'... Le réel est entre elles, en deça d'elles". Ainsi, la multiplication contrôlée des échelles de l'observation est susceptible de produire un gain de connaissance dès lors que l'on postule la complexité du réel [...] et son inaccessibilité » (Lepetit, 1993).

Choisir une échelle, c'est sélectionner un niveau d'information qui soit pertinent avec ce qui est étudié. L'imagerie satellite couvre généralement des espaces plus grands que l'imagerie par drone. Les résolutions des satellites vont de 30 cm à 30 m et les images couvrent une surface minimale de 25 à 300 km². Parallèlement, les drones de cartographie couvrent jusqu'à 3 km² en une journée ou 10 km² en une semaine pour une résolution entre 3,5 et 8 cm (Fabbroni, 2016). La technique du drone ou du satellite permet d'obtenir des informations différentes et d'analyser des réalités différentes. Les drones permettent moins de saisir les effets de masse. De plus, même si de nouvelles avancées technologiques relativisent ces effets, la pertinence de l'imagerie satellite peut être remise en cause si les conditions météorologiques ne sont pas au beau jour comme c'est souvent le cas lors de phénomènes météorologiques extrêmes où lorsqu'une forte couverture nuageuse persiste depuis plusieurs jours.

Figure 2. Comparatif de la résolution de l'imagerie par drones et l'imagerie satellite d'un même espace



Imagerie par drones

Imagerie satellite

Données d'imagerie : Drone Swinglet CAM
Dates d'imagerie : 10 février 2012
Résolution : 5 cm
Copyright : UNITAR/UNOSAT 2012
Analyse : UNITAR/UNOSAT

Données d'imagerie : DigitalGlobe WorldView-02
Dates d'imagerie : 8 février 2012
Résolution : 50 cm
Copyright : 2012 DigitalGlobe
Analyse : UNITAR/UNOSAT

Extrait de *Drones et action humanitaire : Guide sur l'utilisation des systèmes embarqués lors de situation de crise humanitaire*

Comme le dit l'enquêté B, confronté à de nombreuses difficultés d'analyse :

On était au Rwanda au printemps. Il y a plein de contraintes à un satellite d'observation en orbite polaire héliosynchrone, ça passe tous les jours à la même heure. Pour Spot c'était vers 11h du matin. 11h du matin au-dessus du Rwanda, tous les jours il y avait des nuages, tous les jours, tous les jours. On n'a quasiment pas sorti d'images exploitables pendant 3 mois. Parce qu'on n'avait pas. Pour vous donner un ordre d'idée, c'est pour la même raison qu'on a pas pu faire – on a fait la cartographie de la France l'IGN l'a fait X fois – la cartographie de la Guyane qui n'a été réalisée qu'en 2010 avec des satellites. 2010. Parce que la Guyane c'est pareil, c'est un endroit, à part la bande côtière, tout l'intérieur, à 11h du matin à l'heure où passent les satellites d'observation, c'est le pire moment. Vous avez jamais entendu parler d'un tir Ariane au milieu de la matinée, ça n'existe pas. Les tirs Ariane ils sont au début d'après-midi ou dans la soirée. On attend que le ciel se lève parce que 300 jours par an, voilà. Moi j'ai travaillé il n'y a pas longtemps pour une ONG qui travaillait sur le parc de la Dzanga, c'est le point triple de frontières République du Congo – Cameroun – République Centrafricaine. Là il y a 3 parcs... On avait des statistiques qui disaient – et là des statistiques journalières puisqu'on se basait sur des images MODIS, MODIS vous avez une image tous les jours –. On avait 6 bons jours d'observation optique par an à cet endroit-là. Voilà, c'est des réalités ça.

La vue du ciel n'est ainsi pas toute puissante et peut se retrouver prise au piège des aléas météorologiques.

Au-delà d'un choix d'efficacité, en reprenant la pensée de Bernard Lepetit, l'échelle permet de gérer la continuité entre les niveaux. Il faut la penser plutôt comme un curseur plutôt qu'un escalier. La multiplication des échelles produisant une augmentation des connaissances. Elles montrent des choses différentes en fonction du curseur lequel on les place et son complémentaires.

Ainsi, les dispositifs de la production des données sont dévoilés notamment après avoir explicité ses origines, ses usages et ses jeux d'échelles, nous pouvons dorénavant en étudier différentes utilisations et ses effets corollaires.

Surveiller et secourir

Un outil du pouvoir au regard des crises sanitaires et écologiques

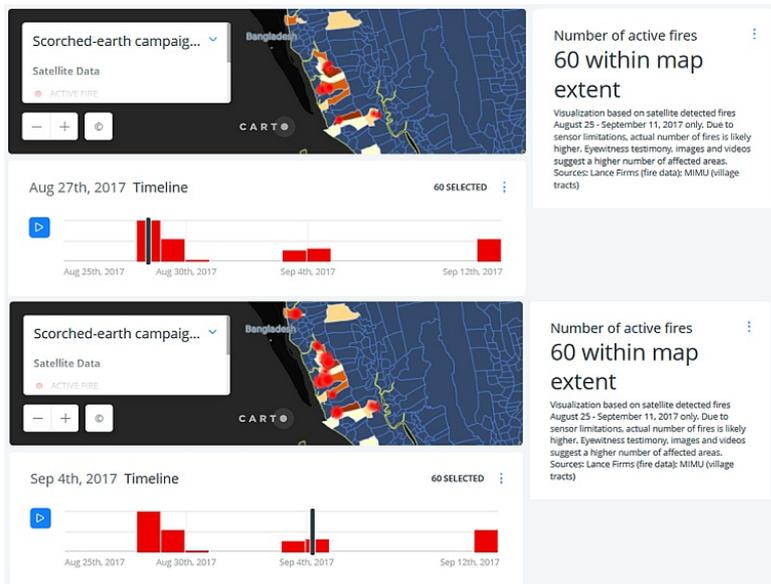
L'utilisation des données spatiales peut être salutaire dans différents contextes de crises et notamment dans des crises sanitaire et/ou écologique. En effet, l'offre capacitaire actuelle des satellites permet de balayer efficacement l'ensemble des espaces avec peu de contraintes. En amont des crises, il est entre autres possible de prédire des risques d'épidémies via de la télé-épidémiologie consistant à surveiller l'environnement des pathogènes. Il est ainsi utile d'utiliser ces données dans des logiques de prévention mais également comme outil de pouvoir. La connaissance au préalable de la géographie des risques épidémiques permettant par exemple d'installer au mieux les campements militaires.

En temps de crise, les données spatiales permettent également de surveiller en temps réel l'évolution des épidémies. Récemment, la crise de la Covid-19 a fait la part belle à l'expérimentation technologique en ce domaine. En 2020, au moment où le recul scientifique sur cette pandémie était encore modeste, de nombreux articles en géographie ont été publiés à ce sujet et montrait différentes stratégies d'observations. Une équipe de chercheurs internationaux (Franch-Pardo I. & al, 2020), en rappelant en préambule la pensée de Billie Lee Turner « *geography is one of the few disciplines that purports to offer a synthetic approach to the interplay between the biophysical and human variables* »⁵, a ainsi dès le début de la crise fait la revue de 63 articles scientifiques autour de la pandémie de Covid-19 en prenant pour thème l'analyse spatio-temporelle, la géographie sanitaire et sociale, les variables environnementales, le data-mining et la cartographie en ligne. Cette méta-étude permet de montrer les tâtonnements – à prendre avec du recul aujourd'hui – de la communauté scientifique via l'utilisation des données spatiales pour comprendre la propagation du virus dans différentes régions du monde. L'étude italienne de Mario Cocchia⁶, espagnole de Daniel Oto-Peralías⁷ et états-unienne de Abolfazl Mollalo⁸ pour n'en citer que trois s'appuient en ce sens sur les données issues d'outils de télédétection afin de mesurer la propagation du virus.

Si ces résultats sont aujourd'hui à prendre avec plus de recul, ils montrent la volonté dans un contexte de crise de distancier le regard en se surélevant pour comprendre le virus par le haut.

Au-delà de la télé-épidémiologie, les données spatiales excellent depuis de nombreuses années en matière de détection et de surveillance de feux de forêts. S'il s'agit ici d'un précieux outil de contrôle pour les différents Etats, il est aussi possible d'avoir une analyse plus fine afin de repérer des patterns anormaux d'incendies. C'est par exemple en ce sens qu'en 2017 l'ONG Amnesty International s'est servi d'imagerie satellitaire montrant au Myanmar des feux de forêts systématiques près de lieux habités par des Rohingyas.

Figure 3. Captures d'écran prise sur le site d'Amnesty International où il est possible de balayer chronologiquement les différentes données satellites montrant des incendies près des lieux d'habitations des Rohingyas

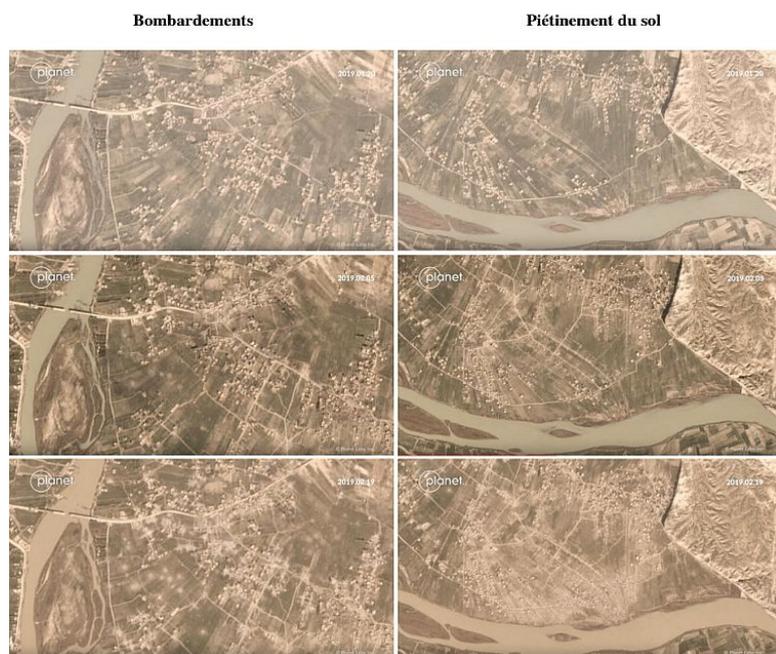


Ces images ont ainsi permis à Amnesty International de documenter et étayer la tactique de la terre brûlée dans le cadre de la politique de nettoyage ethnique à l'encontre des populations Rohingyas de telle sorte que l'ONG s'est servie des données spatiales comme instrument de contrôle du pouvoir.

Crises humanitaires et politiques : un contrôle sur le pouvoir

Au-delà des crises sanitaires et écologiques, il est tout autant intéressant d'étudier l'utilisation des données spatiales en matière de crises humanitaires et politiques. En effet, l'imagerie satellitaire permet de saisir également les effets d'un bombardement comme les cratères, les enterrements de masse, le piétinement induit par la fuite et l'établissement de camps.

Tableau 1. Images satellites de Planet montrant Baghouz 2019.01.20 – 2019.02.05 – 2019.02.19



Ces images prises par Planet à Baghouz (Syrie) entre janvier et février 2019 avec 2 semaines d'intervalle permettent pour un œil expérimenté de rendre ainsi compte de ces effets. Depuis l'espace, les effets concrets des attaques aériennes sont parfaitement saisissables. En outre, en étant capable d'observer le piétinement induit par la fuite massive d'une population bombardée, il est également possible de prévoir où vont se réfugier les victimes.

Tableau 2. Images satellites de Planet montrant Baghouz 2019.01.20 – 2019.02.05 – 2019.02.19

Camp de réfugiés



Il est ainsi possible ici de remarquer l'étalement du camp de réfugiés à proximité de Baghouz.

Avec une surcouche d'analyse, les données spatiales sont plus explicites pour un public non initié. Voici par exemple pour ce cas à Baghouz via l'ONG Human Rights Watch.

Figure 4. Image satellite montrant les lieux de frappes aériennes (points rouges) menées par la coalition dirigée par les États-Unis contre l'État Islamique à Baghouz, en Syrie, du 19 janvier au 20 février 2019



De nombreux civils sont retranchés dans un campement près du fleuve Euphrate (ligne en pointillé jaune, vers le bas). Des civils ont tenté de fuir la ville afin de rejoindre la zone contrôlée par les Forces démocratiques syriennes (flèche blanche, à droite).

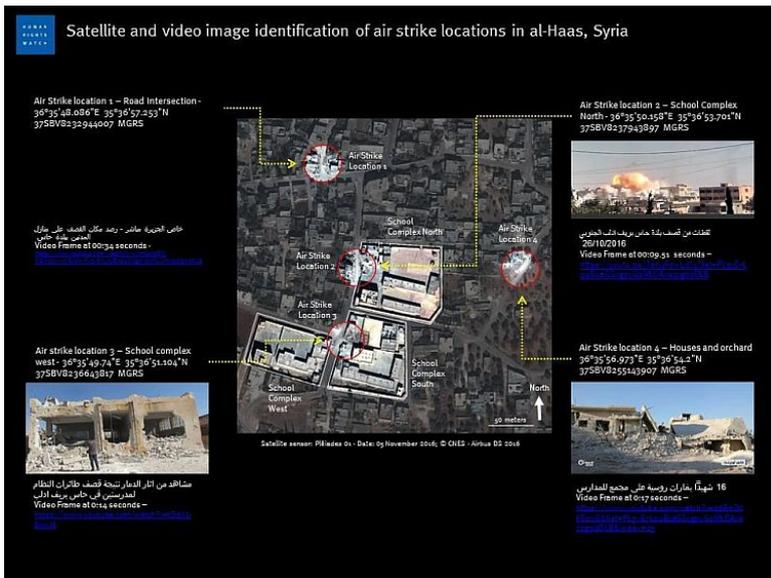
© 2019 Human Rights Watch

Il est ainsi rendu possible de surveiller l'emplacement des frappes et notamment leurs effets sur la population. Cet ONG peut mener via ces données spatiales un travail critique concernant l'exercice du pouvoir de la coalition dirigée par les États-Unis. Ce travail est d'autant plus primordial que dans ces contextes guerriers, la confusion règne et peut être entretenu délibérément.

Réalités et vérité

Y voir clair, il s'agit là d'un des enjeux les moins évidents dans le cadre d'un théâtre d'opérations. En ce sens, l'imagerie spatiale, en la croisant avec d'autres données, peut permettre de démêler et de remettre de l'ordre dans le déroulé d'un conflit. À la suite des frappes aériennes du 26 octobre 2016 sur un complexe scolaire dans la ville de Haas, située dans la province d'Idlib dans le nord de la Syrie, le ministère de la Défense russe a nié toute implication en diffusant deux images fixes extraites d'une vidéo prise par un drone de surveillance. C'est en associant des images satellites, des images capturées par des drones, des vidéos au sol et des témoignages que Human Rights Watch a pu constituer un dossier contredisant le discours russe et prouvant sa responsabilité.

Figure 5. Images satellite (Pliades 01 - Airbus DS) images et vidéos montrant 4 frappes aériennes menées contre le complexe scolaire à Haas (Syrie) le 26 octobre 2016



Frappes 1 (carrefour au nord de l'école) - Frappe 2 (complexe scolaire, côté nord) - Frappe 3 (complexe scolaire, côté sud) - Frappe 4 (maisons et verger à l'est de l'école)

© 2016 Human Rights Watch

De par son expérience à la CNES, l'enquêteur C rappelle ainsi en ces termes :

Il faut se méfier un petit peu, il faut quand même s'assurer que l'image n'a pas été manipulée. L'image que vous utilisez, que vous exploitez, il faut s'assurer qu'elle n'a pas été manipulée avant d'arriver chez vous. Donc il y a une question d'intégrité d'une part de la donnée que vous recevez et de confiance finalement dans le fournisseur de la donnée. Le risque que vous pourriez voir c'est le risque que les données ont été modifiées.

Images contre images, vidéos contre vidéos, les drones et les satellites sont les outils d'une véritable guerre de vérité qui se joue à distance. Face au terrain syrien et au pluralisme de ses acteurs, l'illusion spatiale s'effrite et les interstices révèlent les discours au sein de ces images. Derrière l'image froide se montre le corps tout en chair du politique.

Néanmoins, devant l'immensité de données spatiales pouvant être produite et le nécessaire travail de tri à effectuer, il peut être délicat de s'en saisir à l'échelle d'une ONG ou du service de photo-interprètes d'une administration. Pour lutter face à l'océan de donnée, il est dans la culture de l'imagerie satellitaire de faire du *crowdsourcing*, un appel au public. Amnesty International s'en est notamment servi dans des projets nommés « Decode » au Darfour et en Syrie. Pour le cas syrien Amnesty International en coopération avec Airwars, une ONG spécialisée dans le comptage du nombre de victimes civiles causées par des frappes aériennes en Syrie et en Irak, ont analysé les bâtiments de Raqqa et leur destruction par la coalition menée par les États-Unis de juin à octobre 2017.

Voici ce qu'en dit l'enquêteur E qui travaille pour la section française d'Amnesty International et qui a participé aux projets « Decode » :

Il s'agissait de venir en appui à tout un travail qui avait été fait sur les frappes qui avaient été menés par la coalition contre Daesh sur la ville de Raqqa et de voir avec tout un système d'évolution temporelle / chronologique d'identifier les zones de destruction et de pouvoir corréler ces destructions-là avec des campagnes de bombardements massives de la part des forces aériennes de la coalition qui était impliquée dans la libération de Raqqa de Daesh mais au prix de bombardements extrêmement forts et qui étaient pas forcément liés à des besoins militaires.

L'ONG invitait tous les militants qui le souhaitaient à installer une application sur leur smartphone pour analyser des images satellites de Raqqa à n'importe quel moment et pour un laps de temps au choix de l'utilisateur. Le procédé de l'application Strike Tracker est volontairement simple et réalisable le temps d'un trajet de métro : la contribution doit être massive. De novembre 2018 à début 2019 ce seront 138 557 contributions pour 2 millions d'images satellites analysées par 3101 décodeurs venant de 124 pays. Ils couvriront 11 218 bâtiments et chacun de ces bâtiments ont été analysé par au moins 10 personnes différentes afin de déterminer avec exactitude le jour de leur destruction.

Figure 6. Interface de l'application Strike Tracker



À gauche : le 4 août 2017, avant la frappe. À droite : le 11 août 2017, après la frappe.

L'enquête E complète ainsi :

Il y a eu tout un travail d'analyse des images sur un même type de plateforme collaborative et participative que « Decode Darfour » pour faire cette analyse d'images d'immeubles ou de pâtés de maison dans Raqqa pour dire « à telle époque, pas de destruction constatée, à tel moment des destructions ont été constatées à telle période etc. ». On voyait aussi un accroissement du rythme du bombardement en fait. Et que vraiment il y avait beaucoup beaucoup de zones qui étaient ciblées et bombardées avec énormément de bâtiments détruits qui ne correspondaient pas forcément systématiquement à la ligne de front.

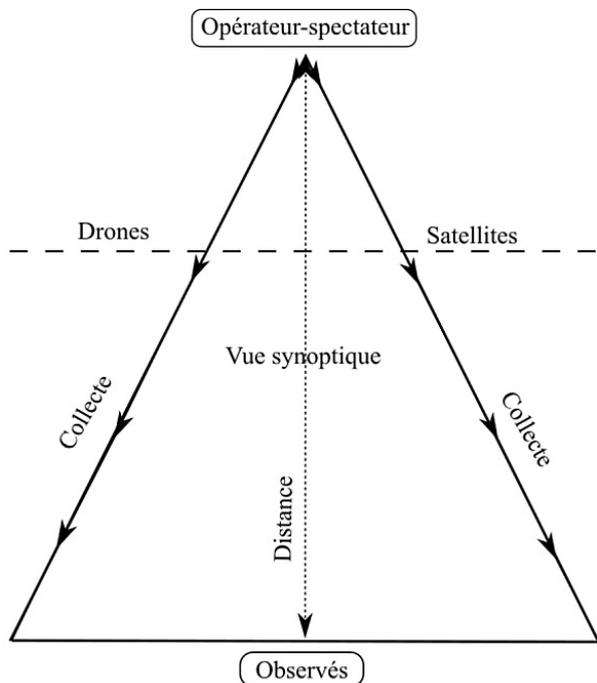
De fait le stigma de la surveillance est retourné. La vision toute puissante « œil de Dieu » (Chamayou, 2013) n'est pas détenue que par la puissance militaire mais peut au contraire être mobilisé par les citoyennes et les citoyens pour observer, analyser et finalement surveiller les belligérants. Ainsi, les données spatiales peuvent servir dans des contextes variés. Elles peuvent tantôt être l'instrument du pouvoir pour exercer son contrôle, tantôt l'outil du contrôle sur le pouvoir. Elles projettent néanmoins en continue dans ce rôle de vigie une surveillance permanente. Il reste dans ce double-jeu à en étudier plus profondément ce qui se joue.

Critique du contrôle ; contrôle de la critique

Œil de dieu au regard panoptique

Les drones et les satellites assurent une veille géospatiale permanente, l'observation ne s'arrêtant jamais. Si derrière les écrans les opérateurs se relaient et se succèdent en étant attentifs à différents éléments au sol, la surveillance persiste et personne ne sait véritablement ce que l'objet voit et veut voir. L'opérateur est assuré de voir sans jamais qu'au sol on ne puisse deviner ce qu'il voit. « Et ce qui retient particulièrement l'attention dans le caractère du spectateur c'est, d'une part, la possibilité de tout voir, celle d'une perspective totalisante, d'un regard sans point de vue ou d'une circulation entre tous les points de vue possibles. C'est d'autre part – et les deux sont indissociablement liés –, la possibilité de voir sans être vu » (Boltanski, 1993). L'opérateur-spectateur à ces deux caractères : en plus de voir sans être vu il a une vue synoptique. Imperturbable, il collecte inlassablement de la donnée sans jamais être interpellé ou engagé directement dans la scène qu'il traverse. À la persistance du regard, il faut ajouter sa totalisation (Chamayou, 2013). C'est une surveillance qui voit tout, tout le temps. L'opérateur se veut et se fait presque omni-voyant.

Figure 7. Modèle de la perspective totalisante de l'observateur-spectateur



Modèle de la perspective totalisante de l'observateur-spectateur

Au-delà, la vue de haut issu d'un drone ou d'un satellite a cette particularité qu'elle ne permet pas de distinguer les visages. Elle dépersonnalise les personnes puisqu'elle les dépouille d'émotions. D'en haut, c'est un autre point de vue, une perception de la neutralité, de l'information pure, de la gestion des stocks, des flux et des ressources humaines. C'est une essentialisation des personnes observées en tant qu'elles sont aidées et ne sont plus que cela : des donataires, des bénéficiaires, des aidés.

La puissance d'exister des personnes en détresse dans la capacité à avoir des actions, des relations, des influences, des passions et du désir est niée. Elles ne persévèrent que dans l'ataraxie ou dans une souffrance passive si un sinistre a lieu. En ne percevant les personnes en détresse que dans leur faculté à éprouver de la tristesse, elles perdent leur puissance d'exister. À terme, les observés sont dépourvus de *conatus* dans un regard réifiant. En posant un regard constant et à priori neutre, en se rapprochant de la fiction du point de vue de *l'œil de Dieu*, les drones et les satellites déshumanise ainsi les personnes observées.

Contrairement au ras-du-sol qui met face à face les personnes et oblige à se confronter soi-même à autrui, d'en haut la perception est unilatérale. L'autre ne me voit plus et je ne vois de l'autre que ce que j'objectifie. On ne peut voir autrui comme soi-même puisqu'autrui ne m'est plus semblable. « L'Autre n'est pas seulement la contrepartie du Même, mais appartient à la constitution intime de son sens » (Ricœur, 1990).

Effet de réel et trompe-l'œil

Il y a dans ce mouvement en germe quelque chose de potentiellement dangereux. Particulièrement en temps de crise, quand la quête de vérité est rendue plus ardue, les données spatiales peuvent se relever salvatrices

puisqu'elles sont fabriquées par l'œil froid de la machine. De telle sorte que l'imagerie par drone et l'imagerie satellitaire produisent un puissant « effet de réel » (Barthes, 1968) qui semblent permettre de comprendre d'un regard une réalité montrée affranchie de toute partialité, cela au point de construire une réalité « télé-objectivité » (Rouvroly & Berns, 2013). En plus d'être aussi réaliste et de poser les mêmes questions qu'une photographie classique, ces technologies permettent de se figurer par la plongée verticale l'impartial regard de Dieu.

Antoinette Rouvroly et Thomas Berns montrent que cet effet de réel ne reste qu'une illusion puisque « les sujets individuels sont en fait évités, au point de créer une sorte de double statistique des sujets, et du 'réel' ». C'est en ce sens que la réification se construit et que les personnes observées sont privées de *conatus*.

En somme, ce qui est observé c'est un double statistique sans prise dans le réel puisque sans puissance d'exister, un double irréel. Ce qui existe par l'entreprise du gouvernement algorithmique et du big data, comme le démontre ces auteurs, ce ne sont plus les sujets mais les relations. Lorsque nous observons l'image satellite d'un mouvement de foule suite à un bombardement, c'est la relation entre le bombardement et le mouvement qui est analysé. Ces relations sont elles-mêmes « transformées, au point d'être paradoxalement substantifiées et de représenter une extraction du devenir, donc un obstacle aux processus d'individuation – plutôt qu'une forte inscription dans celui-ci » (Rouvroly & Berns, 2013).

Par l'étude massive des relations, il est possible de s'immiscer dans le « pattern of life » et de prévoir de manière algorithmique les comportements. C'est sur ce postulat que l'armée états-unienne fait abattre la foudre des drones par des « frappes de signature » à l'encontre de tout individu dont l'algorithme nourri par la surveillance prédit un comportement associé à une organisation terroriste. « On frappe alors en ce cas "sans connaître l'identité précise des individus ciblés", sur cette seule base que leur agissements, vus du ciel, "correspondent à une 'signature' de comportement pré-identifiée que les États-Unis associent à une activité militante" » (Chamayou, 2013). L'effet de réel du regard de Dieu est tel que l'étude des images permet de prédire le devenir et de décréter – dans le cadre militaire – le droit de vie ou de mort de tout individu sur la base de ces seules images : perfection de l'objet divin.

Et pourtant derrière l'algorithme se situe les personnes. Lorsque Zubair Rehman (Cornwell, 2013) est venu témoigner devant le congrès américain des attaques de drones au Pakistan, c'est après que sa grand-mère, Momina Bibi, – innocente – fut trouvée, ferrée, traquée, ciblée et abattue. L'œil de Dieu a failli, l'algorithme s'est fait avoir par un trompe-l'œil.

Figure 8. Annonciation par Francesco del Cossa, 1470



En matière de trompes-l'œil, l'histoire de l'art nous renseigne. Ici, si la présence de Dieu dans le ciel du tableau nous laisse imaginer la perspective en plongée dans laquelle se place le drone, c'est l'analyse de Daniel Arasse qui nous intéresse dans ce cadre. Daniel Arasse a longuement analysé ce tableau et notamment la présence incongrue de l'escargot au premier plan. En vérité, celui-ci ne se situe pas dans la scène du tableau mais en dehors, au plus près de notre réalité, en trompe-l'œil. Il écrit au sujet du tableau « Un jour, donc, ce que le tableau me montrait silencieusement, au tout premier plan, m'a sauté aux yeux : cet escargot est énorme, gigantesque, monstrueux. Si vous ne me croyez pas, vous n'avez qu'à le comparer à la taille du pied de Gabriel, qui est lui aussi au tout premier plan du tableau » (Arasse, 2000).

Si l'on remplace la scène de l'annonciation par le contexte guerrier du Pakistan, le double statistique de Momina Bibi représente pour l'algorithme une menace monstrueuse au premier plan qu'il a convenu d'anéantir. Ceci sans prendre en compte le double réel au second plan. Sur ce tableau, la forme de l'escargot au premier plan se superpose parfaitement à la forme de Dieu au second plan mais pour autant, l'escargot n'incarne pas nécessairement Dieu, ils sont deux identités distinctes. Momina Bibi et le double statistique créé par l'algorithme furent deux identités distinctes. Daniel Arasse observera plus loin qu'en vérité l'escargot n'a rien d'énorme ni de monstrueux, que c'est plutôt la scène qui est petite « par sa disproportion [il] fait, localement, échec à la profondeur fictive de la perspective » (Arasse, 2000). L'algorithme peut s'emballer et déformer le réel au point de s'aveugler par la donnée qu'il engrange.

L'enquêteur D en prenant appui sur son expérience rappelle en ces termes :

Et parfois, quelqu'un, j'allais dire le citoyen lambda, qui va sur le site Internet, il voit des images qui sont publiques, qui viennent de satellites commerciaux et tu es tenté de l'interpréter toi-même. Tu dis « bah oui on voit des véhicules, on voit probablement des populations qui sont regroupées à un endroit etc. », tu fais ta propre interprétation et tu peux faire de très grosses erreurs parce que t'as pas la compétence, t'as pas la capacité, t'as pas l'expérience.

Si ces images peuvent sembler facilement saisissable, il faut en réalité s'en méfier.

Colin Powell aura ces mots lors du discours du 5 février 2003 :

Let me say a word about satellite images before I show a couple. The photos that I am about to show you are sometimes hard for the average person to interpret. Indeed hard for me. The painstaking work of photo analysis takes experts with years and years of experience poring for hours and hours over light tables. But as I show you these images, I will explain what they mean, what they indicate to our imagery specialists¹⁰.

Daniel Arasse écrira en ces termes l'enseignement à retenir de ce trompe-l'œil :

Sur le bord de la construction perspective, sur son seuil, l'anomalie de l'escargot vous fait signer ; elle vous appelle à une conversion du regard et vous laisse entendre : vous ne voyez rien dans ce que vous regardez. Ou, plutôt, dans ce que vous voyez, vous ne voyez pas ce que vous regardez, ce pour quoi, dans l'attente de quoi vous regardez : l'invisible venu de la vision (Arasse, 2000).

En réalité, on ne peut jamais vraiment savoir si ce que l'on voit, qui semble si vrai, est réel ou s'il s'agit d'un trompe-l'œil. Des mots de Grégoire Chamayou : « C'est le problème épistémologique de l'ombre chinoise. L'image du molosse ressemble à celle d'un molosse, mais comment savoir avec certitude quel objet l'engendre, si l'on n'a accès qu'à son ombre portée ? Il se peut que ce ne soient que des mains » (Chamayou, 2013).

La fabrique de la dépolitisation

La fabrique des données spatiales n'est pas dénuée de contexte et celui-ci peut être aux prises d'effets politique structurant son recours, particulièrement dans la sphère civile et humanitaire. Lorsque dans cette sphère ces données sont mobilisées, il s'agit toujours de répondre avec efficacité et impartialité mais au nom de quel impératif moral répond cette impartialité ?

L'*industrie de l'aide* (Escobar, 1995), soucieuse de ne pas se retrouver coincée dans la gesticulation en cherchant la cause des problèmes et guidée par son impératif d'action va s'engager dans l'amélioration des conditions et dans cette apolitisation. Depuis la chute du mur, c'est l'ère d'une idéologie dominante « *There is no alternative* » des mots de Margaret Thatcher qui se constitue.

C'est à partir de la décennie 1990, qui suivait celle de la mise en œuvre des ajustements structurels et de l'installation de l'hégémonie du libéralisme, que la question du développement est formulée explicitement en termes de pauvreté, tant par la Banque mondiale [...], que par les agences des Nations Unies, et par un nombre croissant de gouvernements et d'organisations non gouvernementales (Destreumeau & Lautier, 2014).

On ne pense plus les personnes en *exploités* mais en *pauvres*. La dépolitisation profite au capital puisqu'elle détache des dominations, elle rend asystémique et naturalise les problèmes. En effet, l'hégémonie néolibérale ne pose plus la question du *pourquoi* mais du *comment*. De telle sorte qu'à partir de ce moment, l'impératif d'action et la volonté d'efficacité vont finir d'imposer l'hégémonie. Bertrand Bréqueville écrit en ces termes :

Dans le Journal du dimanche (JDD) du 22 mai 2016, à l'occasion du Sommet humanitaire mondial d'Istanbul, Michel Maietta, directeur de recherche à l'Institut de relations internationales et stratégiques (Iris), estimait qu'il n'y avait pas d'autre alternative pour les ONG humanitaires que de travailler en réseau avec les entreprises et le secteur privé et déclarait avec un incroyable aplomb : « Beaucoup d'ONG se réfugient encore derrière des discours militants et passistes pour ne pas évoluer. C'est un combat perdu d'avance. » Il n'y a pas de pragmatisme éclairé à voir dans de tels positionnements. C'est un

processus de dépolitisation des ONG, une capitulation en rase campagne... (Bréqueville, 2018).

Le recours aux drones et aux satellites s'inscrit dans ce paradigme. L'ONG Medair travaille par exemple activement avec le fabricant de drones Parrot. Nathalie Fauveau après un tremblement de terre au Népal écrit à ce propos : « Dans ces situations, les drones sont plus rapides, plus efficaces, et plus rentables que les humains » (Andres, 2015). C'est également en ce sens que les drones ont pu être utilisés pendant le pic de la crise de Covid-19 avec un regard techno-solutionniste sur des questions politiques de santé publique (Martins, 2021). En parallèle, la technique n'est pas neutre. L'imagerie satellite et l'imagerie par drone sont productrices de puissants effets de réel qui favorise la dépolitisation. Antoinette Rouvroy et Thomas Berns écrivent :

L'inoffensivité, la « passivité » du gouvernement algorithmique n'est alors qu'apparente : le gouvernement algorithmique « crée » une réalité au moins autant qu'il l'enregistre. [...] il dépolitise les critères d'accès à certains lieux, biens ou services ; il dévalorise la politique (puisqu'il n'y aurait plus à décider, à trancher, dans des situations d'incertitude dès lors que celles-ci sont d'avance désamorcées) ; il dispense des institutions, du débat public (Rouvroy & Berns, 2013).

La collecte massive de données qu'opèrent les drones et les satellites profite au gouvernement algorithmique qui « approfondit encore l'idéal libéral d'une apparente disparition du projet même de gouverner [...], il ne s'agit plus de gouverner le réel, mais de gouverner à partir du réel » (Rouvroy & Berns, 2013). La question du politique est inversée. On ne questionne pas le réel mais il est pris comme tel et c'est à partir de lui qu'il s'agit de gouverner. Le néolibéralisme devient l'alpha et l'oméga de l'émancipation. Ceci « d'autant plus que le libéralisme est aujourd'hui d'avantage perçu comme un système économique – qui plus est irréversible – que comme une idéologie. Or la dépolitisation des ONG participe également à leur instrumentalisation » (Broudic, 2014).

Le néolibéralisme dépolitise l'aide humanitaire, l'aide humanitaire dépolitise la technique, la technique dépolitise l'aide humanitaire et l'aide humanitaire dépolitise le néolibéralisme. A travers la fabrique des données spatiales, c'est une fabrique de la dépolitisation, un cercle vicieux qui, s'il n'est pas confronté, peut être le *tombeau* de l'aide humanitaire.

Conclusion

Cet article questionne la fabrique des données spatiales via l'utilisation de drones et de satellites en se focalisant particulièrement sur la sphère civile et humanitaire.

Il s'agissait ainsi d'abord d'explicitier les rouages de la production de ces données, en rappelant son histoire, sa culture d'usage et ses différentes échelles. De sorte qu'il fut possible d'étudier différents contextes d'utilisation de ces données, notamment à travers les crises sanitaires, écologiques et humanitaires et le rapport qu'elles entretiennent avec le réel et la quête de vérité. De telle sorte qu'au-delà d'être un outil du pouvoir, les données spatiales peuvent être un outil de regard critique et de contrôle sur le pouvoir. Néanmoins au-delà, il s'agissait de produire une critique de la critique car celle-ci peut se retrouver aliéné au regard de ses normes, de ses effets anthropologiques et par le contexte politique dans lequel elle s'inscrit.

Si cette étude se concentre particulièrement sur le terrain syrien, ces analyses peuvent sur certains aspects en dépasser le cadre. En 2024, du fait de leur utilisation importante, la question de la fabrique des données spatiales trouve un écho particulièrement important à étudier et interroger dans le contexte ouïghour, ukrainien et palestinien en y cherchant notamment de potentielles spécificités.

Ainsi, les données spatiales permettent une critique du pouvoir tant elles permettent de saisir des enjeux souvent invisibles mais il est nécessaire de conserver en regard critique sur l'œil de Dieu au risque de s'aliéner.

Finalement, la carcasse froide de la machine est habitée par une chair chaude tant l'objectif des drones comme des satellites est un faux miroir du réel fabriquant des données spatiales qui dévoile des réalités subjectivées.

Bibliographie

Amnesty International, 2018/11/21, Strike Tracker, Decode how US led-bombing destroyed Raqqa, Syria, consulté le 2023/05/29 <https://decoders.amnesty.org/projects/strike-tracker>

Amnesty International, 2017/09/14, Myanmar. La politique de la terre brûlée favorise le nettoyage ethnique visant les Rohingyas dans l'État d'Arakan, consulté le 2023/05/29 <https://www.amnesty.org/fr/latest/news/2017/09/myanmar-scorched-earth-campaign-fuels-ethnic-cleansing-of-rohingya-from-rakhine-state/>

ANDRES, C., 2015/12/21, Le drone, nouvelle arme des humanitaires, Bilan, consulté le 2023/05/29 https://www.bilan.ch/techno/le_drone_nouvelle_arme_des_humanitaires

ARASSE, D., 2000, On n'y voit rien, Gallimard.

BARTHES, R., 1968, Le bruissement de la langue, Seuil.

BOLTANSKI, L., 1993, La souffrance à distance. Morale humanitaire, médias et politique, Métailié.

BREQUÉVILLE, B., 2018/04/09, « C'est un processus de dépolitisation des ONG, une capitulation en rase campagne... », Alternatives Humanitaires, consulté le 2023/05/29 <https://www.alternatives-humanitaires.org/fr/2018/04/09/cest-processus-de-depolitisation-ong-capitulation-rase-campagne/>

BROUDIC, C., 2014, Les ONG, cheval de Troie du néolibéralisme ?, in : Adam, C., Lebel, O. Humanitaire n° 39, (p. 64-75).

COCCIA, M., 2020 « Factors determining the diffusion of COVID-19 and suggested strategy to prevent future accelerated viral infectivity similar to COVID », Science of The Total Environment, Volume 729.

Conseil de Sécurité des Nations Unies, 2003, La situation entre l'Iraq et le Koweït, Procès-verbal de la 4701^e séance, (p. 5).

CORNWELL, R. 2013/10/30, Pakistani family gives Congress an unprecedented account of effect of CIA drone attacks on their community, The Independent, consulté le 2023/05/29 <https://www.independent.co.uk/news/world/americas/pakistani-family-gives-congress-an-unprecedented-account-of-effect-of-cia-drone-attacks-on-their-community-8911587.html>

CHAMAYOU, G., 2013, Théorie du drone, La fabrique.

DELAFOI, F., 2016/04/11, Le drone, l'allié ambigu des humanitaires, Le Temps, consulté le 2023/05/29 <https://www.letemps.ch/monde/drone-lallie-ambigu-humanitaires>

DESTREMEAU, B., LAUTIER, B., 2014, Le sociologue et 'la femme pauvre du tiers monde', ou comment une approche en termes de rapport sociaux de sexe a éclairé la sociologie du développement, in Guétat-Bernard, H. Sous le développement, le genre, Objectifs Suds (IRD Éditions), (p. 129-150).

ESCOBAR, A., 1995, Encountering Development: The Making and Unmaking of the Third World, Princeton University Press.

FABBRONI, V., 2016, Drones et action humanitaire : Guide sur l'utilisation de système embarqués lors de situations de crise humanitaire.

FRANCH-PARDO, I., NAPOLETANO, B. M., ROSETE-VERGES, F., BILLA, L., 2020, « Spatial analysis and GIS in the study of COVID-19. A review », Science of The Total Environment, Volume 739.

HOFMAN, M., 2018, « Drones humanitaires : des outils utiles, une image toxique », L'essor des nouvelles technologies : utilité, mésusages et sens. Alternatives Humanitaires n° 8.

HOSTETTLER, S., NAJIH BESSON, S., 2018, Do no Digital Harm: Mitigating Technology Risks in Humanitarian Contexts, in Technologies for Development, From Innovation to Social Impact.

Human Right Watch, 2019/02/22, Syrie : inquiétudes pour les civils qui tentent de fuir le bastion de l'EI, consulté le 2023/05/29 <https://www.hrw.org/fr/news/2019/02/22/syrie-inquietudes-pour-les-civils-qui-tentent-de-fuir-le-bastion-de-lei>

Human Right Watch, 2016/11/16, Russie / Syrie : Des images satellite et vidéos confirment l'attaque contre l'école à Haas, consulté le 2023/05/29 <https://www.hrw.org/fr/news/2016/11/16/russie/syrie-des-images-satellite-et-vidéos-confirment-lattaque-contre-lecole-haas>

LEPETIT, B., 1993, Architecture, géographie, histoire : usage de l'échelle. Belin.

MARTINS, B., LAVALEE, C., SILKOSSET, A., 2021, « Drone Use for COVID-19 Related Problems: Techno-solutionism and its Societal Implications », Global Policy, Volume 12.

MERLEAU-PONTY, M., 1988, Le Visible et l'Invisible, Gallimard.

MOLLALO, A., 2020, « GIS-based spatial modelinf of COVID-19 incidence rate in the continental United States », Science of The Total Environment, V olume 728.

OTO-PERALÍAS, D., 2020, Regional correlations of COVID-19 in Spain, Universidad Pablo de Olavide.

RICŒUR, P., 1990, Soi-même comme un autre, Seuil.

ROUVROY, A., BERNS, T., 2013, « Gouvernementalité algorithmique et perspectives d'émancipation », Politique des algorithmes. Les métriques du web, n° 177, (p. 163-196).

SANDVIK, K. B., JUMBERT, M. G., 2015, « Les drones humanitaires », Revue internationale et stratégique, n° 98, (p. 139-146).

The New Humanitarian, 2014/07/23, Les ONG excluent l'utilisation des drones de la MONUSCO pour leurs activités humanitaires, consulté le 2023/05/29 <https://www.thenewhumanitarian.org/fr/analyses/2014/07/23/les-ong-excluent-lutilisation-des-drones-de-la-monusco-pour-leurs-activites>

Notes

1 « Mes collègues, je vous déclare que chacune des affirmations que je fais aujourd'hui s'appuie sur des sources, des sources solides. Ce ne sont pas de simples affirmations, mais des faits et des conclusions étayées sur des renseignements sérieux ». (Traduction : Conseil de Sécurité des Nations Unies. *La situation entre l'Iraq et le Koweït*. Procès-verbal de la 4701^e séance. 2003, p.5.)

2 Cet article utilise largement les résultats d'un mémoire mené entre 2019 à 2021 sous la direction de Laëtitia Atlani-Dualet à l'École des Hautes Études en Sciences Sociales.

3 Famine Early Warning Systems Network

4 United States Agency for International Development

5 « La géographie est l'une des rares disciplines qui offre une approche de l'interaction entre les variables biophysiques et humaines ».

6 L'étude a identifié pour chacune des 55 villes italiennes étudiées la distance à la mer, la latitude, la densité de population, les niveaux de pollution de l'air, les variables climatiques (température moyenne, humidité,

vitesse du vent, jours pluvieux) ainsi que les caractéristiques spatio-temporelles des personnes infectées. Elle révèle une association probable entre une diffusion accélérée du virus avec une pollution atmosphérique élevée, une vitesse de vent faible et un éloignement de la mer.

7 L'étude s'est intéressée aux variables géographiques (latitude, longitude, température moyenne et précipitations, altitude et amplitude moyennes, insularité, province côtière, distance de Madrid) et aux variables sociales et économiques (PIB, population et tranche d'âge, densité, agglomération urbaines, secteur du travail, vol, pollution). Le but était de comprendre la grande disparité de personnes infectées entre les provinces et trouver un indicateur qui pourrait le corréler cela. L'auteur relève ainsi qu'il y a apparemment une corrélation avec la température et la distance de Madrid qui minimiserait l'efficacité de transmission.

8 L'étude comprenait 35 facteurs à la fois socio-économiques, comportementaux, environnementaux, topographiques et démographiques. L'étude conclut que les facteurs environnementaux ne semblent pas avoir une influence majeure sur l'incidence du Covid-19. En revanche, elle met en avant une combinaison de quatre variables qui sont le revenu moyen du ménage, l'inégalité des revenus, le pourcentage d'infirmières praticiennes et le pourcentage de femmes noires qui seraient corrélés à une plus grande incidence du virus.

9 Effort accroissant une puissance d'être

10 « Je voudrais dire un mot sur les quelques images satellite que je vais montrer. Les photos sont parfois difficiles à interpréter par le spectateur moyen. Et même pour moi. L'analyse de ces photos est un travail d'experts ayant des années et des années d'expérience et qui passent des heures et des heures à les examiner. Mais en vous montrant ces images, j'expliquerai ce qu'elles signifient, ce qu'elles indiquent à nos spécialistes ». (Traduction : Conseil de Sécurité des Nations Unies. *La situation entre l'Iraq et le Koweït*. Procès-verbal de la 4701^e séance. 2003, p.6.)

Résumés

Cet article s'intéresse à la fabrication des données spatiales via l'utilisation de drones et de satellites en se focalisant particulièrement sur la sphère civile et humanitaire. Pour ce faire, une analyse de l'utilisation des drones et satellites principalement par l'aide humanitaire a été réalisée, avec une attention particulière au terrain syrien. Elle a été menée dans une perspective pluridisciplinaire en sciences sociales, en s'appuyant tout particulièrement sur les apports de la géographie et de l'anthropologie, et s'appuie tout autant sur la revue de la littérature que sur une série d'entretiens qualitatifs menés avec des personnes au profil varié dans le champ humanitaire, militaire, de l'ingénierie et des agences spatiales. Avec l'objectif de contribuer aux recherches sur les données spatiales grâce à une enquête anthropologique de la fabrique même de leurs outils, il s'agit 1) de montrer comment se fabriquent ces données dans la sphère civile et humanitaire, 2) d'en offrir un panorama d'usages pour l'analyse de l'espace politique, notamment en matière d'information, de surveillance, de prévention des risques et des crises, puis 3) de s'interroger d'un point de vue critique sur la nature même de ces données spatiales, faux miroirs du réel et vécus comme tels par leurs utilisateurs, mais devenus de redoutables outils de pouvoir et de contre-pouvoir, voire des armes de guerre.

The following article deals with the production of spatial data by using drones and satellites with a particular emphasis on the civil and humanitarian sphere. Though different spaces are explored, the investigation mainly focuses on the Syrian territory which gathers a wide range of actors that experiment many technical means. This research falls within a multidisciplinary perspective related to social studies and particularly builds upon geographical and anthropological contribution works. The investigation was carried out between Summer 2019 and October 2021. In order to achieve successful research completion, the investigation relies on thorough study of literature works related to drones and satellites on military and humanitarian field. This is part of a Post-Tomnod context where participatory projects are flourishing. Two books were particularly inspiring to this end: *La souffrance à distance* (1993) by Luc Boltanski and *Théorie du drone* (2013) by Grégoire Chamayou. Moreover, a number of qualitative interviews were conducted with individuals whose diverse profiles are representative of the many different actors that belong to the space-based data field. Each of them intervenes in the humanitarian, military and engineering field as well as in spatial agencies.

So as to contribute to the research on spatial data through an anthropological investigation on the development of the related tools, we shall explain the process of data fabrication with a look at the history, the use and the different representations of the world. Then, the idea is to present an overview of data use so as to analyze the political space especially in terms of information, surveillance, risks and crisis prevention. Thus, beyond its use as a power tool, space-based data can be seen as a tool for critical examination and to control power. Indeed, these tools can be used by humanitarian workers to monitor population shifts following an unexpected bombing.

Nonetheless, these interests must be balanced due to certain backlashes. In this criticism of the criticism itself, we shall mention "God's eye" point of view which is allowed by these tools that necessarily provide a panoptic gaze upon the people who are to be observed. The issue that this panoptic gaze comes along with is that it reifies observed individuals. This implies other difficulties. One of which is linked to the reality effect provoked by these images. This effect can be misleading because it deals with subjective realities as a result of their environment and analysis. God's eye ends up being fooled by a sham. Finally, it is crucial to put the technological imperative back into its political context and into the standards it meets. Indeed, by dint of not questioning the challenges linked to the reasons why a crisis occurred but rather on the means that can be used to help the victims, the process can be alienating and can induce a latent depoliticization of crises.

Eventually, the use of spatial-based data brings a lot of benefits especially in terms of information, surveillance, prevention, and critical analysis of power. However, these assets must be questioned. Drones have become fearsome power tools as well as opposition tools. Both drones and satellites purpose constitute a false mirror of reality to the extent that, due to the manufacturing of spatial-based data, they reveal subjective realities.

Index

Mots-clés : données spatiales, drones, satellites, crises, aide humanitaire, Syrie, technologies, développement

Keywords : spatial data, drones, satellites, crises, humanitarian aid, Syria, technologies, development

Auteur

Marvin Freyne

Géographe & anthropologue, doctorant, Université Paris Cité, IRD, Inserm, Ceped, F-75006 Paris, France

marvin.freyne@gmail.com

L'avènement des constellations de satellites dédiées au haut débit dans les territoires isolés : le cas de Starlink dans l'Arctique canadien

The Emergence of Satellite Constellations Dedicated to High-Speed Internet in Remote Areas: The Case of Starlink in the Canadian Arctic

Célestine Rabouam

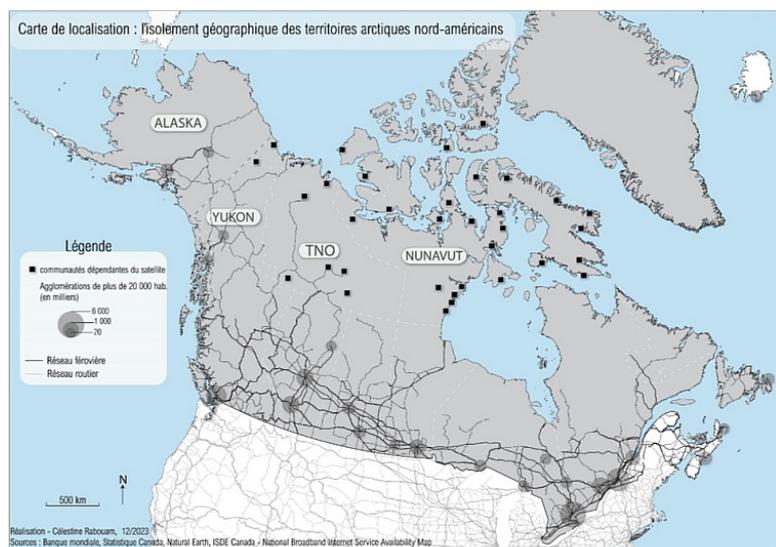
Introduction

Après s'être largement impliqué dans la guerre en Ukraine en mettant son réseau de satellites Starlink à disposition des Ukrainiens puis en remettant en cause l'utilisation militaire de sa constellation, Elon Musk annonçait le 28 octobre dernier son intention de « soutenir la connectivité des organisations d'aide internationalement reconnues » à Gaza¹. Alors que la société Starlink compte plus de 2 millions de clients dans 60 pays (Petrova, 2023), cette déclaration du PDG de SpaceX vient à nouveau questionner l'influence croissante du secteur privé dans des conflits géopolitiques et vient également réaffirmer la nature et la vocation stratégique des systèmes de télécommunications par satellite.

L'évolution technique des systèmes de télécommunications par satellite est aujourd'hui au cœur d'enjeux sociaux, économiques et géopolitiques et fait l'objet d'une réflexion de plus en plus approfondie sur les espaces et territoires dans lesquels ils s'inscrivent. Bien qu'ils n'assurent aujourd'hui qu'une infime partie du trafic internet international, les systèmes de télécommunications par satellites sont essentiels pour de nombreux secteurs d'activités mais également pour assurer des services dans les territoires ruraux et les communautés reculées où l'installation d'infrastructures terrestres est complexe et coûteuse. Cependant, malgré une nette amélioration des capacités techniques des satellites en orbite géostationnaire depuis les années 1960, ces systèmes de télécommunications ne permettent plus de répondre aux besoins contemporains des utilisateurs. Dans de nombreux pays, cette situation conforte l'inégalité numérique entre les populations qui disposent d'une connexion par fibres optiques et celles qui dépendent d'une connexion satellitaire généralement lente et onéreuse.

Alors que le développement des premiers satellites de communications était contrôlé par une poignée d'Etats dans les années 1960, les projets de constellations de satellites dédiés au haut débit sont désormais menés par des entreprises privées, qui exercent une influence croissante sur la gestion, le contrôle et l'accès à ces technologies (Pasco, 2019). Cette privatisation progressive soulève des interrogations quant à l'équilibre entre les intérêts sociaux, économiques et les enjeux de sécurité que servent les télécommunications par satellite. Cette situation favorise également l'émergence de nouveaux rapports de force entre les acteurs gouvernementaux et privés, ainsi que de nouvelles formes de dépendance vis-à-vis de ces derniers (Voelsen, 2021). Ces constellations offrent néanmoins de nouvelles opportunités dans les territoires isolés où les populations ne bénéficient que d'un accès limité aux ressources numériques. Dans de nombreuses communautés reculées de l'Arctique canadien, les communications dépendent entièrement des satellites car les contraintes géophysiques et géographiques (fonte du pergélisol, climat polaire, très faible densité de population, absence de routes) complexifient l'aménagement du territoire et l'installation de d'infrastructures numériques traditionnelles comme des câbles. Cette situation est d'autant plus problématique à l'Est de l'Arctique canadien, au Nunavut, car les services de télécommunications du territoire reposent uniquement sur les satellites. D'une part, cette situation de dépendance entrave la gouvernance décentralisée du territoire et d'autre part, elle accentue les inégalités sociales et d'accès aux ressources numériques qui touchent en priorité les populations autochtones, dont les Inuits qui représentent près de 86 % de la population au Nunavut (Statistique Canada, 2016).

Figure 1. Carte de localisation : l'isolement géographique des territoires arctiques nord-américains



L'arrivée en phase opérationnelle des constellations de satellites en orbites basses dans l'Arctique canadien est un sujet intrinsèquement géographique et géopolitique. En effet, l'introduction de ce nouveau système de télécommunication dans des territoires encore dépendant du satellite modifie les logiques spatiales d'organisation des infrastructures tout en redéfinissant les rapports de pouvoir entre les acteurs traditionnellement impliqués dans le développement numérique de ces territoires (gouvernement fédéral, gouvernement territorial, opérateurs et fournisseurs de services traditionnels, organisations autochtones). L'évolution technologique des satellites contribue ainsi à redéfinir les rapports de pouvoir à une échelle locale et régionale mais également à l'échelle globale car le développement et le contrôle de ces technologies sont concentrés dans les mains d'une minorité d'acteurs étatiques et privés qui peuvent alors renforcer leur influence économique, militaire ou culturelle.

En s'appuyant sur le cas de l'Arctique canadien, cet article vise ainsi à interroger les dimensions géopolitiques du développement des constellations de satellites en orbite basse et de leur passage en phase opérationnelle dans l'Arctique en se concentrant sur les répercussions de ce nouveau système de télécommunication sur les acteurs et les différents espaces et territoires dans lesquels ils s'inscrivent. En effet, bien que les satellites de communication circulent dans l'espace extra-atmosphérique, leurs conceptions, leurs pilotages et les services qu'ils assurent sont fermement ancrés dans des politiques terrestres (Warf, 2007). En visant une couverture globale, les constellations de satellites à haut débit font également l'objet d'une attention croissante de la part des gouvernements. La Chine et la Russie ont déjà commencé à développer leurs projets nationaux – Sfera et Guowang – et l'Union Européenne a également annoncé en novembre 2022 son propre projet destiné à sécuriser ses communications et Internet dans ses territoires. Avant de servir les intérêts des communautés isolées et mal connectées, les constellations Starlink et OneWeb ont notamment été testées par l'Armée américaine pour ses opérations dans l'Arctique².

L'autorisation obtenue par SpaceX pour le lancement de 12 000 satellites à l'horizon 2025 a soulevé beaucoup d'optimisme dans les communautés isolées de l'Arctique canadien. Cependant, pour les associations inuites, le gouvernement territorial et les agences fédérales, Starlink soulève également l'inquiétude d'une hégémonie privée et américaine sur les infrastructures de télécommunications spatiales et sur la topologie des réseaux, qui sont des lieux fondamentaux de l'exercice du pouvoir économique et politique (DeNardis et Musiani, 2016). La multiplication des projets de constellations et la vive compétition qui se joue entre des acteurs privés et étatiques qui les soutiennent soulèvent également un enjeu crucial concernant l'utilisation des orbites et des spectres et leur régulation à l'échelle internationale. Cet article vise ainsi à examiner les enjeux géopolitiques soulevés par l'accaparement et la saturation des espaces orbitaux les plus proches de la Terre et des espaces fréquentiels utilisés pour les télécommunications par satellite, une thématique peu abordée par la littérature en géopolitique. Le cas d'étude de l'Arctique canadien permet d'illustrer la pluralité des enjeux soulevés par la multiplication des constellations de satellites à haut débit mais également d'identifier les répercussions de leur déploiement sur les territoires qu'elles visent en premier lieu à desservir : les moins connectés. Dans une première partie, cet article cherchera à montrer l'évolution du rôle des Etats et des acteurs privés dans le développement technologique des systèmes de télécommunications par satellite. En s'appuyant sur le cas de l'Arctique canadien, la seconde partie de l'article vise à identifier les répercussions de cette évolution à la fois technologique et géopolitique sur l'organisation numérique de ces territoires.

Les constellations de satellites et l'universalisation du haut débit : des objets techniques qui soulèvent des enjeux géopolitiques à plusieurs échelles

L'évolution des systèmes de télécommunications par satellite pour atteindre le haut débit

Depuis le lancement des premiers satellites de communications dans les années 1960, l'orbite géostationnaire, circulaire ou géosynchrone, est désignée comme l'orbite reine pour les télécommunications³. En gravitant à environ 36 000 km d'altitude, les satellites lancés sur cette orbite tournent à la même vitesse angulaire que la terre et apparaissent comme des points fixes dans le ciel pour l'utilisateur. Cette orbite présente un avantage de choix pour les opérateurs de satellite car elle permet de couvrir de vastes espaces grâce à des faisceaux de couverture très larges qui leur permettent de viser des marchés d'utilisateurs dans de nombreux territoires. Les satellites en orbite géostationnaire ont néanmoins un inconvénient majeur : la distance entre le satellite et l'utilisateur.

Afin de comprendre les enjeux posés par la distance entre l'utilisateur et le satellite, il convient de rappeler succinctement le fonctionnement d'une communication par satellite. Lorsqu'un utilisateur se connecte à Internet grâce à une connexion satellite, ses paquets de données sont transformés en signaux depuis son terminal utilisateur avant de traverser l'espace libre pour rejoindre le satellite. Le satellite va ensuite décrypter la requête de l'utilisateur puis renvoyer le signal vers une station au sol connectée à une dorsale Internet. Le signal doit alors remonter jusqu'au satellite, à 36 000 km d'altitude (pour les satellites en orbite géostationnaire), puis redescendre vers le terminal utilisateur afin de le connecter à Internet. Ces allers-retours entre le terminal utilisateur, le satellite et la station au sol ont un impact concret sur les temps de latence pour les utilisateurs. Généralement, la latence de propagation – c'est-à-dire le délai de transmission pour passer de la source à la destination à travers un réseau – est imperceptible pour l'utilisateur car les paquets de données transformés en signaux voyagent à la vitesse de la lumière entre les équipements du réseau. Or, la vitesse de la lumière dans le vide est de 299 792 km/s et on estime qu'elle est d'environ 200 000 km/s dans une fibre optique (Bigo et Hamaide, 2006). C'est donc en calculant le rapport entre la distance et la vitesse de la lumière que nous obtenons un temps de latence théorique pour une communication.

Pour une communication par fibre optique, la latence est généralement moins importante que pour une communication par satellite car les distances parcourues par les données à la vitesse de la lumière sont plus courtes. En effet, même si les données passent par un câble qui fait le tour de la Terre (soit environ 40 000 km), la distance et donc, *in fine*, la latence théorique, est toujours moins importante que pour une communication par satellite. Avec un satellite en orbite géostationnaire, les données doivent parcourir 36 000 km puis revenir sur Terre (= 72 000 km). De plus, un deuxième aller-retour s'ajoute généralement à cette

distance pour que les données rejoignent la station au sol du fournisseur d'accès connectée à la dorsale Internet. La distance que doivent parcourir les signaux pour atteindre leurs cibles les expose également aux perturbations météorologiques, tant terrestres qu’extra-atmosphériques⁴.

La question de la distance entre le satellite de télécommunication et l'utilisateur est donc cruciale pour les opérateurs qui, dès le début des années 1990, vont s’intéresser aux orbites basses pour améliorer leurs services. Plusieurs projets de constellations commerciales d'environ une centaine de satellites vont alors voir le jour, mais très peu aboutissent étant donné le coût trop important des lancements. Les constellations Globalstar et Iridium, qui se concentrent sur les services de téléphonie par satellite, sont les seuls projets à aboutir et sont d'ailleurs toujours en fonctionnement.

Au niveau des services Internet, malgré une nette amélioration des capacités techniques des satellites en orbite géostationnaire depuis les années 1960, ces systèmes de télécommunications sont progressivement considérés comme obsolètes par rapport aux infrastructures terrestres comme les câbles à fibres optiques, qui permettent d'atteindre des vitesses bien supérieures au satellite pour des coûts inférieurs. Pour les services d'accès à Internet, il faudra attendre 2007 et le lancement de la société privée O3b Networks pour qu'un opérateur décide de réduire la distance entre l'utilisateur et le satellite dans l'optique d'adapter les communications par satellites aux attentes et aux usages du numérique contemporains. Le projet de constellation O3b, porté par Greg Wyler et soutenu financièrement par d'importants partenaires privés comme Google ou SES, ambitionne alors de placer sa flotte de satellites sur une orbite moyenne, à environ 8 000 kilomètres d'altitude afin de réduire la latence des communications⁵. En 2012, Greg Wyler quitte O3b pour fonder WorldVu Satellites Limited, opérant alors sous le nom de OneWeb et en janvier 2015, la société annonce son intention de construire, lancer et exploiter une constellation de satellites en orbite terrestre basse dédiée à l'Internet haut débit. Le même mois, le projet de constellation en orbite basse Starlink est annoncé pour la première fois par SpaceX et quelques années plus tard, en 2017 puis en 2019, Telesat et Amazon vont lancer leurs propres projets de constellations Lightspeed et Kuiper. Alors que le développement des satellites en orbite géostationnaire était encadré et contrôlé par les quelques Etats ayant les capacités d'envoyer des satellites dans l'espace dans les années 1960, les premières constellations de satellites en orbites basses et dédiées à l'Internet haut débit vont être développées sous la houlette d'acteurs privés qui s'inscrivent dans un marché de plus en plus compétitif.

D'un point de vue technique, le haut débit est défini par la capacité de transmission de données au sein d'un réseau mais la valeur associée au haut débit varie quant à elle en fonction des États et des organes de régulation qui associent généralement au terme de haut débit des politiques publiques visant à améliorer les services numériques pour la population. Il existe de nombreuses définitions du haut débit qui correspondent donc généralement aux contextes réglementaires et aux politiques publiques des territoires concernés. Par exemple, en France, l'ARCEP parle d'accès internet « haut débit » lorsque le débit est inférieur à 30 Mb/s⁶ alors qu'au Canada, le CRTC le définit depuis 2016 comme un service permettant des vitesses d'au moins 50 Mb/s en téléchargement (transfert de données entre Internet et l'appareil) et 10 Mb/s en téléversement (transfert de données entre l'appareil et Internet). Dans le cadre de la stratégie canadienne pour la connectivité soutenue par le ministère de l'Innovation, des Sciences et du Développement économique, le principal objectif est d'apporter le « haut débit » à l'ensemble de la population canadienne d'ici 2030⁷.

Le débit – c’est-à-dire la quantité de données qui peuvent être transférées sur un réseau en une unité de temps – et la latence de propagation des données sont deux aspects distincts. Un débit plus élevé n'est donc pas caractérisé par une latence plus faible. Afin d'améliorer les services, les opérateurs de satellites, qu'ils soient géostationnaires ou en orbites basses, doivent ainsi miser sur d'autres aspects comme l'utilisation de bandes de fréquences plus élevées, des modulations avancées et des technologies de compression de données.

Jusqu'à la fin des années 2010, les méga constellations dédiées au haut débit ne sont pas réellement prises au sérieux par les acteurs étatiques. La prise de conscience de l'intérêt stratégique et sécuritaire de ce type de constellation est en partie due à la faillite du projet OneWeb en 2020. La société américaine prévoyait de fournir des services de communications haut débit dans l'Arctique pour l'armée et sa mise en faillite a fait ressortir de nombreuses inquiétudes concernant un potentiel rachat des actifs de Oneweb par des acteurs chinois. Le lieutenant-général David Thompson, vice-commandant de l'US Space Force avait notamment déclaré que le Département de la défense américaine ainsi que la Maison Blanche et le Congrès travaillaient sur cette question et voulaient s'assurer que leurs adversaires ne disposent pas la possibilité d'acquérir ces capacités (Erwin, 2020). Les actifs de Oneweb seront finalement rachetés en juillet 2020 par le gouvernement britannique et le conglomérat indien Bharti Global (Henry, 2020).

Bien que les premières phases du développement des constellations de satellites en orbites basses à haut débit aient été largement investies par des acteurs privés, les Etats mesurent désormais pleinement les capacités stratégiques de ces technologies. Cette situation se traduit aujourd'hui par une multiplication des projets gouvernementaux visant à obtenir cet outil technologique – le projet Guowang ou Xinhuang chinois, le projet russe Sfera ou la constellation européenne Iris2 – et donne lieu à de nouvelles réflexions sur l'accaparement et la saturation des orbites basses et des espaces fréquentiels. Ces projets de constellations leur réseau néanmoins loin d'être opérationnels et leurs objectifs, notamment en termes de couverture, ne sont pas encore publics.

Les orbites basses et les bandes de fréquences : des ressources stratégiques à réguler

En se positionnant sur le marché des télécommunications satellitaires, les opérateurs privés comme SpaceX s'inscrivent progressivement dans des domaines stratégiques pour les Etats comme la gouvernance de l'Internet et la gouvernance de l'environnement spatial. La réduction progressive des coûts de lancement depuis le milieu des années 2000 a permis à de nouveaux acteurs de s’insérer dans le secteur des télécommunications par satellite. La nature compétitive de ce marché engendre aujourd'hui de nouveaux débats sur l'utilisation et la régulation des orbites basses et des bandes de fréquence, qui représentent des espaces et des ressources éminemment stratégiques pour les Etats et les acteurs privés qui les exploitent. Ces débats dépassent même la sphère de l'aérospatial pour toucher directement l'écosystème des télécommunications dans la mesure où l'exploitation de la bande 12 GHz pour la 5 G, vivement critiquée par SpaceX, a fait l'objet en mars 2021 d'une réunion entre les représentants d'AT&T, Dish Network, RS Access et OneWeb, sur la possibilité de partager la bande entre l'usage satellitaire et terrestre. En effet, la bande 12 GHz est utilisée depuis de nombreuses années par les opérateurs de satellite car elle offre d'importants avantages par rapport aux autres bandes de fréquence. Elle permet notamment de diminuer la taille des antennes de réception et donc de réduire le coût des équipements au sol, tout en s'adaptant aux transmissions à large bande, ce qui lui confère la possibilité de transporter des données à des débits élevés et donc de répondre à la demande de connectivité haut débit promise par les constellations en orbites basses. Starlink et Oneweb s'appuient donc sur la bande 10.7-12.7 GHz pour assurer leurs liaisons utilisateurs et les deux opérateurs se sont vivement opposés à l'ouverture de la bande 12 GHz pour l'exploitation de la 5G, arguant les problèmes d'interférences qu'elle pourrait engendrer avec leurs constellations (Alleven, 2022). Les systèmes de télécommunications par satellite s'appuient sur un choix limité de bandes de fréquence pour fournir leurs services. La bande de fréquence la plus utilisée est la bande Ku entre 12 et 18 GHz. La bande Ka est comprise entre 26,5 et 40 GHz, la bande V entre 40 à 75 GHz, la bande Q entre 33 à 50 GHz et la bande C entre 3,7 et 4,2 GHz. Pour la majorité des systèmes de télécommunications par satellite, les opérateurs utilisent plusieurs bandes de fréquence pour optimiser les liaisons entre les différentes entités qui composent leur réseau. Les bandes Ku et Ka sont généralement exploitées pour les liaisons entre les satellites et les terminaux des utilisateurs et les bandes Q/V – optimisées mais plus chères – sont utilisées pour les liaisons avec les stations de raccordement au réseau terrestre⁸.

Pour utiliser ces fréquences, les opérateurs de satellites doivent demander des licences d'exploitation auprès des organismes de régulation nationaux en détaillant les plans orbitaux sur lesquels ils prévoient de placer leurs satellites et les fréquences utilisées. Ces licences sont attribuées en fonction des besoins du marché et des ressources disponibles en matière de spectre. Lorsqu'elles sont effectivement acceptées, l'organe de régulation dépose la demande auprès de l'Union Internationale des Télécommunications. Cette organisation internationale ne dispose pas des compétences légales pour approuver ou refuser les demandes de lancements et d'exploitation de fréquences, son rôle est plutôt de gérer la coordination internationale, la notification et l'enregistrement des fréquences radio spécifiques émises et reçues par les satellites. Pour chaque satellite ou grappe de satellite, l'Union Internationale des Télécommunication va affecter un certain espace fréquentiel que le satellite pourra utiliser sans prendre le risque d'interférer avec ses voisins. Dans le cadre de ce processus, l'UIT donne la priorité de fréquence aux satellites en orbite géostationnaire (Foust, 2015), ce qui oblige les opérateurs de constellations de satellites en orbites basses à trouver des espaces fréquentiels qui correspondent aux besoins opérationnels de leur constellation tout en s'assurant de ne pas interférer avec les satellites GEO. Les nouveaux projets de constellations et les projets les moins avancés sont donc particulièrement désavantagés car ils comptent s'appuyer sur les mêmes espaces fréquentiels et devront veiller à ne pas interférer avec les satellites GEO en plus des satellites en orbites basses des constellations déjà opérationnelles.

Par rapport aux orbites hautes accaparées par les premières puissances spatiales, les orbites basses sont accessibles (en termes de coût et de logistique) à beaucoup plus d'acteurs étatiques et privés, ce qui en complexifie la gestion. Avec les constellations de satellites, on a donc une multiplication des demandes de lancements en orbites basses alors que le processus de l'Union Internationale des Télécommunications pour l'obtention d'espaces fréquentiels reste le même que pour les satellites en orbite géostationnaires. Il est néanmoins important de souligner que le cadre réglementaire international ne prend pas en charge la fourniture de services par satellite dans un pays particulier sans les procédures d'autorisation et de licence appropriées. C'est ce qu'on appelle les droits d'atterrissage, et les pays décident eux-mêmes de leurs conditions. L'installation de stations au sol, les licences d'utilisation du spectre de fréquences, les licences de fournisseur de services Internet et l'importation de terminaux d'utilisateurs sont toutes soumises aux lois et aux réglementations des juridictions hôtes (Akcali Gur et Kulesza, 2023).

Avec la multiplication des projets de constellations de satellites à laquelle on assiste ces dernières années les plans orbitaux situés entre 500 et 2000 km d'altitude sont de plus en plus convoités et cette situation se traduit par une évolution des rapports de force entre les opérateurs privés qui développent ces constellations. L'entreprise Amazon s'était notamment opposée à la demande de modification des plans orbitaux de la deuxième génération des satellites Starlink auprès de la FCC, arguant que cette modification doublait l'effort technique auquel les opérateurs comme Amazon sont confrontés pour examiner les problèmes d'interférence et de débris orbitaux vis-à-vis de Starlink (Brodkin, 2021). La constellation Starlink est particulièrement compétitive par rapport à ses concurrents car elle s'appuie sur les atouts considérables de sa société mère SpaceX qui dispose notamment de lanceurs partiellement réutilisables qui réduisent considérablement les coûts de lancement. En effet, détenir une capacité de lancement est un enjeu clé pour les opérateurs mais aussi pour les Etats qui projettent de déployer leur constellation. Les concurrents directs de Starlink, Oneweb et Amazon ont d'ailleurs fait appel à SpaceX pour leurs propres lancements car l'entreprise propose des solutions de lancements très efficaces grâce à des coûts réduits et une fréquence de lancement élevée (Zafagani, 2023).

Les stratégies de blocage des concurrents de SpaceX n'ont pas permis de réellement bloquer les lancements des satellites, mais ont néanmoins freiné les plans de l'entreprise concernant la couverture des zones polaires. En novembre 2020, SpaceX demande à la FCC une approbation accélérée « pour faciliter le déploiement de 348 satellites Starlink sur des orbites polaires héliosynchrones à basse altitude », mais l'organe de régulation américain n'en approuve que 10, estimant devoir répondre aux problèmes d'interférence soulevés par d'autres opérateurs de satellite (Brodkin, 2021). Les entreprises Amazon, ViaSat, Kepler Communications et Pacific Dataport – un opérateur situé en Alaska et dont le partenaire de distribution est Oneweb – se sont également opposés à l'autorisation du FCC concernant les 10 satellites. Dans sa réponse formulée au FCC, SpaceX a fait valoir que l'ajout de satellites sur des orbites polaires lui permettrait de commencer le service en Alaska, et d'apporter le même service haut débit dans les régions les plus reculées de cet Etat en insistant sur les répercussions de la pandémie sur les besoins numériques de la population.

L'orbite polaire héliosynchrone à basse altitude, privilégiée par Starlink et Oneweb, est particulièrement stratégique pour la couverture des zones arctiques. L'inclinaison orbitale héliosynchrone permet aux satellites de passer directement au-dessus des pôles tout en maintenant une trajectoire constante par rapport à la position du Soleil et de la Terre. Les satellites en orbite héliosynchrone suivent une trajectoire synchronisée avec la position du soleil, ce qui permet également une couverture continue dans l'Arctique où les éclipses solaires prolongées peuvent affecter l'alimentation en énergie solaire des satellites tout l'hiver.

Starlink et OneWeb sur la connectivité polaire : deux modèles qui s’affrontent

La connectivité polaire est un domaine éminemment politique pour les Etats arctiques⁹ qui doivent assurer la disponibilité des services de communications dans ces territoires. La couverture de la zone arctique intéresse donc en premier lieu ces acteurs. Dans le cadre de leurs programmes nationaux, les Etats-Unis, le Canada, la Norvège ainsi que la Russie exploitent des satellites de télécommunications ayant une couverture polaire. Au-delà de l'enjeu de la connectivité pour les territoires arctiques, la couverture de la zone est aujourd'hui cruciale pour la surveillance environnementale, la navigation et la sécurité maritime mais également pour l'exploration et la gestion des ressources naturelles. L'accent mis par SpaceX et Oneweb sur la couverture polaire de leurs constellations répond donc également à ces enjeux. Comme mentionné plus haut, les deux constellations ont d'abord été testées dans l'Arctique à des fins militaires et opérationnelles et sont aujourd'hui également utilisées pour répondre aux besoins des entreprises d'exploitation minière et d'extraction de ressources dans la zone.

La couverture polaire présente plusieurs défis pour les opérateurs de satellites. D'une part, la latitude élevée des territoires arctiques se traduit par un angle d'élévation faible pour les satellites qui couvrent cette zone, ce qui peut entraîner des atténuations de signal. Et d'autre part, les régions polaires sont particulièrement sujettes aux variations ionosphériques – qui influencent la propagation des ondes radioélectriques – ainsi qu'à l'effet Faraday (les signaux traversent la magnétosphère terrestre, modifiant leur polarisation) qui peut aussi entraîner des perturbations des signaux et affecter les communications. Les conditions météorologiques extrêmes s'ajoutent également à ces défis et peuvent affecter la stabilité des équipements de transmission et de réception. Alors que les concurrents directs et indirects de SpaceX se sont opposés en bloc à ses premiers lancements de satellites au niveau des orbites polaires, l'entreprise a bénéficié d'un important soutien de plusieurs organisations et entreprises basées en Alaska qui ont envoyé des lettres à l'organisme de régulation américain pour justifier la demande de SpaceX et les intérêts publics que son service apporterait à la population. Les lettres insistaient notamment sur la rareté du service proposé par Starlink et sur les difficultés rencontrées à l'échelle locale pour atteindre des niveaux de connectivité qui répondent aux besoins de la population¹⁰.

Dans les communautés rurales et isolées de l'Arctique canadien et en Alaska dans une moindre mesure, le choix des opérateurs et fournisseurs d'accès internet est très limité et la compétition est presque inexistante. Cette situation a engendré une forte frustration des populations qui réclament plus de choix. Or, SpaceX est le seul opérateur de constellation qui vend directement ses services à la population, agissant comme un fournisseur d'accès internet. Pour l'instant, les concurrents directs de SpaceX qui aspirent à connecter les territoires arctiques agissent uniquement comme des opérateurs de satellite et vendent leur bande passante aux fournisseurs d'accès déjà présent sur le territoire. Oneweb et le projet canadien Lightspeed développé par Telesat ont d'ailleurs signé des accords avec NorthwesTel, le principal fournisseur internet dans l'Arctique

canadien et Pacific Dataport, une filiale de Microcom qui dessert une partie de l'Alaska rurale (2021). En Alaska, Pacific Dataport s'est fortement opposé à Starlink auprès de la FCC et a poursuivi ses efforts en publiant un livre blanc « Clearing the LEO fog in Alaska » dans lequel la constellation Oneweb est présentée comme l'option la plus sûre et la plus rapide pour les populations rurales située en Arctique, alors que le projet Starlink est accusé de vouloir influencer les agences de réglementation et de s'appuyer sur des campagnes populistes.

L'autorisation obtenue par SpaceX pour le lancement de ses satellites en orbites polaires a donc donné lieu à d'importantes contestations de la part des concurrents de la constellation en Arctique. Les critiques envers Starlink s'articulent également sur les supposés bénéfices du service pour les populations locales. En effet, même si la disponibilité de Starlink dans les communautés isolées et reculées de l'Arctique permet aux utilisateurs de choisir un nouveau service plus performant, l'entreprise n'est pas physiquement présente sur le territoire, ce qui soulève certains problèmes. D'une part, SpaceX ne participe pas à l'économie de ces territoires et contrairement aux fournisseurs d'accès traditionnels, elle n'emploie pas de main-d'œuvre locale et d'autre part, les utilisateurs situés dans les communautés isolées n'ont accès à aucun service client dédié aux utilisateurs pour rapporter des problèmes. La matérialité du service est pourtant un enjeu de taille dans ces communautés, car il y a très peu de profils techniques pouvant aider à l'installation du service ou à sa mise en marche. Or, l'un des principaux arguments de SpaceX pour lancer ses satellites en orbites polaires est l'intérêt civil de ce service pour les populations les moins connectées du monde, notamment dans l'Arctique.

Les opérateurs de constellations misent sur les liaisons optiques inter-satellites qui permettent aux données de circuler à la vitesse de la lumière d'un satellite à un autre, afin de rejoindre le plus rapidement possible la station au sol qui se connecte à la dorsale Internet puis au terminal de l'utilisateur. Ce système permet de réduire la latence et le besoin de stations au sol en formant un réseau maillé interconnecté qui permet aux utilisateurs d'accéder au réseau peu importe où ils se trouvent. Les paquets de données des utilisateurs transitent de satellite en satellite jusqu'à la station au sol la plus proche, remontent jusqu'au satellite et transitent à nouveau entre les satellites de la constellation pour atteindre celui qui est le plus proche de l'utilisateur (Rodríguez-Perez *et al.*, 2011). Actuellement, la seconde génération des satellites Starlink – dont ceux lancés sur l'orbite polaire – sont les seuls à être équipés de cette technologie ce qui permet à Starlink de contourner les coûts de la construction ou l'exploitation de stations au sol dans l'Arctique (Foust, 2021). L'utilisation des liens optiques inter-satellites confère donc à la constellation Starlink un avantage de choix pour la couverture des zones polaires, à la fois au niveau des coûts d'exploitation et des services. Oneweb a achevé sa couverture polaire il y a plusieurs mois, mais la première génération de ses satellites n'intègre pas de liaisons optiques intersatellites, ce qui semble avoir un impact sur la qualité de ses services dans l'Arctique. En décembre 2022, le groupe de lobbyiste de l'Alaska Telecom Association déposait auprès de la FCC un document dans lequel elle mentionnait des niveaux de connectivité peu satisfaisants et des coûts associés à l'exploitation trop importants pour un réseau résidentiel destiné aux populations rurales d'Alaska (Swinhoe, 2023).

L'intensification des débats sur les opportunités et les défis soulevés par l'arrivée des constellations de satellites en orbites basses dans les communautés isolées de l'Arctique souligne ainsi la tension permanente qui subsiste entre la vocation sociétale et la vocation économique et politique des ressources et des infrastructures numériques.

Les constellations de satellites dédiées au haut débit : facteurs de risques et d'opportunités pour les communautés isolées de l'Arctique

Le marché des télécommunications arctiques : un secteur dominé par Bell Canada et sa filiale NorthwesTel

En matière de télécommunications, les trois territoires arctiques (Yukon, Territoires du Nord-Ouest et Nunavut)¹¹ disposent d'une histoire commune liée aux monopoles exercés par BCE (anciennement Bell Canada) puis NorthwesTel au Yukon, dans les Territoires du Nord-Ouest (TNO) et au Nunavut. Avant la dérégulation des télécommunications en 1992 et l'introduction de la compétition sur les marchés, le gouvernement avait attribué des monopoles aux principales entreprises de télécommunications canadiennes afin qu'elles assurent l'ensemble des services dans les territoires concernés par les monopoles (Poitras, 2000). En 1992, le monopole de Bell sur l'Est de l'Arctique canadien prend fin mais sa filiale NorthwesTel créée en 1979 obtient un prolongement du monopole au Yukon, dans les TNO et au Nunavut jusqu'en 2012 (Delaunay, 2021, p.255). Cependant, ces trois territoires n'ont pas accès aux mêmes technologies pour assurer des services de télécommunications et cette différence alimente les inégalités entre les populations. Alors que l'infrastructure de télécommunications du Yukon repose presque exclusivement sur des câbles terrestres de fibres optiques opérée par NorthwesTel, les TNO s'appuient sur une combinaison de plusieurs technologies (satellites GEO, câbles et réseaux à tour micro-ondes) et le Nunavut est totalement dépendant des systèmes de télécommunications satellitaires (Delaunay, 2014). Pour connecter les communautés reculées et isolées de l'arctique canadien, le gouvernement fédéral s'appuie depuis toujours sur les satellites géostationnaires opérés par l'entreprise Telesat car ils permettent de contourner les contraintes liées à l'aménagement d'infrastructures numériques dans les espaces ruraux et peu densément peuplés (Delaunay, 2021, p. 249-288). Or, ce choix technologique a rendu de nombreuses communautés dépendantes à un système coûteux et qui n'offre qu'une bande passante limitée.

La position monopolistique de NorthwesTel sur le marché des télécommunications des trois territoires bloque également l'arrivée d'acteurs concurrentiels et conforte l'inégalité de l'accès à Internet vis-à-vis des populations du Sud, mais aussi entre les classes sociales au niveau local. Au Nunavut, le coût de la vie est beaucoup plus élevé que dans le reste du Canada et les ménages les plus précaires ne peuvent généralement pas se permettre de payer un forfait Internet. Le choix du gouvernement fédéral de s'appuyer sur des systèmes satellitaires pour connecter ses populations arctiques a engendré des conséquences importantes sur l'attribution des financements qui ont suivi, car les projets d'infrastructures terrestres sont considérés comme trop risqués et coûteux par rapport aux infrastructures satellitaires déjà présentes sur ces territoires et exploitées par les entreprises de télécommunications traditionnelles. Cette tendance s'observe surtout au Nunavut où le réseau routier est limité et où le développement de câbles terrestres demanderait un aménagement complexe en termes de logistique (Coelho, 2018).

Le choix du satellite pour connecter les populations rurales de l'arctique canadien s'explique effectivement par les défis techniques soulevés par la pose de câbles dans ces territoires. D'une part, les câbles terrestres sont soumis aux conditions climatiques extrêmes et à l'instabilité des pergélisols qui complexifie l'aménagement des infrastructures et leur maintenance. Et d'autre part, la pose de câbles sous-marins dans le passage du Nord-Ouest demande un effort important en matière d'étude de faisabilité et d'impact environnemental car ce passage maritime est recouvert de glace durant une partie de l'année. En plus de ces efforts, les masses de glace qui se détachent progressivement du continent peuvent causer des dommages près de la section côtière d'un câble si elle n'est pas correctement protégée. Lors de la construction des premiers segments du câble alaskien Quintillion en 2017, du béton a même été posé pour renforcer l'installation et protéger davantage la filiale (Green, 2018).

Les inégalités numériques dans l'Arctique canadien : un terreau fertile pour les premières constellations opérationnelles

La dépendance aux satellites dans les communautés reculées de l'Arctique canadien est associée à la difficulté d'installer des infrastructures de télécommunications traditionnelles sur le territoire, ce qui en fait un candidat particulièrement enthousiaste concernant l'utilisation des constellations de satellites en orbites basses. Bien que les satellites de télécommunications en orbite géostationnaire se soient améliorés depuis les années 1970, les Fournisseurs d'Accès Internet (FAI) locaux sont toujours confrontés à de nombreux défis pour assurer des services similaires à ceux proposés au sud du pays grâce aux infrastructures terrestres. Ils doivent s'engager sur de longs contrats auprès des opérateurs de satellites comme Telesat afin d'acheter des capacités de bande passante. Dans l'Arctique canadien, NorthwesTel domine largement le marché et possède une grande partie des infrastructures terrestres : les stations au sol pour la réception de données satellitaires et le relais, les tours à micro-ondes et les câbles n'appartenant pas aux gouvernements territoriaux du Yukon et des TNO. Dans les communautés isolées, NorthwesTel s'appuie sur la bande passante du satellite Telstar Vantage 19 de Telesat mais la capacité de bande passante n'est pas suffisante pour l'ensemble des communautés et l'encombrement des réseaux qui en résulte augmente considérablement le temps de latence des communications. Le satellite de Telesat est également confronté à de nombreux défis techniques liés à la distance entre le satellite en orbite géostationnaire et les stations au sol car la météo terrestre comme la météo extra-atmosphérique peuvent venir perturber le signal entre l'infrastructure terrestre et le satellite. Les interruptions sont donc fréquentes et peuvent parfois durer plusieurs jours¹².

Depuis le lancement des principaux fonds pour la large bande et la réduction des inégalités numériques au Canada, NorthwesTel a bénéficié de plusieurs subventions pour améliorer la connectivité dans les territoires arctiques. L'entreprise avait notamment bénéficié d'un financement de \$49,9 millions qui lui a permis de mettre en service en 2019 son nouveau réseau « Tamarmiik Nunaliit » et d'installer des stations au sol dans toutes les communautés du Nunavut (Frizzel, 2017). L'octroi de cette subvention avait alors fait l'objet de vives critiques car l'initiative de NorthwesTel ne répondait pas aux problématiques rencontrées localement : l'encombrement de la bande passante et le manque de résilience lié à la dépendance au satellite.

Les critiques des utilisateurs concernant les services de NorthwesTel dans les communautés dépendantes de satellites s'articulent surtout autour du prix des forfaits internet qui ne répondent pas aux vitesses de connexion promises et des coûts de dépassement extrêmement importants. L'entreprise propose des forfaits illimités dans les zones les plus peuplées où elle exploite des câbles à fibres optiques mais ces offres ne sont pas disponibles dans les communautés dépendantes du satellite. De plus, la réputation de NorthwesTel est particulièrement mauvaise dans l'Arctique canadien. L'entreprise est notamment critiquée pour avoir privilégié des investissements dans les zones plus peuplées et plus lucratives de l'Arctique aux dépens des petites communautés isolées. Cette situation a d'ailleurs conduit à la décision historique du CRTc en 2012 d'obliger l'entreprise à mettre à niveau ses infrastructures au Nord car les services n'étaient pas satisfaisants au regard des bénéfices fait par l'entreprise (Delaunay, 2021, p.255).

La construction et le renforcement du ressentiment de la population nunavummiut pour les FAI traditionnels dans le Nord a ainsi permis de créer un terreau particulièrement fertile pour les constellations de satellites étrangères comme Starlink et Oneweb. L'objectif de ces constellations étant d'universaliser le haut débit jusque dans les territoires les plus reculés et isolés, leur mise en service dans l'arctique canadien était particulièrement attendue par les utilisateurs. Les deux constellations sont maintenant disponibles. Oneweb est disponible via des partenaires de distribution canadiens depuis l'été 2022 et Starlink a étendu ses services au Yukon, aux Territoires du Nord-Ouest et au Nunavut au mois de novembre la même année. L'opérateur canadien Telesat a également lancé son propre projet de constellation de satellites, Lightspeed mais a pris des retards importants par rapport à Oneweb et Starlink. La constellation devait être opérationnelle en 2024 mais Telesat a annoncé en mars 2022 que la mise en service pourrait être retardée jusqu'en 2026 (De Selding, 2022).

Le modèle économique de Starlink lui permet de contourner les fournisseurs d'accès traditionnels en vendant l'accès Internet directement aux utilisateurs contrairement à OneWeb qui a signé en août 2021 un protocole d'entente avec NorthwesTel pour étendre les solutions de connectivité pour la population, les entreprises, les gouvernements et l'exploitation minière. Initialement, NorthwesTel prévoyait de s'appuyer uniquement sur la constellation de Telesat mais l'entreprise n'a pas écarté la piste de OneWeb pour répondre à leurs objectifs dans le cadre du projet « every community » (NorthwesTel, 2020). Ce projet s'appuie sur plusieurs technologies (câbles, tour à micro-ondes et constellations en orbite basse) pour apporter le haut débit à l'ensemble de la population des TNO et du Yukon. Le projet ne concerne donc pas le Nunavut, même si Lightspeed a aussi vocation à desservir ce territoire. Si la population attendait avec beaucoup d'impatience la mise en service de Starlink au Nunavut, c'est justement parceque Oneweb et Lightspeed sont associées aux fournisseurs traditionnels comme NorthwesTel dont l'image de marque est particulièrement abimée au nord.

La rapidité de déploiement de Starlink semble avoir pris au dépourvu les fournisseurs de services internet – peu nombreux dans l'Arctique canadien – qui craignent aujourd'hui de perdre une part de leur marché au profit de Starlink. C'est notamment le cas de NorthwesTel qui a interpellé le CRTc avant même que le service ne soit disponible dans l'Arctique, pour l'aider à contrer la menace concurrentielle que représente ce nouvel acteur. En 2021, l'entreprise a notamment demandé à l'organe de régulation de modifier le processus de dépôt des tarifs pour les services Internet de détail afin qu'il puisse se préparer à l'arrivée de Starlink sur le marché des télécommunications arctiques¹³. Même si Starlink n'a pas encore complété sa couverture polaire, la constellation a reçu un franc succès au Nunavut et a même engendré une levée de boucliers contre la société de logement Northview car celle-ci n'accepte pas que ses locataires posent des antennes Starlink à leur domicile. Une pétition a d'ailleurs été lancée le 04 décembre 2022 pour obliger Northview a laisser ses locataires accéder au service Starlink (Cohen, 2022).

L'avènement des constellations et l'implication croissante des organisations autochtones dans le développement des télécommunications arctiques

Au Canada, les télécommunications sont considérées comme des outils indispensables pour unir la population étant donné l'immensité du territoire et la distance qui sépare les différentes populations. Cette représentation est d'autant plus forte dans les territoires arctiques où l'étendue des entités territoriales se combine à la faiblesse des infrastructures routières, voire à leur absence dans certaines communautés (Charland, 1986). L'accès à Internet soulève également un enjeu particulièrement important à l'échelle nationale : l'égalité socio-économique entre les populations autochtones et les populations non autochtones. Depuis le 21 décembre 2016, le Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes (CRTc) définit l'accès à l'Internet haut débit sans limites de volume de données et avec une vitesse minimale de 50-10 Mb/s, comme un service universel de base à fournir à chaque Canadien, reconnaissant par la même occasion qu'Internet est un outil essentiel au développement économique d'un territoire (CRTc, 21 décembre 2016). Confortée par la pandémie de la COVID-19 et par la généralisation des études et du travail en distanciel qui en résultent, cette déclaration du CRTc admet ainsi que l'accès à Internet doit être considéré comme un vecteur d'égalité sociale, économique, mais également politique puisqu'il permet la participation démocratique aux débats qui se tiennent de plus en plus en ligne (CRTc, 2016).

Le contexte de réconciliation – co-négocié entre Ottawa et les organisations autochtones à partir de 2008 – tient également une place importante dans les discours liés à l'équité numérique au Canada. L'accès aux ressources numériques n'est pas seulement pensé comme un besoin universel, mais comme un outil politique pour répondre aux besoins spécifiques des communautés autochtones. La réconciliation avec les

populations autochtones au Canada s'appuie effectivement sur des leviers économiques et politiques. Au niveau des télécommunications, les initiatives qui s'inscrivent dans cette logique de réconciliation doivent permettre aux communautés autochtones d'atteindre une souveraineté numérique en leur donnant la possibilité de détenir et de décider de l'organisation et la gestion de leurs données et infrastructures numériques. Les infrastructures numériques sont donc pensées comme des outils d'émancipation dont les communautés doivent se saisir afin de contrôler les usages et effets du numérique et de s'assurer qu'ils répondent à leurs besoins spécifiques (McMahon, 2013).

Depuis 2007, le réseau Kuhkenah (KO-KNET) développé dans le nord de l'Ontario est un bon exemple de l'approche de réconciliation dans le domaine des télécommunications. KO-KNET est une association à but non lucratif qui a adopté un modèle communautaire autonome et autocontrôlé pour l'infrastructure et les services numériques. Cette initiative a permis de connecter 26 fournisseurs d'accès à Internet dans les communautés des Premières nations, et chaque Première nation desservie par KO-KNET possède et contrôle sa propre infrastructure de réseau local, et est son propre fournisseur d'accès à Internet. L'intérêt de cette initiative réside dans le fait que les Premières nations contrôlent et entretiennent l'infrastructure de télécommunications « selon leurs propres politiques, mais dans la dépendance d'organismes de financement et de partenaires non autochtones et dans le contexte plus large des politiques gouvernementales » (Budka, 2015, p.37).

Dans les TNO et au Yukon, plusieurs groupes de premières nations ont œuvré pour mettre en place ce type d'initiative mais n'ont obtenu qu'un résultat partiel. En mai 2022, le fournisseur d'accès internet NorthwesTel vendait notamment une partie de ses infrastructures au consortium de 14 premières nations au Yukon et se félicitait de contribuer aux objectifs de la réconciliation avec ce type d'initiative (Crawford, 2022). Le consortium des 14 premières nations est néanmoins revenu sur les enjeux de cet accord, en précisant qu'il s'agissait avant tout d'un partenariat commercial et a également critiqué le fait que Northwestel ait présenté cette initiative comme un exemple de réconciliation économique (CRTC, 2023).

Au Nunavut, les associations inuites régionales sont également très impliquées dans les projets visant à améliorer les conditions d'accès aux ressources numériques et tentent de contrôler au maximum le développement des deux projets de câbles visant à connecter les communautés au sud du territoire et la capitale Iqaluit (Canadian Northern Economic Development Agency, 2021 ; CanArctic, 2021). Au Nunavut, les projets de câbles sont au cœur des revendications inuites mais n'ont cependant pas occulté les enjeux soulevés par l'arrivée des constellations de satellites à haut débit. En effet, la branche télécom de l'association inuite du Qikiqtani, PanArctic Communication, s'est emparée de ce créneau en formant la société Inuknet, détenue à 51 % par PanArctic et issue d'un partenariat avec OneWeb et Galaxy Broadband (Lipscombe, 2023). L'entreprise inuite avait également entamé des discussions avec SpaceX pour utiliser la bande passante de son réseau Starlink mais l'opérateur ne souhaitait pas vendre sa bande passante en gros afin de rester fidèle à son modèle économique. Créé en 2023, Inuknet ne dessert pour l'instant qu'un client à Iqaluit mais vise à fournir des services résidentiels dans toutes les communautés du Nunavut d'ici quelques mois. Il s'agira alors de l'unique fournisseur de service opérationnel détenu par des inuits au Nunavut.

Avec Starlink, la quantité de données consommables par mois est cinq fois supérieure au volume de données allouées au plus gros forfait NorthwesTel¹⁴. Les évolutions permises par Starlink au niveau de la qualité du service et de la disponibilité des données consommables permettent donc d'augmenter les possibilités numériques des utilisateurs. L'arrivée d'acteurs compétitifs comme Starlink soulève néanmoins certains risques pointés par les organisations inuites et les concurrents de la constellation américaine dans l'Arctique canadien. D'une part SpaceX ne participe en aucun cas à l'économie des territoires arctiques et ne contribue pas aux initiatives visant à renforcer les initiatives dédiées à la réconciliation avec les populations autochtones. Et d'autre part, en récupérant une partie des utilisateurs au Nunavut, au Yukon et dans les TNO, Starlink augmente la dépendance des communautés reculées et plus largement du Canada aux infrastructures de télécommunications américaines.

Conclusion

En définitive, l'avènement des constellations de satellites en orbites basses qui visent à universaliser le haut débit pour desservir les territoires isolés tels que l'Arctique canadien, soulève des enjeux géopolitiques à plusieurs échelles. L'évolution technologique des systèmes de télécommunications par satellite transforme les relations entre les acteurs privés et les États qui reconnaissent aujourd'hui pleinement l'importance stratégique de cet outil. Le modèle économique de la constellation Starlink permet à SpaceX de contrôler son réseau de bout en bout, ce qui en fait un acteur de plus en plus influent et incontournable dans les débats liés à la gouvernance de l'Internet et de ses standards et à la régulation de l'espace extra-atmosphérique et des ressources nécessaires pour y accéder (lanceur et fréquences). L'arrivée des constellations de satellites sur les marchés des télécommunications rurales souligne également l'intense compétition qui se joue entre les acteurs privés, mettant en lumière la menace concurrentielle que représente Starlink sur le marché des télécommunications par satellite. Enfin, l'avènement des constellations dans l'Arctique, à l'heure d'une réappropriation des enjeux numériques par les organisations autochtones, présente de nouvelles opportunités ainsi que de nombreux défis. L'objectif des constellations en orbites basses est de combler le fossé numérique à l'échelle mondiale et d'universaliser l'accès à Internet. Elles répondent néanmoins à des intérêts étatiques et privés très éloignés des préoccupations des communautés qui dépendent encore de services Internet limités et coûteux. L'arrivée de Starlink sur le marché des télécommunications arctiques en novembre 2022 était très attendue car ce nouvel acteur permet à la population de ne plus dépendre des opérateurs et des FAI traditionnels. Cependant, l'accapement d'une partie du marché par Starlink a également pour effet de renforcer la dépendance aux infrastructures américaine et de conforter la concentration géographique du pouvoir décisionnel organisationnel du numérique au Sud, alors que les populations autochtones aspirent à relocaliser ces compétences localement.

Alors que la sécurisation des systèmes de télécommunications dans les territoires arctiques est complexe et critique à de nombreux niveaux, l'introduction d'un acteur comme SpaceX dans l'écosystème numérique de l'Arctique canadien vient également questionner l'usage dual de sa constellation Starlink. L'arrivée de cet acteur sur le marché des télécommunications arctiques à l'heure d'une implication militaire claire de la constellation dans la guerre en Ukraine amène également les gouvernements territoriaux et les organisations autochtones à s'interroger sur les potentiels risques que pourrait entraîner la dépendance à Starlink pour les utilisateurs de l'Arctique canadien. L'implication directe du PDG de SpaceX, Elon Musk, dans des conflits internationaux et son comportement imprévisible introduisent un élément d'incertitude pour les acteurs traditionnellement responsables des télécommunications dans l'Arctique canadien, qui doivent aujourd'hui peser et mesurer les avantages d'une connectivité améliorée par rapport aux potentiels risques associés au double usage et aux enchevêtrements géopolitiques de la technologie.

Bibliographie

Ouvrages et productions scientifiques

CHARLAND, M., 1986, « Technological Nationalism ». Revue canadienne de théorie politique et sociale, 10 (1-2) : 196-220.

COELHO, K., 2018, « Frozen Screens: Discourses of Nunavummiut Internet ». PhD. Dissertation, University of London, 254 pages.

DELAUNAY, M., 2014. « The Arctic: A New Internet Highway? ». The Arctic Yearbook 2014, [en ligne] https://arcticyearbook.com/images/yearbook/2014/Briefing_Notes/2_Delaunay.pdf

DELAUNAY, M., 2021, « Internet dans l'Arctique canadien, enjeu de Soft Power pour l'État fédéral et les Inuit », Thèse de doctorat, Université de Paris-Saclay, 513 pages.

DELAUNAY, M., 2021, « Les enjeux de la route de la soie numérique chinoise en Arctique ». Études internationales, 50-1, 165-192. [en ligne] <https://www.erudit.org/fr/revues/ei/2020-v51-n1-ei06200/>

DENARDIS L. and MUSIANI F., 2014, « Chapter 1. Governance by Infrastructure » In: Musiani, F., Coghurn, D.L., DeNardis, L., Levinson, N.S. (eds) The Turn to Infrastructure in Internet Governance. Information Technology and Global Governance. Palgrave Macmillan, New York. https://doi.org/10.1057/9781137483591_1

ESCUDE-JOFFRES, C., 2019, « Les régions de l'Arctique entre États et sociétés », Géoconfluences, [en ligne] <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-regionaux/arctique/articles-scientifiques/regions-arctiques-entre-etats-et-societes>

PASCO, X., 2019, « L'espace extra-atmosphérique : un espace commun en voie de privatisation ? », Stratégique, p. 215-223 [en ligne] <https://www.caim.info/revue-strategique-2019-3-page-215.htm>

POITRAS, C., 2000, « La constitution du monopole de Bell ». In: Poitras C (dir.) La cité au bout du fil. Presses de l'Université de Montréal, Montréal : 71-85.

AKCALI GUR, B. and Kulesza J., 2023, « Activated! Public dissent, internet access and satellite broadband » [en ligne] <https://policyreview.info/articles/news/activated-public-dissent-internet-access-and-satellite-broadband/1685>

VOELSEN, D., 2021, « How New Satellite Connections Could Affect Global Internet Governance » German Institute for International and Security Affairs [en ligne] https://www.swp-berlin.org/publications/products/research_papers/2021RP03_InternetFromSpace.pdf

WARF B., 2007, « Geopolitics of the satellite industry ». Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie. 98. 385-397. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9663.2007.00405.x>.

MCMAHON, R., 2013, « Digital Self-Determination: Aboriginal Peoples and the Network Society in Canada. » PhD. Dissertation, University of British Columbia, 361 pages.

Ecole des mines – Mooc Introduction aux communications par satellite, séance 1 : « Le marché des télécommunications spatiales » [cours en ligne] <https://ims.fun-mooc.fr/courses/course-v1:MinesTelecom+04009+archiveouvert/courseware/a64e3b8751e84856a8cfd49a8c740b97/>

Sites officiels et rapports

ARCEP. « La couverture internet fixe à haut et très haut débit » [en ligne] <https://www.arcep.fr/nos-sujets/la-couverture-internet-fixe-a-haut-et-tres-haut-debit.html#:~:text=Par%20convention%2C%20on%20d%C3%A9signe%20un,inf%C3%A9rieur%20C3%A0%2030%20Mbits%2F5>

Canadian Northern Economic Development Agency. 2021, « Government of Canada Continues to Support Kivalliq Hydro-fibre Link », [en ligne] <https://www.canada.ca/en/northern-economic-development/news/2021/05/government-of-canada-continues-to-support-kivalliq-hydro-fibre-link.html>

CRTC. « Ce que vous devez savoir sur les vitesses de connexion Internet » [en ligne] <https://crtc.gc.ca/fr/internet/performance.htm>

CRTC. 2016, « Le CRTC établit un fonds pour atteindre de nouvelles cibles en matière de service Internet haute vitesse », Communiqué de Presse du Conseil de la radiodiffusion et des télécommunications canadiennes (CRTC), [en ligne] <https://www.canada.ca/fr/radiodiffusion-telecommunications/nouvelles/2016/12/crtc-etablit-fonds-atteindre-nouvelles-cibles-matiere-service-internet-haute-vitesse.html>

CRTC. 2023, « Telecom Notice of Consultation CR(TC 2022-147 », Notice of Hearing in Whitehorse, Yukon, [en ligne] <https://crtc.gc.ca/eng/archive/2022/2022-147.htm>

Green G et al., 2018, « Quintillion 2017 subsea cable system phase 1 Installation Program ». Marine mammal monitoring and mitigation 90-day report. Owl Ridge Natural Resource Consultants, Anchorage.

Federal Communications Commission (FCC). 2021, « Space Exploration Holdings, Request for Modification of the Authorization for the SpaceX NGSO Satellite System », 21-48, Adopted: April 23, 2021 [en ligne] https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-21-48A1_Rcd.pdf

Statistique Canada. 2016, « Inuit: Fact Sheet for Nunavut » [en ligne] <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/89-656-x89-656-x2016017-eng.htm>

Oneweb. « OneWeb and Northwestel sign Memorandum of Understanding to expand connectivity solutions for business, governments and mining across northern Canada. 11 aout 2021, [en ligne] <https://oneweb.net/resources/oneweb-and-northwestel-sign-memorandum-understanding-expand-connectivity-solutions>

NorthwesTel. « Every Community project » 16 octobre 2020 [en ligne] <https://www.nwtel.ca/community/every-community-project>

Articles de presse

- ALLEVEN, M., 2022 « OneWeb says 5G in 12 GHz band would interfere with its satellite service », Fierce Wireless, [en ligne] <https://www.fiercewireless.com/tech/oneweb-says-5g-12-ghz-band-would-interfere-its-satellite-service#:~:text=OneWeb%20focus%20on%20B2B&text=The%20company%20received%20its%20license,designing%20its%20system%2C%20she%20said.>
- BIGO, S. et HAMAIDE, J.-P., 2006, « La fibre optique embobine la Terre », Pour la Science [en ligne] <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/la-fibre-optique-embobine-la-terre-2448.php>
- BRODKIN, J., 2021, « Amazon asked FCC to reject Starlink plan because it can't compete, SpaceX says », Ars Technica [en ligne] <https://arstechnica.com/tech-policy/2021/09/spacex-slams-amazons-obstructionist-plot-to-block-starlink-upgrade-plan/#:~:text=Amazon%20last%20week%20urged%20the,SpaceX%20request%20violates%20a%20rule>
- BRODKIN, J., 2021, « SpaceX adds laser links to Starlink satellites to serve Earth's polar areas », Ars Technica, 26 janvier 2021 [en ligne] <https://arstechnica.com/information-technology/2021/01/spacex-adds-laser-links-to-starlink-satellites-to-serve-earths-polar-areas/>
- COHEN, S., 2022, « Nunavut Housing Corporation, other landlords getting in the way of Starlink access », CBC , [en ligne] <https://www.cbc.ca/news/canada/north/nunavut-landlords-obstruct-starlink-access-1.6670166>
- CRAWFORD, L., 2022, « First Nation development corporations buy fibre assets from NorthwTel », Toronto Star , [en ligne] <https://www.thestar.com/news/canada/2022/05/11/first-nation-development-corporations-buy-fibre-assets-from-northwestel.html>
- DE SELDING, P., 2022, « Telesat may trim Lightspeed constellation size to counteract inflation; estimated in-service date now ~ 2026 », Space Intel Report , [en ligne] <https://www.spaceintelreport.com/telesat-may-trim-lightspeed-constellation-size-to-counteract-inflation-estimated-in-service-date-now-2026/>
- ERWIN, S., 2020, « Space Force vice commander: China can't be allowed to buy bankrupt U.S. space companies », SpaceNews , [en ligne] <https://spacenews.com/space-force-vice-commander-china-cant-be-allowed-to-buy-bankrupt-u-s-space-companies/>
- FOUST, J., 2015, « Low Earth Orbit Constellations Could Pose Interference Risk to GEO Satellites », SpaceNews, [en ligne] <https://spacenews.com/low-earth-orbit-constellations-could-pose-interference-risk-to-geo-satellites/>
- FOUST, J., 2021 « SpaceX adds laser crosslinks to polar Starlink satellites », SpaceNews, [en ligne] <https://spacenews.com/spacex-adds-laser-crosslinks-to-polar-starlink-satellites/>
- FRIZZEL, S., 2017, « Competitive cell service coming to all Nunavut communities by 2019 », CBC, [en ligne] <https://www.cbc.ca/news/canada/north/cell-service-nunavut-communities-1.4296826>
- HENRY, C., 2020, « British government and Bharti Global buy OneWeb, plan \$1 billion investment to revive company », SpaceNews, [en ligne] <https://spacenews.com/british-government-and-bharti-global-buy-oneweb-plan-1-billion-investment-to-revive-company/>
- LIPSCOMBE, P., 2023 « Inuit-owned telco InukNet launches in Nunavut, Canada », Data Center Dynamics, [en ligne] <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/inuit-owned-telco-inuknet-launches-in-nunavut-canada/>
- PETROVA, M., 2023, « Starlink's rapid growth and influence has made it an indispensable part of Elon Musk's SpaceX », CNBC, [en ligne] <https://www.cnbc.com/2023/11/11/the-rapid-rise-of-elon-musks-starlink-satellite-internet-business.html#:~:text=SpaceX%20launched%20its%20first%20batch,and%20in%20over%2060%20countries>
- SWINHOE, D., 2023, « OneWeb shuts down trial site in Alaska, deemed "too costly" for residential broadband », Data Center Dynamics, [en ligne] <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/oneweb-shuts-down-trial-site-in-alaska-deemed-too-costly-for-residential-broadband/>
- ZAFFAGANI, M., 2023, « Pourquoi Amazon fait-il appel à son rival SpaceX pour lancer ses satellites Internet Kuiper ? » CNET, [en ligne] <https://www.cnetfrance.fr/news/pourquoi-amazon-fait-il-appel-a-son-rival-spacex-pour-lancer-ses-satellites-internet-kuiper-388897.htm>
- « Internet slowly returns to Iqaluit, 24 hours after outage », Nunatsiq News, 4 août 2022 [en ligne] <https://nunatsiq.com/stories/article/internet-slowly-returns-to-iqaluit-24-hours-after-outage/>
- « CanArctic Inuit Networks' SednaLink Fibre to eliminate Nunavut and Nunatsiavut Connectivity Crisis by November 2022 » CanArctic Inuit Networks Press Release , 5 janvier 2021, URL : <https://subtelforum.com/fibre-optic-network-between-iqaluit-nu-and-clareville-nl-which-will-dramatically-improve-connectivity-in-to-inuit-nunangat-by-november-2022/>
- « Gaza coupé du monde, Elon Musk s'engage à rendre sa connexion Starlink disponible », Libération et AFP, 28 octobre 2023 [en ligne] https://www.liberation.fr/internationale/moyen-orient/gaza-coupe-du-monde-elon-musk-sengage-a-rendre-sa-connexion-starlink-disponible-20231028_5MYP2BJ54RFLXERCEH5YPUDIAQ/
- « Northwestel tells CRTCC it's in "urgent" need of ability to respond to Starlink's competitive threat », CARTT.CA, 10 décembre 2021 [en ligne] <https://cartt.ca/northwestel-tells-crtc-its-in-urgent-need-of-ability-to-respond-to-starlinks-competitive-threat/>
- « O3b Networks Limited raises total funding of US\$1.2 billion, to finance fully the construction and launch of its next generation global satellite constellation », Connect World , 29 novembre 2010 [en ligne] <https://connect-world.com/o3b-networks-limited-raises-total-funding-of-us-12-billion-to-finance-fully-the-construction-and-launch-of-its-next-generation-global-satellite-constellation/>
- « U.S. Military Testing OneWeb, Starlink For Arctic Operations », Aviation Week Network , 05 Mai 2022 [en ligne] <https://aviationweek.com/defense-space/space/us-military-testing-oneweb-starlink-arctic-operations>

Notes

- « Gaza coupé du monde, Elon Musk s'engage à rendre sa connexion Starlink disponible », Libération et AFP, 28 octobre 2023 [en ligne] https://www.liberation.fr/international/moyen-orient/gaza-coupe-du-monde-elon-musk-sengage-a-rendre-sa-connexion-starlink-disponible-20231028_5MYP2BJ54RFLXERCEH5YPUDIAQ/
- « U.S. Military Testing OneWeb, Starlink For Arctic Operations », *Aviation Week Network* , 05 Mai 2022 [en ligne] <https://aviationweek.com/defense-space/space/us-military-testing-oneweb-starlink-arctic-operations>
- Ecole des mines – Mooc Introduction aux communications par satellite, séance 1 : « Le marché des télécommunications spatiales » [cours en ligne] <https://lms.fun-mooc.fr/courses/course-v1:MinesTelecom+04009+archiveouvert/courseware/a64e3b8751e84856a8cf4d9a8c740b97/>
- Op.cit Ecole des mines – Mooc Introduction aux communications par satellite, séance 1 : « Le marché des télécommunications spatiales »
- « O3b Networks Limited raises total funding of US\$1.2 billion, to finance fully the construction and launch of its next generation global satellite constellation », *Connect World* , 29 novembre 2010 [en ligne] <https://connect-world.com/o3b-networks-limited-raises-total-funding-of-us-12-billion-to-finance-fully-the-construction-and-launch-of-its-next-generation-global-satellite-constellation/>
- ARCEP. « La couverture internet fixe à haut et très haut débit » [en ligne] <https://www.arcep.fr/nos-sujets/la-couverture-internet-fixe-a-haut-et-tres-haut-debit.html#:~:text=Par%20convention%2C%20on%20d%C3%A9signe%20un,inf%C3%A9rieur%20%C3%A0%2030%20Mbps%2F.>
- CRTC. « Ce que vous devez savoir sur les vitesses de connexion Internet » [en ligne] <https://crtc.gc.ca/fra/internet/performance.htm>
- Op.cit Ecole des mines – Mooc Introduction aux communications par satellite, séance 1 : « Le marché des télécommunications spatiales »
- Il existe plusieurs définitions et limites de l'Arctique mais généralement on considère qu'il existe huit États arctiques dont cinq États côtiers (Danemark, Norvège, Russie, États-Unis, Canada), et trois États qualifiés de circumpolaires (Finlande, Suède, Islande), réunis dans une organisation internationale non contraignante, le Conseil de l'Arctique. (Escudé-Joffres, 2019)
- Federal Communications Commission FCC 21-48 "Space Exploration Holdings, Request for Modification of the Authorization for the SpaceX NGSO Satellite System", Adopted: April 23, 2021 [en ligne] https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-21-48A1_Rcd.pdf
- La délimitation administrative de l'Arctique canadien comprend le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest et le Nunavut, mais on peut également le définir au travers des quatre régions inuites connues sous l'appellation inuktitut *Inuit Nunangat* : l'Inuvialuit au Yukon aux TNO, le Nunavut, le Nunavik au Nord-du-Québec et le Nunatsiavut au Labrador.
- « Internet slowly returns to Iqaluit, 24 hours after outage », *Nunatsiq News* , 4 août 2022 [en ligne] <https://nunatsiq.com/stories/article/internet-slowly-returns-to-iqaluit-24-hours-after-outage/>
- « Northwestel tells CRTCC it's in "urgent" need of ability to respond to Starlink's competitive threat », *CARTT.CA* , 10 décembre 2021 [en ligne] <https://cartt.ca/northwestel-tells-crtc-its-in-urgent-need-of-ability-to-respond-to-starlinks-competitive-threat/>
- Contrairement à NorthwTel qui proposent au maximum des forfaits de 200 gigabits de données pour 109 \$/mois (hors coût de la ligne téléphonique, obligatoire pour bénéficier des offres internet), Starlink propose 1 téraoctet (1 000 gigabits) pour 140 \$/mois.

Résumés

L'évolution technologique des systèmes de télécommunications par satellite pour atteindre le haut débit soulève des enjeux géopolitiques à plusieurs échelles. En effet, le développement de ces systèmes repose aujourd'hui principalement sur des acteurs privés qui gagnent progressivement en influence dans le domaine du numérique et des activités extra-atmosphériques. Or, l'élaboration de ces systèmes répond avant tout à la nécessité de connecter les utilisateurs et les services, n'importe où sur Terre et dans les conditions les plus complexes. Leur implémentation dans les territoires où les infrastructures terrestres sont rares, comme l'Arctique canadien, était donc particulièrement attendue et ouvre aujourd'hui de nouvelles opportunités pour les utilisateurs situés dans ces territoires isolés. Alors que les constellations Starlink et OneWeb sont aujourd'hui disponibles et utilisées à des fins civiles dans l'Arctique, la compétition entre les opérateurs privés et l'évolution des rapports de force entre ces derniers et les gouvernements souligne la dimension géopolitique et multiscalaire de l'implémentation de ces objets techniques. Cet article vise ainsi à examiner l'évolution technologique des systèmes de télécommunications par satellite afin d'interroger les répercussions géopolitiques de l'arrivée en phase opérationnelle des constellations Starlink et OneWeb dans l'Arctique canadien.

Mots-clés : télécommunications par satellite, connectivité, constellations, géopolitique, Arctique canadien, haut débit, communautés autochtones

Keywords : satellite communications, connectivity, constellations, geopolitics, Canadian Arctic, broadband, Indigenous communities

Auteur

Célestine Rabouam

Doctorante en deuxième année de thèse, Paris 8, IFG Lab¹, GEODE

rabouamcelestine989@gmail.com

La surveillance des émissions anthropiques de CO2 depuis l'espace : un enjeu géopolitique émergent

Monitoring the CO₂ anthropogenic emissions from space: an emerging geopolitical issue

Grégoire Broquet et Frédéric Chevallier

Introduction

L'accord de Paris sur le climat a été signé par 194 États et l'Union européenne (UE) en 2015, lors de la 21e Conférence des parties (en anglais « 21st Conference of the Parties », COP21) à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (CCNUCC, 2024a). Par cet accord, les signataires se sont engagés conjointement à limiter l'augmentation de la température moyenne de la planète d'ici 2100 en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Même si l'exploitation des opportunités qu'il ouvre pour la collaboration internationale reste incertaine (Lavallée et Maljean-Dubois, 2016), il s'agit du jalon de la lutte contre le changement climatique le plus important depuis la reconnaissance du dérèglement climatique du fait des activités humaines lors de la conférence des Nations Unies à Rio de Janeiro en 1992 et la COP3 de la CCNUCC à Kyoto en 1997. Suivant le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), l'accord de Paris et les COP depuis 2015 soulignent par ailleurs le besoin de limiter l'augmentation de la température par rapport aux niveaux préindustriels à 1,5 °C (GIEC, 2019). Cette limitation de l'augmentation de la température passe principalement par une réduction globale et massive des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES), responsables du changement climatique, et en particulier des émissions anthropiques de dioxyde de carbone (CO2). Elle passe également par l'accroissement de l'absorption du CO2 atmosphérique dans les sols, la biosphère terrestre ou les océans (des « puits » de CO2), par des procédés industriels ou par la gestion des écosystèmes, du fait de la nécessité d'avoir un bilan « négatif » des émissions de GES à la fin du siècle pour atteindre l'objectif des 2 °C (Fawcett et al., 2015 ; Dooley et al., 2018 ; CCNUCC, 2023a), et dans la mesure où même s'il est réduit, le bilan des émissions « positives » de GES dans l'atmosphère restera probablement élevé pendant longtemps (Roelfsema et al., 2020).

Le CO2 est le principal GES anthropique. Ses émissions anthropiques sont celles dont la contribution au réchauffement depuis l'ère préindustrielle est la plus grande (entre 0,5 et 1,2 °C en 2010-2019 par rapport à 1850-1900) (GIEC, 2021). Les émissions anthropiques de CO2 sont essentiellement le produit de la combustion des combustibles fossiles pour la production d'énergie (énergie électrique, chaleur, alimentation de moteurs thermiques). La déforestation et l'utilisation de carbonates pour la construction et la chimie (notamment pour la cimenterie) sont les deux autres grandes causes de ces émissions. Cependant, depuis l'ère préindustrielle, près de la moitié du CO2 émis dans l'atmosphère par ces activités humaines est captée par les puits naturels de CO2 que sont les océans et les écosystèmes terrestres (Friedlingstein et al., 2023). En effet, l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO2 liée aux émissions anthropiques déséquilibre les échanges physiques de CO2 à l'interface océanique avec une pression en CO2 accrue du côté de l'atmosphère, générant des flux de l'atmosphère vers les océans. Cette augmentation fertilise par ailleurs les écosystèmes, amplifiant leur captage de CO2. À cela s'ajoute l'impact de la gestion des écosystèmes par l'Homme, qui a accru leur productivité et la fertilité des sols. L'absorption de CO2 correspondante permet ainsi de limiter l'accroissement du CO2 dans l'atmosphère et donc l'effet de serre (Canadell et al., 2007). Or, l'évolution des puits naturels de CO2 reste incertaine avec la dégradation possible des écosystèmes et des échanges physiques et biologiques avec les océans du fait de l'impact du changement climatique (Lenton et al., 2019 ; Qin et al., 2021). De façon générale, il y a ainsi un intérêt scientifique, politique et sociétal à quantifier précisément l'ensemble des flux (émissions ou absorptions) de CO2 entre la surface terrestre et l'atmosphère pour mieux identifier, comprendre et contrôler les processus sous-jacents, et pour mieux anticiper leur évolution et leur impact dans le futur.

Les accords internationaux obtenus lors des COP de la CCNUCC ou au sein de l'Union Européenne (le « pacte vert pour l'Europe » ; Commission Européenne, 2023) et les politiques climatiques nationales (comme la stratégie nationale bas-carbone du ministère français de la transition écologique et solidaire -MTES- ; MTES, 2020) ou territoriales (par exemple celle des réseaux internationaux de villes et de collectivités régionales et locales que sont le C40 et l'International Council for Local Environmental Initiatives -ICLEI- ; Greenhouse Gas Protocol, 2021) s'appuient sur des inventaires d'émissions de GES, notamment les inventaires nationaux établis dans le cadre de la CCNUCC. Ces inventaires sont compilés à partir de données de la consommation de combustibles fossiles ou d'indices des activités à l'origine des émissions et absorptions de GES, et de facteurs d'émission plus ou moins standards, permettant la conversion des indices d'activité en estimation des émissions (Citepa, 2023). Or, comme cet article va le montrer, cette source d'information présente de nombreuses limitations, parfois en termes de fiabilité, et de façon plus systématique en termes de résolution spatiale et temporelle, et de délai d'accès à l'information.

Depuis une vingtaine d'années, le concept de surveillance des émissions associées à l'activité humaine à partir d'observations des concentrations atmosphériques de CO2 émerge progressivement (GIEC, 2006 ; Ciaïs et al., 2015 ; Bergamaschi et al., 2018). Ces observations correspondent généralement à des mesures en continu de stations au sol ou à des données de télédétection spatiale. Leur traitement avec des outils numériques proches de ceux utilisés pour la prévision météorologique permet de quantifier et cartographier les émissions et absorptions de CO2. On envisage ainsi de déployer d'importants réseaux d'observation du CO2 atmosphérique pour des estimations rapides et fiables des émissions anthropiques à différentes échelles spatiales, couvrant des bilans ou des cartographies aux échelles planétaires à locales, avec la quantification des émissions nationales, régionales ou pour des villes et des grands sites industriels. Ces estimations doivent permettre un contrôle de la qualité des inventaires, voire un ajustement des facteurs d'émission pour les secteurs d'activité où ils sont le plus incertains. Des estimations basées sur la mesure sont en principe le gage d'une source d'information transparente et indépendante des émetteurs. L'utilisation de la mesure spatiale présente de nombreux avantages par rapport à celle des stations de mesures au sol : elle devrait accroître la couverture de l'observation à l'ensemble de la planète, l'homogénéité de l'acquisition des données et de leur traitement et l'indépendance des estimations, puisqu'elle ne nécessite pas d'installation et donc de coopérations locales.

L'Europe montre aujourd'hui de grandes ambitions dans ce domaine. La mission Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring (CO2M) du programme européen d'observation de la terre Copernicus et de l'Agence Spatiale Européenne (European Space Agency, ESA), qui doit être lancée en 2026 (Meijer et al., 2023), sera la principale source d'observations atmosphériques à court terme pour l'estimation des émissions anthropiques de CO2. Ces observations seront traitées et exploitées par le futur système opérationnel de suivi atmosphérique des émissions anthropiques de CO2, le CO2 Monitoring and Verification Support capacity (CO2MVS) de Copernicus (CAMS, 2021) que l'Europe développe actuellement (Pinty et al., 2017). Ce système doit alimenter les déclarations des émissions européennes. Cependant, son niveau de maturité ne permet pas encore de qualifier un tel système : l'utilisation de ses futures estimations des émissions de CO2 dans le cadre international posé par l'accord de Paris, ou pour le développement de services aux territoires et le secteur privé, pose de nombreux défis techniques et politiques que la communauté scientifique et les agences institutionnelles tentent aujourd'hui de relever et d'anticiper.

L'objectif de cet article est de présenter ces défis, et de donner une vision d'ensemble de la question du suivi spatial des émissions anthropiques de CO2 permettant d'en mesurer les enjeux. Pour cela, il s'appuie sur une revue d'articles scientifiques et de rapports pour les décideurs politiques, et sur une connaissance des échanges internationaux sur le sujet. Les sections suivantes traitent ainsi le cadre imposé par l'accord de Paris et les inventaires actuels, le contexte scientifique et technique de la mise en place de systèmes opérationnels de quantification des émissions à partir d'observations depuis l'espace, et les défis de leur application. En guise de synthèse et de conclusion, la section finale donne quelques perspectives générales pour la surveillance des émissions anthropiques de CO2 depuis l'espace.

Les inventaires des émissions de CO2

Les inventaires des émissions et absorptions de CO2 de la CCNUCC et les limitations associées

L'accord de Paris repose sur les engagements de chacune des parties signataires à réduire ses émissions ou leur accroissement à plus ou moins long terme, les « Contributions déterminées au niveau national » (en anglais « Nationally Determined Contributions », NDC). Il repose également sur le bilan collectif régulier de ces engagements, des progrès réalisés et de leur cohérence avec l'objectif de limitation du réchauffement climatique : le Bilan Mondial (en anglais « Global StockTake », abrégé en « GST » dans la suite) (Perugini et al., 2021 ; Brocchieri et Perugini, 2022). Ce GST a lieu tous les cinq ans, dans un cadre de transparence renforcée (Enhanced Transparency Framework, ETF). Il doit s'appuyer sur des inventaires des émissions nationaux dont la qualité, la fiabilité et la précision est donc critique pour la réussite de l'accord de Paris.

Depuis les années 2000, dans le cadre du protocole de Kyoto, l'UE et une quarantaine d'États (correspondant à l'annexe I de la CCNUCC), regroupant les pays industrialisés qui étaient membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) en 1992 et les anciennes républiques de l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques (URSS) en transition vers l'économie de marché, sont juridiquement engagés à fournir chaque année à la CCNUCC un inventaire normalisé de leurs émissions de GES sur la période de 1990 à deux ans avant la date de livraison. Cet inventaire doit notamment décrire l'ensemble des émissions annuelles de CO2 liées à l'activité humaine : les émissions liées aux énergies et carbonates fossiles, ainsi que les émissions et la séquestration du CO2 atmosphérique liées à l'Utilisation des Terres, au Changement d'Affectation des Terres et à la Foresterie (UTCATF) (Citepa, 2023). Il est public (CCNUCC, 2024b) et évalué par une équipe d'experts au sein de la CCNUCC. Cet effort continu et ambitieux d'inventaire permet aujourd'hui une bonne connaissance des bilans annuels et nationaux des émissions de CO2 d'origine fossile (liées à l'utilisation des combustibles et carbonates fossiles) pour les pays concernés (Perugini et al., 2021). Mais ce n'est pas le cas pour les émissions anthropiques liées à l'UTCATF, car les variations de la masse de carbone des sols et des écosystèmes sont très dures à estimer aux échelles régionales ou nationales, et du fait de la difficulté d'établir des règles adaptées pour la classification des terres et des émissions et absorptions par les écosystèmes qui doivent être prises en compte (Petrescu et al., 2020 ; McGlynn et al., 2022 ; Luers et al., 2022). Par ailleurs, les engagements de réduction des émissions pris par les États impliquent des changements rapides de consommation des combustibles fossiles dans les secteurs de la production d'énergie, du transport, etc. qui pourraient accroître l'incertitude sur les facteurs et donc sur les bilans d'émissions fossiles dans les décennies à venir. Enfin, avec la mise en place du GST, les pays dits « en développement » (pays de l'annexe II de la CCNUCC) doivent désormais également fournir des rapports d'inventaires biennaux, même s'ils n'ont pas toujours accès à des informations ou à des données fiables (Ciaïs et al., 2015 ; Perugini et al., 2021). Ce problème s'applique à la Chine qui est pourtant aujourd'hui le premier émetteur de CO2 (Korsbakken et al., 2016 ; Han et al., 2020). L'accord de Paris crée un cadre de collaboration internationale permettant de soutenir l'établissement des inventaires dans ces pays, mais la fiabilité des rapports dépend de la volonté d'investissement et de coopération de chaque pays. Dans tous les cas, chaque pays est responsable *in fine* du rapport de ses propres émissions, ce qui pose des questions d'indépendance des estimations, en dépit des procédures d'évaluation croisées mises en place.

Des systèmes de surveillance, déclaration et vérification des émissions (en anglais « Monitoring, Reporting and Verification », abrégé en MRV ci-après ; Bellassen et al., 2015) ou d'ETF ont pourtant été mis en place, notamment dans le cadre de la CCNUCC pour assurer la transparence et la fiabilité des inventaires. Cependant, les systèmes MRV imposent essentiellement un suivi de bonnes pratiques (comprenant l'utilisation de facteurs d'émission standards ou dont la valeur est démontrée), l'analyse quantitative des niveaux d'incertitudes associés aux inventaires et la validation ou la confrontation des inventaires avec des données indépendantes. Ainsi, la capacité de ces systèmes et des revues expertes multilatérales de l'ETF à limiter l'incertitude sur les inventaires dépend elle-même de la disponibilité et de l'accès à des données fiables et indépendantes (OCDE, 2018).

Par ailleurs, l'action climatique s'appuie en grande partie sur des politiques urbaines et territoriales. Il y a donc un besoin d'information locale, auquel ne répondent par les inventaires nationaux. Les inventaires territoriaux existants (Greenhouse Gas Protocol, 2021 ; en France : les inventaires pour certaines régions -AIRPARIF, 2024- et villes -Ville de Paris, 2020-) s'appuient eux-mêmes souvent sur des facteurs d'émission moyens ou standards qui ne tiennent pas compte de l'impact parfois important de réglementations ou de pratiques locales sur les taux d'émission de CO2 associés à un niveau de production ou d'activité donné (Cochran, 2011).

Enfin, la compilation des données d'activité nécessaires à l'établissement d'inventaires, qu'ils soient locaux ou nationaux, prend du temps. Les rapports d'inventaires de la CCNUCC sont publiés par exemple avec plus d'un an de retard par rapport aux émissions les plus récentes qu'ils documentent. Il manque une capacité de suivi en temps réel (donc intra-annuel) des émissions locales comme nationales pour l'aide à la gestion des émissions.

L'apport d'un suivi des émissions et absorptions de CO2 basé sur des mesures atmosphériques

Dans ce contexte, l'utilisation de mesures atmosphériques indépendantes avec des approches objectives et standardisées pour la quantification des émissions et absorptions de CO2 paraît prometteuse. Que ce soit avec l'amélioration de la connaissance de facteurs d'émission ou des niveaux d'activité utilisés dans la compilation des inventaires, ou en apportant des estimations permettant l'évaluation des inventaires (notamment

dans le cadre des systèmes MRV), les données de CO₂ atmosphériques devraient permettre l'accroissement de la fiabilité et de la transparence des bilans d'émissions du GST. En principe, ces données peuvent également permettre de générer des estimations des émissions en temps quasi-réel et aux échelles nationales et locales (pour des régions administratives, des villes, des grands sites industriels).

La mesure satellitaire ne nécessite ni l'implantation potentiellement intrusive de structures au sol, ni la mise en place de coopérations dans les différents pays pour assurer une couverture quasi planétaire de l'atmosphère et donc des émissions. Cette couverture satellitaire a aussi l'avantage d'être relativement homogène autour du globe. Si des stations de mesures au sol ont pu être installées en Amérique latine ou en Afrique par les pays hôtes (Labuschagne et al., 2018) ou dans le cadre de collaborations entre agences et laboratoires de recherche de différents pays incluant les pays hôtes (Morgan et al., 2015 ; Tiemoko et al., 2021), les stations de mesure aux États-Unis et en Chine ont essentiellement été installées et maintenues par des laboratoires de ces pays respectifs. Par ailleurs, l'accès à la plupart des données des stations états-uniennes et européennes est libre, mais l'accès aux données des stations en Chine est plus difficile. À ce jour, le problème d'accès aux données est principalement lié aux stratégies de partage des différentes institutions en charge des stations, mais il pourrait revêtir des aspects plus politiques à l'avenir. La limitation géographique des réseaux sol est également fortement liée à des problèmes de logistique (sécurité, capacité à accéder aux stations et à des ressources locales pour leur maintenance, etc.)

Le suivi satellitaire des émissions de CO₂

Les variations spatiales ou temporelles (accroissements ou diminutions) des mesures de concentrations atmosphériques proches des sources ou des puits de CO₂ sont en grande partie liées et proportionnelles à ces sources et puits. La modélisation du transport atmosphérique du CO₂, qui s'appuie sur des simulations météorologiques, permet le filtrage de ces variations et leur interprétation en termes de flux de CO₂ entre la surface terrestre et l'atmosphère. Les méthodes « d'inversion de la modélisation du transport atmosphérique » (abrégié en « inversion atmosphérique ») correspondantes permettent ainsi de quantifier et cartographier les puits et sources de CO₂ à partir des mesures de concentration.

Initialement développées dans le secteur de la recherche sur le cycle du carbone pour quantifier les flux naturels de CO₂ à l'échelle de continents et d'océans, ces méthodes peuvent aujourd'hui s'appuyer sur des réseaux d'observations toujours plus denses, et sur un nombre croissant de missions spatiales d'observation du CO₂. Ces observations permettent dès à présent de cibler des sources anthropiques dont les signatures atmosphériques sont beaucoup plus localisées que les grandes aires de puits naturels (Bergamaschi et al., 2018).

L'implémentation des systèmes d'inversion atmosphérique utilise généralement les principes mathématiques et des outils numériques très proches de ceux de l'assimilation de données pour la prévision et la ré-analyse en météorologie et en océanographie. On se référera à Rayner et al. (2019) et à Jacob et al. (2022) pour un aperçu de la théorie et des différents types de systèmes (qui sont très similaires pour l'estimation des flux de CO₂ et de méthane). Les sections suivantes présentent les principes généraux du suivi des émissions et absorptions de CO₂ à la surface de la terre avec l'inversion atmosphérique, en particulier dans le cas de l'utilisation des données satellitaires.

L'observation des concentrations atmosphériques de CO₂ depuis l'espace

Le CO₂ absorbe une partie du rayonnement solaire, que ce soit pendant le trajet de ce rayonnement vers la surface terrestre ou une fois ce rayonnement réfléchi par cette surface. Dans certaines bandes du proche infrarouge (IR), cette absorption par le CO₂ est relativement aisée à identifier, à isoler de l'absorption du rayonnement solaire par les autres gaz atmosphériques, et à lier à la concentration atmosphérique de CO₂. La mesure dans ces bandes du proche IR du rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre avec un spectromètre localisé à bord d'un satellite permet donc de quantifier la concentration moyenne de CO₂ le long du double trajet à travers l'atmosphère de ce rayonnement, c'est-à-dire la concentration moyenne sur « des colonnes » atmosphériques à la verticale du satellite (Figure 1).

Figure 1. Illustration de l'observation des concentrations atmosphériques de CO₂ par satellite

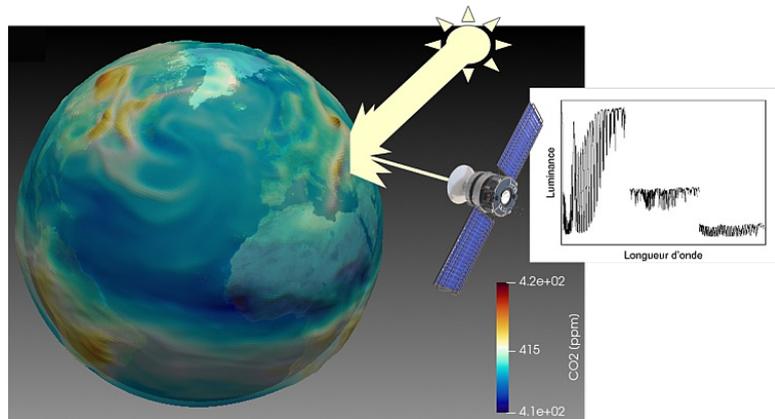


Schéma illustrant le double trajet du rayonnement du soleil à travers l'atmosphère avant d'être perçu par un satellite. Le satellite mesure ici le spectre des luminances énergétiques reçues dans des intervalles de longueurs d'onde choisies. Ce spectre porte la marque des molécules de CO₂ rencontrées le long du trajet lumineux et représentées sur le globe par une carte des concentrations moyennes de CO₂ sur la verticale le 14 octobre 2021 à 21h, temps universel coordonné.

C'est en suivant ce principe que les satellites existants dédiés à l'observation du CO₂ réalisent des mesures du rayonnement dans le proche IR. La plupart d'entre eux est placée en orbite basse héliosynchrone, générant des données à heure locale constante, mais des concepts d'observation en orbite géostationnaire (depuis un point fixe au-dessus de l'équateur) sont désormais également envisagés. La résolution spatiale de leurs instruments est très variable, de même que leurs modes d'acquisition, qui peuvent correspondre à des balayages discontinus ou continus sur une fauchée (c'est à dire une largeur au sol) plus ou moins grande, dans la direction orthogonale à la trace de déplacement du satellite au sol, ou avec des modes de ciblage en dehors de cette trace. En fonction de ces paramètres, les satellites peuvent fournir des sondages plus ou moins denses, voire des images à plus ou moins haute résolution et plus ou moins larges des champs de concentrations de CO₂ moyennées sur la verticale (Figure 2) (Crisp et al., 2018).

Figure 2. Image de panache anthropique de CO₂ générée à partir des mesures satellitaires

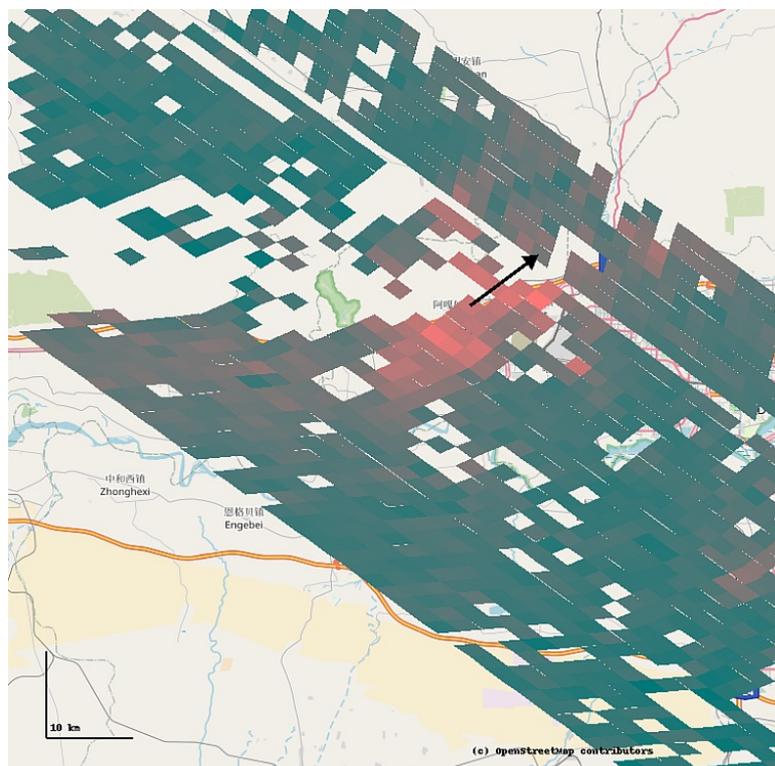


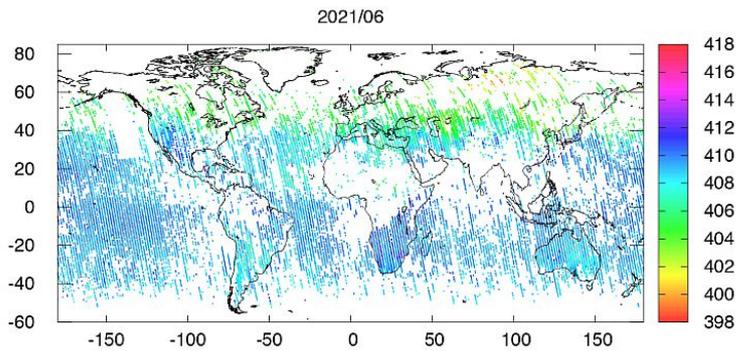
Image de CO₂ générée à partir des mesures de la mission OCO-3 le 30 juin 2021 (version des données : NASA ACOS v10.4), couvrant le panache d'une centrale électrique au charbon en Mongolie Intérieure (Chine). La flèche indique la direction du vent près de la surface dans la zone d'observation.

Le procédé de calcul des concentrations de CO₂ correspondant aux mesures spectrales du satellite est cependant complexe et s'appuie sur des outils de modélisation du transfert radiatif dans l'atmosphère, incluant notamment les effets de diffusion du rayonnement par les aérosols. Il s'appuie également sur des outils d'inversion similaires à ceux utilisés pour l'inversion du transport atmosphérique. En effet, les modèles de transfert radiatif simulent une absorption du rayonnement en fonction d'une composition atmosphérique donnée. Il faut donc inverser statistiquement ce processus pour déduire d'un spectre du rayonnement la composition atmosphérique correspondante, et notamment la concentration de CO₂. Les données de concentrations atmosphériques satellitaires correspondent ainsi à des estimations, avec des niveaux d'incertitude significatifs en comparaison des signaux recherchés. Par ailleurs, le principe de cette observation spatiale du CO₂ repose pour l'instant sur des spectromètres « passifs » qui observent le rayonnement solaire s'il parvient jusqu'à eux. De nuit, il est impossible avec une telle approche d'accéder à la connaissance des concentrations de CO₂. En présence de nuages épais, le rayonnement n'atteint pas le sol et ne recèle aucune information sur le CO₂ dans la partie basse de l'atmosphère qui contient la meilleure information sur les émissions et les absorptions. Ces deux limitations ainsi que d'autres aspects théoriques et techniques rendent aujourd'hui importante la complémentarité entre mesures spatiales et mesures depuis le sol et dans l'atmosphère (données aériennes par avions, ballons, drones etc.), et en particulier les mesures *in situ* (Pinty et al., 2019). En effet, de nombreux types d'instruments permettent une mesure *in situ* très précise des concentrations de CO₂ que ce soit depuis des stations fixes ou sur des plateformes mobiles.

Principe général de la quantification des sources et puits de CO₂ par inversion atmosphérique

En moyenne, dans l'atmosphère, la concentration de CO₂ est aujourd'hui de 419 parties par million de molécules d'air (ppm) (NOAA, 2024). Cette concentration varie sous l'effet des flux de CO₂ à la surface terrestre, et à un degré bien moindre, du fait du temps de vie du CO₂ dans l'atmosphère (Tans et al., 1997). À grande échelle temporelle, depuis l'ère préindustrielle, cette concentration augmente continuellement sur l'ensemble de la planète du fait des émissions anthropiques. À l'échelle intra-annuelle, la répartition des grands courants atmosphériques et les écarts d'émissions et de puits naturels génèrent entre les hémisphères Nord et Sud un gradient et un déphasage du cycle saisonnier de la concentration de CO₂ principalement associé à celui de l'absorption par photosynthèse des écosystèmes (Figure 3). À ces grandes variations s'ajoutent des variations continentales, régionales, et locales, mensuelles, synoptiques voire instantanées, associées aux sources et absorptions diverses de CO₂, notamment celles dues aux activités anthropiques, aux écosystèmes terrestres, aux océans, et aux eaux côtières et continentales. Ces variations peuvent être très fortes près de la surface, mais le transport horizontal et vertical de CO₂ dans l'atmosphère s'accompagne de sa diffusion et donc du mélange des signaux associés aux différents sources et puits. Les champs de CO₂ gagnent donc en homogénéité au fur et à mesure que celui-ci se diffuse sur la verticale, hors de la couche limite de surface atmosphérique, et la signature d'une source ou d'un puits local devient rapidement évanescence (à faible distance, ou peu de temps après l'interruption de l'émission ou du puits). Enfin, l'amplitude des signaux et des variations sur les colonnes atmosphériques associés à des flux continentaux, régionaux et locaux, même en considérant ceux de forêts continentales, n'excède généralement pas quelques ppm (voire 1 ppm pour les grandes villes), ce qui est faible en comparaison de la concentration moyenne atmosphérique de 419 ppm. La valeur de cette amplitude est proche de la précision typique des estimations des colonnes individuelles de CO₂ à partir des mesures satellitaires (de l'ordre de 1 ppm ; Jacobs et al., 2023).

Figure 3. Cartographie mondiale des concentrations de CO₂ à partir des mesures satellitaires



Observations de CO₂ (en ppm) à travers le monde, générées à partir des mesures de la mission OCO-2 en juin 2021 (version des données : NASA ACOS v11.1).

La détection et la quantification des émissions de CO₂ d'une source « ponctuelle », comme un groupe de cheminées d'un grand site industriel, à partir d'images satellitaires des concentrations de CO₂ au voisinage de cette source représente un cas pratique d'inversion atmosphérique relativement simple à concevoir. Cette source ponctuelle industrielle génère, en suivant la direction du vent, un panache de CO₂ qui se superpose au champ de CO₂ de fond, c'est-à-dire aux 419 ppm en moyenne autour de la planète ainsi qu'à des variations associées aux autres flux naturels et anthropiques régionaux. On peut détecter ce panache dans les images satellitaires de CO₂ locales, même si celles-ci sont fortement bruitées du fait des incertitudes sur les estimations des colonnes de CO₂ à partir des mesures satellitaires, en recherchant les accroissements de CO₂ spatialement cohérents (Barré et al., 2021). Or la connaissance plus ou moins précise du champ de vent local permet de modéliser le panache que générerait un niveau d'émission du site industriel donné, et notamment son amplitude. En inversant le processus de transport atmosphérique associé au panache, on peut donc déduire d'une observation de l'amplitude du panache le niveau des émissions du site.

Le concept peut être généralisé à celui de la cartographie temporalisée des puits et sources de CO₂ à partir d'un ensemble d'observations des concentrations atmosphériques, qu'elles soient satellitaires ou non. L'objectif est de couvrir un ensemble de flux d'intérêts (émissions et flux naturels nationaux, pour une zone urbaine, puits associés à un grand écosystème, à une forêt spécifique, émissions d'un site industriel etc.) sur un domaine qui peut être planétaire, régional ou local. La modélisation du transport atmosphérique de CO₂ sur ce domaine permet la simulation des champs atmosphériques de CO₂ et de leurs variations spatio-temporelles pour une estimation donnée de la cartographie temporalisée des flux. L'inversion statistique de ce transport permet une estimation des flux qui correspond de façon optimale à l'ensemble des observations sur ce domaine. Lorsque l'ensemble des observations est trop éparpillé pour bien couvrir et quantifier l'ensemble des flux dans le domaine considéré, l'inversion atmosphérique s'appuie fortement sur une connaissance *a priori* des flux, dérivée de modèles de processus du cycle du carbone et d'inventaires d'émissions : elle les corrige pour réduire les écarts entre simulations et observations. Ainsi, des inventaires spatialisés, désagrégeant les bilans nationaux en cartes d'émissions sur la base d'indices de répartition des activités (tels que l'inventaire Emissions Database for Global Atmospheric Research-EDGAR- du Joint Research Center de la Commission européenne, couvrant le monde à ~10 km de résolution ; Janssens-Maenhout et al., 2019), sont largement utilisés voire développés dans le domaine de l'inversion atmosphérique.

Évolution de l'approche

Au début des années 2000, l'inversion atmosphérique a été essentiellement utilisée pour identifier les zones de fort puits naturel entre les différents continents. Le bilan planétaire et annuel des émissions fossiles était déjà bien quantifié, l'accroissement planétaire annuel de la concentration de CO₂ atmosphérique était parfaitement bien caractérisée à l'aide de stations de mesure au milieu de l'océan Pacifique, et le puits océanique était assez bien connu du fait de nombreuses campagnes de mesure dans l'océan et de ses faibles variations spatiales et temporelles. Le puits annuel des écosystèmes à l'échelle de la planète était donc déduit des autres composantes du cycle du carbone, mais il restait à déterminer dans quelles zones ce puits était le plus fort, et sous l'effet de quels processus. Les mesures *in situ* de quelques dizaines de stations sol étaient alors assimilées dans des systèmes d'inversion atmosphérique à l'échelle mondiale (Chevallier et al., 2010).

L'accroissement régulier du système d'observation du CO₂, et notamment le développement de réseaux de dizaines de stations de mesure en continu en Europe et en Amérique du Nord, puis à partir de la fin des années 2000 le lancement de missions satellitaires dédiées aux observations de CO₂ a permis l'émergence de systèmes d'inversion atmosphérique régionaux, à plus haute résolution, visant la distribution des flux naturels aux échelles sous-continentales (Broquet et al., 2011). De surcroît, les émissions d'origine fossile étant restreintes à des zones très limitées, le suivi de ces émissions a commencé à être envisagé avec la mise en place de systèmes d'inversion atmosphérique à l'échelle de la ville (Bréon et al., 2015), ou d'inversion de panache de sites industriels (Nassar et al., 2017) (Figure 2). Toutefois, sur une image satellitaire, ou pour des observations horaires, l'amplitude du signal correspondant aux émissions fossiles est souvent plus faible que celui des flux naturels. À l'échelle de l'année, l'absorption de CO₂ liée à la photosynthèse (en journée et surtout au printemps et en été) s'agrège aux émissions de CO₂ liées à la respiration des écosystèmes (qui dominent les flux naturels la nuit, en automne et en hiver). Au final, les flux d'origine fossile sont plus importants que les flux naturels. Or les observations atmosphériques de CO₂ doivent être interprétées à fine résolution temporelle pour démêler l'impact très variable des champs météorologiques, et en particulier du vent, sur le lien entre flux et concentrations atmosphériques. Les émissions d'origine fossile sont donc une cible *a priori* plus complexe que les flux naturels.

La détection et l'inversion des panaches de CO₂ des villes et grands sites industriels à l'aide de l'imagerie spatiale de CO₂ à haute résolution s'apparente à la détection et à l'inversion des panaches dans les images satellitaires de polluants et de méthane (CH₄), qui ont fait leurs preuves (Sherwin et al., 2023). Mais à ce jour, il n'y a pas encore sur orbite une mission d'imagerie spatiale de CO₂ à haute résolution sur une grande largeur, c'est-à-dire avec une grande fauchée. La situation va radicalement changer avec le lancement de la mission CO2M à partir de 2026.

Les missions spatiales dédiées au suivi des flux de CO₂

Il est possible d'estimer des concentrations de CO₂ atmosphérique dans les colonnes à la verticale des satellites à partir de mesures dans l'IR thermique, suivant un principe et un protocole similaires à ceux de l'estimation des concentrations de CO₂ à partir des mesures dans le proche IR. Les mesures dans l'IR thermique de missions satellitaires de météorologie telles que celles de l'Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge (IASI) du Centre National d'Études Spatiales (CNES) (Crevoisier et al., 2009) ont donc parfois été exploitées pour la quantification des flux naturels de CO₂ aux échelles continentales. Cette exploitation reste exploratoire car les mesures dans l'IR thermique sont en fait peu sensibles aux variations des concentrations de surface qui sont très importantes pour caractériser les flux, et parce que l'incertitude sur l'estimation des concentrations de CO₂ déduites des mesures dans l'IR thermique est plus grande que celle sur l'estimation des concentrations de CO₂ déduites des mesures dans le proche IR.

Les premières mesures dans le proche IR exploitées pour l'estimation des concentrations de CO₂ et des flux associés ont été celles de la mission ENVironment SATellite (ENVISAT) de l'ESA (2002-2012), qui comportait de nombreux instruments et couvrait ainsi un large éventail de spectres de rayonnement. Cependant, la résolution spectrale et spatiale limitée pour les bandes associées à l'estimation des concentrations de CO₂ n'a pas permis d'obtenir des produits de qualité pour ce gaz.

Les premières missions véritablement consacrées à l'estimation des concentrations de CO₂ avec des spectromètres dédiés entièrement ou en grande partie aux bandes du proche-IR pertinentes pour cette espèce ont été la mission japonaise (Japan Aerospace Exploration Agency -JAXA / National Institute for Environmental Studies -NIES) Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT ; 2009-présent) et la mission américaine (National Aeronautics and Space Administration -NASA / Jet Propulsion Laboratory -JPL) Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2, lancée en 2014). Elles restent aujourd'hui, avec leurs successeurs GOSAT-2 (lancée en 2018) et OCO-3 (instrument placé sur la station spatiale internationale en 2019 ; Figure 2) les principales missions d'observation du CO₂. Les missions chinoises (Ministry of Science and Technology -MOST / Chinese

Academy of Sciences –CAS / China Meteorological Administration -CMA) TanSat et TanSat-2 (depuis 2016) complètent le panel actuel des missions institutionnelles dédiées au CO₂. La mission Microcarb du CNES et de l'Agence spatiale du Royaume-Uni (United Kingdom Space Agency) devrait rejoindre cette constellation en 2025 (CEOS, 2024).

Or, ces missions ont été principalement conçues pour le suivi des flux naturels de CO₂ à l'échelle des continents et des bassins océaniques, avec une résolution et une densité spatiales relativement faibles (pour les missions GOSAT) ou une fauchée étroite (pour les missions OCO-2, OCO-3 et TanSat). Seule exception, la mission OCO-3 intègre un mode de visée dédié à l'acquisition d'images d'environ 80×80 km² sur les villes et grands sites industriels. Ce mode de visée a produit plusieurs milliers d'images depuis la mise en opération de la mission, ce qui illustre son utilisation à relativement haute fréquence et son rôle majeur dans les objectifs de la mission. Leur petite taille limite la capacité à traiter les panaches issus des mégapoles, mais ces images préfigurent la nouvelle génération d'instruments imageurs dont la principale mission sera le suivi des émissions anthropiques, et qui devrait être lancée dans les années à venir. La mission Microcarb intégrera également un mode de visée vers les grandes sources anthropiques, le « mode ville », produisant des images de plus petite taille (~40 km × 40 km) et moins fréquentes que celles d'OCO-3, mais toujours dans le but d'apporter des données précurseurs des imageurs à venir. On note enfin que les mesures sur des fauchées étroites de la mission OCO-2 croisent régulièrement des panaches d'amplitude relativement forte sous le vent de grandes sources anthropiques. Le traitement de ces sections de panaches peut poser des difficultés à la fois pour assurer que le pic de concentration associé correspond bien à un panache anthropique, ou pour identifier la source correspondante, ce qui restreint les cas pour lesquels une identification et une quantification de source est pertinente, mais l'analyse des données OCO-2 a permis de nombreuses estimations pour de grandes centrales thermiques et des villes (p.ex. Nassar et al., 2017 ; Chevallier et al, 2022).

La constellation de deux à trois satellites imageurs CO2M (ESA/UE) du programme Copernicus sera la première des missions d'imagerie sur large fauchée (> 200 km) en continu à relativement haute résolution spatiale (4 km²) et devrait rester la principale source d'information satellitaire sur les émissions anthropiques dans les années qui suivront son lancement en 2026. C'est la première mission spatiale dont la configuration a été principalement étudiée pour permettre la quantification des émissions anthropiques, et plus généralement le programme institutionnel le plus ambitieux pour le suivi des flux de CO₂. La mission Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle (GOSAT-GW, JAXA/NIES), qui doit être lancée prochainement, apportera également une imagerie des champs de CO₂.

Le secteur privé générera peut-être lui aussi des projets ambitieux, avec le développement croissant de concepts de constellations de nanosatellites imageurs à très haute résolution spatiale (< 1 km²). La société privée canadienne GHGSat a déjà lancé des nanosatellites pour la détection de panaches de CO₂ et de CH₄ et la quantification des émissions associées. Seules les observations de CH₄ semblent aujourd'hui exploitables, mais les progrès pour ce gaz ont été très rapides et les résultats correspondants sont aujourd'hui convaincants, ce qui est prometteur pour l'observation du CO₂. L'emprise croissante du « new space » (l'industrie spatiale d'initiative privée) et les soutiens gouvernementaux pour son développement alimentent d'ores et déjà la naissance de start-up visant le développement d'instruments et de plateformes satellitaires pour le suivi des GES, principalement le CO₂ et le CH₄ (Evroux, 2022).

Le CO2MVS, les systèmes nationaux et les services avals

L'exploitation des mesures satellitaires pour le suivi des flux de CO₂ nécessite l'utilisation de systèmes de modélisation et d'inversion statistique qui peuvent être complexes et coûteux en temps de calcul. Les systèmes de détection et d'inversion de panaches dans les images de GES reposent le plus souvent, pour l'instant, sur des approches et des codes très simples. Ainsi, l'application de ces systèmes au traitement des données OCO-2 et OCO-3, ou des images de CH₄ ou de polluants (telles que les images de CH₄, de CO et de NO₂ de l'instrument TROPospheric Monitoring Instrument -TROPOMI- de la mission Copernicus Sentinel-5P) représente, pour l'instant, des coûts de calcul relativement faibles. Mais cela s'explique par la quantité relativement faible des données exploitées jusqu'à présent, par le manque de panaches aisés à distinguer dans les données existantes ou par le conservatisme des algorithmes actuellement utilisés qui se concentrent sur les panaches d'un ensemble limité de très grandes sources (Chevallier et al., 2022). La multiplication des missions spatiales et l'augmentation du volume et de la précision des données à traiter demanderont des ressources croissantes ou la complexification des algorithmes d'inversion atmosphérique. Des codes d'intelligence artificielle sont déjà testés pour la détection et l'inversion de panaches (Dumont Le Brazidec et al., 2024). Par ailleurs, quoi qu'il en soit de l'inversion atmosphérique, la génération des données de concentrations à partir des mesures de spectres de rayonnement reste complexe et nécessite des améliorations afin d'augmenter la précision des estimations de concentrations. En effet, les observations de CO₂ actuelles sont entachées de biais importants dont les structures spatiales perturbent la capacité à interpréter les variations des concentrations en termes de flux de surface. Enfin, la représentativité temporelle des panaches observés dans l'imagerie satellitaire n'est au plus que de quelques heures. Leur exploitation pour produire des estimations avec une représentativité temporelle pertinente (à l'échelle de la journée, du mois, de l'année) nécessite l'ingestion de jeux de données complémentaires, probablement multiples.

Le déploiement de missions spatiales à visée opérationnelle, comme le programme CO2M, doit donc s'accompagner de la mise en place de systèmes sophistiqués de traitement des données des missions satellitaires, CO2M et autres, des mesures des réseaux sol et des sources d'informations complémentaires : observations des polluants co-émis par la combustion des combustibles fossiles, inventaires spatialisés et données d'activités à haute résolution spatiale et temporelle, etc. (Pinty et al., 2017). La conception du futur système européen CO2MVS en est aujourd'hui l'expression la plus aboutie, l'objectif étant d'assurer un suivi opérationnel des émissions anthropiques et des absorptions naturelles de CO₂ sur l'ensemble de la planète et à haute résolution spatiale, dont les estimations pourront être agrégées aux résolutions annuelles et nationales. La complexité de l'architecture du système et les défis associés à l'intégration de flux de données complexes et variés explique qu'une série de projets européens accompagne son développement sous la houlette du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) et en coopération avec la communauté européenne de recherche dans le domaine de l'inversion atmosphérique. Des connexions importantes seront mises en place avec les services de l'ESA (pour le satellite et l'instrument) et de l'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites -EUMETSAT-, pour le segment spatial au sol) en lien avec l'acquisition des mesures et la génération des données de CO₂ de CO2M. Le CO2MVS doit être opérationnel et exploiter les données CO2M dès l'année 2026 pour produire en 2028 des estimations pertinentes pour le 2e GST, puis, de façon régulière et sur le long terme, pour les GST suivants.

Les données Copernicus, comme les données des missions de la NASA et de la JAXA, sont libres d'accès et d'utilisation. Toutes ces données nourrissent donc le développement de systèmes de traitement, notamment aux États-Unis, en Europe, au Japon et en Chine. Ces systèmes peuvent eux-mêmes alimenter le développement de services avals. Ainsi, en parallèle du développement du CO2MVS, différents projets de systèmes opérationnels de suivi des émissions de GES nationaux et urbains voient le jour en Europe. Un programme national a été lancé dans ce sens en Allemagne. Le Royaume-Uni, la Suisse et l'Allemagne incluent des résultats d'inversions atmosphériques pour le CO₂, le CH₄ ou le protoxyde d'azote (N₂O) dans les annexes de leurs inventaires nationaux pour leur évaluation. Dans ces exemples, les efforts sont principalement institutionnels et alimentés par des laboratoires de recherche. Le secteur privé s'intéresse lui aussi à la question et cherche à développer des services pour les territoires et les municipalités, ou de valorisation des estimations des émissions industrielles (suivi, indices financiers etc.). Il n'existe pas encore d'exemple de service de suivi des émissions de CO₂ utilisant les données satellitaires, mais les cas de services de suivi des émissions industrielles de CH₄ basés sur les données spatiales, ou de suivi des émissions urbaines de CO₂ basés sur des réseaux sol dédiés montrent que le lancement de missions comme CO2M devrait rapidement changer la situation.

Si de nombreuses entreprises devraient fonder leurs analyses sur les données publiques des missions spatiales institutionnelles, d'autres pourraient lancer leurs propres constellations de satellites comme c'est déjà le cas pour le suivi atmosphérique des émissions de CH₄ avec la société GHGSat, et comme cela est déjà envisagé pour le CO₂.

Défis à court terme et perspectives techniques

Malgré l'émergence de nombreux projets publics et privés de suivi satellitaire des émissions de CO₂ et les échéances serrées pour la mise en opération de systèmes comme le CO2MVS, cette activité génère encore de nombreuses questions techniques que la communauté scientifique cherche à résoudre.

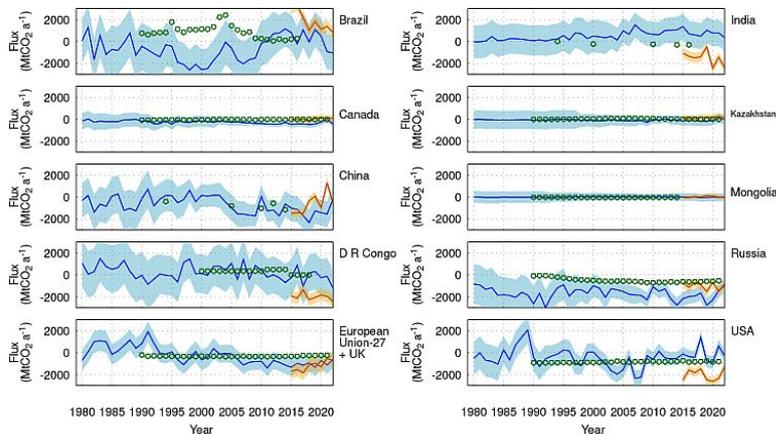
La fréquence de revisite d'une ville ou d'un site par une constellation de trois satellites CO2M sera d'environ deux jours, alors que la représentativité temporelle des estimations associées à l'inversion d'un panache de CO₂ correspondant dépassera difficilement quelques heures. De plus, les nuages rendront un grand nombre de ces revisites inexploitables. Si la couverture nuageuse d'une scène est partielle, et que seuls des fragments du panache sont visibles sur les images, la qualité des estimations pourra être fortement dégradée. Même pour des images complètes de panaches et du champ de fond dans son voisinage, le niveau d'incertitude sur les estimations des émissions données par les inversions seront élevées du fait des erreurs instrumentales, des erreurs sur les champs de CO₂ dérivés des mesures satellitaires (liées aux incertitudes sur le transfert radiatif), des erreurs sur la détection du panache et sur la caractérisation du champ de concentration de fond, et des incertitudes sur le champ de vent associé (incertitudes sur l'inversion du transport atmosphérique). Afin que le rapport entre le signal généré par une source et le bruit associé à toutes ces sources d'erreurs soit assez élevé pour permettre des estimations, il faut un niveau d'émission élevé.

Avec CO2M, seules des grandes sources locales pourront être quantifiées avec une précision convenable, typiquement, les sites industriels et aires urbaines émettant plus d'une mégatonne de carbone par an (1MtC/an) sous forme de CO₂. Ces sources représentent en cumulé la moitié des émissions mondiales de CO₂ associées aux énergie fossiles. Sur un an, avec trois satellites CO2M et pour une source de plus de 1MtC/an, on pourra typiquement espérer 15 à 60 estimations des émissions sur quelques heures avec moins de 20 % d'incertitude (Lespinas et al., 2020). Au vu des défis techniques associés et de la nouveauté relative du concept, cette seule capacité pourra être considérée comme un succès de l'observation spatiale. Mais elle n'en restera pas moins limitée pour produire des bilans d'émissions nationaux indépendants et précis. Il sera probablement difficile de traiter les signaux diffus dans les images de CO2M et de les attribuer aux flux naturels ou anthropiques, à des territoires bien délimités, à des secteurs d'activité ou à la gestion des différents types d'écosystèmes. Même pour les grandes sources industrielles ou urbaines, la couverture et la qualité des estimations sera hétérogène, du fait de la variation des conditions locales d'ensoleillement, atmosphériques, de surface etc.

De façon générale, à ce stade, le traitement des données satellitaires dédiées au suivi des flux de CO₂ reste en très grande partie un objet de recherche, qui suscite l'exploration d'une grande diversité d'approches et le développement d'une grande variété de systèmes. Cet éparpillement en limite probablement la portée pour une exploitation opérationnelle à très court terme, mais de nombreuses perspectives techniques permettent d'espérer une croissance radicale des capacités. La résolution, la couverture spatio-temporelle et la précision des données satellitaires de CO₂ va rapidement s'accroître avec la multiplication des missions : missions à très haute résolution spatiale, comme la mission Twin Anthropogenic Greenhouse Gas Observers (TANGO) que l'ESA vient de sélectionner (ESA, 2024), grandes constellations de micro- ou nanosatellites, missions en orbite géostationnaire, qui permettront une imagerie à haute fréquence temporelle sur une région donnée, instruments actifs utilisant leur propre rayonnement pour la mesure de l'absorption du CO₂ atmosphérique, et donc permettant des observations sans ensoleillement local (de nuit, et aux très hautes latitudes en hiver), etc. Le traitement des données lui-même et son potentiel devraient progresser avec l'utilisation d'approches et de systèmes de modélisation permettant d'extraire une quantité croissante d'information des mesures satellitaires, et avec une capacité croissante à combiner les données d'observation spatiale du CO₂ avec des observations ou des informations complémentaires.

À court terme, les objectifs de l'exploitation des observations spatiales de CO₂ peuvent être la vérification des bilans des flux de CO₂ à de très grandes échelles, comme les bilans planétaires (l'objectif commun du GST), continentaux ou pour des groupes de pays, la génération d'indicateurs d'émissions pour les pays manquant de moyens pour la compilation d'inventaires fiables, d'indicateurs des variations spatiales et temporelles aux échelles sous-nationales et intra-annuelles, et d'indicateurs des variations des émissions en temps quasi-réel. Dans certains cas, notamment pour l'UTCATF, le traitement de ces observations devrait permettre l'amélioration des facteurs d'émission les plus incertains, et la correction des inventaires. Des comparaisons entre les déclarations officielles de flux de CO₂ associés à l'UTCATF dans des grands pays et des estimations issues des observations satellitaires existantes sont déjà étudiées (Figure 4) (Chevallier, 2021).

Figure 4. Flux annuels de CO₂ du secteur UTCATF pour dix grands signataires de la CCNUCC



Flux annuels de CO₂ du secteur UTCATF pour dix grands signataires de la CCNUCC estimés par les signataires eux-mêmes (disques verts) et par l'enveloppe d'incertitude à 1- σ des deux dernières inversions atmosphériques du service Copernicus (bleu pour l'inversion pilotée par les prélèvements d'air près de la surface et orange pour l'inversion pilotée par les données du satellite OCO-2). Les valeurs positives indiquent que le secteur UTCATF du signataire est une source de CO₂ dans l'atmosphère.

Coopération et cadre internationaux

On observe pour l'instant une forte collaboration internationale autour du développement de l'observation spatiale de CO₂ et de ses émissions. On peut l'inscrire dans le contexte de séries de succès lors des COP depuis l'accord de Paris, avec l'obtention de consensus et de décisions importantes pour la lutte contre le changement climatique malgré la montée actuelle des tensions politiques internationales, et même si ces décisions ne paraissent pas encore à la hauteur des enjeux climatiques (Maslin et al., 2023 ; Arora, 2024 ; Citepa, 2024). Une des explications de ce contexte est probablement l'absence de contrainte significative pour obliger les États à respecter leurs engagements dans le cadre de l'accord de Paris (Lavallée et Maljean-Dubois, 2016).

Les données d'observation de CO₂ des missions institutionnelles américaines, japonaises et européennes sont en accès libre et largement partagées, de même que l'expertise pour les développements instrumentaux et le traitement des données. La communauté d'experts (scientifiques, industriels, inventaristes) est aujourd'hui très fortement structurée en Europe autour de la préparation de la mission CO2M et du service CO2MVS du programme Copernicus, et aux États-Unis, dans une moindre mesure, autour des programmes OCO-2/-3. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) s'investit maintenant pour coordonner les efforts à l'échelle du globe avec le programme « Global Greenhouse Gas Watch » (WMO, 2023). Des normes internationales sont à l'étude autour des estimations atmosphériques des émissions (ISO, 2020).

À plus long terme, la solidité de la coopération internationale sera questionnée par des rivalités en termes de leadership, de souveraineté, de normes, de transparence des instruments et des logiciels, de maîtrise des technologies correspondantes, d'autonomie, d'utilisation de données opposables pour se confronter à des estimations défavorables, de concurrence commerciale, etc. Si la coopération de part et d'autre du Pacifique entre les programmes GOSAT (Japon) et OCO-2 (États-Unis) a été exemplaire, le premier aidant le second après l'échec du lancement du précurseur d'OCO-2 en 2009 (Crisp et al., 2012), la coopération intra-européenne entre les programmes Microcarb et CO2M depuis 2015 a été moins manifeste, et les programmes chinois sont difficilement lisibles depuis l'extérieur (CEOS, 2024).

En particulier, il y a des freins à l'utilisation des données spatiales dans le cadre des accords internationaux comme celui de Paris : la question d'une gouvernance planétaire qui s'appuierait sur des instruments nationaux d'un petit nombre de pays (en l'état : les États-Unis, les pays européens, le Japon, le Canada et la Chine), et celle de la transparence apportée par de telles données, qui d'un côté augmente la confiance, mais de l'autre pose des problèmes de souveraineté et d'accès à des informations sensibles, notamment pour les pays ne disposant pas de ces instruments (Albergel, 2021). L'observation spatiale des émissions de CO₂ est d'ailleurs souvent promue comme un support à l'établissement des inventaires plus que comme un outil de vérification.

Le nouveau paradigme est au fond plus agressif que celui de la CCNUCC et du GST, qui se veut le moins intrusif possible, et pour lequel chaque État signataire est l'acteur principal de son propre inventaire et du suivi des progrès pour la réalisation de ses NDC. Ce dernier ayant été peu efficace en termes de réduction des émissions, l'Europe et les États-Unis (ou du moins certaines agences états-uniennes comme la NASA) essaient de coordonner des systèmes d'information pour « mettre au pilori » les États qui ne diminueront pas suffisamment les leurs. L'adage « Vous ne pouvez pas gérer ce que vous ne pouvez pas mesurer » mis fréquemment en avant s'applique implicitement à la gestion des émissions des autres (Stephens, 2011, NASA, 2014). Par nature, cette approche favorise tensions et rivalités.

On peut d'ailleurs craindre que la multiplication des missions spatiales, avec des géométries, temporalités et précisions d'observation très variables, et la multiplication des systèmes de traitement génèrent des flux d'estimations trop hétérogènes et donc, parfois intentionnellement, plus d'opacité que de transparence, voire plus de manipulation que de neutralité dans l'exploitation de mesures.

Ainsi, il est essentiel de conserver l'accès libre aux données de référence et de mettre en place des standards internationaux pour la mesure et les traitements des données. La coordination internationale pour les programmes spatiaux (notamment via les structures en place telles que l'OMM, le Group on Earth Observations -GEO- et le Committee on Earth Observation Satellites -CEOS) doit probablement être renforcée.

Ces différents aspects sont fortement pris en compte dans la préparation du service CO2MVS de Copernicus pour assurer sa légitimité à fournir des estimations pour le GST, avec un travail important d'étalonnage et de standardisation des méthodes et des protocoles pour le traitement des données en lien avec l'OMM, et en impliquant les agences d'inventaires afin d'assurer la cohésion entre les produits du service et les attendus du cadre formel de la CCNUCC et des GST.

Conclusion : perspectives générales

Le potentiel et les limites actuelles de l'utilisation des données atmosphériques de CO₂ pour la quantification des émissions et puits de CO₂ sont connus et documentés dans les directives du GIEC pour la CCNUCC depuis 2006 (GIEC, 2006). La méthodologie générale des inventaires détaillés de référence pour la CCNUCC et le GST ne va pas être bouleversée dans la décennie à venir, mais la donnée satellitaire peut s'imposer progressivement comme une source de contrôle, d'amélioration et d'information complémentaires pour les inventaires. Il est essentiel pour cela d'assurer une forte interaction entre les experts du domaine du suivi spatial des flux de CO₂ et les inventaristes, et l'utilisation par ses derniers des estimations issues des données satellitaires.

L'exploitation de l'observation spatiale en support du GST pose la question de sa pérennisation et de sa stabilité. Le coût financier d'une mission comme CO2M est élevé : le budget correspondant aux deux premiers satellites de la constellation ayant initialement été estimé à environ 450 millions d'euros (ESA, 2020). Or, au-delà de la mission CO2M, il y aura un besoin d'accroître la constellation des satellites dédiés à l'observation du CO₂ et de croiser des modes d'observations variés pour couvrir la plupart des émissions aux échelles spatiales et temporelles d'intérêt. Il est donc impératif de valider rapidement le concept CO2MVS en environnement réel (niveaux de maturité technologique > 6 sur l'échelle « Technology readiness level », TRL) auprès des publics ciblés, en particulier les décideurs politiques et économiques.

Les observations spatiales de CO₂ seront exploitées dans des approches intégrées avec l'assimilation de données socio-économiques (telles que celles utilisées pour les inventaires), de données des réseaux de mesure au sol, et de données de polluants émis conjointement avec le CO₂ par les processus anthropiques et naturels sous-jacents. Ainsi, le suivi des émissions de CO₂ sera étroitement lié dans sa mise en œuvre comme dans ses implications à la question de la surveillance de la qualité de l'air et à celle de l'évolution des comportements socio-économiques.

Le rôle du secteur privé pose des questions. Il apportera des approches et des modes d'exploitation innovants, et il pourra soutenir l'expansion de la constellation des satellites d'observation du CO₂. Mais les synergies pourraient être limitées, soit parce que les objectifs du secteur privé (et donc la configuration de leurs instruments et de leurs chaînes de traitement) se distingueraient des objectifs institutionnels de soutien aux politiques climatiques aux échelles planétaires et nationales, et notamment au GST, soit parce qu'il développerait des canaux d'estimation parallèles et quasi-concurrentiels (ce qui questionnerait l'accès libre aux données institutionnelles). Les initiatives du secteur privé, encouragées par les institutions pour stimuler l'activité économique, pourraient poser des difficultés à l'établissement d'estimations indépendantes de référence.

Le rôle de l'observation spatiale du CH₄ semble aujourd'hui plus évident et mieux établi que celui de l'observation spatiale du CO₂. Les facteurs d'émission et les inventaires sont en effet beaucoup plus incertains pour les émissions de CH₄ que pour les émissions de CO₂. Les émissions de CH₄ sont en grande partie liées à des fuites de gaz naturel qui représentent une perte pour le secteur industriel, et la détection et la quantification de ces fuites peuvent donc être associées à un bénéfice économique immédiat. Les panaches atmosphériques de CH₄ correspondants sont généralement plus faciles à détecter dans les images satellitaires dans le proche-IR et à traiter que les panaches de CO₂, qui se superposent aux signaux très variables des flux naturels de CO₂. Enfin, la dynamique de suivi atmosphérique des émissions de CH₄ s'est accélérée avec l'établissement du « Global Methane Pledge » lors de la COP26, qui a donné naissance à des initiatives publiques comme privées pour établir des méthodes éprouvées pour la détection et la quantification de ces émissions (par exemple dans le cadre du projet International Methane Emissions Observatory -IMEO- du Programme des Nations unies pour l'environnement ; UNEP, 2024).

Il devient urgent de mettre en place de nouvelles capacités de suivi des émissions de CO₂ auxquelles l'observation spatiale des concentrations atmosphériques devrait pouvoir contribuer en partie. Les engagements formels des États auprès de la CCNUCC (les NDC) ne permettant pas encore d'assurer une limitation de l'augmentation de la température moyenne de la planète en dessous de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels (CCNUCC, 2023b), il est essentiel de s'assurer collectivement que ces engagements soient au moins respectés.

Bibliographie

AIRPARIF, 2024, « Inventaire AIR-CLIMAT-ENERGIE », En ligne : https://www.airparif.fr/sites/default/files/document_publication/bilan_emissions_IDF_2021.pdf.

Albergel, E., 2021, « Earth observation satellites: Monitoring greenhouse gas emissions under the Paris Agreement », Public Policy Master Thesis, SciencesPo school of public Affairs. En ligne : https://www.sciencespo.fr/public/sites/sciencespo.fr/public/files/ALBERGEL_Eve.pdf

Arora, P., 2024, « COP28: ambitions, realities, and future », *Environmental Sustainability*, vol. 7, n° 1, p. 107-113.

Barré, J., Aben, I., Agustí-Panareda, A., Balsamo, G., Bousserez, N., Dueben, P., et al., 2021, « Systematic detection of local CH₄ anomalies by combining satellite measurements with high-resolution forecasts », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 21, n° 6, p. 5117-5136.

Bellassen, V., Stephan, N., Afriat, M., Alberola, E., Barker, A., Chang, J.-P., et al., 2015, « Monitoring, reporting and verifying emissions in the climate economy », *Nature Climate Change*, vol. 5, n° 4, p. 319-328.

- Bergamaschi, P., Danila, A. M., Weiss, R., Albritton, T. L., Thompson, R. L., Brunner, D., et al., 2018, « Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories », EUR 29276 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-88938-7, doi: <https://doi.org/10.2760/759928>, JRC111789, En ligne: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC111789>.
- Bréon, F. M., Broquet, G., Puygrenier, V., Chevallier, F., Xueref-Remy, I., Ramonet, M., et al., 2015, « An attempt at estimating Paris area CO₂ emissions from atmospheric concentration measurements », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 15, n° 4, p. 1707-1724.
- Brocchiéri, F., Perugini, L., 2022, « D6.3 User Requirement Document | CoCO2: Prototype system for a Copernicus CO2 service », En ligne: <https://www.coco2-project.eu/node/331>.
- Broquet, G., Chevallier, F., Rayner, P., Aulagnier, C., Pison, I., Ramonet, M., et al., 2011, « A European summertime CO₂ biogenic flux inversion at mesoscale from continuous in situ mixing ratio measurements », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 116, D23303, doi: <https://doi.org/10.1029/2011JD016202>.
- CAMS, 2021, « COP26: CAMS to help measure progress towards CO2 goals », *site internet de CAMS*, <https://atmosphere.copernicus.eu/cop26-cams-help-measure-progress-towards-co2-goals>.
- Canadell, J. G., Le Quéré, C., Raupach, M. R., Field, C. B., Buitenhuis, E. T., Ciais, P., et al., 2007, « Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, n° 47, p. 18866-18870.
- CCNUCC, 2023a, « First global stocktake », En ligne: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_L17_adv.pdf.
- CCNUCC, 2023 b, « Nationally determined contributions under the Paris agreement », En ligne: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_12.pdf.
- CCNUCC, 2024 a, « L'Accord de Paris », *site internet de la CCNUCC*, <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris>.
- CCNUCC, 2024 b, « National Inventory Submissions 2024 », *site internet de la CCNUCC*, <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2024>.
- CEOS, 2024, « Greenhouse gas satellite missions portal », *site internet du CEOS*, <https://database.eohandbook.com/ghg/>.
- Chevallier, F., Ciais, P., Conway, T. J., Aalto, T., Anderson, B. E., Bousquet, P., et al., 2010, « CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21-year reanalysis of atmospheric measurements », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 115, D21307, doi: <https://doi.org/10.1029/2010JD013887>.
- Chevallier, F., 2021, « Fluxes of Carbon Dioxide From Managed Ecosystems Estimated by National Inventories Compared to Atmospheric Inverse Modeling », *Geophysical Research Letters*, vol. 48, n° 15, p. e2021GL093565.
- Chevallier, F., Broquet, G., Zheng, B., Ciais, P., Eldering, A., 2022, « Large CO₂ Emitters as Seen From Satellite: Comparison to a Gridded Global Emission Inventory », *Geophysical Research Letters*, vol. 49, n° 5, p. e2021GL097540.
- Ciais, P., Crisp, D., Denier Van Der Gon, H., Engelen, R., Heimann, M., Janssens-Maenhout, G., Rayner, P., Scholze, M., 2015, « Towards a European Operational Observing System to Monitor Fossil CO₂ emissions », European Commission – ISBN 978-92-79-53482-9. En ligne: <https://www.copernicus.eu/en/news/news/new-co2-green-report-2019-published>
- Citepa, 2023, « Rapport CCNUCC (NIR) », En ligne: <https://www.citepa.org/fr/ccnucc/>.
- Citepa, 2024, « COP-28 : Malgré un premier pas vers la sortie des combustibles fossiles et l'adoption des règles sur les fonds pertes et préjudices, le bilan global de Dubaï est mitigé », En ligne: https://www.citepa.org/fr/2024_01_a03/.
- Cochran, I., 2011, « Analyse des inventaires locaux d'émissions de gaz à effet de serre : quel inventaire pour quelle utilisation ? », in B. Duplessis & C. Raux (Éd.), *Économie et développement urbain durable : Émissions urbaines : inventaires et politiques publiques & Transport et usage du sol*, Développement durable, Paris, Presses des Mines, p. 15-31.
- Commission Européenne, 2023, « Commission welcomes completion of key 'Fit for 55' legislation, putting EU on track to exceed 2030 targets », *site internet de la Commission Européenne*, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_4754.
- Crevoisier, C., Chédin, A., Matsuëda, H., Machida, T., Armante, R., Scott, N. A., 2009, « First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, n° 14, p. 4797-4810.
- Crisp, D., Fisher, B. M., O'Dell, C., Frankenberg, C., Basilio, R., Bösch, H., et al., 2012, « The ACOS CO₂ retrieval algorithm ‐ Part II: Global X_{CO2} data characterization », *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 5, n° 4, p. 687-707.
- Crisp et al., 2018, « A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space, CEOS Greenhouse Gas White Paper », En ligne: https://ceos.org/observations/documents/CEOS_AC-VC_GHG_White_Paper_Publication_Draft2_20181111.pdf
- Dooley, K., Christoff, P., Nicholas, K. A., 2018, « Co-producing climate policy and negative emissions: trade-offs for sustainable land-use », *Global Sustainability*, vol. 1, p. e3.
- Dumont Le Brazidec, J., Vanderbeeken, P., Farchi, A., Broquet, G., Kuhlmann, G., Bocquet, M., 2024, « Deep learning applied to CO₂ power plant emissions quantification using simulated satellite images », *Geoscientific Model Development*, vol. 17, n° 5, p. 1995-2014.
- ESA, 2020, « Contract signed to build Europe's carbon dioxide monitoring mission », *site internet de l'ESA*, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Contract_signed_to_build_Europe_s_carbon_dioxide_monitoring_mission ~-~text=Taking the mission a significant start building the two satellites.
- ESA, 2024, « NanoMagSat and Tango Scout missions get go-ahead », *site internet de l'ESA*, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/NanoMagSat_and_Tango_Scout_missions_get_go-ahead.
- Evroux, C., European Parliamentary Research Service, 2022, « EU space policy: Boosting EU competitiveness and accelerating the twin ecological and digital transition », En ligne: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698926/EPRS_BRI\(2022\)698926_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698926/EPRS_BRI(2022)698926_EN.pdf).
- Fawcett, A. A., Iyer, G. C., Clarke, L. E., Edmonds, J. A., Hultman, N. E., McJeon, H. C., et al., 2015, « Can Paris pledges avert severe climate change? », *Science*, vol. 350, n° 6265, p. 1168-1169.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., et al., 2023, « Global Carbon Budget 2023 », *Earth System Science Data*, vol. 15, n° 12, p. 5301-5369.
- GIEC, 2006, in Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), « IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme », IGES. En ligne: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- GIEC, 2019, « Réchauffement planétaire de 1,5 °C - Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique Foire aux questions Glossaire », En ligne: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf.
- GIEC, 2021, Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R., Zhou, B. (Eds.) « IPCC Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Greenhouse Gas Protocol, 2021, « Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories », En ligne: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/GPC_Full_MASTER_RW_v7.pdf.
- Han, P., Zeng, N., Oda, T., Lin, X., Crippa, M., Guan, D., et al., 2020, « Evaluating China's fossil-fuel CO₂ emissions from a comprehensive dataset of nine inventories », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 20, n° 19, p. 11371-11385.
- ISO, 2020, « Greenhouse gas and climate change management and related activities », *site internet de l'organisation internationale de normalisation*, <https://committee.iso.org/home/tc207sc7>.
- Jacob, D. J., Varon, D. J., Cusworth, D. H., Dennison, P. E., Frankenberg, C., Gautam, R., et al., 2022, « Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 22, n° 14, p. 9617-9646.
- Jacobs, N., O'Dell, C. W., Taylor, T. E., Logan, T. L., Byrne, B., Kiel, M., et al., 2024, « The importance of digital elevation model accuracy in X_{CO2} retrievals: improving the Orbiting Carbon Observatory 2 Atmospheric Carbon Observations from Space version 11 retrieval product », *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 17, n° 5, p. 1375-1401.
- Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F., et al., 2019, « EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012 », *Earth System Science Data*, vol. 11, n° 3, p. 959-1002.
- Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Andrew, R. M., 2016, « Uncertainties around reductions in China's coal use and CO₂ emissions », *Nature Climate Change*, vol. 6, n° 7, p. 687-690.
- Labuschagne, C., Kuiper, B., Brunke, E.-G., Mokolo, T., van der Spuy, D., Martin, L., et al., 2018, « A review of four decades of atmospheric trace gas measurements at Cape Point, South Africa », *Transactions of the Royal Society of South Africa*, vol. 73, n° 2, p. 113-132.
- Lavallée, S., Maljean-Dubois, S., 2016, « L'Accord de Paris : fin de la crise du multilatéralisme climatique ou évolution en clair-obscur ? », *Revue juridique de l'environnement*, vol. 41, n° 1, p. 19-36.
- Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., et al., 2019, « Climate tipping points — too risky to bet against », *Nature*, vol. 575, n° 7784, p. 592-595.
- Lespinas, F., Wang, Y., Broquet, G., Bréon, F.-M., Buchwitz, M., Reuter, M., et al., 2020, « The potential of a constellation of low earth orbit satellite imagers to monitor worldwide fossil fuel CO₂ emissions from large cities and point sources », *Carbon Balance and Management*, vol. 15, n° 1, p. 18.
- Luers, A., Yona, L., Field, C. B., Jackson, R. B., Mach, K. J., Cashore, B. W., et al., 2022, « Make greenhouse-gas accounting reliable — build interoperable systems », *Nature*, vol. 607, n° 7920, p. 653-656.
- Maslin, M. A., Lang, J., Harvey, F., 2023 « A short history of the successes and failures of the international climate change negotiations », *UCL Open Environment*, vol. 5, p. e059.

- McGlynn, E., Li, S., F. Berger, M., Amend, M., L. Harper, K., 2022, « Addressing uncertainty and bias in land use, land use change, and forestry greenhouse gas inventories », *Climatic Change*, vol. 170, n° 1, p. 5.
- Meijer, Y., Andersson, E., Boesch, H., Dubovik, O., Houweling, S., Landgraf, J., et al., 2023, « Editorial: Anthropogenic emission monitoring with the Copernicus CO₂ monitoring mission », *Frontiers in Remote Sensing*, 4:1217568. doi:<https://doi.org/10.3389/frsen.2023.1217568>. En ligne: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsen.2023.1217568>.
- Morgan, E. J., Lavič, J. V., Seifert, T., Chicoine, T., Day, A., Gomez, J., et al., 2015, « Continuous measurements of greenhouse gases and atmospheric oxygen at the Namib Desert Atmospheric Observatory », *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 8, n° 6, p. 2233-2250.
- MTES, 2020, « Stratégie nationale bas-carbone », En ligne : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf.
- NASA, 2014, « You can manage only what you can measure », *site internet de la NASA*, <https://www.nasa.gov/image-article/you-can-manage-only-what-you-can-measure/>.
- Nassar, R., Hill, T. G., McLinden, C. A., Wunch, D., Jones, D. B. A., Crisp, D., 2017, « Quantifying CO₂ Emissions From Individual Power Plants From Space », *Geophysical Research Letters*, vol. 44, p. 10,045-10,053.
- NOAA, 2024, « Trends in CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ », *site internet du Global Monitoring Laboratory de la NOAA*, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>.
- OCDE, Climate Change Expert Group, 2018, « Tracking progress towards NDCs and relevant linkages between Articles 4,6 and 13 of the Paris Agreement », En ligne:<https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/358aae24-en.pdf?expires=1716564815&id=id&accname=guest&checksum=2F06F5F1FC2A9B6C9F1D9B8C10F85AC5>.
- Perugini, L., Pellis, G., Grassi, G., Ciais, P., Dolman, H., House, J. I., et al., 2021, « Emerging reporting and verification needs under the Paris Agreement: How can the research community effectively contribute? », *Environmental Science & Policy*, vol. 122, p. 116-126.
- Petrescu, A. M. R., Peters, G. P., Janssens-Maenhout, G., Ciais, P., Tubiello, F. N., Grassi, G., et al., 2020, « European anthropogenic AFOLU greenhouse gas emissions: a review and benchmark data », *Earth System Science Data*, vol. 12, n° 2, p. 961-1001.
- Pinty, B., Janssens-Maenhout, G., Dowell, M., Zunker, H., Brunhes, T., Ciais, P., Dee, D., Denier Van Der Gon, H., Dolman, H., Drinkwater, M., Engelen, R., Heimann, M., Holmlund, K., Husband, R., Kentarchos, A., Meijer, Y., Palmer, P., Scholze, M., 2017, « An Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring & Verification Support capacity - Baseline Requirements, Model Components and Functional Architecture » doi: <https://doi.org/10.2760/39384>, European Commission Joint Research Centre, EUR 28736 EN, En ligne: <https://www.copernicus.eu/en/news/news/new-co2-green-report-2019-published>
- Pinty, B., Ciais, P., Dee, D., Dolman, H., Dowell, M., Engelen, R., Holmlund, K., Janssens-Maenhout, G., Meijer, Y., Palmer, P., Scholze, M., Denier Van Der Gon, H., Heimann, M., Juvyns, O., Kentarchos, A., Zunker, H., 2019, « An operational anthropogenic CO₂ emissions monitoring & verification support capacity: needs and high level requirements for in situ measurements : report from the CO₂ monitoring task force. », European Commission Joint Research Centre, EUR 29817 EN, En ligne: <https://www.copernicus.eu/en/news/news/new-co2-green-report-2019-published>
- Qin, Y., Xiao, X., Wigneron, J.-P., Ciais, P., Brandt, M., Fan, L., et al., 2021, « Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon », *Nature Climate Change*, vol. 11, n° 5, p. 442-448.
- Rayner, P. J., Michalak, A. M., Chevallier, F., 2019, « Fundamentals of data assimilation applied to biogeochemistry », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 19, n° 22, p. 13911-13932.
- Roelfsema, M., van Soest, H. L., Harmsen, M., van Vuuren, D. P., Bertram, C., den Elzen, M., et al., 2020, « Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement », *Nature Communications*, vol. 11, n° 1, p. 2096.
- Sherwin, E. D., Rutherford, J. S., Chen, Y., Aminfarid, S., Kort, E. A., Jackson, R. B., et al., 2023, « Single-blind validation of space-based point-source detection and quantification of onshore methane emissions », *Scientific Reports*, vol. 13, n° 1, p. 3836.
- Stephens, B., 2011, « Greenhouse gas emissions: how to manage what cannot be measured », *Carbon Management*, vol. 2, n° 1, p. 1-4.
- Tans, P. P., 1997, « The Co₂ Lifetime Concept Should Be Banished; An Editorial Comment », *Climatic Change*, vol. 37, n° 3, p. 487-490.
- Tiemoko, T. D., Ramonet, M., Yoroba, F., Kouassi, K. B., Kouadio, K., Kazan, V., et al., 2021, « Analysis of the temporal variability of CO₂, CH₄ and CO concentrations at Lamto, West Africa », *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, vol. 73, n° 1, p. 1-24.
- UNEP, 2024, « International Methane Emissions Observatory (IMEO) », *site internet de l'UNEP*, <https://www.unep.org/topics/energy/methane/international-methane-emissions-observatory>.
- Ville de Paris, 2020, « Bilan des émissions de gaz à effet de serre de Paris », En ligne : <https://cdn.paris.fr/paris/2020/02/06/dc2edb10d13ae050815850f721f5a837.pdf>.
- WMO, 2023, « WMO Executive Council endorses global greenhouse gas monitoring plan », *site internet de l'OMM*, <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-executive-council-endorses-global-greenhouse-gas-monitoring-plan>.

Résumés

L'accord de Paris sur le climat en 2015, et plus généralement les politiques de lutte contre le changement climatique s'appuient sur une connaissance des émissions de gaz à effet de serre, en particulier de dioxyde de carbone (CO₂), dues à l'activité humaine, établie par des inventaires combinant des données sur ces activités et des coefficients d'émissions correspondants. Cette approche présente aujourd'hui des limitations, avec des niveaux d'incertitudes variables en fonction des pays et des secteurs d'activité, et en termes de délais et de résolution spatiale et temporelle, qui pénalisent la transparence et la fiabilité recherchées par l'accord de Paris. Or l'acquisition et le traitement d'observations, notamment satellitaires, des concentrations atmosphériques de CO₂ pourrait permettre des estimations rapides et fiables des émissions de CO₂ à différentes échelles spatiales, et un contrôle voire une amélioration de la qualité des inventaires. Cet article montre ainsi que cette approche atmosphérique, longtemps limitée à la recherche scientifique, émerge aujourd'hui comme un moyen de répondre au besoin politique de nouvelles capacités de suivi des émissions de CO₂. L'Europe affiche de grandes ambitions dans ce domaine, avec la mission spatiale Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring (CO₂M) et la préparation d'un service opérationnel de suivi atmosphérique des émissions anthropiques de CO₂ qui alimenterait les déclarations officielles des émissions européennes. Cependant, la maturité actuelle des chaînes de traitement ne permet pas encore de qualifier un tel système. L'utilisation de ses estimations des émissions de CO₂ dans un cadre international pose de nombreux défis techniques et politiques, que cet article discute, en leur donnant un contexte et des perspectives générales. Il s'appuie pour cela sur une revue d'articles scientifiques et de rapports pour les décideurs politiques, et sur une connaissance des échanges internationaux sur le sujet.

The Paris climate agreement in 2015, and more generally policies to combat climate change, are based on knowledge of greenhouse gas emissions, in particular carbon dioxide (CO₂) emissions, from human activity, established by inventories combining data on these activities and corresponding emission coefficients. This approach currently presents limitations, with varying levels of uncertainty depending on the countries and sectors of activity, and in terms of latency and spatial and temporal resolution, which penalize the transparency and reliability sought by the Paris agreement. However, the acquisition and processing of observations, particularly satellite observations, of atmospheric CO₂ concentrations could enable rapid and reliable estimates of CO₂ emissions at different spatial scales, and the evaluation or even the improvement of the quality of inventories. This article thus shows that this atmospheric approach, long limited to scientific research, is now emerging as a means of responding to the political need for new capacities for monitoring CO₂ emissions. Europe has great ambitions in this area, with the Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring (CO₂M) space mission and the preparation of an operational service for atmospheric monitoring of anthropogenic CO₂ emissions, which would feed into official declarations of European emissions. However, the current maturity of the processing chains does not yet make it possible to qualify such a system. Using its CO₂ emissions estimates in an international framework poses many technical and policy challenges, which this article discusses, giving them general context and perspective. To do this, it relies on a review of scientific articles and of reports for political decision-makers, and on knowledge of international exchanges on the subject.

Index

Keywords : CO₂ emissions, CO₂ satellite observations, climate agreements, inventories, reliability, transparency
Mots-clés : émissions de CO₂, observations satellitaires de CO₂, accords sur le climat, inventaires, fiabilité, transparence

Auteurs

Grégoire Broquet

Chercheur de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ) en sciences du climat et de l'environnement, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay
gregoire.broquet@lsce.ipsl.fr

Frédéric Chevallier

Directeur de recherche du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA), Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay
frederic.chevallier@lsce.ipsl.fr

La frontière vue du satellite : étude du territoire transfrontalier de Khorgos à l'aide des ondes infrarouges

The border seen from satellite: study of the cross-border territory of Khorgos using infrared waves

Isabella Damiani

Introduction : télédétection et géopolitique critique

Les enjeux technologiques qui gravitent autour de l'information géographique sont nombreux. La question de la production ou de l'amélioration des données, l'automatisation des résultats, la modélisation multicritère des territoires (Verger, 2010), la représentation des régularités observées sont parmi les objectifs principaux qui alimentent la croissance des performances techniques. Les réflexions sur l'espace politique n'échappent pas à cette course au développement technologique de l'information et se concentrent notamment autour des données géospatiales dont l'imagerie satellitaire. Prérogative, pendant longtemps, du renseignement militaire (GEOINT, IMINT), c'est-à-dire dans des contextes de géopolitique « pratique » (O Tuathail, 1996) et plutôt au service des pouvoirs, ces données peuvent être extrêmement utiles également pour la recherche académique géopolitique indépendante. Ces informations géographiques, comme les lumières de nuit ou des images en couleurs naturelles des endommagements causés par des attaques de drones, récupérées depuis l'espace, se sont avérées être un outil essentiel dans de nombreuses réflexions académiques sur les espaces politiques (Eldridge et al., 1997 ; Agnew et al., 2008 ; Agnew et al., 2009 ; Gillespie et al., 2012 ; De Juan, 2015 ; Kuenzer et al., 2015 ; Do et al., 2018).

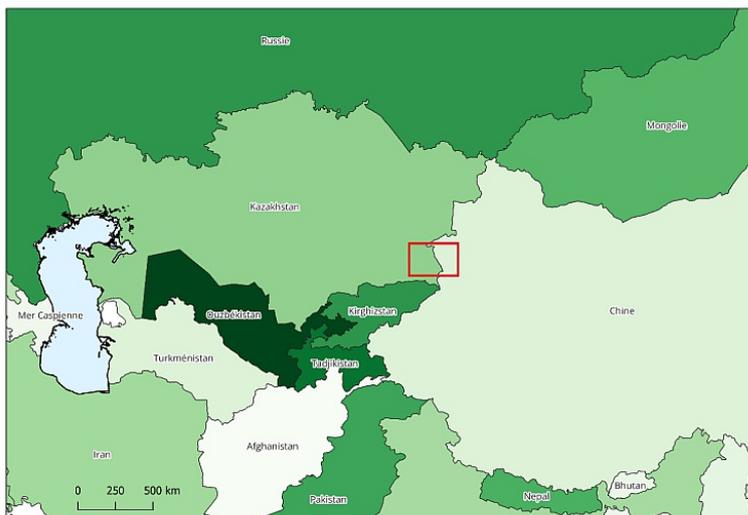
Les études frontalières ont particulièrement bénéficié des données satellitaires, comme dans l'étude de l'urbanisation de la région genevoise (Boricchia, 1996), ou l'aménagement territorial transfrontalier entre le Venezuela et la Colombie (Gomez, Linares, Bradshaw, 2000 ; Gomez, Linares, 2006), ou l'occupation du sol entre l'Égypte et Israël (Qin, Li, Burghermer, Karnieli, 2006), ou encore la région de Khorgos (Damiani, Bachelet, 2018 ; Bennett, 2020 ; Bennett, Faxon, 2021 ; Hiliquin, 2023). Grâce à une haute résolution spatiale du spectre du visible ou une grande variété spectrale des infrarouges, la donnée géospatiale peut faciliter les analyses multiscalaires et multitemporelles des espaces frontaliers, notamment depuis l'amplification de la matérialisation des dispositifs frontaliers et de surveillance des dernières années (Brown, 2009 ; Amilhat Szary, 2012, 2015, 2016 ; Ganivet, 2015 ; Vallet, 2018 ; Rosière, 2020). L'imagerie satellitaire permet donc d'améliorer l'évaluation des changements dans l'aménagement frontalier et d'analyser le travail des acteurs sur leur territoire. Comme les études citées ci-dessus l'indiquent, la télédétection appliquée à la géopolitique critique, c'est-à-dire une géopolitique indépendante de toute forme de pouvoir, peut donc aider à surveiller la surveillance, à analyser le contrôle exercé par les acteurs sur leur espace frontalier.

Néanmoins, l'utilisation de données géospatiales demeure toujours une méthodologie complémentaire à la saisie d'informations en provenance des terrains de recherche. La vérification sur place des informations satellitaires reste fortement préconisée afin d'éviter non seulement le piège d'une éventuelle *deepfake geography* (Zhao et al. 2021), c'est-à-dire des fausses informations géographiques, mais également afin de vérifier les résultats des traitements d'image qui peuvent parfois ne pas être satisfaisants¹. Cependant, l'accès aux territoires frontaliers peut parfois être limité, car aucun pouvoir, même le plus ouvert, n'apprécie un regard extérieur sur ses dispositifs de démarcation (et de défense) territoriale ou sur ses aménagements frontaliers. À la frontière, endroit où il est presque possible de toucher l'institution étatique (Amilhat Szary, 2020), nous avons donc le droit et même le devoir de contempler la souveraineté étatico-nationale théâtralisée (Brown, 2009), mais nous n'avons pas le droit de la regarder attentivement, de l'analyser, sans éveiller des soupçons. La télédétection aura donc comme objectif de contourner cette règle, d'examiner la frontière avec d'autres moyens, de compléter et d'améliorer l'observation du de la géographe sur les espaces de frontière. Les Systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils qui complètent ce paradigme méthodologique car ils permettent non seulement le traitement des données satellitaires, mais aussi de les rassembler et de créer l'interaction parmi les différentes sources : terrain, satellite, bases de données, littérature préexistante.

L'intérêt d'un nouveau regard géographique sur Khorgos

Khorgos est aujourd'hui un toponyme avec des représentations multiples. Au-delà des différentes formes linguistiques kazakhe, ouïgoure, mandarin ou autres (Khorgas, Korgas, Qorgas, Huoerguosi, Huocheng pour ne citer que les formes les plus usitées), Khorgos peut désigner une grande et dynamique nouvelle ville chinoise, un poste-frontière en milieu désertique de la république du Kazakhstan, une zone de libre-échange destinée aux affaires internationales, une rivière utilisée en guise de frontière politique, une région de la frontière soviétique, le terrain d'une fameuse bataille du XVIII^e siècle², la plaque tournante d'un projet géopolitique et géoéconomique d'une grande puissance mondiale du XXI^e siècle (image 1). Ces représentations différentes, multitemporelles et multiscalaires sont les raisons qui ont amené à cette analyse avec l'aide de l'imagerie satellitaire infrarouge.

Image 1. Khorgos (rectangle rouge), dans son contexte eurasiatique

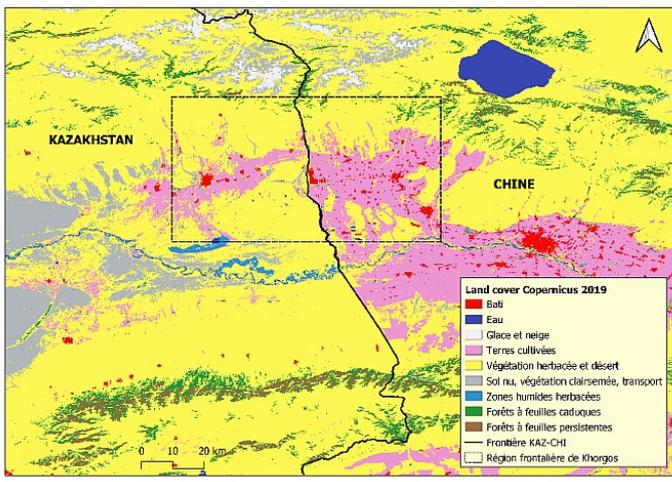


Réalisation de l'auteur.

Le territoire de Khorgos ne cesse de connaître d'importantes évolutions depuis le début des années 2000, et notamment depuis 2013, année de l'officialisation du projet chinois des Nouvelles routes de la soie (aujourd'hui *Belt and Road Initiative - BRI*) qui aura parmi ses objectifs le développement des échanges commerciaux entre la République Populaire de Chine (RPC) et le reste de l'Eurasie, ainsi que la facilitation de l'acheminement de la marchandise chinoise vers le Moyen-Orient, la Russie et l'Europe. À l'intérieur de cette démarche géoéconomique, Khorgos joue un rôle logistique et symbolique en tant que porte d'ouverture de la RPC vers l'ouest grâce à sa localisation, mais aussi grâce à ses multiples visages en évolution constante (Islamjanova, Iddrisu, Suy, Bekbauova, Suleiman, 2017 ; Grant, 2020 ; La Mela, 2021).

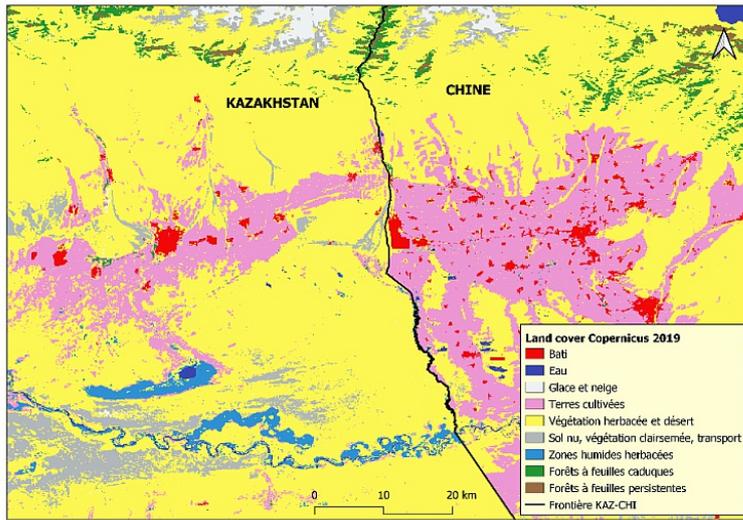
Afin de présenter le contexte géographique de la région d'étude, ce travail propose une analyse récente de l'occupation du sol de la région transfrontalière de Khorgos (image 2a), où on remarque le développement des espaces cultivés dans un contexte paysager aride, formé principalement par des territoires steppiques et sableux. L'échelle relativement petite de l'image 2a nous permet de voir le positionnement stratégique de Khorgos entre deux branches de la chaîne de montagnes Tian Shan/Tangri Tagh, au sud de la chaîne Jungar Alatau, source de la rivière Khorgos, et au nord du fleuve Ili, principale ressource hydrique du territoire. Un agrandissement d'échelle sur Khorgos (image 2b) permet de discerner l'asymétrie de développement des espaces agricoles et urbains, beaucoup plus étendus du côté chinois.

Image 2a. Région transfrontalière de Khorgos, occupation du sol



Source : Programme Copernicus, ESA, 2019. <https://land.copernicus.eu/global/products/lc>

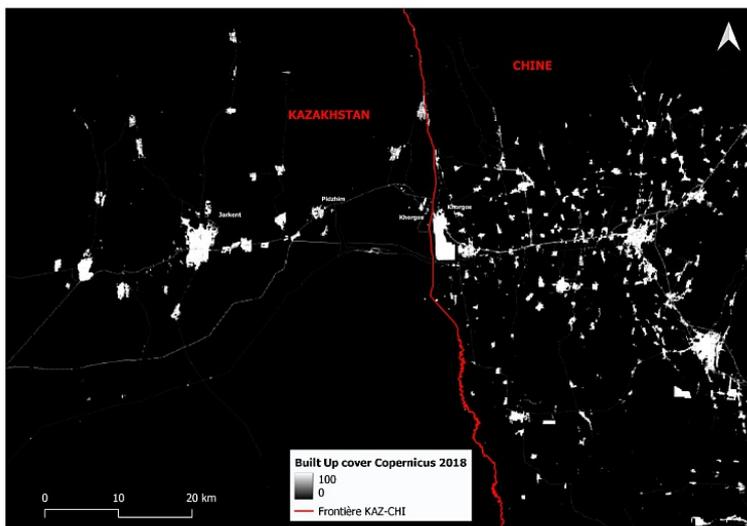
Image 2b. Zoom sur l'occupation du sol



Source : Programme Copernicus, ESA, 2019. <https://land.copernicus.eu/global/products/lc>

En dépit de la rhétorique autour de la coopération et du développement transfrontalier du territoire, les évolutions sont très asymétriques. Du côté chinois on remarque le développement d'un tissu urbain qui, depuis la fin des années 1990, n'a pas arrêté de s'étendre à travers la création de nombreux villages et de la ville de Khorgos qui aujourd'hui compte presque 250 000 habitants, alors qu'elle comptait 50 000 habitants en 2000 (Bureau des statistiques chinois). Toute la province frontalière chinoise de Khorgos, la préfecture autonome kazakhe d'Ili, est passée d'environ 400 000 à presque 2 900 000 habitants entre 1949 et 2011 (Tuerxun, Tashi, 2015). En revanche, du côté kazakhstanais la transformation de l'espace frontalier n'a pas vraiment attiré de nouvelle population, les villes limitrophes de Jarkent, Koktal, Pidzhim, du district frontalier de Panfilov, étant passées au total de 23 500 à 28 200 habitants entre 2009 et 2021 (Bureau des statistiques du Kazakhstan). Le village kazakhstanais de Khorgos, très proche de la frontière, qui sert uniquement d'interface au Centre international de coopération transfrontalière (ICBC), est passé de 875 à 1 148 habitants entre 2009 et 2021 (Bureau des statistiques du Kazakhstan). L'unique changement dans l'espace urbain kazakhstanais a été la création du village de Nurkent, en 2010, très proche de Pidzhim, qui accueille actuellement environ 1 000 habitants. Les données sur le bâti du programme européen Copernicus (image 3) nous permettent de voir dans le détail l'asymétrie urbaine autour de la frontière sino-kazakhstanais dans cette région.

Image 3. Développement du bâti frontalier



Source : Programme Copernicus, ESA, 2018.

Cet article aura donc pour objectif un apport méthodologique : voir comment les données satellitaires infrarouges peuvent favoriser la compréhension d'un territoire de frontière soumis à d'importantes évolutions, à l'instar de la région de Khorgos. Les données sollicitées dans ce travail seront donc les ondes infrarouges, c'est-à-dire le rayonnement du spectre électromagnétique compris entre 780 nm (nanomètre) et 1 mm (millimètre) environ³. Le choix de se concentrer sur les ondes infrarouges est dicté par la volonté de mettre en valeur l'image alternative donnée par cette partie du spectre électromagnétique et de regarder le territoire d'une manière autre que par la vision classique de l'œil humain.

Etat de l'art des recherches géographiques sur Khorgos et données utilisées

La région de Khorgos a fait l'objet de nombreuses recherches en géographie depuis sa mise en valeur dans le projet chinois BRI. Un premier travail mobilisant la télédétection avait déjà été réalisé par l'auteur en 2018 autour de la création d'une classification non supervisée avec une analyse diachronique sur quatre dates clés de l'évolution de l'espace frontalier (Damiani, Bachelet, 2018). Un second travail en télédétection géopolitique a été accompli en 2020 sur l'évolution des lumières de nuit sur différents secteurs de la frontière chinoise, dont Khorgos (Bennett, 2020). D'autres travaux sur l'évolution territoriale et sur le rôle stratégique

de Khorgos dans la BRI ont été publiés ces dernières années ; certains de ces travaux ont utilisé des images satellitaires en compositions colorées « vraies couleurs » (bandes rouge, vert, bleu), résultat des plateformes de cartographie ou d'imagerie satellitaire en ligne comme Google Earth (Grant, 2020 ; Hiliquin, 2023). L'emploi du radar pour l'analyse de l'élévation de tout le district frontalier de Panfilov, du côté kazakhstanaï de la frontière, a été réalisé pour un travail sur l'impact de l'ouverture frontalière sur le secteur agricole (Alif, Konysbayev, Salmyrzauly, 2023).

L'image 4, exemple de composition « vraies couleurs », nous offre une image de départ à grande échelle, du territoire de Khorgos, avec les toponymes principaux et les lieux, notamment du côté kazakhstanaï, auxquels ce travail fera référence et qui seront donc analysés plus tard⁴. Les données de l'image 4 proviennent du satellite Sentinel 2A (bandes 4, 3, 2 avec 10 mètres de résolution spatiale), du programme européen Copernicus, passé sur Khorgos le 31 juillet 2023 à 786 km de distance.

Sentinel 2A a été lancé en 2015 et le programme Copernicus représente la meilleure alternative d'observation de la terre, à des fins scientifiques, et en source ouverte, au programme américain Landsat débuté en 1972. La rivalité entre l'ESA et la NASA sur la production de données géospatiales pour l'observation des sols, en libre accès, se poursuit aujourd'hui avec Sentinel 2A et 2B (lancé en 2017) et Landsat 9, lancé en 2021. Malgré l'antagonisme, les deux programmes demeurent plutôt complémentaires, car si Copernicus nous fournit une meilleure résolution spatiale⁵ (10 mètres pour le visible et le proche infrarouge), Landsat nous fournit une meilleure résolution spectrale⁶ avec l'acquisition d'images panchromatiques et infrarouges thermiques, ainsi que la possibilité de réaliser des analyses diachroniques à travers des séries temporelles plus amples, Landsat ayant débuté il y a 50 ans (Mandanici, Bitelli, 2016).

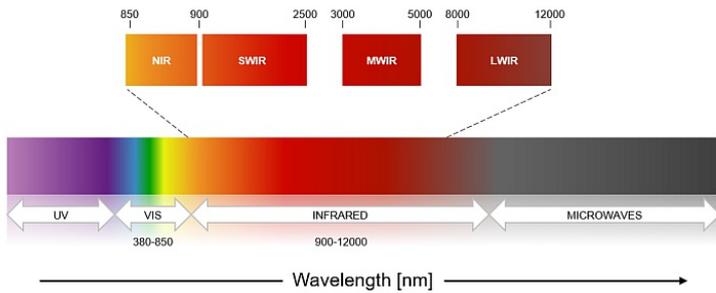
Afin d'enrichir les réflexions déjà existantes sur le développement du territoire de Khorgos, ce travail tachera donc de se concentrer sur l'apport du rayonnement infrarouge à la compréhension de la région à travers la mise en évidence de certains éléments du territoire particulièrement sensibles aux ondes infrarouges (image 5). Le spectre infrarouge concerné sera la partie comprise entre 845 nm et 12 500 nm, exception faite pour la fourchette 2 500 – 10 300 nm, notamment les Medium Wave InfraRed (MWIR) qui ne sont pas incluses dans l'imagerie optique Copernicus et Landsat utilisée dans ce travail.

Image 4. Composition vraies couleurs de Khorgos



Source : Sentinel 2A, 31 juillet 2023, programme Copernicus. Réalisation de l'auteur.

Image 5. Les infrarouges dans le spectre électromagnétique



Source : <https://sunex.com>

Khorgos vu par les infrarouges

Composition fausses couleurs infrarouge

L'utilisation des infrarouges pour l'observation de la terre la plus courante est certainement la composition colorée en fausses couleurs infrarouge (image 6). Cette composition permet la superposition de bandes « proche infrarouge » (PIR ou NIR, acronymes français et anglais)⁷, rouge et vert. Les ondes les plus courtes de la partie visible du spectre électromagnétique, c'est-à-dire les couleurs bleue et violette, normalement utilisées dans les compositions colorées « vraies couleurs », sont donc remplacées par les ondes infrarouges plus courtes. Les trois couleurs primaires utilisées pour l'assemblage de l'image seront donc représentées ainsi : le rouge avec le PIR, le vert avec la bande du rouge et le bleu avec la bande verte. Les PIR sont les premiers infrarouges à être assimilés au spectre du visible pour l'observation de la terre ; cette méthodologie a été utilisée pour la première fois en 1969 avec le capteur S065 du satellite américain Apollo 9 qui a photographié le désert de l'Arizona (Schowengerdt, Slater, 1972 ; Verger, 1997).

Les données pour la réalisation de l'image 6 proviennent également du satellite Sentinel 2A du 31 juillet 2023. Les bandes utilisées sont donc 8A, 4 et 3⁸.

Grâce au logiciel QGIS, l'auteur a procédé à la fusion des différentes images par bandes spectrales et à la création d'un raster virtuel, qui a permis d'assembler les trois bandes. La résolution spatiale des bandes 4 et 3 est de 10 mètres, celle de la bande 8A est de 20 mètres ; la meilleure résolution spatiale au sol sera donc 10 mètres. La caractéristique principale de cette composition est la mise en évidence de la réflectance⁹ des proches infrarouges. Les PIR permettent d'isoler trois grands groupes d'éléments territoriaux selon leur réflectance :

- La végétation qui reflète beaucoup aux PIR, selon l'espèce ou l'état de santé ou de développement de la plante et qui aura différentes tonalités du rouge dans cette composition ;
- Les éléments minéraux naturels ou d'origine anthropique, comme le bâti, qui reflètent moyennement et seront représentés avec des tonalité du bleu/cyan ;
- Les éléments hydriques qui absorbent complètement la lumière et seront représentés en noir ou bleu très foncé, selon le degré de profondeur, d'humidité du sol ou de pureté de l'eau.

Cette grille de lecture permet l'interprétation des images 6 et 8.

Image 6 : Composition fausses couleurs infrarouge de Khorgos



Source : Sentinel 2A, 31 juillet 2023, programme Copernicus. Réalisation de l'auteur.

Une végétation de juillet, riche et en pleine floraison, s'agissant principalement de maïs du côté kazakhstanaï et de plusieurs céréales et légumes du côté chinois, est bien visible aux alentours des espaces urbains. Cependant, la présence d'éléments végétaux avec des tonalités de rouge ne signifie pas forcément un développement agricole, car du côté kazakhstanaï, la végétation spontanée typique du paysage steppique est très répandue, par exemple au sud de la frontière ou entre les villes de Khorgos et Pidzhim (images 7a et 7b). Un critère plus fiable dans la différenciation de la végétation anthropisée et spontanée, sur cette image, pourrait être la morphologie des parcelles, des formes géométriques plus nettes nous indiquent la présence d'activités agricoles.

Image 7a. Paysage entre Khorgos et Pdzhim, côté kazakhstanaï



Photographie de l'auteur, 2022

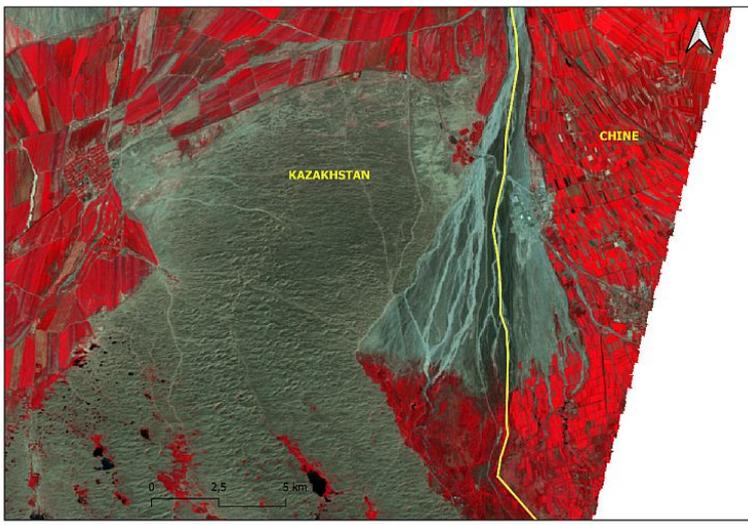
Image 7b. Paysage entre Khorgos et Pdzhim, côté kazakhstanaï



Photographie de l'auteur, 2022

Au sujet de l'évolution des parcelles agricoles, il serait pertinent de faire une comparaison avec une composition fausses couleurs de Khorgos dans le passé. Malgré une résolution spatiale de seulement 30 mètres, avec la composition infrarouge produite par les données du satellite Landsat 5, qui est passé au-dessus de Khorgos le 26 juillet 1994 (image 8), il est possible d'effectuer une analyse diachronique entre les deux territoires non seulement au sujet de l'artificialisation des sols de la zone de frontière, mais également au sujet de l'évolution des espaces agricoles. La région transfrontalière demeure complètement différente. En 1994, tous les espaces urbains sont beaucoup plus réduits. La frontière entre le Kazakhstan fraîchement indépendant et la Chine commence à s'ouvrir, une zone de libre-échange est établie à Jarkent, mais les échanges continuent encore principalement à être réalisés par les particuliers. Par ailleurs, les grandes infrastructures de transports ne sont pas encore présentes, car elles seront mises en place seulement dans les années 2000 (Damiani, Bachelet, 2018). Les PIR nous permettent également de voir l'évolution des politiques agricoles, notamment du côté kazakhstanaï, les parcelles en 1994 étant beaucoup plus grandes que celles de l'image de 2023.

Image 8. Composition fausses couleurs infrarouge de Khorgos



Source : Landsat 5, 26 juillet 1994. Réalisation de l'auteur.

Les parcelles agricoles du district frontalier de Panfilov de l'image 8 sont beaucoup plus grandes que celles de l'image 6, car elles sont encore gérées par les six fermes collectives, que l'on comptait dans le district jusqu'à la fin des années 1990. À partir des années 1960, le pouvoir soviétique commence à transformer Panfilov en un grand territoire de production de maïs, alimenté par un système de canaux d'irrigation très élaboré. La richesse céréalière du district devait être une vitrine des grandes performances agricoles soviétiques bien visibles pour le voisin chinois (Alff, Konysbayev, Salmrzauly, 2023). Les grandes réformes foncières et agricoles entreprises par le Kazakhstan indépendant, à partir des années 1990, modifieront totalement le paysage agricole. Malgré le fait que la propriété privée sera introduite officiellement seulement avec la réforme du code foncier de 2003 (Damiani, 2023), dès la fin des années 1990 les fermes collectives commencent à être démantelées. Les parcelles sont réparties parmi les familles qui travaillaient dans les fermes, mais cette fragmentation sera très peu propice à la culture du maïs. Les agriculteurs kazakhstaniens se retrouveront de plus en plus privés d'un soutien économique étatique, et avec une frontière toujours plus ouverte qui permettra l'arrivée en masse de produits chinois en tout genre. Pourtant, cette ouverture ne débouchera pas sur l'exportation en Chine du maïs kazakhstaniens à des prix plus avantageux pour les producteurs, car les recettes seront systématiquement récupérées par le marché interne et les politiques protectionnistes chinoises limiteront la concurrence de la production kazakhstaniens (Kvartiuk, Petrick 2021 ; Alff et al., 2023).

De l'autre côté de la frontière, la grande stratégie de développement de l'Ouest est menée principalement par le Corps de production et construction du Xinjiang (CPCX), organisation gouvernementale paramilitaire, créée dans les années 1950 afin d'aménager et contrôler ces territoires frontaliers. Ces politiques amèneront de nombreux travailleurs/colons Han des provinces orientales chinoises dans le Xinjiang, région autonome longtemps à majorité ouïgoure mêlée à d'autres minorités turques comme les Kazakhs ou les Kirghizes. Tous les secteurs de production, de l'agriculture à l'industrie, sont gérés par des fermes d'État, six dans le seul district de Khorgos, qui se spécialisent surtout dans les céréales, les fruits, les légumes, l'industrie textile et sucrière, ainsi que dans la production de lavande (Tuerxun, Tashi, 2015).

Sur les images 6 et 8, le territoire avec des tonalités de marron au centre de la zone frontalière kazakhstaniens n'est pas steppique, mais désertique sableux (image 9). Cet espace désertique, majoritairement couvert avec des toiles noires afin d'éviter le recouvrement de l'autoroute, est destiné à l'aménagement des éléments logistiques d'acheminement de la marchandise chinoise vers l'ouest, où on retrouve déjà certains éléments en bleu/cyan comme la gare d'Altynkol, le port sec ou l'autoroute (image 4). La présence de nuages dans le nord-ouest de l'image n'impacte pas l'interprétation de la zone d'étude.

Image 9. Territoire désertique sableux dans la majeure partie de la zone frontalière kazakhstaniens, entre la gare d'Altynkol et le port sec



Photographie de l'auteur, 2022.

Entre le désert et la frontière, la zone fluviale de la rivière Khorgos, à très faible débit, est identifiable via un entonnoir très minéral couleur cyan. Une réduction ultérieure des flux est visible en comparant les images de 1994 et 2023 (Images 10a et 10b).

Image 10a. La rivière Khorgos, très réduite, réfléchit de la même manière que les éléments minéraux sur les infrarouges proches



Photographie de l'auteur, 2022.

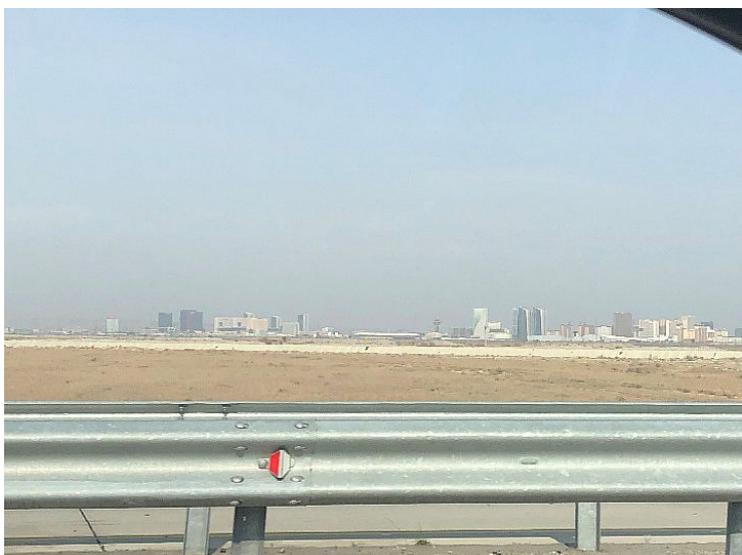
Image 10b. La rivière Khorgos, très réduite, réfléchit de la même manière que les éléments minéraux sur les infrarouges proches



Photographie de l'auteur, 2022.

Depuis ce désert, le panorama asymétrique dans l'aménagement frontalier de Khorgos est bien visible (Image 11). Les espaces désertiques kazakhstaniens, au premier plan, laissent au fur et à mesure place à l'étalement urbain chinois à l'arrière-plan.

Image 11. La Khorgos désertique kazakhstanaise, au premier plan, et la Khorgos urbaine chinoise, au second plan



Photographie de l'auteur, 2022.

Composition fausses couleurs urbain

Cette composition colorée utilise les bandes spectrales du rouge et des infrarouges courts (SWIR)¹⁰. Les données utilisées sont toujours celles de Sentinel 2A du 31 juillet 2023, donc les bandes spectrales traitées sont la 12 et la 11 pour les SWIR et la 4 pour le rouge (image 12). Les manipulations réalisées pour la création de cette composition sont les mêmes que pour la composition infrarouge, toujours avec une résolution spatiale de 10 mètres. Cette composition sert à mettre en évidence les zones urbanisées qui seront représentées en violet, gris, blanc, selon les différents matériaux de construction du bâti. Cela nous permet de voir donc surtout l'étalement urbain du côté chinois. La ville nouvelle kazakhstanaise de Nurkent, entre Pidzhim et le port sec, est bien visible sur cette composition. Construite en 2010, ce village d'un millier d'habitants accueille principalement les travailleurs kazakhstaniens de la frontière. Les projets étatiques sur Nurkent, comme miroir du miracle démographique de la Khorgos chinoise, prévoient une expansion de la ville jusqu'à 100 000 habitants, d'ici à 2030 (image 13a). Les zones végétalisées sont en vert, avec des différences chromatiques plus marquées du côté chinois probablement en raison d'une plus importante variété de cultures. Grâce à l'utilisation des SWIR, cette composition permet de mettre en évidence, dans des tonalités de rouge et de jaune, les points de chaleur (feux de forêt, volcans ou, dans le cas de Khorgos, activités humaines ponctuelles). Sur l'image 12, des points de chaleur sont identifiables à l'intérieur des espaces urbains, dans un hangar à la gare Altynkol et surtout dans certains entrepôts du côté chinois, au sud de la frontière, près du poste frontière Nur Joly (image 13b).

Image 12. Composition fausses couleurs urbain de Khorgos



Source : Sentinel 2A du 31 juillet 2023, programme Copernicus. Réalisation de l'auteur.

Image 13a. La nouvelle ville de Nurkent



Photographie de l'auteur, 2022.

Image 13b. Poste-frontière Nur Joly, du côté kazakhstanais



Photographie de l'auteur, 2022.

Nur Joly (chemin de lumière) est le principal passage routier de la région de Khorgos. Le nom choisi pour ce poste-frontière, inauguré en 2018, rappelle la grande réforme sur le développement des infrastructures lancée par l'ancien président du Kazakhstan Noursoultan Nazarbaïev en 2014. Cette réforme avait comme objectif la modernisation de l'appareil logistique d'un Kazakhstan eurasiatique et multivectoriel, prêt à se désenclaver, se relier au reste de l'Eurasie et s'ouvrir aux nouvelles connexions (Damiani, 2023). Environ six kilomètres avant d'arriver au poste-frontière, du côté kazakhstanais, un péage de 6 500 tenge (environ 13 euros), assez conséquent pour les standards kazakhstanais, est demandé afin d'accéder au *check-point* (image 4). Si on considère que le salaire moyen mensuel au Kazakhstan est de 700 euros, on peut affirmer qu'une barrière économique a été érigée entre le Kazakhstan et la frontière, barrière qui limite donc la possibilité d'effectuer du commerce transfrontalier et de profiter de l'opportunité géoéconomique de l'ouverture de Khorgos, tant célébrée. Lors du passage de l'auteur au *check-point*, en octobre 2022, la voie vers la Chine était caractérisée par une file de camions en attente. Les chauffeurs dans la rue se plaignaient du fait que la frontière était fermée, en revanche des camions arrivaient du côté chinois. De nombreuses voitures garées du côté kazakhstanais attendaient le retour de personnes, à pied, depuis la Chine. L'asymétrie frontalière entre le Kazakhstan et la Chine était encore bien présente du point de vue administratif en 2022. Depuis 2013, une facilitation du transit est mise en place avec un régime sans visa pour les Kazakhstanais des provinces frontalières, jusqu'à trois jours, permettant ainsi un commerce à la journée. Cependant, les autres citoyens du Kazakhstan avaient toujours besoin d'un visa pour se rendre en Chine, alors que les citoyens chinois pouvaient séjourner au Kazakhstan jusqu'à 14 jours sans visa. Depuis 2023 une solution plus symétrique permet un séjour jusqu'à 30 jours continus, ou 90 jours sur 180, autorisant des activités touristiques et commerciales, pour les Kazakhstanais en Chine et vice-versa (Damiani, 2023).

Indices NDBI et UI

Au-delà des compositions colorées, des méthodes plus complexes de télédétection permettent d'identifier l'étalement du bâti sur un territoire. Les deux indices les plus utilisés sont le Normalized Difference Built-up Index (NDBI) et l'Urban Index (UI).

NDBI=

$$\frac{SWIR\ 1 - NIR}{SWIR\ 1 + NIR}$$

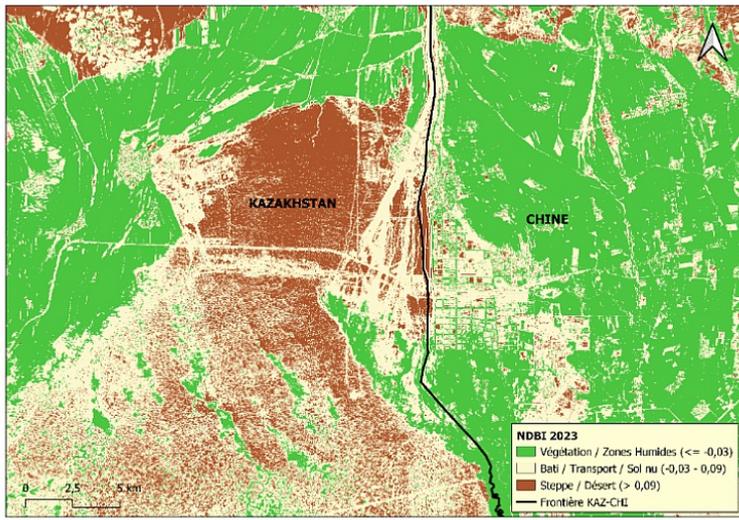
UI=

$$\frac{SWIR\ 2 - NIR}{SWIR\ 2 + NIR}$$

Le NDBI a pour objectif de mettre en relation les proches infrarouge (PIR/NIR) avec les SWIR les plus courts et l'UI les PIR avec les SWIR plus longs. L'intérêt principal de ces deux indices est de mettre en évidence l'étalement du bâti et les éléments minéraux anthropisés et faire une classification du sol simplifiée de la zone de Khorgos. Les données utilisées pour l'application de ces deux indices au territoire de Khorgos (image 14a et 14b) proviennent également du satellite Sentinel 2A du 31 juillet 2023. Les bandes 11 et 8 pour le NDBI et 12 et 8 pour l'UI ont été traitées avec une calculatrice raster, la résolution spatiale finale est de 10 mètres. L'interpolation discrète des données nous permet d'avoir un résultat plus clair et la discrétisation selon les quantiles en trois classes nous permet de simplifier la donnée en isolant les éléments minéraux : le bâti, les transports, le lit de la rivière et le sol nu¹¹ des éléments végétaux et des paysages naturels non anthropisés (désert et steppe). Les résultats sont très similaires, cependant le NDBI nous propose une mise en évidence plus nette de la classe centrale sur les espaces artificialisés et le sol nu. L'UI, en revanche, semble plus sensible aux différences de réflectance parmi les terrains non artificialisés ; entre ceux qui présentent encore une petite végétation spontanée (steppe ou désert) et ceux qui ont été dévégétalisés pour la construction (sol nu). Les parcelles de sol nu sont assez fréquentes dans la zone urbaine chinoise vers le poste-frontière Nur Joly.

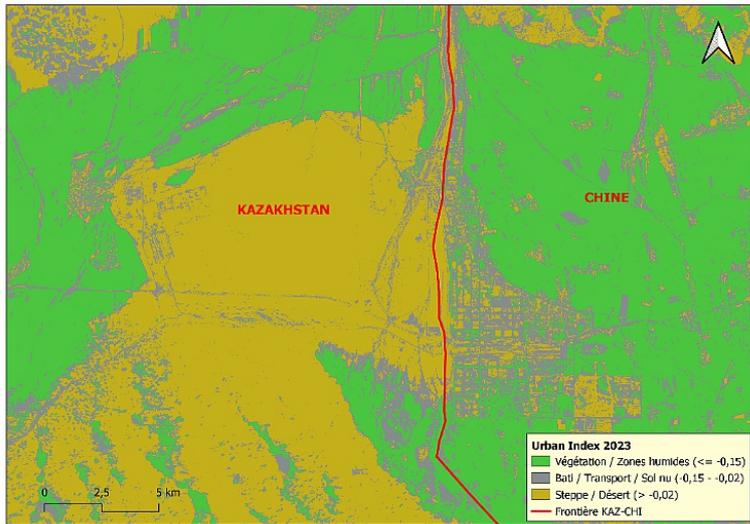
Une autre barrière interne entre le Kazakhstan et la frontière, un poste-frontière administratif invisible aux infrarouges, est présent au nord des bureaux douaniers kazakhstanais de l'ICBC, à trois kilomètres de la ville de Khorgos et à quatre kilomètres de la frontière avec la Chine (images 4 et 15). Ce poste-frontière limite l'accès à la ville kazakhstanaise de Khorgos, pour les étrangers et pour les Kazakhstanais, n'ouvrant cet accès qu'à ceux qui possèdent une autorisation spéciale « commerce ». Cette matérialisation frontalière, à l'intérieur du territoire kazakhstanais, est perçue par les locaux comme une « imposition des lois des Chinois » au Kazakhstan. Le récit anti-chinois est très mobilisé dans le sud-est du Kazakhstan, les Kazakhstanais reprochant aux Chinois d'occuper désormais les espaces urbains, mais aussi agraires, à travers l'installation de nombreux commerces de détail de produits pour l'agriculture¹². Malgré la suppression des autorisations spéciales pour l'accès aux nombreux sites frontaliers pour les étrangers, avec la résolution N. 600 de juillet 2015, modifiée en 2017 et 2021 (registre législatif numérique du Kazakhstan), la ville de Khorgos reste encore un territoire sensible, non accessible pour l'auteur, étrangère, mais également pour des citoyens kazakhstanais sans autorisation spéciale¹³. Dans cette perspective, il est possible, de manière critique, de considérer que la ville de Khorgos est devenue une sorte d'espace public, privatisé par le dispositif frontalier, qui n'est accessible qu'aux visiteurs contribuant à la machine commerciale de la BRI.

Image 14a. NDBI



Source : Sentinel 2A du 31 juillet 2023, programme Copernicus. Réalisation de l'auteur.

Image 14b. UI du territoire de Khorgos, 2023



Source : Sentinel 2A du 31 juillet 2023, programme Copernicus. Réalisation de l'auteur.

Image 15. La barrière frontalière d'accès à la ville de Khorgos, coté kazakhstanais



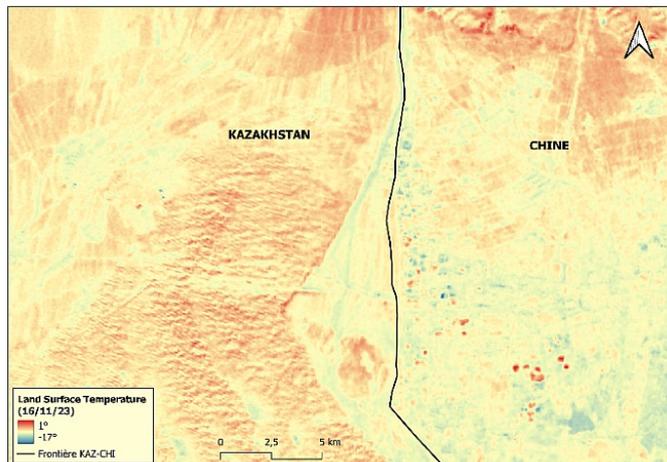
Cette frontière interne au pays est à 3 km de la ville et à 4 km de la frontière avec la Chine.

Photographie de l'auteur, 2022.

Land Surface Temperature (LST)

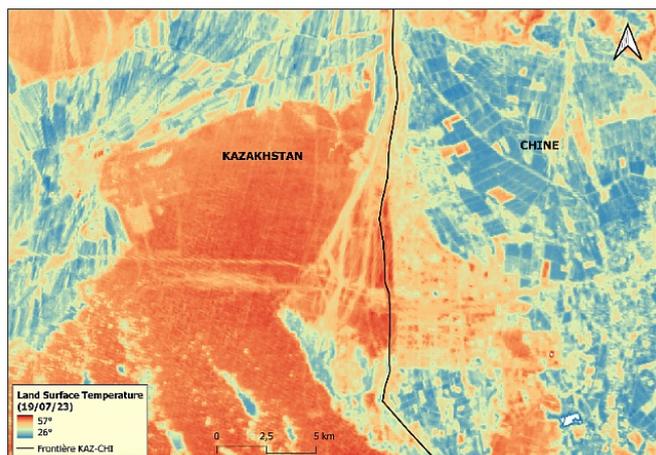
Une dernière analyse du territoire de Khorgos avec les infrarouges s'appuiera sur le calcul des températures avec une des plus importantes variables climatiques, *Land Surface Temperature* (LST). Les bandes nécessaires pour calculer cette variable sont le rouge, les proches infrarouge (NIR) et les infrarouges thermiques (appelés aussi Long wave infrared - LWIR)¹⁴. Le programme Copernicus n'a pas encore mis en activité un satellite disposant d'un capteur infrarouge thermique, les données utilisées pour le LST seront donc celles en provenance des satellites Landsat 8 (30 juillet 2013) et 9 (19 juillet et 16 novembre 2023) du programme américain Landsat. Les bandes utilisées sont les 4, 5, 10 et 11 pour les deux satellites, avec une résolution spatiale de 30 mètres. Le calcul du LST a été réalisé avec le plugin QGIS SPT qui utilise l'algorithme split-Window Algorithm (SWA), méthode la plus utilisée pour le calcul du LST qui profite de la différence d'absorption atmosphérique entre les deux infrarouges thermiques (Wang et al., 2019). Une interpolation linéaire des données, associée à une discrétisation selon les quantiles, avec cinq classes de températures sur deux saisons et deux années à 10 ans d'intervalle, nous permettent d'avoir une analyse thermique assez complète du territoire de Khorgos (images 16a, 16b, 16c)

Image 16a. Land Surface Temperature (LST), novembre 2023



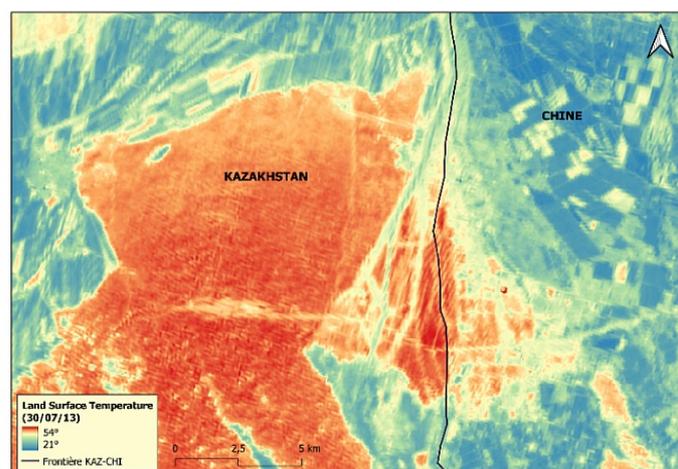
Source : Landsat 9 (2023). Réalisation de l'auteur.

Image 16b. LST, juillet 2023



Source : Landsat 9 (2023). Réalisation de l'auteur.

Image 16c. LST, juillet 2013



Source : Landsat 8 (2013). Réalisation de l'auteur.

Le climat continental sec typique de cette partie de l'Asie centrale permet aux températures maximales de monter au-delà des 50 degrés l'été et de baisser jusqu'aux alentours - 20 degrés en hiver. La zone steppique et désertique non encore aménagée du côté kazakhstanais est l'espace le plus chaud de la région en hiver comme en été. Certaines sources ponctuelles de chaleur, très probablement de nature artificielle, se remarquent du côté chinois en hiver. L'asymétrie dans l'aménagement frontalier entre le Kazakhstan et la Chine amène également à une asymétrie thermique, car en hiver comme en été le côté kazakhstanais est nettement plus chaud que le côté chinois, le bâti étant une source de chaleur moins importante que le désert du côté kazakhstanais. La donnée certainement la plus remarquable de cette analyse des températures de la région est la comparaison temporelle entre l'été 2013 et l'été 2023. Dix ans de modifications et d'artificialisation de l'espace frontalier, à la suite de la mise en place des Nouvelles routes de la soie à partir de septembre 2013, ont engendré non seulement une augmentation générale des températures du côté chinois à la suite de l'étalement du bâti mais aussi l'augmentation en général de trois degrés des températures maximales et de cinq degrés des minimales. Une diminution du débit de la rivière Khorgos est également remarquable en comparant les LST de juillet 2013 et de juillet 2023. Malgré les engagements chinois vers une décarbonation et des projets plus durables au niveau environnemental, la BRI représente aujourd'hui environ 28 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone [15](#).

Des changements hydrologiques et écologiques sont observés dans toute la région, ainsi qu'autour du bassin versant du fleuve Ili, fleuve transfrontalier, la plus importante ressource hydrique de la région, bien visible au sud de Khorgos dans l'image 2b. La fertilité des terres autour de l'Ili a toujours attiré les communautés humaines depuis des siècles. Cependant, les grands changements actuels dans l'exploitation des terres, (à travers l'augmentation des zones arables et la diminution des prairies), et la surexploitation anthropique ont amené à une dégradation des sols par salinisation (Tuerxun, Tashi, 2015).

La dégradation environnementale de la région passe aussi par la diminution des débits des fleuves transfrontaliers, enjeu de longue date entre la Chine et le Kazakhstan soviétique ou indépendant, qui, à de nombreuses reprises, s'est superposé à l'enjeu frontalier, comme dans le cas des conflits autour des rivières Saryshilde non loin de la porte de Dzoungarie ou Chogan-Obo, plus au nord (Pietkiewicz, 2017). La question hydrique était déjà au centre du débat frontalier dès l'époque tsariste, les empires Russe et Chinois ayant signé le traité de l'Ili en 1881, lequel redonnait à la Chine la partie orientale du bassin de l'Ili et établissait la frontière au niveau de la rivière Khorgos, comme aujourd'hui. Cependant, les rivalités hydro-frontalières entre la Chine et le Kazakhstan continuent encore de nos jours, Astana reprochant à Beijing de construire plusieurs ouvrages hydrauliques en amont des fleuves en augmentant ainsi les prélèvements d'eau notamment du fleuve Ili – qui fournit 80 % de l'eau du lac Balkhach au Kazakhstan – et d'autres importants fleuves transfrontaliers comme l'Irtysh. Entre le Kazakhstan et la Chine il y a en tout 23 fleuves transfrontaliers. Malgré les accords sur la gestion du débit de l'Ili, en 2001 et 2010, durant les 20 dernières années, le fleuve est passé de 17,8 à 12,7 km³ par an en provoquant une véritable crise environnementale avec une menace de disparition pour le lac Balkhach (Tuerxun, Tashi, 2015 ; CAA Network, 2020).

En ce qui concerne la rivière de Khorgos, des accords transfrontaliers pour le partage des eaux ont permis la construction à partir de 2013 d'un complexe hydroélectrique et d'un réservoir au nord de l'ICBC, afin d'avoir une répartition plus égalitaire de la ressource hydrique indispensable pour le secteur agricole des deux pays. Un barrage sera également envisagé pour assurer la sécurité des aménagements transfrontaliers par rapport aux risques d'inondation assez élevés dans ce secteur de la rivière (AstanaTimes, 2018). Cependant, le Kazakhstan reproche à la RPC de ne pas respecter les accords et demande la création d'un nouveau réservoir sur la rivière, plus au nord, du côté kazakhstanais (Alff et al., 2023 ; Zhang, Hu, Williams, 2023).

Conclusion

Cette étude sur la région frontalière de Khorgos, fondée sur l'imagerie infrarouge, a permis de voir ce territoire différemment et d'apporter des nouveaux éléments pour la compréhension de cet espace aux nombreux visages et en évolution continue. Ce travail s'est appuyé sur différentes parties du spectre infrarouge, des proches infrarouges aux infrarouges thermiques, afin d'éclairer certains éléments physiques et paysagers, et mieux comprendre le développement local, car la frontière est un objet géopolitique, mais avant tout un espace géographique.

La frontière à Khorgos était fermée, mais cette fermeture n'avait pas généré des modifications majeures sur le territoire, avant les démarches d'ouverture de la Chine vers l'ouest. Aujourd'hui, ce territoire est devenu un haut lieu d'échange, peut-être plus symbolique que réel, et cette représentation a augmenté la visibilité de la frontière. Khorgos existe-t-elle aujourd'hui surtout pour qu'elle soit vue, pour que soit appréciée à travers elle la grandeur des stratégies géopolitique et géoéconomique chinoises ?

Les asymétries et les inégalités territoriales émergent de plus en plus de cette politique commerciale transfrontalière à sens unique, où la RPC est l'unique acteur actif. Toute la contradiction de la rhétorique sur le développement partagé de la BRI est visible dans l'exemple agricole, où les producteurs kazakhstaniens frontaliers sont limités dans leurs exportations vers la Chine qui impose des réglementations strictes en matière d'importation. Ces limitations profitent aux institutions kazakhstaniennes qui n'achètent pas à des prix plus élevés et à celles chinoises qui peuvent appliquer des mesures protectionnistes sur leur production céréalière, sans créer de la concurrence. Khorgos apparaît donc uniquement comme un vecteur de sortie de la marchandise chinoise.

Cette nouvelle visibilité de la frontière a également mené à une fragmentation du territoire kazakhstaniens à travers une privatisation de l'espace exercée par la mise en place de différentes barrières internes, économiques et administratives. L'accès au poste-frontière Nur Joly est associé au péage d'un droit de douane. De surcroît, l'entrée dans la ville de Khorgos semble l'unique apanage de ceux qui participent activement à l'entretien du dispositif commercial transfrontalier.

Bibliographie

Agnew J., Gillespie T., Gonzalez J., Min B., (2008), *Baghdad Nights: Evaluating the US Military 'Surge' Using Nighttime Light Signatures*, UCLA On-Line Working Paper Series.

Alif H., Konysbayev T., Salmzyrauly R. (2023) *Old stereotypes and new openness: discourses and practices of trans-border re- and disconnection in south-eastern Kazakhstan's agricultural sector*, Eurasian Geography and Economics, 64:7-8, 896-918, DOI: <https://doi.org/10.1080/15387216.2023.2169184>

Amilhat Szary A-L., (2012), *Que montrent les murs ? Des frontières contemporaines de plus en plus visibles*, Etudes Internationales (U. de Laval, Québec), 2012, 43 (1), pp.67-87. fhalshs-00809322f

Amilhat Szary A-L., (2015), *Qu'est-ce qu'une frontière aujourd'hui ?*, PUF, Paris.

Amilhat Szary A-L., (2016), *Les frontières, lieu/locus d'une post-politique des images ?*, Les Carnets du BAL, 2016, 7, pp.62-81.

Amilhat Szary A-L., (2020), *Géopolitique des frontières*, Le cavalier bleu, Paris.

Bennett M. M., (2020), *Is a pixel worth 1000 words? Critical remote sensing and China's Belt and Road Initiative*, Political Geography, Volume 78, 102127. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2019.102127>.

Bennett, M.M., Faxon, H.O. (2021), *Uneven Frontiers: Exposing the Geopolitics of Myanmar's Borderlands with Critical Remote Sensing*, Remote Sensing, 2021, 13, 1158. <https://doi.org/10.3390/rs13061158>

Bornicchia F. (1996), *Télé-détection satellitaire et suivi des phénomènes d'urbanisation transfrontalière dans le bassin genevois. Elaboration d'une méthode d'analyse diachronique*, Le Globe. Revue genevoise de géographie, tome 136. Frontières et territoire. pp. 41-64; doi : <https://doi.org/10.3406/globe.1996.1358>

Brown W., (2009), *Murs. Les murs de séparation et le déclin de la souveraineté étatique*, Les prairies ordinaires, Paris.

Damiani I., Bachelet V., (2018), *Représentations géopolitiques sur la Route de la Soie, une étude à l'aide de l'analyse cartographique et du traitement d'images satellites*, L'Espace Politique [En ligne], 34 | 2018-1, DOI: <https://doi.org/10.4000/espacepolitique.4663>

Damiani I., (2023), *Le Kazakhstan face aux enjeux des Nouvelles routes de la soie: Entre représentations identitaires et présence chinoise*, Hommes & Migrations, 1343, 43-51. <https://doi.org/10.4000/hommesmigrations.16254>

De Juan A., (2005), *Long-term environmental change and geographical patterns of violence in Darfur, 2003–2005*, Political Geography, Volume 45, Pages 22-33, ISSN 0962-6298.

Do Q. T., Shapiro J. N., Elvidge C. D., Abdel-Jelil M., Ahn D. P., Baugh K., Hansen-Lewis J., Zhizhin M., Bazilian M. D. (2018), *Terrorism, geopolitics, and oil security: Using remote sensing to estimate oil production of the Islamic State*, Energy research & social science, 44, 411–418. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.013>

Elvidge C. D., Baugh K. E., Kihn E. A., Kroehl H. W., Davis E. R., Davis C. W. (1997), Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption, International Journal of Remote Sensing, 18:6, 1373-1379, DOI: <https://doi.org/10.1080/014311697218485>

Ganivet E., (2015), *Esthétique du mur géopolitique*, PUQ, Québec.

Gillespie T., Agnew J., Mariano E., Mossler S., Jones N., Braughton M., Gonzalez J. (2009), *Finding Osama Bin Laden: An Application of Biogeographic Theories and Satellite Imagery*, California Center for Population Research On-Line Working Paper Series.

Gillespie T., Laygo K., Rayo N., Garcia E., (2012), *Drone Bombings in the Federally Administered Tribal Areas: Public Remote Sensing Applications for Security Monitoring*, California Center for Population Research On-Line Working Paper Series.

Gómez H., Linares Gómez R., Bradshaw R. (2000), *El paisaje fronterizo: una visión satelital. Caso San Antonio del Táchira (Venezuela) - Cúcuta (Colombia)*, Aldea Mundo, 4(8),5-12. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54300802>

Gómez R. H., Linares R. (2006), *SIG: un arma para la frontera*, Aldea Mundo, 11(20),73-86. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54302009>

Grant A. (2020), *Crossing Khorgos: Soft power, security, and suspect loyalties at the Sino-Kazakh boundary*, Political Geography, Volume 76, 102070, ISSN 0962-6298.

Hiliquin M., (2023), *Proximité et frontière : vivre le « rêve chinois » à Khorgos*, 0 | 2023 – *Ma Proximité*, GéoProximitéS, URL : <https://quamoter.hypotheses.org/3166>

Islamjanova, A., Iddrisu, I., Suy, R., Bekbaouva, D., & Suleiman, A. S. (2017). The impact of silk road economic belt on economic development of the Republic of Kazakhstan: The Case of Khorgos City. Journal of Social Science Studies, 4(2), 177-192.

Kvartiuk V. Petrick M., 2021, *Liberal land reform in Kazakhstan? The effect on land rental and credit markets*, World Development N. 138.

Kuenzer C., Dech S., Wagner W. (dir.), 2015, *Remote Sensing Time Series. Revealing Land Surface Dynamics*, Springer, New York.

La Mela V., (2021), *Khorgos The making of an equal twin on the Sino-Kazakh border*, in Mikhailova E., Garrard J., (dir.), 2021, *Twin Cities across Five Continents*, Routledge, London.

Mandanici E., Bitelli G., (2016), *Preliminary Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 Imagery for a Combined Use*, Remote Sensing 8, no. 12: 1014. <https://doi.org/10.3390/rs8121014>

Ó Tuathail G. (1996), *Critical geopolitics*, Routledge, Londres.

Pietkiewicz M., (2017), *Borders of the Central Asian countries under the international law*, Nowa Polityka Wschodnia, N. 4 (15). ISSN 2084-3291.

Qin Z., Li W., Burgheimer J., Kamieli A., *Quantitative estimation of land cover structure in an arid region across the Israel–Egypt border using remote sensing data*, Journal of Arid Environments, Volume 66, Issue 2, Pages 336-352. <https://doi.org/10.1016/j.jandenv.2005.11.003>.

Rosière S. (2020), *Frontières de fer. Le cloisonnement du monde*, Syllepse, Paris.

Schowengerdt R. A., Slater P. N., (1972), *Final postflight calibration report on Apollo 9 multiband photography experiment SO65*, Optical Sciences Center, University of Arizona.

Tuerxun Y., Tashi Y., (2015), *L'impact de la pression démographique sur la rivière Ili (Xinjiang)*, Cahiers d'Asie centrale [En ligne], 25 | 2015. URL : <http://asiacentrale.revues.org/3151>.

Vallet E. (2018), *Borders, Fences and Walls*, Routledge, London.

Verger F. (dir), (1997), *Atlas de géographie de l'espace*, Belin, Paris.

Verger F. (2010), *Les débuts de la télédétection spatiale dans la géographie française : témoignage d'un pionnier*, L'Information géographique, 74, 45-52. <https://doi.org/10.3917/lig.742.0045>

Wang M., He G., Zhang Z., Wang G., Wang Z., Yin R., Cui S., Wu Z., Cao X., (2019), *A radiance-based split-window algorithm for land surface temperature retrieval: Theory and application to MODIS data*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 76, Pages 204-217, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.015>.

Zhao B., Zhang S., Xu C., Sun Y., Deng C. (2021) *Deep fake geography? When geospatial data encounter Artificial Intelligence*, Cartography and Geographic Information Science, 48:4, 338-352, DOI: <https://doi.org/10.1080/15230406.2021.1910075>

Zhang Z., Hu Z., Williams J., (2023) *International rivers as national borders: the functional complexity of border river governance with a case study of the Khorgos river*, Eurasian Geography and Economics, DOI: <https://doi.org/10.1080/15387216.2023.2300070>

Sites consultés

<https://stat.gov.kz>

<https://www.stats.gov.cn>

<https://law.gov.kz>

<https://sentinels.copernicus.eu/>

<https://www.electropedia.org/>

<https://land.copernicus.eu>

<https://sunex.com>

<https://www.rfa.org>

<https://www.caa-network.org/>

<https://astanatimes.com/>

Notes

- 1 Les résultats des traitements peuvent être proches malgré les différences entre les terrains.
- 2 Bataille menée par l'Empire chinois de la dynastie Qing contre le Khanat dzoungar pour la conquête du Xinjiang.
- 3 Définition officielle de la Commission Électrotechnique Internationale <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=731-01-05>
- 4 L'auteure a réalisé un travail de terrain du coté kazakhstanais de la frontière durant l'automne 2022.
- 5 La résolution spatiale fait référence à l'échelle ou à la taille de la plus petite unité d'une image capable de distinguer des objets.
- 6 La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à définir des intervalles de longueur d'onde fins. Plus la résolution spectrale est fine, plus la plage de longueurs d'onde est étroite pour un canal ou une bande particulière.
- 7 Spectre lumineux situé dans la gamme de longueur d'ondes 750 - 900 nm.
- 8 La bande 8A de Sentinel 2 est une variante plus étroite de la proche infrarouge (8) qui évite la contamination du signal par la vapeur d'eau. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi-instrument>
- 9 La réflectance est la proportion de lumière réfléchiée par la surface d'un matériau.
- 10 Spectre lumineux se situant dans la gamme de longueur d'onde 900 – 2.500 nm.
- 11 Cette catégorie fait référence notamment aux espaces en évolution, comme les chantiers ; des terrains, donc, non encore artificialisés, mais qui ne présentent aucun signe de végétation car prêts à la construction.
- 12 A propos de la sinophobie au Kazakhstan voir Damiani, 2023.
- 13 Lors du terrain de l'auteure, des ressortissants kazakhstanais, sans autorisation, n'ont pas pu accéder à la ville de Khorgos.
- 14 Spectre lumineux se situant dans la gamme de longueur d'onde 8000 – 12.500 nm, la gamme utilisée sera plutôt 10.300 – 12.500 nm.
- 15 <https://www.rfa.org/english/commentaries/bri-green-10302019173104.html>

Résumés

Cette étude sur l'espace frontalier de Khorgos entre le Kazakhstan et la République populaire de Chine aura comme objectif de montrer une nouvelle image des mutations territoriales de cette région, en évolution permanente depuis la progressive ouverture de la Chine vers ses voisins post-soviétiques et notamment depuis l'officialisation des Nouvelles routes de la soie, en 2013. Cette analyse territoriale sera portée notamment par le traitement d'images satellite infrarouge. Des proches infrarouges jusqu'aux infrarouges thermiques, l'utilisation de cette partie du spectre électromagnétique permettra de comprendre de nouveaux éléments sur ce territoire et d'améliorer l'analyse géopolitique, avec des informations normalement non accessibles à l'œil nu.

This study on the Khorgos border area between Kazakhstan and the People's Republic of China will aim to show a new image of territorial developments of this region, in constant evolution since the gradual opening of China towards its post-Soviet neighbors and in particular since the formalization of the Belt and Road Initiative, in 2013. This territorial analysis will be carried out by infrared satellite image processing. From near-infrared spectroscopy to thermal infrared, the use of this part of the electromagnetic spectrum will understand new elements and improve the geopolitical analysis, with information normally not reachable to the naked eye.

Index

Mots-clés : Khorgos, Kazakhstan, frontières, télédétection, infrarouge, Belt and Road Initiative

Keywords : Khorgos, Kazakhstan, borders, remote sensing, infrared, Belt and Road Initiative

Auteur

Isabella Damiani

Géographe, Université Paris-Saclay, UVSQ, LIMEEP-PS (UR 20204/OVSQ)

isabella.damiani@uvsq.fr

Vues depuis Pékin, les actuelles évolutions du système portuaire de la RPC

Gouvernance renouvelée, projection planétaire assumée

Seen from Beijing, current evolutions in the port system of the PRC

Benjamin Claverie

En s'appuyant sur une bibliographie essentiellement asiatique, le présent article vise à cerner les ambitions portuaires de l'État chinois – notamment en termes de gouvernance et d'expansion des connexions territoriales des entités portuaires les plus performantes du pays. Car, l'actuelle course à la puissance, qui bouleverse les grands équilibres géopolitiques et géoéconomiques mondiaux, pousse les États, notamment les plus grands, à toujours mieux maîtriser leur territoire et à le connecter au reste du monde toujours plus efficacement. C'est à cette aune qu'il faut comprendre par exemple les efforts entrepris pour moderniser leurs aménagements de transport par les États-Unis au travers l'Infrastructure Investment and Job Act promulgué en novembre 2021. De son côté, la Chine promeut sa Belt and Road Initiative comprenant une large dimension maritime et donc portuaire. Or, s'inspirant du socialisme scientifique, les élites chinoises entendent construire rationnellement un réseau de ports efficaces auquel nous pouvons appliquer le concept de système portuaire.

Si l'on définit un système comme un « ensemble organisé d'éléments et d'interactions entre ces éléments » (Pradeau, 1998), un système portuaire s'entend par conséquent comme un ensemble d'aménagements portuaires équipant une façade maritime. Fonctionnant comme un système logistique et productif complexe, il est constitué de ports exerçant non seulement des interactions entre eux, mais aussi servant d'interface entre des territoires d'avant et d'arrière-pays. Il opère la manutention de flux d'importation et d'exportation sous diverses formes (vrac, conteneurs), leur stockage, leur transformation ou leur assemblage précédant leur redistribution au moyen de réseaux multimodaux de transport. Certains territoires productifs intégrés dans un système portuaire bénéficient d'un statut juridique de zone franche, afin d'assurer leur attractivité auprès des investisseurs et leur développement.

Longtemps tenu pour rachimite, le système portuaire de la République populaire de Chine (RPC) a connu un rapide rattrapage sous la forme d'une profonde modernisation et massification : la somme géographique rédigée par Pierre Gourou ne l'évoque même pas au début des années 1970 (Gourou, 1971), signe indubitable de la fermeture de la RPC à l'extérieur, tandis qu'actuellement il constitue la plus puissante rangée portuaire mondiale (Claverie, 2024). Par le fait, la RPC jouit d'une nette supériorité portuaire vis-à-vis de ses partenaires commerciaux, à tel point que l'expression de superpuissance portuaire peut être avancée. Toutefois, la puissance du système portuaire chinois peut être nuancée en convoquant l'indice mondial de performance des ports à conteneurs, lequel mesure l'efficacité de leurs performances opérationnelles. Les critères retenus comprennent le nombre de conteneurs que les ports manutentionnent, le temps des rotations et d'attente des navires, la productivité des quais, l'efficacité des services administratifs et douaniers. En 2022, six ports chinois se classent parmi les vingt ports mondiaux les mieux notés. Si Yangshan domine le classement, cependant cinq ports situés au Moyen-Orient (Salalah dans le Sultanat d'Oman, Khalifa aux Émirats Arabes Unis), au Maroc (Tanger Med), en Colombie (Carthagène) et en Malaisie (Tanjung Pelepas) devançant Ningbo qui est le second port chinois figurant à la septième place (Banque Mondiale, S&P Global, 2022, p.39-40). Le système portuaire chinois se voit ainsi confronté à des défis pour gagner en efficacité dans un environnement portuaire planétaire hautement compétitif.

Pleinement conscientes des avantages de détenir un système portuaire efficace, les autorités chinoises œuvrent à cet objectif par de régulières réformes institutionnelles relatives à sa gouvernance et par une planification évolutive. Si des économistes européens plaident en faveur d'un retour en grâce de la planification indicative dans les démocraties libérales afin d'adapter notamment leurs économies aux contraintes environnementales (Sapir, 2022), la RPC élabore et applique des plans quinquennaux quasiment sans discontinuer depuis 1953, afin de conduire sa société et son territoire sur la voie du développement et de la puissance (Roux, Xiao-Planes, 2018). Quelles sont les constantes et les inflexions de la planification portuaire dans le cadre de la politique chinoise des transports qui ont contribué à l'affirmation du système portuaire national ?

Une gouvernance renouvelée des ports en faveur d'une intégration gagnante dans la mondialisation

La croissance portuaire, révélatrice de la croissance nationale

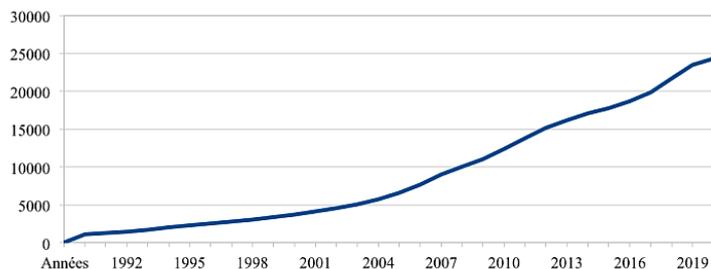
Le parti-État communiste entend bâtir un socialisme à la chinoise que la réflexion de Deng Xiaoping associe à la recherche de l'acquisition de la richesse commune par la libération des forces productives (Artus, 1992). Dans le prolongement de son prédécesseur, Xi Jinping martèle à l'occasion de plusieurs discours que le socialisme à la chinoise entre dans une nouvelle ère (Xi, 2021, p.89-90 et 249-254). Il doit dorénavant participer à atteindre les deux objectifs suivants : « les deux centennaires » et le « rêve chinois de grand renouveau de la nation » (Xi, 2018, p.119). Énoncé plus prosaïquement, la RPC poursuit un développement pour édifier la société de moyenne aisance d'ici 2021, puis pour s'affirmer en tant que pays socialiste moderne et puissance mondiale vers 2049. Dans ce contexte, l'État stratège chinois, bâtisseur d'un capitalisme d'État, considère la construction d'un système portuaire efficace comme l'instrument et le marqueur de son niveau de développement national, en l'occurrence comme le levier indispensable à la modernisation de son économie maritime et à la projection de sa puissance maritime dans le cadre d'une mondialisation économique perçue comme le terreau favorable au développement chinois. Pour accroître le poids du système portuaire dans l'économie de la double circulation, le pouvoir chinois se fait l'initiateur de la transformation des ports en « ports de libre-échange aux couleurs chinoises » (Xi, 2021, p.250). Les ports, laboratoires de l'ouverture sans cesse louée par les autorités, fonctionnent ensuite comme un des territoires où se réalise le passage d'une économie de forte croissance à une économie axée sur la qualité au moyen de l'innovation (Xi, 2021, p.308-311).

La littérature scientifique publiée en anglais propose de nombreux articles dissertant sur le rôle du système portuaire chinois dans le développement du pays à plusieurs échelles géographiques. Elle se distingue par une approche économique recourant à la modélisation mathématique. Certains auteurs (Guan, Yahalon, 2011 ; Wang, Wang, 2019) concluent à l'existence d'une corrélation entre la croissance portuaire et le développement national de la RPC. Selon eux, la réforme portuaire a été profitable au commerce international chinois, a eu un effet d'entraînement sur l'économie et l'emploi et a donc stimulé le PIB national. Ils établissent un lien entre la hausse du nombre de quais portuaires et la croissance du PIB chinois. A l'échelle régionale, ils rappellent que les provinces littorales sont les plus avancées en termes de production de richesses car elles disposent de l'outil portuaire. Enfin, à l'échelle locale, d'autres analystes (Xu, Huang, Chen, Wan, Qin, Song, 2021 ; Cong, Zhang, Wang, Xu, Li, 2020 ; Huang, Bao, 2011 ; Guo, Qin, Du, Han, 2020) mentionnent que le port est à la fois un facteur d'urbanisation et un stimulant de l'économie urbaine, car il favorise la diversification de celle-ci et son rayonnement sur un arrière-pays surtout dans le cas de trafics conteneurisés. Toutefois, une dernière étude (Ma, Jia, She, Haralambides, Kuang, 2021) nuance ce constat. Elle met d'abord en lumière des différences régionales concernant les effets d'entraînement des ports sur l'économie : le golfe de Bohai semble moins en bénéficier que le delta du Yangzi. Elle pointe ensuite le fait que l'impact économique d'un port est plus fort pour les villes petites et moyennes que pour les grandes.

Pour jauger l'influence du système portuaire sur le développement de la RPC, il est probant de comparer l'évolution de trois indicateurs économiques : le PIB en parité de pouvoir d'achat (ppa), le volume du fret maritime et le trafic maritime conteneurisé. En raison d'une collecte incomplète des données relatives au trafic conteneurisé, la période étudiée va de 2000 à 2020, soit une période correspondant globalement à l'ère à partir de laquelle la RPC a rejoint l'OMC. Nous constatons que ces trois indicateurs connaissent une croissance selon des rythmes différents comme en témoignent les figures 1 et 2. La hausse du PIB chinois s'élève à environ 558 %. Le volume du fret maritime montre une tendance haussière régulière égalant 654 %, tandis que le volume du trafic conteneurisé accuse une croissance légèrement moindre (497,8 %) et heurtée, car marquée par deux décroissances en 2004-2005 puis 2008-2009. Ces reculs s'expliquent par une conjoncture économique morose ou dégradée affectant les principaux clients des exportations chinoises de produits manufacturés, à savoir les États-Unis et l'Europe. En 2004-2005, les premiers subissent une croissance peu dynamique, tandis que la zone euro est languissante. En 2008-2009, les conséquences de la crise des subprimes se font sentir. Ce constat nous conduit à penser que les ports chinois contribuant le plus au développement national sont ceux ayant cultivé leur polyfonctionnalité, ce qui les autorise à importer des matières premières indispensables à la croissance de la consommation intérieure, laquelle demeure la composante essentielle de l'économie de la double circulation¹, tout en exportant des produits manufacturés au moyen des échanges conteneurisés. Les activités extraverties apparaissent secondaires mais vitales car elles contribuent à quasiment 19,6 % du PIB chinois en ppa en 2022. La recherche de cette polyfonctionnalité portuaire doit finalement se comprendre dans le contexte d'une Chine, grande puissance industrielle, au sein de laquelle 211 millions d'actifs travaillent dans le secteur secondaire en 2022, représentent 28,8 % de la population active et contribuent à 39,9 % du produit national brut chinois pour une valeur de 48 316 milliards de yuan (National Bureau of Statistics of China, 2023).

Figure 1. La croissance soutenue du PIB chinois en ppa en milliards de dollars entre 1990 et 2020

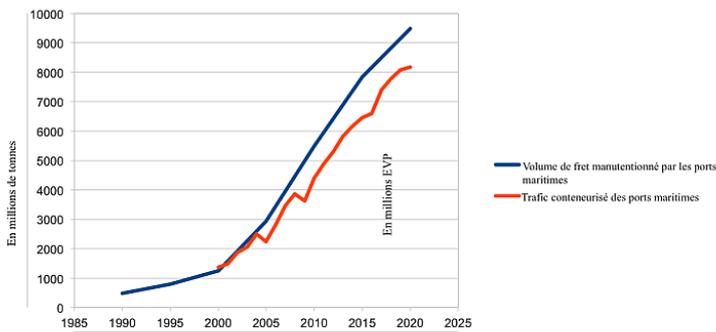
La croissance soutenue du PIB chinois en ppa en milliards de dollars entre 1990 et 2020 (source : Banque Mondiale)



Source : Banque mondiale. Réalisation : Benjamin Claverie.

Figure 2. L'historique croissance des trafics du système portuaire chinois

Figure 2: L'historique croissance des trafics du système portuaire chinois
(Sources : China Statistical Yearbook 2020 et Banque mondiale)



Sources : China Statistical Yearbook 2020 et Banque mondiale. Réalisation : Benjamin Claverie.

Un développement portuaire planifié par des acteurs renouvelés

La construction de ce système portuaire en tant que levier de développement est le résultat tangible d'une politique de planification, laquelle consiste grandement en une double réforme institutionnelle de la gouvernance portuaire pour mobiliser un maximum d'acteurs dans cet objectif. Une telle politique suppose bien entendu un suivi et des ajustements périodiques. L'augmentation de la capacité portuaire visée passe par la création ex nihilo de nouveaux ports ou la modernisation et l'extension des équipements déjà existants. Ce faisant, l'offre portuaire s'accroît rapidement en RPC comme en témoigne la stupéfiante hausse du nombre de postes d'amarrage sur la période allant de 1978 à 2021 passant de 735 à 6 386. D'un point de vue qualitatif, de remarquables progrès sont aussi réalisés dans la mesure où le nombre de quais en eau profonde augmente de 133 en 1978 à 2 207 en 2021.

La réforme portuaire entreprise est d'abord ponctuée par quatre étapes (Guan, Yahalom, 2011). De 1950 à 1979, le Ministère des Transports et des Communications (MOTC) administre de manière centralisée les ports au moyen d'une agence d'État et récupère les profits engendrés. Entre le début et le milieu des années 1980, bien que le MOTC conserve le monopole de la gouvernance portuaire, une première modification intervient puisque deux subdivisions (administration et affaires) apparaissent concernant la direction portuaire. Le troisième stade consiste en la mise en œuvre d'une semi-décentralisation caractérisée par le partage de la responsabilité de la gestion portuaire entre le MOTC et les autorités locales. Une première expérience est menée dans le port de Tianjin avant sa généralisation à l'ensemble des ports chinois dès janvier 1986. Un mécanisme financier lie le MOTC et les acteurs locaux : le premier prête le capital nécessaire aux seconds, le remboursement s'effectue à l'aide des bénéfices ; dans le cas de pertes, l'investissement du MOTC se transforme en subvention. Les ports acquièrent alors une première marge de manœuvre dans leur activité au quotidien. Enfin, à partir du milieu des années 1990, la décentralisation devient effective car les pouvoirs locaux obtiennent le transfert de la juridiction portuaire, en particulier dans le cadre de la Loi portuaire de 2004.

Conjointement à cette décentralisation de la gestion portuaire, la législation chinoise évolue pour attirer les investissements étrangers et capter des transferts technologiques. Dès 1985, le Conseil d'État rédige un Règlement intérimaire relatif au traitement préférentiel des coentreprises désormais autorisées à investir dans le développement des terminaux portuaires. Le Code maritime datant de 1992 rappelle certes que le MOTC est le seul responsable de la politique maritime et portuaire de la RPC. Il convie toutefois les entreprises étrangères à investir dans des projets portuaires en Chine, à condition qu'elles demeurent minoritaires au capital des coentreprises. La Loi sur les sociétés de 1999 officialise la corporatisation des ports. Finalement, la Loi portuaire promulguée en 2004 supprime la défense opposée aux entreprises étrangères d'être majoritaires dans une coentreprise gérant un port chinois. Cette libéralisation de la gestion des équipements portuaires aboutit au fait que les opérateurs étrangers contrôlent 60 % des terminaux conteneurisés (Guan, Yahalom, 2011, page 6). Répondant favorablement aux sollicitations chinoises, l'entreprise publique émiratie DP World participe à l'activité de plusieurs terminaux en RPC comme à Hong Kong, Shenzhen, Shanghai, Tianjin, Qingdao et Yantai. Par l'intermédiaire de sa filiale Terminal Link qu'elle cogère avec l'entreprise China Merchants Port Holdings, la CMA CGM exploite le Qingdao Qianwan United Advance Container Terminal et un terminal à Xiamen. Cette réforme portuaire menée en RPC aboutit donc à une gouvernance portuaire décentralisée impliquant la conclusion de partenariats public-privé. Les ports chinois sont donc entrés dans l'ère d'une corporatisation (Pallis et Notteboom, 2022) aux caractéristiques chinoises, car politiquement très encadrée, pour garantir le maintien de la souveraineté chinoise sur son système portuaire. La stratégie portuaire demeure en effet du ressort des autorités politiques chinoises qu'elles soient provinciales ou municipales, tandis que les acteurs privés ne se voient délégués que la gestion des terminaux portuaires.

Ce rapide développement du système portuaire chinois apparaît confronté à une limite. La décentralisation stimule les initiatives locales et conduit de nombreuses municipalités à vouloir se doter d'un port. Une vive concurrence interportuaire voit le jour et les surcapacités portuaires deviennent problématiques lors du ralentissement de l'économie globale. En outre, le surendettement guette certains ports et peut les conduire à une banqueroute à l'image du port de Dandong situé au Liaoning (Feng, Grifoll, Yang, Zheng, 2021). Pour mettre bon ordre à cette situation et optimiser l'offre du système portuaire, les autorités chinoises agissent en deux temps. En 2006, elles créent cinq grands pôles portuaires régionaux : le golfe de Bohai, le delta du fleuve Yangzi, le littoral Sud-Est, le delta de la rivière des Perles et le littoral Sud-Ouest. Elles appellent ensuite de leurs vœux la constitution de groupes portuaires provinciaux dès 2015. Ainsi, en 2019, le Ministère des Transports et des Communications coordonne un rapport intitulé « Avis sur la construction de ports de classe mondiale », lequel se fait l'avocat des groupes portuaires provinciaux comme facteur de meilleure complémentarité et de meilleure efficacité des ports (Ma, Jia, She, Haralambides, Kuang, 2021). L'idée-force soutient que la création de groupes portuaires provinciaux permettrait d'accroître la spécialisation des ports membres tout en établissant la polyfonctionnalité de l'ensemble. Ces recommandations émanant du centre politique sont suivies par les provinces littorales. Par exemple, la province du Zhejiang donne mission au Zhejiang Harbor Investment and Operations Group d'incorporer les ports de Ningbo-Zhoushan, Wenzhou, Jiaxing et Taizhou dans un groupe portuaire provincial. En 2017, le groupe portuaire du Jiangsu voit ainsi le jour. C'est en 2019 que la création des groupes portuaires au Liaoning, au Shandong et au Guangxi est officialisée. Cette récente réforme institutionnelle ne règle cependant pas toutes les difficultés. D'une part, la collaboration entre les différents ports constituant le groupe portuaire provincial peut s'avérer conflictuelle, aucun des ports principaux ne voulant se déléster d'activités au profit des autres toujours considérés comme des concurrents. C'est notamment le cas pour le groupe portuaire du Liaoning, dont l'intégration est mise en péril par la concurrence qui perdure entre les deux ports clés de Dalian et de Yingkou (Wu, Yang, 2018). D'autre part, certains observateurs relèvent le fait que la création des groupes portuaires régionaux a pour conséquence le glissement de la concurrence portuaire de l'échelle locale au niveau interprovincial (Zhang, Yan, Yang, 2021).

L'agrandissement des arrière-pays portuaires stimulé par la planification

Dans l'objectif d'éclaircir la démonstration suivante, nous devons indiquer au lecteur que nous avons fait le choix de retenir deux catégories pour désigner les arrière-pays portuaires. Lorsqu'un port maritime dessert à lui tout seul un territoire commercial, il jouit d'un arrière-pays captif. Dans le cas où plusieurs ports maritimes luttent pour dominer un arrière-pays, celui-ci est dit partagé. Le système portuaire chinois doit lever plusieurs handicaps pour desservir des arrière-pays de manière rentable économiquement. Il doit composer avec la vastitude du territoire national, l'amoinissement de la densité du peuplement vers les périphéries, la sous-utilisation du rail face à la route, enfin la saturation de certains tronçons du réseau ferré.

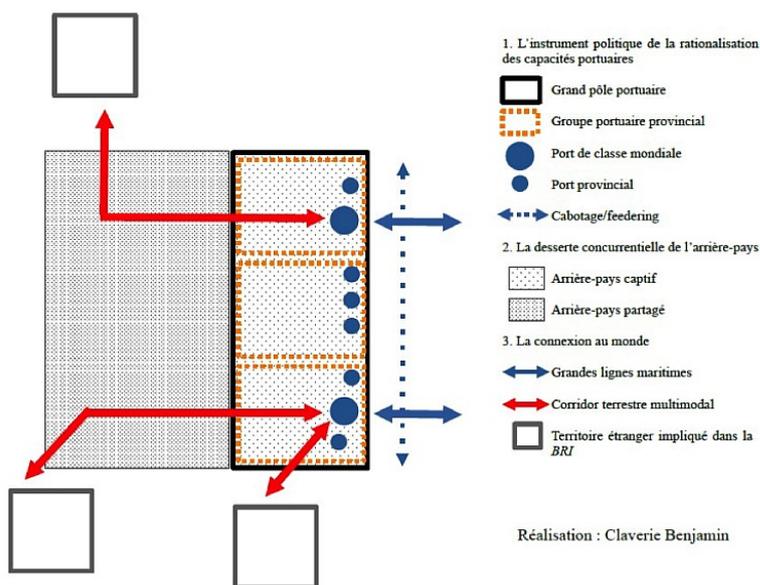
Deux études (Zhang, Ma, Li, Wang, Mao, 2008 ; Wan, Luan, Ma, Haralambides, 2020) évaluent la taille des arrière-pays des ports maritimes chinois à conteneurs en déterminant leur attractivité sur leur clientèle. L'article le plus ancien se concentre sur l'étude de cas du port de Lianyungang, divise son hinterland en trente unités internationales de conteneurs et applique la théorie du TOPSIS flou à partir d'une sélection de 27 critères. L'article le plus récent fonde son analyse sur un échantillon statistique plus complet en retenant les 19 principaux ports à conteneurs chinois. Dans un premier temps, il utilise des données douanières pour appliquer la méthode du degré d'appartenance puis il recourt au modèle HUFF pour calculer la probabilité que le trafic conteneurisé d'une ville soit affecté à tel ou tel port. Leurs conclusions convergent pour indiquer la faiblesse de l'étendue des arrière-pays, laquelle se limite en moyenne à 350 kilomètres à partir du rivage. Dans ces conditions, la plupart des ports majeurs chinois bénéficient d'un arrière-pays captif ou partagé couvrant uniquement la province dans laquelle ils sont situés. En revanche, quelques grands ports à conteneurs rayonnent sur un arrière-pays captif composé d'au moins deux provinces et déploient leur arrière-pays partagé au-delà, sur d'autres provinces voisines. Des exemples le prouvent : les ports de Yantai et de Weihai ont un arrière-pays couvrant strictement la province du Shandong ; ceux de Shantou, Jieyang et Zhuhai satisfont uniquement la demande de clients originaires du Guangdong ; enfin, le port de Beihai voit son arrière-pays limité à la province du Guangxi. Au Fujian, le port de Fuzhou se contente de sa province comme arrière-pays, alors que Xiamen dispose de sa province comme arrière-pays captif et fait déborder son arrière-pays partagé sur le Guangdong et le Jiangxi. Un port plus dynamique comme Tianjin façonne son arrière-pays captif à l'échelle de sa municipalité et des unités administratives avoisinantes (Beijing, Hebei et Mongolie intérieure), pendant que son arrière-pays partagé lorgne sur la province du Liaoning. Le port de Qingdao possède un arrière-pays captif comprenant les provinces du Shandong et du Henan, son arrière-pays partagé se situe au Jiangsu et en Anhui. Enfin Shanghai, en sa qualité de premier pôle de distribution de conteneurs en Chine, présente l'arrière-pays captif le plus vaste correspondant au delta du Yangzi (Shanghai, Jiangsu, Zhejiang) et à l'Anhui. Son arrière-pays partagé apparaît grandement discontinu spatialement et concerne des villes du Jiangxi et du Fujian.

La faible largeur de l'arrière-pays du système portuaire chinois est le résultat des premières politiques économiques et d'aménagement du territoire menées par les autorités pour amarrer le pays à la mondialisation. La politique de réformes et d'ouverture promue par Deng Xiaoping à partir de décembre 1978 contribue à une insertion précautionneuse et graduelle des territoires chinois dans la mondialisation. De 1980 à 1992, seules les provinces littorales sont le théâtre de cette ouverture progressive : d'abord les quatre Zones économiques spéciales en 1980, ensuite quatorze villes côtières en 1984, puis trois régions littorales en 1985, finalement toutes les villes littorales en 1988. Cette stratégie s'incarne dans la mise en place d'une industrie sur l'eau et produit plus généralement la littoralisation de l'industrie chinoise. Néanmoins, depuis le début des années 1990, la politique économique de la RPC connaît des réorientations certaines pour répondre à de nombreux défis, lesquelles ont un réel impact sur l'extension des arrière-pays des ports chinois. Ainsi, face au creusement des inégalités régionales de développement en défaveur des provinces centrales et périphériques, face à la montée des questions sécuritaires dans certaines zones de l'Ouest chinois (Tibet, Xinjiang), face à l'érosion de la compétitivité salariale des zones littorales chinoises concurrencées par d'autres États asiatiques, les autorités chinoises planifient l'ouverture et le développement de l'intégralité du territoire national en plusieurs étapes. En premier lieu, accompagnant l'officialisation de la mise en œuvre de l'économie socialiste de marché en 1992-93, de nouveaux territoires chinois sont inclus dans la mondialisation. Il s'agit des capitales provinciales, des villes frontalières et des ports fluviaux équipant les rives du fleuve Yangzi. La seconde étape intervient en 2000 lors du lancement de la politique de développement de l'Ouest visant au désenclavement des provinces intérieures et périphériques. La troisième étape procède de l'application du douzième plan quinquennal entre 2011 et 2015 visant à stimuler la croissance intérieure. En dernier lieu, dès 2013, l'annonce de l'ambition de fonder une mondialisation sinisée au moyen du projet géoéconomique et géostratégique de la Belt and Road Initiative rebat les cartes en faveur des régions centrales et périphériques de la Chine, puisqu'elles deviennent le passage obligé de corridors de transport et de développement transcontinentaux ou transeurasiatiques. Il en résulte inmanquablement un agrandissement des arrière-pays des ports maritimes chinois à l'échelle de l'ensemble du territoire national le long de couloirs multimodaux.

A cette fin, plusieurs politiques édictées par les autorités centrales à destination des acteurs locaux et des gestionnaires des ports maritimes encouragent la construction de lignes logistiques multimodales nationales, prolongées par des segments transfrontaliers, lesquelles comprennent des ports maritimes, fluviaux et secs. En 2008, le National Railway Plan stimule l'édification d'un réseau de lignes ferrées à grande vitesse qui atteint plus de 40 000 kilomètres en 2021 et permet de libérer des voies pour le transport de marchandises, en particulier conteneurisées. Cette modernisation du réseau ferré participe alors à l'extension des arrière-pays des ports maritimes. L'année 2011 est marquée par la directive des autorités chinoises visant à multiplier les projets de transport intermodal port-rail. L'objectif poursuivi recherche l'établissement de routes pénétrant dans le territoire chinois à partir des ports maritimes. En 2016, le treizième plan quinquennal (Central Compilation & Translation Press, 2016), guidé par la théorie de la double circulation visant à assurer de manière concomitante la stimulation de la consommation nationale et de l'économie mondiale, promeut une politique de développement d'un réseau de transport multimodal maillant le territoire national par des axes nord-sud et est-ouest afin de relier les grandes régions métropolitaines, tout en réalisant son interconnexion avec des réseaux étrangers par des corridors de transport internationaux à partir des régions du Nord-Ouest, du Nord-Est et du Sud-Ouest ainsi que le long des nouvelles routes de la Soie. La même année, la Commission nationale du développement et de la réforme confirme cette ambition en intégrant les ports maritimes dans les lignes ferroviaires dédiées à la connexion entre la Chine et l'Europe dans le cadre du projet China Railway Express (Zhang, 2019). En décembre 2018, les autorités chinoises sélectionnent et subventionnent 41 villes intérieures dotées d'un port sec ou fluvial pour fonder ce réseau transfrontalier (Wei, Lee, 2021). Reste encore à accroître la compétitivité du China Railway Express. Le premier effort doit porter sur l'amélioration de la qualité de son service. Le second axe de progrès considère la nécessité d'organiser sept alliances entre les villes chinoises disposant d'une plateforme labellisée China Railway Express. Par exemple, une alliance pertinente associerait les pôles logistiques intérieurs de Shenyang, Changchun, Harbin et Jiamusi qui structurerait un axe débouchant sur la Russie et la Mongolie au profit des ports maritimes du Nord du Golfe de Bohai. En dépit de ces deux restrictions, ce réseau du China Railway Express a sa part dans l'extension spatiale des arrière-pays des ports maritimes chinois.

La structuration de ces corridors de transport multimodal est le prélude à l'étiement en profondeur des arrière-pays des ports maritimes chinois. Par exemple, le pôle portuaire du Golfe de Bohai prolonge son arrière-pays vers l'Ouest chinois par de multiples aménagements de transport. L'autoroute Beijing-Urumqi longue de 2 800 kilomètres est ainsi totalement mise en service en juillet 2021 sous l'appellation Jingxin expressway G7 (CGTN, 2021). Tianjin et les ports du Liaoning utilisent des voies ferrées menant à Beijing avant de partir, soit vers le nord pour Baotou, soit vers le sud pour Taiyuan, et se rejoindre à Lanzhou. Les marchandises débarquées dans les ports du Shandong empruntent l'itinéraire Jinan-Taiyuan-Lanzhou avant leur arrivée à Urumqi.

Figure 3. Essai de modélisation : mutations et recompositions d'un pôle portuaire chinois



Le bilan des quatre dernières décennies de planification portuaire en Chine, illustré par la figure 3, est marqué par la constitution d'un système portuaire comprenant de grands ports mondiaux, dont la gouvernance s'est vue décentralisée et dont les arrière-pays se sont étirés bien au-delà des provinces littorales. Si les planificateurs chinois consacrent autant d'attention à l'amélioration du système portuaire, c'est qu'ils le savent central pour initier un rééquilibrage voire une désoccidentalisation de la mondialisation. Car les ports se situent à l'articulation stratégique entre les « espaces fluides » et les « espaces solides » (Henninger, 2012) et doivent contribuer à l'affirmation de la puissance chinoise.

Le système portuaire, soubassement de la projection planétaire chinoise

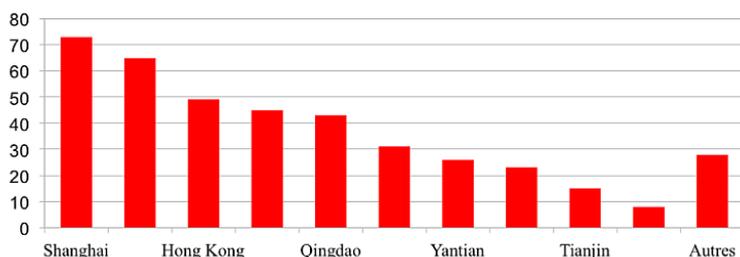
Des ports stratégiques dans la Belt and Road Initiative (BRI)

Annoncé le 3 octobre 2013 devant les parlementaires indonésiens par le président Xi Jinping, le projet de nouvelles Routes maritimes de la Soie est le revers des Routes de la Soie continentales dévoilées un mois plus tôt au Kazakhstan. L'ajout de ce volet maritime à la BRI rappelle l'importance de la maritimisation en tant que levier de croissance de l'économie de la RPC. Il met encore en lumière les objectifs stratégiques de sécuriser l'approvisionnement en matières premières du pays mais aussi de convaincre ses partenaires que la renaissance de la puissance chinoise rime avec paix et développement gagnant-gagnant dans un environnement mondial redevenant multipolaire.

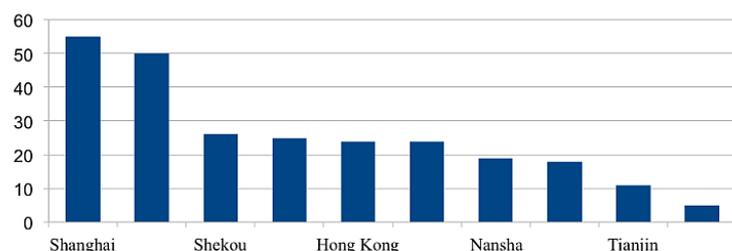
Dans ce contexte, les ports confortent leur poids dans l'organisation territoriale de la RPC en tant qu'escalas structurant des lignes maritimes régionales ou mondiales, lesquelles sont opérées par des compagnies maritimes transnationales chinoises ou étrangères parfois collaborant au sein d'une alliance maritime. Au moyen de la, l'étude de la fréquence à laquelle les porte-conteneurs appartenant à la flotte des opérateurs de transport globaux COSCO Shipping et CMA CGM, membres de l'Ocean Alliance, abordent les ports chinois témoigne désormais de leur rayonnement au sein du dispositif spatial des Routes maritimes de la Soie. Concernant COSCO Shipping, sur ses 212 lignes maritimes internationales, 115 font escale dans au minimum un port chinois, soit plus de la moitié du total. COSCO sollicite principalement les ports de Shanghai, Ningbo-Zhoushan, Qingdao, Hong Kong, Shekou et Yantian. De son côté, la CMA CGM propose à sa clientèle 65 lignes maritimes aboutissant dans un port chinois sur un total de 257. Elle privilégie certains ports par ordre décroissant Shanghai, Ningbo-Zhoushan, Shekou, Qingdao, Hong Kong, Yantian, Nansha ou Xiamen. Le port de Shanghai se trouve au cœur de 281 lignes maritimes, pendant que Ningbo-Zhoushan en accueille 300, dont 120 sont labellisées Routes de la Soie maritimes.

Figure 4. Nombre de lignes maritimes internationales touchant tel ou tel port chinois

COSCO Shipping



CMA CGM



Sources : <https://lines.coscoshipping.com/> et <https://www.cma-cgm.fr/>. Réalisation : Benjamin Claverie.

Faire office d'escale sur les Routes maritimes de la Soie n'est pas le seul rôle endossé par les ports chinois dans leur contribution à la projection océanique de leur pays. Ils participent aussi à la promotion de la coopération portuaire dans plusieurs régions intégrées dans la BRI. La première stratégie d'internationalisation menée par les ports chinois consiste en la signature d'accords avec des ports frères étrangers. Ce type de partenariat peu contraignant implique uniquement l'institution d'un dialogue entre les ports concernés à propos d'informations et d'innovations mais aussi le développement de leurs échanges maritimes mutuels. Cette démarche débute très tôt dans la décennie 1980 à la faveur de la politique de réformes et d'ouverture et s'intensifie après l'annonce de la BRI. Deux ports apparaissent précurseurs en la matière. Le port de Guangzhou a conclu quarante accords d'alliance stratégique avec des ports étrangers depuis 1982, pendant que celui de Qingdao s'est rapproché de 21 ports dans le monde entier depuis 1984. Le port de Shanghai s'est allié avec 23 ports sur la période 1992-2015. Figurent sur la liste des ports frères de Shanghai les ports suivants : Marseille, Le Havre, Dunkerque. Le port de Shenzhen s'est associé avec 18 ports entre 2007 et 2015, au nombre desquels on recense Rotterdam, Hambourg et le groupe portuaire international indonésien. L'ensemble portuaire du golfe de Beibu fait partie d'un réseau de coopération des villes portuaires de l'ASEAN regroupant 47 ports. Il collabore en particulier depuis 2014 avec les ports cambodgien (Sihanouk) et malais (Kuantan). Enfin, douze ports chinois (Dalian, Shanghai, Ningbo-Zhoushan, Beibuwan, Guangzhou, Fuzhou, Xiamen, Shenzhen, Haikou, Taicang, Tianjin, Qingdao) signent un protocole d'accord concernant une alliance portuaire avec neuf ports malais (Klang, Malacca, Penang, Johor, Kuantan, Bintulu, Kemaman,

Kuching, Sabah) dès 2015. Cet accord partenarial cible plusieurs compétences pour promouvoir les échanges entre les ports signataires : étude de faisabilité de projets portuaires, assistance technologique, transit de fret, transfert de conteneurs, formation des personnels, campagne de mercatique (Huo, Zhang, Chen, 2018).

La deuxième stratégie à l'international des ports chinois est financière. Ils investissent récemment dans des entités portuaires étrangères pour en obtenir la gestion partielle ou complète. De la sorte, ils marchent dans les pas des firmes transnationales chinoises du transport maritime (COSCO shipping) ou des opérateurs portuaires (China Merchants Port Holdings). Cinq ports chinois réalisent des investissements directs à l'étranger depuis 2010. Shanghai ouvre le bal à cette date au moyen de l'acquisition de 25 % du capital d'APM Terminals à Zeebrugge en Belgique. En 2017, il est question que le port de Shanghai cède ses parts dans le cadre d'un nouvel accord tendant à faire de COSCO shipping l'unique concessionnaire de cet équipement portuaire. En 2015, le port de Shanghai devient l'opérateur du terminal Bayport situé dans la ville israélienne d'Haifa. La même année, le port de Qingdao et COSCO shipping font cause commune pour participer à la gestion du terminal réfrigéré du port de Vado en Italie (Le marin, 2016). Cette stratégie d'alliance avec un opérateur chinois plus expérimenté se retrouve en 2016, lorsque le port de Dalian et China Merchants Port Holdings constitue une coentreprise pour investir dans une zone de libre-échange à Djibouti. C'est en 2017 qu'Hebei Port Group lance une filiale Qinhai Port Company en Indonésie pour diriger un port local situé dans le parc industriel de Jambi. Enfin, le groupe portuaire du golfe de Beibu est l'actionnaire majoritaire de la coentreprise exploitant le terminal à conteneurs du port de Muara à Brunei (Huo, Zhang, Chen, 2018).

Le terminal intelligent, laboratoire de l'industrie maritime chinoise

Dans le cadre du 14^{ème} plan quinquennal (2021-2025), l'État chinois vise à promouvoir à la fois la structuration de grands pôles portuaires régionaux de classe mondiale (Beijing-Tianjin-Hebei, delta du Yangzi, région de la Grande Baie Guangdong-Hong Kong-Macao) et la construction de nouveaux terminaux conteneurisés intelligents (le littoral nord du port de Yangshan, la section C de l'aire de Beijing dans le port de Tianjin, la phase V du port de Nansha, enfin la zone Est du port Yantian à Shenzhen). Cette stratégie ambitieuse de renforcer la suprématie chinoise relative au développement des ports révolutionnés par la haute technologie et partant, la compétitivité de son système portuaire, lequel devient la vitrine à l'exportation du savoir-faire chinois en matière de construction et de gestion des organismes portuaires. Un chiffre montre éloquentement la capacité de séduction du modèle portuaire chinois : la RPC aurait construit cent ports maritimes sur le continent africain depuis le début de ce siècle (De Castelnau, 2023). Pour satisfaire cette volonté de perfectionnement de son équipement portuaire, la RPC fait porter toute son attention sur trois domaines complémentaires : l'acquisition de procès de génie civil, le matériel de manutention, la numérisation et l'automatisation des opérations portuaires. Pour y parvenir, elle peut s'appuyer sur des géants industriels nationaux issus de son capitalisme d'État.

En guise d'exemple, il apparaît ici essentiel d'introduire la firme transnationale China Communications Construction Company (CCCC) et sa filiale Shanghai Zhenhua Heavy Industries (ZPMC). La CCCC est une entreprise du bâtiment et des travaux publics devenue en quelques années un des leaders mondiaux de la conception et de la construction des infrastructures portuaires. Elle excelle dans l'art d'édifier de vastes terminaux, correctement abrités des effets de la houle, résistants aux pressions exercées par les navires à quai et efficacement reliés aux réseaux terrestres de transport. Enregistrant régulièrement des brevets dans le domaine du génie civil, qu'elle chiffre à 6 000 sur la période de 2016-2020 (CCCC, 2023), la CCCC applique ses innovations dans la réalisation de nouveaux projets portuaires d'envergure en Chine. Elle démontre ainsi sa capacité à créer des espaces poldérisés comme dans le cas des îles montueuses de Yangshan transformées en troisième site portuaire de la métropole shanghaiëne, à laquelle il est connecté par le pont de Donghai long de plus de trente-deux kilomètres. D'autre part, les autorités du port de Tianjin requièrent son expertise lors de la construction de l'île artificielle de Nanjiang (China Daily, 2016). Longue d'environ seize kilomètres et occupant une superficie de vingt-six kilomètres carrés, celle-ci correspond à la cinquième zone du port de Tianjin. Ses terminaux traitent des vracs liquides (produits pétroliers) et solides (minerais, charbon). En 2014, l'île de Nanjiang voit l'inauguration de son terminal numéro 26, lequel s'étend sur 400 mètres et possède une capacité annuelle de 23 millions de tonnes. Dès 2016, la CCCC travaille à l'amélioration de la fonction minéralière de l'île de Nanjiang au moyen de la construction du quai numéro 27 prévu pour manutentionner 9,8 millions de tonnes supplémentaires par an. La CCCC s'implique dans plusieurs autres aménagements portuaires en RPC : la phase IV du port de Waigaoqiao à Shanghai en 2014 ; le terminal charbonnier de Caofeidian sis dans le port de Tangshan en 2015 ; l'agrandissement du terminal conteneurisé du port de Yantian la même année ; la zone portuaire de Dongjiakou à Qingdao en 2017 ; enfin, en 2019, la phase 3 de l'aménagement du port charbonnier de Huanghua localisé dans la province du Hebei.

Pouvant se targuer de la reconnaissance officielle de son savoir-faire en matière d'ingénierie portuaire sur son territoire national, la CCCC internationalise ses activités. Elle établit 219 bureaux de représentation dans le monde, lesquels sont majoritairement déployés en Asie et en Afrique. Fer de lance de la domination technologique chinoise dans le secteur du BTP, la CCCC sait parfaitement jouer la carte du projet géoéconomique des Nouvelles routes maritimes de la Soie, ce qui lui permet d'être lauréate de divers marchés publics dans plusieurs États relevant de la catégorie du Sud global. C'est ainsi qu'elle bâtit le port d'Hambantota au Sri Lanka, le terminal conteneurisé de Damman en Arabie Saoudite et le Wharf Global à Dubai (CCCC, 2023). Toutefois, l'internationalisation de la CCCC s'accompagne de critiques relatives à l'opacité des appels d'offre remportés. En outre, la CCCC devient une cible des autorités états-uniennes dans le cadre de l'« autre guerre froide » (Grosser, 2023) opposant la RPC aux États-Unis. Alors secrétaire d'État américain de l'administration Trump, Mike Pompeo dénigre publiquement la CCCC en août 2020. Il lui reproche de s'inscrire dans le brouillage entre civil et militaire entretenu par la RPC, aussi bien en participant à la construction d'îles artificielles destinées à accroître le contrôle naval chinois en mer de Chine méridionale, qu'en étant un acteur phare de la BRI, avec pour conséquence que la CCCC est placée sur la liste des entreprises sous sanctions états-uniennes (Rogers, 2020). Cette décision politico-juridique vise à interdire aux dirigeants de la CCCC toute venue sur le territoire états-unien, à ralentir son accès aux hautes technologies occidentales et à limiter son expansion internationale en convaincant les alliés de l'Amérique de la potentielle dangerosité de cette firme chinoise.

Par l'intermédiaire de sa filiale ZPMC, la CCCC livre aussi aux ports chinois des matériels de manutention perfectionnés, dont certains sont automatisés, fort prisés pour gagner en compétitivité en fluidifiant la prise en charge des cargaisons. La ZPMC fabrique dans ses six bases de production, dont celle de Changxing réputée être le plus grand site mondial de production d'équipements lourds depuis sa mise en fonction en 2003, de nombreux engins de levage, dont des grues à conteneurs, des portiques, des chargeurs/déchargeurs pour manutentionner les vracs, des berbeurs, des grues flottantes, enfin des récupérateurs à roues à godets. Cette entreprise emploie 2 600 techniciens en ingénierie rassemblés dans un centre technologique pour élaborer des équipements novateurs. Elle est l'inventrice de la première grue sur rail à double conteneurs de 40 pieds ainsi que la grue à conteneurs à double chariot mises au point en 2004. La ZPMC domine la concurrence internationale dès 1998, prouvant de nouveau la capacité de la RPC à se saisir d'une technologie étrangère afin de produire dans un second temps un matériel national s'avérant largement compétitif sur le marché mondialisé. La ZPMC contrôle ainsi 70 % du marché mondial des engins de manutention portuaire, loin devant ses concurrents germaniques Liebherr et Gottwald. On retrouve ses engins de levage sur 300 quais dans 106 pays (ZPMC, 2023). Actuellement la ZPMC investit dans le développement de logiciels stratégiques pour automatiser les terminaux portuaires de sorte que, depuis 2014 date à laquelle elle procède à l'automatisation du terminal Yuanhai dans le port de Xiamen, elle équipe d'autres terminaux chinois de cette technologie de pointe : un terminal de Yangshan capable de traiter 4 millions d'EVP annuellement sur ses sept postes d'amarrage (ZPMC, 2018), un terminal de Qingdao fonctionnant à l'aide de 16 ponts roulants, 76 grues sur chenilles et 86 véhicules à guidage autonome. Miser sur la mise au point de solutions pour automatiser les terminaux permet à la ZPMC de renforcer sa position incontournable sur le marché mondial des engins de manutention portuaire. C'est ainsi qu'en 2021 l'opérateur portuaire APM Terminals, filiale de la puissante compagnie de transport globale danoise A.P. Moller Maersk, communique sur la conclusion d'une alliance stratégique avec la ZPMC pour bénéficier en priorité de matériels automatisés dernier cri que les deux entreprises développeront dans un étroit partenariat. Par exemple, APM Terminals mène un projet pilote concernant des chariots cavaliers automatisés mis à disposition par la ZPMC à Aarhus, premier port à conteneurs danois (The Maritime Executive, 2021). La ZPMC n'est pas la seule firme transnationale chinoise à emprunter la voie de l'automatisation des matériels de manutention portuaire. A Tianjin, ce sont les entreprises Huawei et China Mobile qui développent des solutions numériques pour ouvrir le premier terminal automatisé, rapidement opérationnel puisque celui-ci traite un million d'EVP entre octobre 2021 et octobre 2022. L'ajout de terminaux intelligents^{co} dans les ports de la RPC laisse supposer de réels gains de productivité que les premiers utilisateurs de cette nouvelle technologie estiment de l'ordre de 20 %, puisqu'elle s'accompagne d'une réduction des coûts du personnel allant de 60 % à 70 % et d'une baisse de la consommation d'énergie chiffrée à 20 %. Un tel recours à l'automatisation s'avère aussi une réponse à la baisse de la population active qui s'inscrit dans un contexte démographique de vieillissement et de baisse de la population chinoise en 2022 (Schaeffer, 2023). Il coïncide enfin à une adaptation à l'enjeu environnemental relatif au rapide développement des ports chinois.

Verdir les ports… entre impératif environnemental et Soft Power écologique

Foyer de peuplement millénaire ayant artificialisé de longue date son environnement (en créant de multiples géosystèmes), la Chine apparaît aujourd'hui comme un des principaux pays pollueurs à l'échelle planétaire en raison de trois mutations récentes et concomitantes : sa révolution verte agricole, son industrialisation et son urbanisation-métropolisation. Cette situation préoccupante éveille une « inquiétude environnementale » (Sanjuan, 2018, p.54) tant la pression anthropique sur les géosystèmes détermine des dégradations de l'environnement sous la forme de déforestation, désertification des terres, érosion des sols, inondations, stress hydrique. La RPC détient en outre le record mondial des émissions de CO2 avec 11,4 milliards de tonnes en 2022 (Ouangari, Qi, 2023), soit environ 31 % des rejets mondiaux et le double des émissions états-uniennes. Parfois, phénomène climatique naturel et pollution d'origine humaine se combinent comme dans le cas des tempêtes de sable frappant les métropoles du bassin du fleuve Huang He (France Info, 2021).

Des facteurs internes et externes incitent le pouvoir chinois à répondre à cet enjeu environnemental. A destination de leurs citoyens, les autorités de la RPC déclarent qu'un environnement sain est le substrat indispensable à la croissance économique et à l'émergence de la société de moyenne aisance. En affirmant ceci, il s'agit d'éviter la montée de toute contestation sociale parmi des populations de plus en plus sensibles à la question environnementale. C'est pourquoi elles instaurent une loi de protection de l'environnement dès 1979 qu'elles rendent plus sévère en 2013 par la formulation de sanctions à l'encontre des dirigeants provinciaux et des décideurs économiques non respectueux de la qualité de l'environnement. Elles fondent un Ministère de l'Écologie et de l'Environnement en 2018. A l'égard de l'étranger, l'implication chinoise dans la lutte contre les changements globaux doit lui permettre de redorer son image aussi de contribuer à une réforme de la gouvernance écologique mondiale souhaitée par la RPC. Ces objectifs expliquent l'évolution favorable de la diplomatie chinoise concernant le rôle à tenir par le pays dans la réduction des émissions de CO2. La RPC passe ainsi significativement d'un refus catégorique lors de la Conférence de Copenhague en 2009 à l'acceptation de l'Accord de Paris en 2015 à l'issue de la COP 21. N'oublions pas en outre que les autorités chinoises soutiennent le verdissement de l'économie en poussant en la matière un certain nombre d'innovations de rupture dans le but de bénéficier d'une longueur d'avance sur la concurrence étrangère.

Par la voix de Xi Jinping, la RPC développe même un discours martial de mobilisation de l'ensemble de la société pour « promouvoir le développement vert » et « mener une guerre populaire pour maîtriser la pollution de l'environnement » (Xi, 2021, p.476-486). Au moyen d'une planification scientifique, les élites chinoises annoncent aspirer à l'émergence d'une « Belle Chine » et d'une « civilisation écologique » (Xi, 2021, p. 467-475) d'ailleurs inscrite dans sa Constitution.

Les ports, espaces productifs industriels et nœuds logistiques, symbolisent parfaitement les territoires sur lesquels les acteurs géographiques concentrent leur attention pour y améliorer la gestion de l'environnement. En effet, les polluants d'échappement des navires, composés de dioxydes de soufre, d'azote et de carbone, se mêlent aux pollutions atmosphériques dégagées par les zones industrialo-portuaires adjacentes et par le déplacement des marchandises entre le port et son arrière-pays. Et davantage en RPC où ses ports souffrent d'un bilan écologique médiocre aggravé par la rapidité de leur développement et de l'extension géographique de leur arrière-pays. Sans oublier que ces ports peuvent être le sinistre théâtre de catastrophes industrielles comme celle survenue à Tianjin le 12 août 2015. Les résultats de deux études consacrées à la durabilité des ports chinois (Wang, Zhou, Yang, Wu, 2020 ; Liu, Kong, Li, Wu, 2021) montrent qu'elle est conditionnée par l'ancienneté de leur développement, les activités économiques hébergées, l'accès aux nouvelles technologies et la situation régionale. Évalués individuellement, les 21 principaux ports chinois se répartissent en trois groupes : à leur tête Shenzhen présente la plus forte durabilité, les treize ports suivants ont une durabilité moyenne, tandis que les sept restants sont marqués par la faiblesse de leur durabilité. A l'échelle des pôles portuaires, ceux-ci se classent par ordre décroissant de performance écologique : celui du delta de la rivière des Perles, celui du Sud-Est, celui du Sud-Ouest, celui du golfe de Bohai enfin celui du delta du Yangzi. Les pôles portuaires du delta de la rivière des Perles et du Sud-Est dominent ce classement en raison de leur choix de miser sur une industrie légère exportatrice utilisant la conteneurisation, d'adopter des innovations et d'appliquer plus strictement les régulations environnementales. En revanche, le pôle portuaire du golfe de Bohai semble désavantagé par la nature de ses trafics davantage axés sur les énergies fossiles et les minerais pour approvisionner une industrie plus lourde dirigée par des entreprises d'État. Toutefois, les deux études ne parviennent pas à s'accorder pour savoir si les ports méridionaux ou les ports septentrionaux s'avèrent les plus vertueux en termes d'efficacité écologique.

Les contributeurs de ces deux articles formulent des recommandations pour améliorer le bilan environnemental des ports chinois. Ils préconisent d'augmenter la coopération portuaire indispensable pour réduire les gaspillages d'investissements et les surcapacités portuaires, d'accroître la part de la conteneurisation, de mieux réguler les pollutions et de développer le transport multimodal en direction des arrière-pays. Une troisième étude, qui est une étude de cas, s'intéresse à la manière dont il convient de planifier le développement du transport entre le port de Qingdao et son arrière-pays captif, à savoir la province du Shandong. Partant de l'hypothèse que l'économie de cette province doit procéder à une modernisation et à un verdissement en réduisant l'importance de sa production d'acier, les auteurs supposent que, sur le long terme, le volume du fret conteneurisé devrait devenir supérieur à celui du minerai de fer importé allant vers le complexe sidérurgique de Jinan. Par conséquent, ils prescrivent aux décideurs politiques de collaborer avec les acteurs du secteur des transports pour planifier le développement et la conteneurisation du réseau ferroviaire au Shandong (Liu, Wang, Xie, Mu, Lim, 2021).

De manière concrète, les ports chinois s'emploient à vérifier le niveau d'émission des polluants atmosphériques libérés par les navires venant y accoster. C'est par exemple le cas du port de Yantian, lequel appartient à l'ensemble portuaire de la ville de Shenzhen. Il prévoit d'établir un réseau de surveillance à terre pour identifier les navires les plus polluants (He, Wang, Liu, Zhang, He, Yu, Ma, 2021). Le port de Guangzhou développe au moins deux stratégies dans sa planification écologique. D'une part, il mise sur le transport conteneurisé ferroviaire bas carbone. D'autre part, situé à l'apex du delta de la rivière des Perles, il jouxte des espaces naturels remarquables dignes de protection (zone de frai, lieu d'habitat du poisson aux lèvres jaunes, mangrove de Tantou). C'est pourquoi les agrandissements de ses différents sites portuaires (Nansha et Xinsha par exemple) bénéficient de la construction de stations d'épuration pour procéder au recyclage des eaux usées (Wang, Zhao, Shou, Qiao, Dong, Zhang, 2017).

L'évocation de la planification environnementale entreprise par le port de Qingdao apporte des éléments de compréhension instructifs. Le gestionnaire de ce port, Qingdao Port International Co., est une société par actions à responsabilité limitée, créée en 2013 puis introduite en bourse à Hong Kong en 2014 et à Shanghai en 2019. Elle administre quatre sites portuaires équipés de 86 postes à quai, emploie 8 738 personnes et manutentionne 515 millions de tonnes en 2019. Son rapport relatif au développement durable (Qingdao Port International CO, 2020) rappelle que la stratégie de ce port entre totalement en conformité avec les attendus officiels en matière de modernisation du système portuaire de la RPC. En effet, celle-ci poursuit trois buts : construire un port logistique de premier ordre, bâtir un port commercial et financier de premier ordre, élaborer

un port intelligent et vert de première classe. L'entreprise responsable mentionne que les investissements destinés à protéger l'environnement vont croissant ces dernières années. Il en résulte des avancées concrètes prenant la forme de la mise en place de stations d'épuration, d'installations pour limiter la projection dans l'atmosphère des poussières issues de la manutention du charbon et des minerais, de systèmes de récupération du pétrole et du gaz, d'équipements pour lutter en urgence contre le déversement du pétrole, d'un réseau de surveillance de la qualité de l'environnement, enfin la végétalisation des sites. L'entreprise annonce entendre aller de l'avant dans l'amélioration de son efficacité écologique. En conséquence, elle se dote d'une planification écologique sous la forme d'un Plan d'action triennal pour le développement d'un port vert (2020-2022). Ce document articule l'action de la direction du port autour de cinq objectifs. En premier lieu, elle s'engage à prendre des mesures pour éviter la dissémination des poussières liées aux cargaisons en vrac. Il s'agit d'isoler les parcs de stockage des vracs à l'aide de murs anti-poussière, de couvrir ces vracs, de pulvériser des eaux usées retraitées sur ces marchandises, d'installer des clôtures autour des véhicules et de laver leurs roues susceptibles de contaminer d'autres espaces avec des poussières y étant collées, d'expérimenter un dispositif de contrôle automatique des poussières. En second lieu, il convient de réduire la pollution de l'environnement par les effluents des carburants au moyen de la récupération du pétrole et du gaz sur les cent grues en service dans le port ainsi que par le remplacement des engins motorisés au diesel par des machines électrifiées ou utilisant le gaz naturel liquéfié. Troisièmement, la qualité de l'eau et son abondance doivent être garanties par le développement d'un réseau de collecte des eaux usées, leur traitement à des fins de réemploi pour arroser la végétation et les parcs d'empiage des vracs. Quatrièmement, le plan aborde le renforcement des moyens de prévention des risques industriels qui passe par l'acquisition de navires pompiers et par la construction d'un entrepôt afin d'abriter des équipements d'urgence spécialisés dans le pompage des déversements pétroliers. En dernier lieu, le document traite de la lutte contre les nuisances sonores.

Finalement, si le verdissement des ports chinois apparaît de prime abord comme une nécessité sur le plan politique national, il revêt tout autant la dimension d'un argument marketing susceptible de motiver le choix de clients étrangers potentiels de sélectionner des acteurs économiques chinois pour construire ou gérer leurs ports dans le cadre de la BRI.

Pour conclure, s'intéresser au système portuaire chinois permet d'appréhender comment la Chine contemporaine investit diverses « arènes de puissance » (Giron, 2020), par exemple l'économie, le domaine sécuritaire et stratégique, la maîtrise de la haute technologie, le domaine communicationnel. Ainsi devient-il loisible d'estimer son poids au sein du système international. Étudier les étapes de la structuration planifiée du système portuaire chinois revient à décrypter le mode de développement et d'insertion dans la mondialisation voulu par les autorités de la RPC. C'est le moyen de prendre le pouls de son économie et de mesurer le rayonnement de sa puissance géoéconomique. Car ce système portuaire est un des systèmes logistiques et productifs majeurs au cœur de la puissance nationale, véritables laboratoires technologiques où les innovations sont appliquées avant d'être exportées. De plus, il revêt une haute valeur stratégique en tant que lieu indispensable à la souveraineté chinoise dans le cadre de la sécurisation de ses échanges extérieurs. Il acquiert enfin une portée symbolique puisqu'il constitue un élément fondamental des chaînes logistiques régionales et mondiales inscrites dans les Nouvelles routes de la Soie, expression que la restauration de la puissance chinoise contribue à pousser sur le devant de la scène en procédant de la sorte à un renouvellement de la grammaire des relations internationales. Et ce au grand dam de ses concurrents géostratégiques, lesquels peuvent craindre l'instauration d'un *Tianxia* (Zhao, 2018) maritime, version chinoise de la liberté de navigation. Alors que des États en développement ou émergents du Sud global peuvent être tentés de s'y associer.

Bibliographie

ARTUS, H., 1992, « Les discours de Deng Xiaoping dans le Sud (du 18 janvier au 21 février 1992) », Perspectives chinoises, n° 2, p.10-14.

BANQUE MONDIALE, 2017, Achieving full and effective corporatization of port authorities : reform models from global experience, Washington, The World Bank, <http://www.worldbank.org/>

BANQUE MONDIALE, S&P GLOBAL, 2022, Transport Global Practice. The container port performance index 2021, Washington, The World Bank, <http://www.worldbank.org/>

CENTRAL COMPILATION & TRANSLATION PRESS, 2016, The 13th five-year Plan for economic and social development of the People's Republic of China (2016-2020), <http://www.ndrc.gov.cn/>.

CGTN, 1^{er} juillet 2021, « Chine : mise en service complète de la plus longue autoroute au monde traversant un désert », <https://francais.cgtn.com/n/BfJEA-BcA-EA/Eddfca/index.html>.

CHINA COMMUNICATIONS CONSTRUCTION COMPANY, 2023, <https://fr.ccccltd.cn/>.

CHINA DAILY, 2 avril 2016, « Tianjin port starts construction of a new dock », https://africa.chinadaily.com.cn/china/2016-04/02/content_24251980.htm.

CLAVERIE, B., 2024, « La rangée portuaire chinoise et ses arrière-pays, connecter la Chine au Monde », Géoconfluences. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-regionaux/la-chine/articles-scientifiques/rangee-portuaire-chinoise>.

CONG, L., ZHANG, D., WANG, M., XU, H., LI, L., 2020, « The rôle of ports in the economic development of port cities : Panel evidence from China », Transport Policy, n° 90, p.13-21.

DE CASTELNAU, R., 1^{er} juin 2023, « Entretien avec son Excellence Lu Shaye, Ambassadeur de la République populaire de Chine en France », vers 46 minutes, https://www.youtube.com/watch?v=3_MNI987Ex0.

FENG, H., GRIFFOL, M., YANG, Z., ZHENG, P., 2021, « Latest challenges to ports in public-private partnership : Case of Dandong Port (China)'s bankruptcy », Transport Policy, n°110, p.293-305.

FRANCEINFO, 15 mars 2021, « Chine : une tempête de sable et la pollution créent un cocktail suffocant à Pékin », https://www.franceinfo.fr/monde/asi/pollution-en-chine/en-images-chine-une-tempete-de-sable-et-la-pollution-creent-un-cocktail-suffocant-a-pekin_4333847.html.

GIRON, Y., 2020, Précis de la puissance maritime. Agir sur les océans. Paris, Bernard Giovanangeli éditeur.

GOUROU, P., 1971, L'Asie, Paris, Hachette.

GROSSER, P., 2023, L'autre guerre froide ? La confrontation États-Unis/Chine, Paris, CNRS éditions.

GUAN, C., YAHALON S., 2011, « China's Port Reform and Development. Policy Analysis », Journal of the Transportation Research Board, n°2222, p.1-9.

GUO, J., QIN, Y., DU, X., HAN, Z., 2020, « Dynamic measurements and mechanisms of coastal port-city relationships based on the DCI model : Empirical evidence from China », Cities, n° 96, p.1-13.

HE, L., WANG, J., LIU, Y., ZHANG, Y., HE, C., YU, Q., MA, W., 2021, « Selection of onshore sites based on monitoring possibility evaluation of exhausts from individual ships for Yantai Port, China », Atmospheric Environment, n°247, p.1-14.

HENNINGER, L., 2012, « Espaces fluides et espaces solides : une nouvelle réalité stratégique ? », Revue de défense nationale, n° 753, p. 1-3.

HUANG, Y., BAO, W., 2011, « Strategies for the economic transformation of a port city : A case study of Ningbo », Local Economy, 26(5), p.401-408.

HUO, W., ZHANG, W., CHEN, P., 2018, « Recent development of Chinese port cooperation strategies », Research in Transportation Business & Management, n°26, p.67-75.

LE MARIN, 18 octobre 2016, « Renfort chinois pour le projet italien de terminal à Vado », <https://lemarin.ouest-france.fr>.

LIU, J., KONG, Y., LI, S., WU, J., 2021, « Sustainability assessment of port cities with a hybrid model-empirical evidence from China », Sustainable Cities and Society, n°75, p.1-18.

LIU, P., WANG, C., XIE, J., MU, D., LIM, M., 2021, « Towards green port-hinterland transportation : Coordinating railway and road infrastructure in Shandong Province, China », Transportation Research Part D 94, p.1-18.

MA, Q., JIA, P., SHE, X., HARALAMBIDES, H., KUANG, H., 2021, « Port integration and regional economic development : Lessons from China », Transport Policy, n°110, p.430-439.

NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA, 2023, China Statistical Yearbook, <http://www.stats.gov.cn/>.

NOTTEBOOM, T. et PALLIS, A., 2022, Chapter 4.3 – Port Coordination and Cooperation, in Notteboom, T., Pallis, A. et Rodrigue, J.-P., Port Economics, Management and Policy, New York, Routledge.

OUANGARI, L., QI, Y., 1^{er} février 2023, « Quels sont les pays qui émettent le plus de CO2 ? », Ouest France, <https://www.ouest-france.fr/environnement/rechauffement-climatique/quels-sont-les-pays-qui-emettent-le-plus-de-co2-d5b3b782-6c18-11ed-918c-3d4ea5ca1edf>.

PALLIS, A., 2022, Chapter 4.1 – Port Governance and Reform, in Notteboom, T., Pallis, A. et Rodrigue, J.-P., Port Economics, Management and Policy, New York, Routledge.

PRADEAU, C., 1998, Lexique de géographie humaine, Paris, Armand Colin.

QINGDAO PORT INTERNATIONAL CO., 3 septembre 2020, 2019 Sustainability report, <http://www.qingdao-port.com/>.

ROGERS, D., 2020, « Washington launches stinging attack on CCCC – but how successful will it be ? », Global Construction Review, <http://www.globalconstructionreview.com/>.

ROUX, A., XIAO-PLANES, X., 2018, Histoire de la République populaire de Chine. De Mao Zedong à Xi Jinping, Paris, Armand Colin.

SANJUAN, T., 2018, Atlas de la Chine. Les nouvelles échelles de la puissance, Paris, Éditions Autrement.

SAPIR, J., 2022, Le grand retour de la planification ?, Paris, Jean-Cyrille Godefroy éditions.

WAN, S., LUAN, W., MA, Y., HARALAMBIDES, H., 2020, « On determining the hinterlands of China's foreign trade container ports », Journal of Transport Geography, n°85, p.1-13.

SCHAEFFER, F., 17 janvier 2023, « La population chinoise commence à diminuer », les Échos, <https://www.lesechos.fr/monde/chine/la-population-chinoise-commence-a-diminuer-1897782>.

SHANGHAI ZHENHUA HEAVY INDUSTRIES, 24 janvier 2018, « World's largest fully automated terminal opens », <https://www.zpmc.eu/latest/world-s-largest-fully-automated-terminal-opens/>.

SHANGHAI ZHENHUA HEAVY INDUSTRIES, 2023, <https://www.zpmc.com>.

THE MARITIME EXECUTIVE, 22 octobre 2021, « APM Terminals Forms Alliance with China's ZPMC for Terminal Automation », <https://maritime-executive.com/article/apm-terminals-forms-alliance-with-china-s-zpmc-for-terminal-automation>.

WANG, L., ZHOU, Z., YANG, Y., WU, J., 2020, « Green efficiency evaluation and improvement of Chinese ports : A cross-efficiency model », Transportation Research Part D 88, p.1-15.

WANG, N., ZHAO, J., SHOU, Y., QIAO, J., DONG, S., ZHANG, L., 2017, « The Practice of Guangzhou Port Planning Environmental Impact Assessment », IOP Conf. Series Materials Science and Engineering, n°301, p.1-4.

WANG, Y., WANG, N., 2019, « The rôle of the port industry in China's national economy : An input-output analysis », Transport Policy, n°78, p.1-7.

WEI, H., LEE, P., 2021, « Designing a coordinated horizontal alliance system for China's inland ports with China railway express platforms along the Silk Road Economic Belt », Transportation Research, n° 147, p.1-21.

WU, S., YANG, Z., 2018, « Analysis of the case of port co-operation and integration in Liaoning (China) », Research in Transportation Business & Management, n°26, p.18-25.

XI, J., 2018, La gouvernance de la Chine, tome II, Beijing, Éditions en Langues étrangères.

« Accélérer la mise en œuvre de la stratégie de zones de libre-échange et mettre en place un nouveau système économie ouverte », p. 119-123

« Orienter le développement grâce à un nouveau concept de développement », p.247-251

XI, J., 2021, La gouvernance de la Chine, tome III, Beijing, Éditions en Langues étrangères. « Appliquer intégralement la pensée et la stratégie fondamentale du socialisme à la chinoise de la nouvelle ère », p.89-90

« La porte de la Chine s'ouvrira encore davantage », p. 249-254

« L'économie de notre pays a réalisé le passage d'une croissance rapide à un développement axé sur la qualité », p. 308-311

« Principes à suivre pour renforcer l'édification écologique », p.467-475

« Mener une guerre sans merci contre la pollution », p.476-486

XU, Q., HUANG, T., CHEN, J., WAN, Z., QIN, Q., SONG, L., 2021, « Port rank-size rule evolution : Case study of Chinese coastal ports », Ocean and Coastal Management, n°211, p.1-11.

ZHANG, G., 5 septembre 2019, « China Railway Express : la conquête ferroviaire chinoise », apply, <https://market-insights.apply.com/fr/china-railway-express-la-conquete-ferroviaire-chinoise>.

ZHANG, Q., YAN, K., YANG, D., 2021, « Port system evolution in Chinese coastal regions : A provincial perspective », Journal of Transport Geography, n°92, p.1-11.

ZHANG, Y., MA, C., LI, X., WANG, S., MAO, H., 2008, « Methodology of Hinterland Strategy Selection for Container Port Based on GE Matrix and Fuzzy TOPSIS. Case of Lianyungang Port in China », Journal of the Transportation Research Board, n°2066, p.50-59.

ZHAO, T., 2018, Tianxia, tout sous un même ciel, Paris, Les éditions du Cerf.

Notes

1 Le Comité permanent du Parti communiste chinois, qui s'est déroulé le 14 mai 2020, a évoqué pour la première fois cette nouvelle politique économique (双循环经济) qui est parfois traduite par l'expression économie de la double circulation ou économie duale. Il s'agit de maintenir la croissance de l'économie chinoise en tenant compte du ralentissement des échanges internationaux provoqué par un contexte international incertain du fait du retour des pratiques protectionnistes, notamment dans le contexte de la confrontation avec les États-Unis, et de la pandémie de covid-19. Les autorités chinoises décident de donner la priorité à la circulation interne, c'est-à-dire la consommation nationale, plutôt qu'à la circulation externe, à savoir la demande étrangère, pour garantir le développement économique national.

2 Il existe une typologie des ports selon le mode de gouvernance retenu (Pallis, 2022). Cinq types de ports sont définis en fonction de la plus ou moins grande libéralisation de leur gestion économique. Les ports de service public (public service ports) se caractérisent par le plus haut degré d'intervention de la puissance publique qui y possède les infrastructures et y fait fonctionner les services portuaires en employant des fonctionnaires. Les ports-outils (tool ports) se distinguent des ports de service public par le fait qu'ils délèguent le fret à des acteurs privés. Les ports de propriétaires (landlord ports) ont ceci de particulier que les autorités publiques y conservent la maîtrise du foncier mais concèdent la location des infrastructures à des exploitants privés chargés d'y investir. Il s'agit de nos jours du modèle portuaire le plus répandu dans le monde. Viennent ensuite les ports corporatisés (corporatized ports) où la puissance publique continue de posséder le foncier et entre au capital de l'autorité portuaire autonome comme actionnaire, laquelle agit selon les lois du marché. Ces ports sont une solution de compromis à laquelle recourent « les pays qui hésitent à privatiser entièrement leurs autorités portuaires » (Banque mondiale, 2017). Cette typologie se clôt avec les ports à service privé (private service ports), où l'autorité portuaire est entièrement privatisée, la quasi-totalité des fonctions portuaires étant sous contrôle privé, le secteur public conservant une surveillance réglementaire standard » (Pallis, 2022).

3 L'article croise l'attractivité commerciale d'une unité d'arrière-pays mesurée au moyen des critères suivants (PIB, importations et exportations, coefficient moyen de production du conteneur, bénéfice moyen de la logistique des conteneurs, concurrence du marché des conteneurs, pouvoir de négociation de la demande logistique, pouvoir potentiel de l'arrière-pays pour le développement économique, orientation de l'ajustement de la structure industrielle, changement structurel dans les modes de transport internationaux, politiques et réglementations pertinentes pour le développement de logistiques des conteneurs, importance de la logistique internationale pour une unité de l'arrière-pays) et la force relative d'un port dans un arrière-pays estimée avec les critères cités ci-après (distance routière minimale entre l'unité de l'arrière-pays et le port à conteneurs, distance ferroviaire minimale entre l'unité d'arrière-pays et le port à conteneurs, satisfaction du système de transport entre l'unité de l'arrière-pays et le port à conteneurs, coûts directs supportés par les expéditeurs, frais d'expédition et d'intermédiation du navire, coûts de gestion des compagnies maritimes, capacité de commercialisation du port à conteneurs, nombre de compagnies maritimes internationales, distance relative par rapport aux lignes maritimes internationales, densité et fréquence des lignes internationales, avantages du port à conteneurs en matière de gestion d'entreprise, niveau d'information logistique pour le port à conteneurs, fiabilité des services logistiques internationaux pour les chargeurs, efficacité opérationnelle du port à conteneurs, capacité d'investissement pour le développement futur, avantages du port à conteneurs en termes de ressources).

4 Dans un article publié sur le site Géoconfluences, nous proposons une carte intitulée « La Chine littorale et son arrière-pays en cours de consolidation », laquelle synthétise cette extension spatiale des arrière-pays des ports maritimes chinois (Claverie, 2024).

5 Les ports intelligents (smart ports) constituent la nouvelle génération de ports qui ont recours aux nouvelles technologies numériques pour procéder à une manutention automatisée des marchandises plus performante et ainsi réduire le coût de leur service.

Résumés

Confrontés à une organisation portuaire planétaire de plus en plus polycentrique et ayant dû faire face à une désindustrialisation parfois éprouvante, les ports occidentaux ont connu un déclassement dans la hiérarchie portuaire mondiale, désormais largement dominée par l'Asie orientale et la République populaire de Chine en particulier. Au moyen de la lecture d'articles spécialisés dans les questions logistiques publiés par des auteurs asiatiques, d'un traitement de statistiques émises par l'État chinois et les institutions internationales, et d'une visite de terrain dans un port sec chinois, l'auteur analyse les modalités de la politique chinoise ayant permis le développement, le rattrapage puis la supériorité du système portuaire chinois à l'échelle globale. L'article étudie tout d'abord les évolutions de la planification portuaire, lesquelles se sont traduites par une décentralisation de la gestion portuaire aux échelons provincial et municipal, ainsi que par l'intégration des ports dans les problématiques plus larges d'aménagement de l'ensemble du territoire national. La seconde partie est consacrée aux avantages comparatifs des différents acteurs du système portuaire chinois qui leur permettent de se projeter mondialement dans le cadre de la Belt and Road Initiative.

Faced with a global port organization increasingly polycentric and having to face a deindustrialization sometimes difficult, Western ports have experienced a downgrading in the world port hierarchy, now largely dominated by East Asia and the People's Republic of China in particular. By reading articles specializing in logistics issues published by Asian authors, processing statistics issued by the Chinese government and international institutions, and making a field visit to a Chinese dry port, the author analyzes the Chinese policy that has enabled the Chinese port system to develop, catch up and then become superior on a global scale. The article begins with an examination of developments in port planning, which have resulted in the decentralization of port management to the provincial and municipal levels, as well as the integration of ports into broader national planning issues. The second part is devoted to the comparative advantages of the various players in the Chinese port system, enabling them to project themselves globally within the framework of the Belt and Road Initiative.

Index

Keywords : China, planning, port system, dry port, innovation, globalization, Belt and Road Initiative

Mots-clés : Chine, planification, système portuaire, port sec, innovation, mondialisation, Belt and Road Initiative

Auteur

Benjamin Claverie

Géographe, chercheur indépendant

Benjamin.Claverie@ac-bordeaux.fr