

## ENJEUX NUMÉRIQUES

ISSN 2781-1263 (en ligne)

ISSN 2607-9984 (imprimé)

Série trimestrielle - N°25 - Mars 2024

### Rédaction

Conseil général de l'Économie  
Ministère de l'Économie,  
des Finances  
et de la Souveraineté  
industrielle et numérique  
120, rue de Bercy  
Télédoc 797  
75572 Paris Cedex 12  
Tél. : 01 53 18 52 68  
<http://www.annales.org>

**Grégoire Postel-Vinay**  
Rédacteur en chef

**Alexia Kappelmann**  
Secrétaire générale

**Daniel Boula**  
Secrétaire général adjoint

**Magali Gimon**  
Assistante de rédaction  
et Maquettiste

**Frédérique Linque**  
Webmestre et Maquettiste

### Publication

**Photo de couverture**  
*Saint Georges terrassant  
le dragon*, © Ville de Grenoble /  
Musée de Grenoble-J.L. Lacroix -  
Domaine public

**Iconographie**  
Daniel Boula

**Mise en page**  
Magali Gimon

**Impression**  
Duplprint Mayenne

### Membres du Comité de rédaction

**Pierre Bonis**  
Co-président  
**Anne-Lise Thouroude**  
Co-présidente  
**Edmond Baranes**  
**Godefroy Beauvallet**  
**Côme Berbain**  
**Hélène Brisset**  
**Serge Catoire**  
**Nicolas Chagny**  
**Jean-Pierre Dardayrol**  
**Éric Freyssinet**  
**Frédéric Garcia**  
**Francis Jutand**  
**Arnaud de La Fortelle**  
**Caroline Leboucher**  
**Bertrand Pailhès**  
**Grégoire Postel-Vinay**  
**Maurice Ronai**  
**Laurent Toutain**  
**Benjamin Vignard**

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

# La Terre vue d'en haut

- 05 **Préface**  
Grégoire POSTEL-VINAY
- 06 **Quand le sage montre la Terre**  
Laurent TOUTAIN et Nicolas KUHN
- LES ACTEURS,  
LA TERRE VUE DE PLUS OU MOINS HAUT**
- 08 **Les satellites**  
Valérie FOIX et Jean-Philippe TAISANT
- 18 **Les HAPS (High Altitude Permanent System)**  
Michel MASSELIN
- 22 **Le marché international des lanceurs**  
Hervé GILIBERT
- CONTEXTES, ENJEUX TRANSVERSAUX**
- 28 **Aspects juridiques : les fréquences**  
Alexandre MARQUET et Thomas WELTER
- 34 **Régulation des objets volants :  
une histoire centenaire à l'aube  
de la révolution digitale**  
Louis TEODORO, Pascale ROBERT  
et Orian DHEU
- 40 **Le mythe des frontières disparues**  
Jacques ARNOULD
- 43 **Les enjeux juridiques de l'observation  
de la Terre depuis l'espace dans le contexte  
de la nouvelle économie spatiale**  
Philippe CLERC
- 51 **Nanosat : une révolution de petite taille**  
Imane EL KHANTOUTI et Didier DONSEZ
- 59 **Une technologie de rupture  
pour la détection et la géolocalisation  
de navires en mer**  
Rachid NEDJAR et Maël TORCA

## **LES APPLICATIONS DE L'OBSERVATION DE LA TERRE**

- 68 **Des cartes pour panser le monde**  
Sébastien SORIANO
- 73 **Pour cartographier le territoire,  
des technologies en haute altitude**  
Valérie DERÉGNAUCOURT
- 78 **La mesure des émissions de CO<sub>2</sub> depuis l'espace  
et la compréhension de leurs évolutions**  
Philippe LANDIECH et François Marie BRÉON
- 90 **Observer la Terre et son atmosphère  
pour améliorer les prévisions météorologiques**  
Philippe CHAMBON, Quentin LIBOIS  
et Bruno FIGUET
- 100 **Les satellites altimétriques au service  
de la mesure du niveau de la mer**  
Cyril GERMINEAUD, Claire DUFAU  
et Pierre PRANDI
- 108 **Opérationnaliser la donnée satellite  
pour suivre l'amélioration  
des pratiques agricoles**  
Antoine LEFEBVRE

## **LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ**

- 117 **L'espace, un enjeu stratégique**  
Le capitaine de frégate Alexandre ARKWRIGHT
- 122 **Exploiter le potentiel du *New Space*  
au profit du renseignement extérieur**  
Nicolas LERNER
- 127 **Comment la propulsion hybride  
peut participer à retrouver une  
souveraineté française et européenne  
pour l'accès à l'espace**  
Sylvain BATAILLARD
- 132 **Les communications militaires  
par satellite (MilSatCom) :  
une nécessité pour le soldat connecté**  
Vincent SATGE et Grégoire CHAUCHAT

**LES TÉLÉCOMS,  
LE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES**

- 138 **Un tsunami en télécommunications  
par satellite**  
Didier LE BOULC'H
- 143 **L'utilisation des systèmes Satcom  
pour les usages civils et gouvernementaux**  
Hervé POSTEC
- 147 **Convergence of the Telecommunication systems  
with 5G and 6G**  
Flavien RONTEIX, Mohamed EL JAAFARI,  
Dorin PANAITOPOL and Nicolas CHUBERRE
- 157 **La normalisation de la réseautique atteint l'espace**  
Marc BLANCHET et Vinton G. CERF

- 
- 162 **Traductions des résumés**
- 170 **Biographies des auteurs**

*Ce numéro a été coordonné par  
Nicolas KUHN et Laurent TOUTAIN*

# Préface

Par Grégoire POSTEL-VINAY

Rédacteur en chef des *Annales des Mines*

Les développements des outils et usages du numérique ont besoin de voir de haut. Le numérique et l'espace sont nécessaires l'un à l'autre, qu'il s'agisse des usages civils ou militaires. Sans logiciel, point de lanceurs. Sans lanceurs, point de satellites, de système mondial de positionnement, de guidage, de télécommunications dans les zones où le raccordement terrestre est difficile ou trop coûteux, et dans d'autres, avec l'accroissement des débits. Mais aussi notre société dépend de façon toujours accrue du numérique à partir d'observations de la Terre vue d'en haut : la météo, et ses innombrables applications pour un meilleur pilotage de l'énergie, pour les transports, pour l'agriculture, pour les citoyens dans leur ensemble. La cartographie, qui permet de penser l'espace en incluant toujours plus de besoins, et qui aide à adapter le territoire au changement climatique.

Longtemps cet accès à l'espace et à ses applications pour le numérique et les télécommunications fut l'apanage d'un petit nombre d'États : il y fallait des technologies très complexes, coûteuses, avec des prises de risques que les marchés n'assuraient pas seuls. Ce temps est révolu : d'une part, le nombre de pays disposant d'une politique en l'espèce s'est considérablement accru, face aux enjeux de souveraineté qui leur apparaissent. D'autre part, et surtout, de très grands opérateurs privés sont venus bousculer le marché des lanceurs, et désormais agissent avec une capacité d'influence considérable, y compris sur des enjeux stratégiques : que l'on songe à l'offre de Starlink de redonner aux armées ukrainiennes une capacité de communication lors de l'invasion russe, avant, peut-être, un revirement.

Aussi, le Gouvernement doit-il répondre simultanément à de nombreux défis. Techniques, diplomatiques et financiers pour disposer des outils, lanceurs, satellites, ballons et observateurs de haute altitude, avions d'observation, drones, d'une part. Juridiques, pour la régulation des fréquences, et un droit de l'Espace qui se complexifie, ensuite. De soutien à l'observation de la Terre et aux applications qui en découlent, et l'émergence de nouveaux marchés, de nouvelles entreprises innovantes, en troisième lieu. De répondre aux enjeux majeurs de souveraineté que comportent les applications duales, ou *stricto sensu* militaires. Et enfin, pour les télécommunications de répondre à la mutation considérable des constellations de nanosatellites interfacée avec le déploiement de la 5G et bientôt de la 6G.

Ce numéro des *Annales des Mines* illustre nombre de ces problématiques. Puissent ses éclairages contribuer à catalyser les actions nécessaires pour répondre aux enjeux devant nous, et mobiliser les talents qui seront requis à cette fin.

# Quand le sage montre la Terre

Par Laurent TOUTAIN

IMT Atlantique

Et Nicolas KUHN

Thales Alenia Space

*Pour leur précieuse aide dans la coordination des contributions de ce numéro, nous remercions Nicolas BELLEC, Pierre BONIS, Daniel BOULA, Magali GIMON et Grégoire POSTEL-VINAY.*

Au début des années 1960, les téléspectateurs français ne pouvaient ignorer l'utilisation d'un satellite de télécommunication pour la retransmission en direct avec les États-Unis. Pour fantastique qu'il apparaisse, l'usage d'un satellite transférant un signal envoyé des États-Unis était rendu tangible. Depuis, beaucoup de progrès à la fois dans les lanceurs et dans l'électronique ont fait que les satellites nous offrent quotidiennement des services, à peine remarque-t-on les quelques secondes de décalage lors d'un direct sur le terrain pour le journal télévisé.

Quelle que soit la technologie, quand un nouveau domaine apparaît, des solutions particulières sont développées avant d'entamer une phase de généralisation. C'est particulièrement vrai pour le spatial : l'environnement hostile, le coût des lancements, l'absence de possibilités de réparation, font que des solutions propres et robustes ont conduit à la définition de plateformes spécifiques.

Ainsi, l'histoire des télécommunications par satellite s'illustre par une perpétuelle quête de complémentarité avec des systèmes terrestres, étendant ainsi les frontières des services. Cela s'illustre par les premiers services commerciaux de télécommunication par satellite permettant l'établissement d'appels téléphoniques entre le continent américain et le vieux continent. Une fois les câbles sous-marins déployés, et avec l'essor de technologie spatiale permettant une augmentation drastique des débits offerts par les satellites de diffusion, les systèmes satellites ont permis une diffusion de contenu vidéo de grande qualité à un nombre important d'utilisateurs. Les solutions satellitaires ont été optimisées par des pas technologiques importants pour aboutir à des satellites géostationnaires à ultra haut débit comme le satellite Konnect VHTS lancé en 2022 pouvant délivrer plus de 500 gigabits par seconde.

Si le géostationnaire a été privilégié pour les télécommunications et la télévision, car la zone couverte est stable et il est facile de pointer une antenne parabolique vers le satellite, les orbites plus basses n'ont pas été délaissées. Les satellites d'observation ou d'urgence comme Inmarsat parcourent la surface du globe en quelques heures.

Lors de ces dernières années, un intérêt accru des acteurs traditionnels du monde terrestre vers des usages et technologies proposés par et pour le spatial est apparu. Un accès à l'espace grâce à de nouveaux lanceurs, et les avancées dans les composants électroniques ont conduit à l'amenuisement de la frontière entre les technologies spatiales et terrestres. Cette effervescence technologique s'illustre également par une intégration de composants conçus pour un usage terrestre dans des systèmes spatiaux. C'est effectivement notable par les recommandations de la NASA pour l'utilisation de Raspberry

PI dans l'espace. L'utilisation de standards et méthodes utilisés dans le terrestre est régulièrement proposée pour établir des réseaux de télécommunication pour l'exploration spatiale, comme pour la mise en place d'un réseau cellulaire sur la Lune.

C'est ce que nous avons essayé de couvrir dans ce numéro « La Terre vue d'en haut », sans chercher à être exhaustifs, nous avons choisi de traiter différentes (r)évolutions que nous sommes en train de vivre, ou comment un secteur qui était complètement isolé se normalise.

Une première partie, orientée technologie, dresse les évolutions dans le domaine des satellites, avec plus de polyvalence au niveau des services rendus, des lanceurs où la course à la réduction des coûts et l'augmentation des lancements bat son plein. Nous nous intéresserons également à d'autres technologies alternatives comme les ballons stratosphériques.

Une seconde partie tient à ce que les innovations ne soient pas uniquement technologiques, elles impliquent aussi des changements réglementaires et économiques. Sous l'angle réglementaire, se sont développés des systèmes juridiques portant sur la régulation des fréquences, la régulation des objets volants, le droit de l'espace, certaines limites à la transmission d'informations sur l'observation de la Terre. Sous l'angle économique, d'un secteur majoritairement financé par les États, on a évolué vers un système mixte où les financements privés prennent une part considérable, et où d'autre part, les *start-up* fournissent des services innovants et peuvent déployer leurs propres satellites d'observation. Les CubeSats en sont un très bon exemple. Ils peuvent servir d'outil pédagogique pour permettre aux étudiants de se confronter au secteur spatial et lancer des expérimentations, mais ils peuvent aussi être exploités à des fins commerciales.

La troisième partie illustre les applications civiles de l'observation de la Terre. Sont ainsi évoquées la cartographie de l'anthropocène par l'IGN, la mesure des émissions de CO<sub>2</sub> et des outils d'observation contribuant à les réduire, la météo, la mesure de la montée des océans et son impact, l'amélioration des pratiques agricoles.

L'espace est historiquement un enjeu stratégique et militaire. Clausewitz en exposant l'importance cruciale à tenir les hauteurs est demeuré d'actualité avec la conquête spatiale, ce que symbolise la création des commandements de l'Espace par les principales puissances. Sans en traiter tous les aspects, ce numéro en montre quatre, le cas français du commandement de l'Espace, le renseignement, les mini-lanceurs hybrides, les communications militaires par satellites.

Enfin, nous illustrons la complémentarité entre les différentes technologies de télécommunication. Un exemple emblématique concerne la standardisation du système mobile 5G. L'organisme de standardisation 3GPP s'est imposé comme le standard de convergence des réseaux fixes et mobiles, aux dépens d'autres organismes tels que le BroadBand Forum. Depuis la Release 17 du 3GPP, la composante Non-Terrestrial Network (*i.e.* drones, ballons stratosphériques, satellite en orbite basse ou en orbite géostationnaire) est officiellement supportée dans la 5G. Les fournisseurs de composants, de terminaux et les principaux équipementiers d'infrastructure de réseau participent à cette standardisation et son implémentation dans les produits en réponse aux demandes croissantes des utilisateurs et des opérateurs.

Pour conclure ce numéro et pour donner une perspective plus futuriste, cette convergence ne s'arrête pas aux frontières de la Terre. Des chercheurs de l'IETF, l'organisme qui standardise l'Internet, nous font part de leur réflexion sur les évolutions possibles du réseau Internet pour communiquer avec d'autres planètes ou des sondes spatiales.

# Les satellites

Par Valérie FOIX et Jean-Philippe TAISANT

Centre national d'études spatiales (Cnes)

Apparus à la fin des années 1960 sur fond de guerre froide, les satellites artificiels ont progressivement couvert de nombreux secteurs applicatifs, civils et militaires, tels que les télécommunications, l'observation de la Terre et la navigation, pour compter environ 2 000 objets en orbite à la fin des années 2010. Depuis une dizaine d'années, des ruptures technologiques comme la numérisation des charges utiles, la miniaturisation des équipements et des satellites ainsi que l'utilisation de composants commerciaux, ont accéléré la démocratisation de l'espace et le déploiement de constellations, modifiant l'écosystème existant et les modèles économiques traditionnels. Cette accélération de l'occupation de l'espace consécutive à la multiplication des usages et des services, dans un contexte de commercialisation accrue de l'orbite, ainsi qu'au renforcement de la militarisation du secteur, pose en toile de fond la question de la pérennité de son utilisation.

## UNE HISTOIRE QUI DÉMARRE IL Y A UN PEU MOINS DE 70 ANS

L'aventure spatiale commence en 1957, en pleine guerre froide, avec le lancement par l'Union soviétique du premier satellite artificiel de la Terre, Spoutnik. Même si ses fonctions se limitaient à l'émission d'un « bip-bip », il est l'ancêtre commun de tous les satellites qui sont aujourd'hui en orbite autour de la Terre et qui permettent de rendre des services quotidiens aussi bien à destination de divers secteurs économiques, stratégiques et/ou scientifiques qu'à destination du grand public.

L'enjeu initial autour de la maîtrise des technologies spatiales et notamment de l'utilisation de l'orbite terrestre était avant tout un enjeu de souveraineté. L'accès à l'espace ouvrait des perspectives pour assurer la surveillance et le contrôle de n'importe quelle zone de la planète sans avoir recours à des moyens terrestres potentiellement neutralisables. Durant la guerre froide, l'Union soviétique et les États-Unis ont été les premiers à développer une capacité d'observation de la terre en orbite basse à vocation militaire, avec des capteurs à la fois optiques et radiofréquences, pour des missions de renseignement électromagnétique, permettant de détecter les installations militaires, les radars, les déplacements de matériels et de troupes, etc. L'utilisation de l'orbite terrestre permettait également d'envisager des liaisons de communication grande distance « souveraines », ne s'appuyant pas sur des réseaux terrestres traversant des pays tiers et ne nécessitant pas d'infrastructures radiofréquences lourdes et peu efficaces<sup>1</sup>.

Très rapidement, cet enjeu régalien s'est doublé d'enjeux commerciaux et scientifiques avec le développement des satellites de télécommunication et des satellites de télédétection à

---

<sup>1</sup> Les communications longues distances sans fil étaient initialement assurées par des antennes de très grande taille émettant des bandes de fréquence inférieures aux MHz (grandes ondes et au-delà) avec des capacités en nombre et largeur de canaux très limitées.

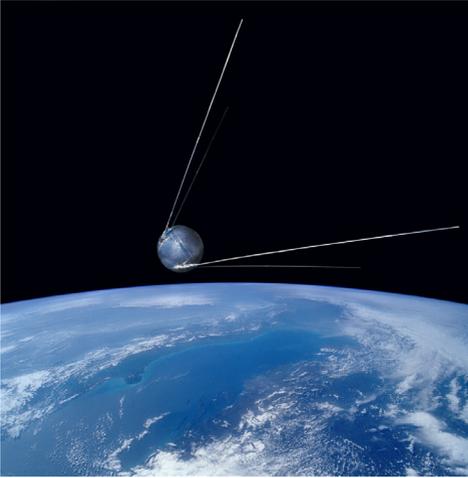


Figure 1 : Satellite Spoutnik  
(© Cnes/Photon/Girard Sébastien, 2008).

vocation civile au service de la météorologie, de la connaissance de l'atmosphère, de la géodésie, de la surveillance du climat, etc. Ces derniers embarquent toute une diversité d'instruments allant de la caméra visible aux radars en passant par les spectromètres, les radiomètres, les caméras hyperspectrales, les lidars, les accéléromètres, les magnétomètres, etc. Ces instruments n'ont eu de cesse de se perfectionner dans l'objectif de gagner en résolution, en sensibilité mais également en compacité afin de baisser le coût d'emport de la mission ou afin de pouvoir embarquer plusieurs capteurs sur un même satellite (cf. satellite Envisat de l'ESA lancé en 2002 qui embarque 9 instruments permettant de disposer de la mesure simultanée des principaux paramètres environnementaux de la Terre).



Figure 2 : Satellite Envisat (© ESA).

Le programme SPOT, initié par le CNES en 1977, a été un précurseur en Europe pour l'observation de la Terre dans le domaine optique. Il a été réalisé en synergie avec le programme Helios à vocation militaire.

L'Europe s'est également dotée d'un vaste programme d'observation de la terre à vocation scientifique, le programme Copernicus lancé en 1998.

Le portefeuille des applications spatiales en orbite terrestre s'est complété depuis la fin des années 1970 de services de navigation qui se sont appuyés sur des infrastructures originales, dont en premier lieu le GPS (Global Positioning System) américain, déployées sur des orbites intermédiaires autour de 20 000 km d'altitude. Le nombre d'applications utilisant les données de radio navigation ne cessant de croître aussi bien dans le domaine civil que dans le domaine militaire, la plupart des grandes puissances dont la Russie (Glonass), l'Europe (Galileo), la Chine (Beidou), et dernièrement l'Inde et le Japon ont souhaité ou



Figure 3 : Satellite Spot 4 (© Cnes/ill./Ducros David, 1998).

souhaitent se doter d'un système souverain afin d'être maître de leurs signaux. De nouvelles infrastructures en orbite basse sont également à l'étude pour fournir des services de navigation par satellite plus résilients, plus immunes au brouillage ou permettant des performances accrues. Ces infrastructures nécessiteront le déploiement de plusieurs centaines de satellite pour assurer un service opérationnel.

Enfin, les vols habités vers les stations orbitales telles que MIR, la station spatiale

internationale ou la station chinoise Tiangong, au-delà de leur apport à la recherche scientifique et technologique, contribuent à la promotion de l'espace auprès du grand public. La popularité de Thomas Pesquet et de ses publications sont là pour en témoigner.

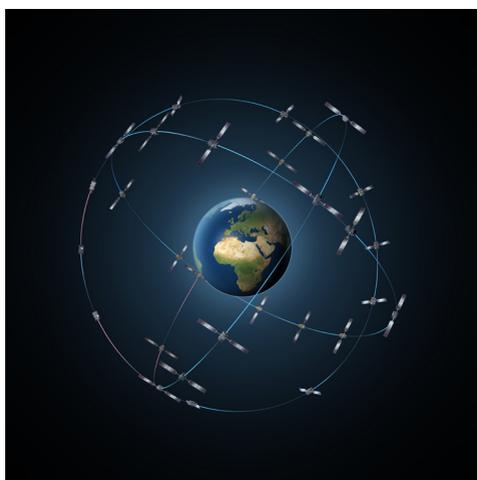


Figure 4 : Constellation Galileo (© Cnes).

La mise en œuvre de ces différents services et des infrastructures associées ont conduit à une colonisation progressive de l'orbite terrestre avec un nombre de satellites en orbite autour de la Terre estimé à environ 2 000 à la fin des années 2010. Le processus s'est accéléré, surtout depuis 2020<sup>2</sup>. En mai 2022, on comptait 5 465 satellites opérationnels (3 433 pour les États-Unis, 541 pour la Chine, 172 pour la Russie, 1 319 pour le reste du monde). 2 664 ont été lancés en 2023 ; la constellation Starlink de la société SpaceX d'Elon Musk pourrait comprendre à terme 42 000 satellites en orbite basse).

---

<sup>2</sup> <https://ourworldindata.org/grapher/yearly-number-of-objects-launched-into-outer-space>

## DES ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES MAJEURES

En tout premier lieu, il faut noter que les évolutions technologiques qui ont lieu dans le secteur des satellites ne sont pas uniquement dictées par les besoins de la mission mais sont intimement liées, et de fait contraintes, par la disponibilité des offres lanceurs. En particulier, les grandes structures ne peuvent être que déployables et les enjeux de masse restent majeurs notamment dans une perspective de compétitivité des systèmes commerciaux ou de soutenabilité des systèmes institutionnels.

Les applications et technologies déployées en orbites sont trop nombreuses pour qu'il soit possible de décrire les évolutions de chacune d'entre elles. Néanmoins de grandes orientations technologiques ont été prises dans le domaine des satellites, certaines issues d'innovations provenant des applications terrestres, d'autres spécifiques au secteur spatial. Sur les quatre grandes évolutions qui suivent, les trois premières ont profité des évolutions des



Figure 5 : Falcon 9 : retour du premier étage (© SpaceX).

technologies terrestres alors que la dernière est spécifique au secteur spatial.

### Les COTS (Commercial Off The Shelf)

Les premières technologies utilisées dans le secteur spatial visaient avant tout à garantir le bon fonctionnement et la durée de vie des équipements dans des environnements hostiles, que ce soit lors de la phase de décollage, avec des niveaux de charges mécaniques et de vibrations très élevés, ou dans la phase opérationnelle avec des plages de température pouvant dépasser plusieurs centaines de degrés (par exemple les panneaux solaires d'un satellite géostationnaire sont qualifiés sur une plage de températures pouvant aller de  $-200^{\circ}\text{C}$  à  $+100^{\circ}\text{C}$ ) et des niveaux de radiations très élevés. Afin de relever ces défis, un ensemble de normes de conception, de fabrication et de vérification a été progressivement mis en œuvre (cf. les normes ECSS pour l'Europe). Ces normes ont conduit à développer des composants et des procédés spécifiques aux applications spatiales, garantissant le succès des missions spatiales, mais avec des coûts induits significatifs. Afin de pallier cette situation, ces dernières années ont vu la mise en œuvre d'approches alternatives passant par l'évaluation en environnement spatial d'un grand nombre de composants utilisés en particulier dans l'industrie automobile afin d'identifier ceux qui seraient compatibles d'un emport en orbite. Cette pratique a permis de réduire les coûts composants même si des activités de qualification par lots restent indispensables pour acter de l'aptitude au vol des composants COTS sélectionnés, ce qui renchérit leur coût par rapport à l'usage terrestre<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> BAUMANN R. (2014), "From COTS to Space - Grade Electronics: Improving Reliability for Harsh Environments", communication à l'IEEE International Integrated Reliability Workshop, Octobre, South Lake Tahoe, CA, USA ; PIGNOL M., MALOU F. & AICARDI C. (2019), "COTS in Space: Constraints, Limitations and Disruptive Capability", in *Radiation Effects on Integrated Circuits and Systems for Space Applications*, Springer, pp. 301-327.

## La miniaturisation

Les enjeux de miniaturisation sont intimement liés aux contraintes des lanceurs. La recherche de gain de masse et d'encombrement est devenue d'autant plus prégnante que l'aspect compétitivité a pris de l'importance. Sont apparues ces dernières années des solutions très innovantes aussi bien au niveau équipement que satellite complet. Au titre des équipements, on peut noter des instruments optiques et radiofréquences beaucoup plus compacts avec une recherche d'intégration toujours plus grande. Est également apparue toute une gamme de nano/micro satellites d'une masse inférieure à 100 kg permettant de réaliser des missions de surveillance, de télécommunication bas débit pour l'Internet des Objets, de validation fonctionnelle ou technologique en orbite et bien d'autres<sup>4</sup>. L'intérêt de ces solutions est leur coût de développement et de lancement, qui reste très bas comparé aux satellites conventionnels. Même si les missions remplies ne sont pas exactement les mêmes, ces solutions contribuent à diversifier les offres de service comme l'amélioration du temps de revisite pour les systèmes d'observation de la Terre.

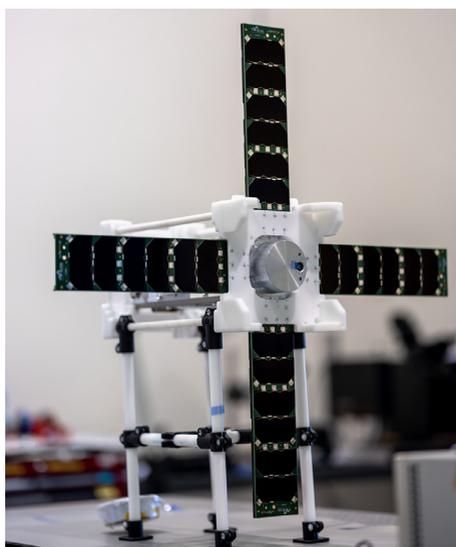


Figure 6 : Satellite Ness  
(© Cnes/De Prada Thierry, 2022).

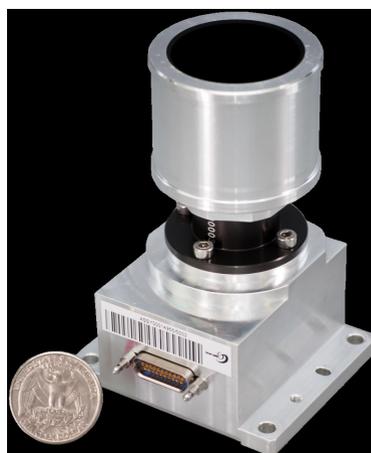


Figure 7 : Viseur d'étoiles Auriga-CP  
(© Sodern – 05/2019).

Ces satellites s'appuient sur de nouvelles générations d'équipements, extrêmement compacts et bas coûts, qui ont vocation à être déclinés sur les gammes de satellites plus capacitifs afin de réduire leur coût et celui de leur lancement.

## Les technologies numériques

L'arrivée des technologies numériques a particulièrement touché les satellites de télécommunication. Alors que la plupart d'entre eux, hormis ceux utilisés pour les applications militaires et les applications bas débits (en particulier pour les communications maritimes), étaient basés jusqu'au milieu des années 2010 sur des charges utiles transparentes analogiques, une véritable révolution s'est opérée ces dernières années. La disponibilité de circuits intégrés de forte capacité et de faible consommation, basés sur des nœuds

---

<sup>4</sup> [www.nanosats.eu](http://www.nanosats.eu)



Figure 8 : Digital Transparent Processor NG  
(© Thales Alenia Space).

technologiques de la classe UDSM (Ultra Deep Sub Micron) a permis d'envisager des charges utiles numériques de grande capacité qui sont en passe de devenir la norme dans le secteur).

Cette arrivée du numérique dans le spatial permet de proposer des systèmes agiles, reconfigurables en orbite, intégrant, dans le secteur des télécommunications, des fonctions équivalentes à celles des réseaux terrestres avec des capacités embarquées de routage, de gestion des ressources et demain de gestion de la qualité de service. L'exemple le plus marquant est celui de la constellation Starlink qui a déployé un réseau maillé de milliers de satellites proposant des services de connectivité Internet haut-débit. L'Europe dispose aussi de solutions très performantes avec notamment le satellite Konnect VHTS d'Eutelsat qui met en œuvre le processeur numérique le plus capacitif actuellement en opération.

## La propulsion électrique

La masse d'ergol à embarquer pour assurer la mise et le maintien à poste des satellites peut s'avérer, pour certaines missions, du même ordre de grandeur que la masse sèche du satellite. Un facteur de réduction important des coûts de lancement passe alors par la réduction de cette masse d'ergol, rendue possible par l'utilisation de systèmes de propulsion à forte impulsion spécifique. C'est le cas des systèmes à propulsion électrique<sup>5</sup>, qui se développent depuis une dizaine d'années, permettant d'atteindre des impulsions spécifiques de quelques milliers de secondes contre quelques centaines pour un système à propulsion chimique. La faiblesse de ces systèmes est leur faible poussée qui les rend incompatibles avec des manœuvres rapides. Une mise à poste de satellites géostationnaires prend quelques jours avec un système de propulsion chimique mais quelques mois avec un système électrique. Un autre handicap vient du coût des ergols utilisés en propulsion électrique. Ce sont en général des gaz rares tels que le xénon ou le krypton dont le coût a fortement augmenté ces dernières années du fait de la demande croissante, notamment du secteur spatial, mais également du fait d'instabilités géopolitiques.

---

<sup>5</sup> MAZOUFFRE S. (2018), « Propulsion électrique pour les systèmes spatiaux », Techniques de l'ingénieur.

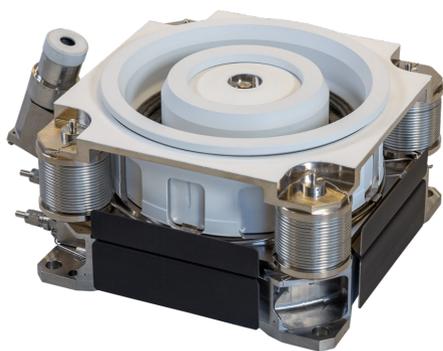


Figure 9 : PPS@5000  
(© Safran Aircraft Engines).



Figure 10 : Essai au banc du moteur  
PPS@5000 (© Safran Aircraft Engines).

Des systèmes utilisant des ergols alternatifs tels que l'iode atomique (I2) ou l'argon sont arrivés récemment permettant d'envisager une généralisation et une pérennisation de cette technologie.

## LEUR IMPACT SUR L'ÉCOSYSTÈME SPATIAL

### L'arrivée des mégaconstellations

Les innovations mentionnées ci-dessus, une fois combinées entre elles et associées à la baisse importante des coûts de lancement impulsée par Space X, ont contribué à l'accélération de la colonisation de l'orbite terrestre due notamment à l'arrivée des mégaconstellations dédiées au service de connectivité. Les constellations Starlink et Oneweb sont à elles seules à l'origine du déploiement respectif de plus de 5 350 et 636 satellites en orbite basse depuis 2019 (situation au 31/10/2023). Cette accélération exponentielle du nombre de satellites en orbite pourrait encore s'accroître si on se réfère aux nombreux projets de mégaconstellations déposés auprès de l'UIT qui prévoient le déploiement d'ici la fin de la décennie de centaines de milliers de satellites supplémentaires.

Du côté gouvernemental, plusieurs nouvelles infrastructures sont également en cours de développement, la plus connue étant certainement l'initiative PWSA (Proliferated Warfi-



Figure 11 : Official Space X Starlink mission  
(© Starlink - Mission-cc-Flickr).

ghter Space Architecture) de la Space Development Agency (SDA) aux États-Unis qui vise à fournir des capacités spatiales en soutien des missions terrestres *via* une constellation multicouche résiliente et interconnectée en orbites basses.

## La démocratisation et la militarisation de l'espace

Cette colonisation s'accompagne d'une « démocratisation » de l'espace qui voit l'arrivée dans tous les pays de nouveaux acteurs. Alors que jusqu'ici le secteur spatial était concentré autour d'un petit nombre d'industriels disposant de compétences et de moyens spécifiques, l'intérêt croissant pour le spatial et ses applications a attiré ces dernières années de nouveaux entrants dont de nombreuses *start-up* mais aussi de grands groupes issus de secteurs économiques non spatiaux, disposant d'importantes capacités d'ingénierie, de développement, de production et de déploiement de systèmes orbitaux. La meilleure illustration est le projet de constellation Kuiper du géant Amazon.

Cette démocratisation favorise également l'émergence d'une palette de nouvelles applications et en particulier celles regroupées au sein de l'appellation « services en orbite » qui vont du ravitaillement en ergols à l'assemblage de structures complexes en passant par l'inspection, la maintenance, le changement d'orbite et la désorbitation en fin de vie, la récupération des débris, etc.

D'autre part, l'intégration intensifiée des systèmes spatiaux dans les dispositifs de défense renforce la militarisation de l'espace qui voit l'arrivée de systèmes d'attaque et de défense en orbite permettant soit de surveiller, soit d'endommager voire détruire des systèmes spatiaux considérés comme ennemis<sup>6</sup>.



Figure 12 : La militarisation de l'espace (© Le Monde de Demain).

## Des modèles économiques en mutation

Les modèles économiques des systèmes orbitaux sont majoritairement dépendant de la commande publique qui porte les investissements répondant aux besoins gouvernementaux, militaires et scientifiques. Représentant en 2022 plus de 70 % des investissements relatifs aux infrastructures<sup>7</sup>, ils sont et restent supérieurs aux investissements privés.

<sup>6</sup> PASCO X. (2021), « Évolution des stratégies d'utilisation de l'espace à des fins militaires », *Vortex*, n°1, juin, pp. 77-89.

<sup>7</sup> EUROCONSULT (2023), "Space Economy Report 2022".

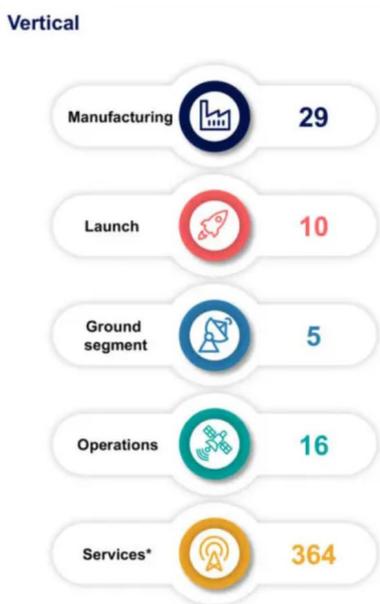


Figure 13 : Marché de l'espace, en milliards de dollars (© Euroconsult).

revenus du secteur des infrastructures<sup>8</sup>, peuvent s'appuyer sur des systèmes orbitaux financés par les États.

Les investissements privés se concentrent jusqu'ici dans le secteur des télécommunications par satellites, secteur marchand historique du spatial. Cette réalité reste vraie, y compris dans la période actuelle, avec une concentration des investissements privés dans le secteur des mégakonstellations de connectivité telles que Starlink de Space X, Oneweb d'Eutelsat, Kuiper d'Amazon, Lightspeed de Telesat, les projets d'AST Mobile ou de Rivada.

Des investissements privés sont aujourd'hui observés dans les secteurs des services en orbite, de l'observation de la Terre, de la navigation ou de la surveillance aérienne et maritime, mais ils sont encore sans commune mesure avec les investissements privés réalisés dans le secteur des télécommunications. Cependant, y compris dans son volet marchand, le secteur spatial n'obéit pas à un schéma économique purement privé.

En effet, les revenus du secteur aval, qui sont d'un ordre de grandeur supérieur aux

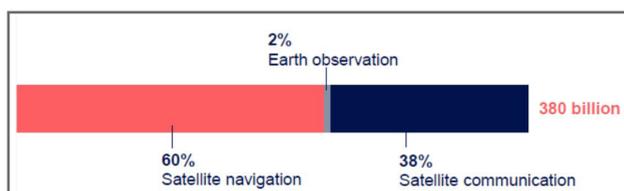


Figure 14 : Marché mondial de l'espace par application en 2022, en milliards de dollars – aval (© Euroconsult).

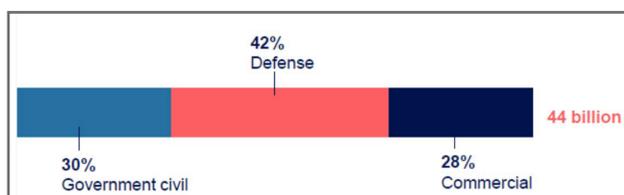


Figure 15 : Marché mondial de l'espace par types de clients en 2022, en milliards de dollars – amont (© Euroconsult).

<sup>8</sup> EUROCONSULT (2023), "Space Economy Report 2022".

Le meilleur exemple est celui de la navigation, dont les revenus du secteur aval sont désormais les plus élevés devant ceux des télécommunications par satellite, sans que cela ne nécessite d'investissements privés dans les infrastructures GNSS (Global Navigation Satellite System) qui restent totalement financées par la puissance publique.

D'autre part, la question du partage de la valeur ajoutée est particulièrement sensible dans le secteur spatial. Alors que les revenus du secteur aval ne cessent de croître, la période actuelle de forte innovation et de compétition accrue voit une dégradation des marges des industriels en charge du développement et de la fourniture des infrastructures, ces derniers portant la majorité des coûts de R&D et les risques associés. Cette situation interroge un modèle économique qui pourrait se diriger vers davantage de verticalisation, comme c'est déjà le cas avec le géant Space X qui est à la fois opérateur de service, maître d'œuvre système, intégrateur satellite, équipementier charge utile / plateforme / terminaux utilisateurs et opérateur de lancement de la constellation Starlink.

## VERS UNE NOUVELLE DONNE POUR L'ORBITE TERRESTRE

Ces évolutions, si elles se confirment, constituent une nouvelle donne pour l'espace, qui interroge l'avenir. La démocratisation de l'utilisation de l'orbite terrestre pose notamment la question de la pérennité de son utilisation, la multiplication des satellites et des débris entraînant une augmentation substantielle des risques de collisions qui pourraient la rendre difficilement utilisable. Elle questionne également le partage de l'orbite entre les différents utilisateurs, en n'oubliant pas les enjeux de protection lumineuse pour la radioastronomie.

Alors que depuis la fin de la guerre froide l'espace était davantage considéré comme une ressource à protéger et à valoriser dans une logique de coopération et de progrès au service du bien commun, la marchandisation et la militarisation de l'orbite sont de nature à remettre en question cette approche.



Figure 16 : Orbite terrestre (© Nasa).

Dans ce contexte, le rôle du législateur pourrait être clé pour déterminer le futur de l'orbite terrestre.

# Les HAPS (High Altitude Permanent System)

Par Michel MASSELIN

Vice-président des ventes de Stratobus

Les récents progrès technologiques permettent d'envisager une nouvelle capacité à base de drones aéroportés : les HAPS (High Altitude Permanent System) tel que le Stratobus. Celui-ci est un dirigeable stratosphérique capable d'opérer pendant une durée de l'ordre de l'année, à une altitude de 19 km, et d'emporter une charge utile de 250 kg avec une puissance de 5 kW.

Les applications pour l'observation de la Terre sont complémentaires des applications satellitaires, et permettent de déployer un moyen d'observation souverain et indépendant, offrant une permanence d'observation et une résolution optique inégalable. De plus, ils sont déplaçables pour se positionner au-dessus de zones inaccessibles, ou fragiles écologiquement, ou par suite d'un désastre naturel.

Le projet Stratobus a été sélectionné en 2016 dans le cadre de la Nouvelle France Industrielle, ce qui a permis de lancer la conception, puis sélectionné dans le cadre du Fond Européen de Défense pour réaliser des démonstrateurs qui voleront à partir de 2025 dans le stratoport des Canaries.

## QU'EST-CE QU'UN HAPS ?

Les récents progrès technologiques permettent d'envisager une nouvelle capacité à base de drones aéroportés : les HAPS (High Altitude Permanent System) qui ont les caractéristiques suivantes :

- ils sont situés dans la stratosphère (entre 18 et 20 km d'altitude), car celle-ci possède des avantages intrinsèques fondamentaux : les vents y sont limités, en particulier dans la zone tropicale et équatoriale, car située au-dessus des Jet-Streams, les conditions météorologiques y sont stables et prédictibles sans vents violents, pluie, grêle ou tempêtes de sable, l'occupation de cet espace est réduit (pas de circulation aérienne) et le contrôle aérien en est simplifié ;
- ils sont capables, grâce à leur propulsion électrique, de rester en permanence au-dessus d'un point fixe, de décrire des hippodromes ou de rallier n'importe quel zone du globe ;
- ils permettent de mener des missions de très longue durée car ils utilisent l'énergie solaire.

Ces HAPS représentent donc une opportunité nouvelle pour compléter les moyens terrestres, satellitaires ou aéroportés en apportant des capacités uniques pour compléter des infrastructures sol.

Trois grands types de HAPS se dégagent :

- des drones à voilure fixe (aussi appelés Stratogliders), plus lourds que l'air : du type Zephyr (ADS) ou Sunlider (Softbank) ;

- les ballons stratosphériques à contrôle d'altitude : du type Loon (Google) ou Stratolite (WorldView) ;
- les dirigeables stratosphériques : du type Stratobus.

## QUELLES SONT LES CARACTÉRISTIQUES D'UN STRATOBUS ?



Figure 1 : Un Stratobus (Source : Thales Alenia Space).

En se basant sur les profils d'utilisation les plus prometteurs, Thales Alenia Space a choisi de lancer le développement d'un dirigeable stratosphérique : le Stratobus.

Le Stratobus est un dirigeable stratosphérique de type « blimp », à savoir une enveloppe souple, maintenue en forme par de l'hélium en surpression, et un système de propulsion électrique entièrement autonome. Les optimisations successives du concept ont conduit à retenir un dirigeable d'environ 140 m de long, une propulsion par 4 moteurs électriques, plus de 1 000 m<sup>2</sup> de cellules solaires, et avec une durée d'opération de l'ordre de l'année à une altitude comprise entre 18 et 20 km. L'objectif est d'emporter une charge utile de 250 kg, disposant d'une puissance 5 kW, sachant que cette masse pourra être plus élevée si l'usage du Stratobus est restreint à des zones où les vents stratosphériques sont plus favorables. Cette capacité d'emport, très élevée par rapport aux autres HAPS, permet d'exploiter pleinement la zone visible qui est de 1 000 km de diamètre.

## QUELS SONT LES USAGES POTENTIELS ?

La conception de Stratobus permet d'intégrer facilement une grande variété de charges utiles, en offrant des conditions d'environnement favorables pour les équipements situés dans la nacelle (large volume, température contrôlée, peu de vibration ou d'accélération...)

ainsi qu'une facilité à intégrer des senseurs ou antennes de grandes tailles. Il est possible d'embarquer plusieurs missions simultanément, ou encore de changer de charge utile à l'occasion d'une opération de maintenance. Les principaux cas d'utilisation sont :

- les télécommunications, et notamment les communications vers les mobiles (5G, puis 6G), en permettant une latence faible et des bilans de liaison compatibles avec l'utilisation de téléphones portables standards ;
- la défense, en créant des relais de communications, en détectant des missiles, etc. ;
- et enfin, l'observation de la terre, en permettant la collecte d'images à haute résolution et de vidéos sur une zone définie et dans la permanence.

## QUELS SONT LES SPÉCIFICITÉS POUR L'OBSERVATION DE LA TERRE ?

Clairement, les HAPS ne remplaceront pas l'observation satellite :

- la première raison est que les HAPS peuvent évoluer dans l'espace aérien national, dans l'espace aérien international ou éventuellement sur des territoires en conflits : ils n'ont donc pas le droit d'être déployés sur un territoire étranger pour réaliser des mesures/images de manière indépendante, ce qui reste le privilège des satellites ;
- la deuxième raison est que les HAPS ne sont déployables de manière quasi-permanente que sur une zone équatoriale élargie (approximativement la zone inter-tropicale).

Par contre, ils la complèteront :

- En constituant un moyen d'observation souverain et indépendant. Les constellations de satellites LEO représentent des coûts élevés, ce qui n'est pas à portée de toutes les Nations/Opérateurs, et couvrent obligatoirement la surface du globe en totalité, ce qui impose de revendre les informations collectées sur des zones sans intérêt national à d'autres clients pour pouvoir amortir les coûts d'infrastructure. Une flotte de Stratobus peut donc constituer un moyen souverain et indépendant plutôt que de dépendre d'information en provenance d'une constellation étrangère, avec les aléas que cela peut comporter.
- En apportant la permanence d'observation. Ceci permet de prendre des vidéos, mais aussi de réaliser des traitements qui permettent de caractériser le comportement d'une « cible » particulière et ainsi d'automatiser en temps réel, ou en temps différé, la détection de menaces (piraterie...) ou d'événements (départ de feu de forêt, évolution du front de feu... par exemple).
- En apportant des résolutions inégalables, du fait de la proximité avec la surface. En effet, des résolutions de l'ordre de 5 cm GSD (Ground Sampling Distance) en optique sont parfaitement envisageables et ouvrent la porte à la reconnaissance, voire l'identification des « cibles ». Notons aussi que cette classe de distance est compatible avec le fonctionnement de senseurs de type infra rouge, hyperspectral ou LiDAR, ces derniers possédant notamment la propriété de « voir » sous la canopée ou de détecter des camouflages.
- En apportant la possibilité de fusion multi-capteurs. Par exemple, il devient possible de détecter des opérations de dégazage en mer (en détectant la nappe par des moyens optiques hyper-spectraux) en temps réel et de prendre simultanément une image précise du bateau qui l'a créée, afin de constituer une preuve irréfutable et opposable en justice.
- En étant facilement déplaçable pour se positionner au-dessus de zones d'intérêt particulier. Cette capacité existe dans tout le domaine de vol du Stratobus. Il est

ainsi possible de déplacer un Stratobus dans la stratosphère sur plusieurs milliers de kilomètres et de recueillir des informations à distance sans aucun besoin de déplacer des moyens au sol d'accompagnement.

- En apportant enfin des solutions facilement déployables, sans empreinte sol locale, au-dessus de zones isolées géographiquement (montagneuses, désertiques...) ou fragiles écologiquement, ou par suite d'un sinistre (tremblement de terre, cyclone...).

## QUAND LES HAPS SERONT-T-ILS DISPONIBLES ?

Certains projets de HAPS ont déjà été déployés (par exemple le projet Loon de Google) mais les caractéristiques limitées de ces premières générations peuvent rendre difficile une exploitation simple et rentable, notamment pour les télécoms.

Les dirigeables stratosphériques, du type Stratobus, demandent plus de recherche et de développement mais permettront d'accéder à des performances critiques que les autres HAPS ne peuvent atteindre. Ainsi, après des études préliminaires démarrées en 2011, qui ont démontré la viabilité du concept, le projet Stratobus a été sélectionné en 2016 dans le cadre de la Nouvelle France Industrielle ce qui a permis de lancer la conception.

Le projet a ensuite été sélectionné dans le cadre du Fond Européen de Défense pour réaliser des démonstrateurs de taille réduite. Ces démonstrateurs de 60 mètres, fonctionnellement complets, voleront à partir de 2025 dans le stratoport des Canaries aménagé à cet effet. Le développement du Stratobus définitif démarrera à l'issue de ces essais et les Stratobus de série seront disponibles à partir de la fin de la décennie.

# Le marché international des lanceurs

Par **Hervé GILIBERT**

Directeur technique au sein d'ArianeGroup

Depuis une dizaine d'années, le domaine des lanceurs spatiaux est l'objet de profondes mutations, dans toutes ses dimensions : les techniques de lancement, les technologies associées, le modèle économique, les organisations industrielles, l'association et les implications respectives du public et du privé... Est-il en train d'évoluer vers une classique économie de marché ?

Cette question n'a pas de réponse définitive à ce stade.

Repartant des fondamentaux qui ont donné lieu à l'émergence du transport spatial il y a 60 ans, retraçant ces 60 années de progrès et de transformations successives jusqu'à l'accélération actuelle, nous pesons les enjeux en présence, nous considérons à la fois les extraordinaires perspectives identifiées pour les 2 décennies à venir, le caractère « intense en capital » et le caractère stratégique et dual du domaine, et nous tentons modestement d'éclairer la question.

Depuis une dizaine d'années, le domaine des lanceurs spatiaux est l'objet de profonds changements, dans toutes ses dimensions : les techniques de lancement, les technologies associées, le modèle économique, les organisations industrielles, l'association et les implications respectives du public et du privé... Revenons donc brièvement sur les 60 années d'opération de lancements spatiaux, analysons la situation actuelle et explorons ensuite les perspectives pour la période à venir.

## **LA GENÈSE, LES ANNÉES 1960-1970 : DU MISSILE STRATÉGIQUE AU LANCEUR SPATIAL**

C'est connu, le début de la guerre froide a été le premier accélérateur de l'aventure spatiale avec le développement des capacités de lancement balistique, atteignant des portées de plus en plus longues jusqu'à être intercontinentales, en passant de missiles mono-étages (dérivés initialement des V2 allemands) et ensuite à des missiles bi puis tri-étages. Poussant alors les performances de ces étages propulsifs, on a pu porter le dernier étage et sa charge utile à des vitesses de 8 km/s à l'horizontale au-dessus de l'atmosphère, ce qui est la condition à partir de laquelle cette charge utile est « orbitée » : elle est en chute libre permanente au-dessus de la terre, mais la force centripète liée à sa vitesse horizontale la maintient sur son altitude.

À l'origine il y a donc continuité totale entre le domaine des missiles balistiques intercontinentaux et celui des lanceurs spatiaux. Certains lanceurs, soviétiques notamment, étaient des dérivés directs de missiles stratégiques. De nos jours, cette connexion est évidemment toujours présente, à la fois parce que les technologies employées (propulsion fusée, guidage-pilotage autonome de haute précision...) sont les mêmes et parce que les lanceurs procurent aux États l'accès à l'espace et aux possibilités de surveillance de l'activité terrestre, une capacité elle aussi de nature stratégique. Une conséquence naturelle en est que les techniques et technologies mises en œuvre sur les lanceurs sont

soumises aux strictes règles de contrôle de la non-prolifération, à l'identique des systèmes de missiles balistiques.

Au démarrage, donc, le monde des lanceurs était celui des États, des lancements « institutionnels » (essentiellement militaires, pour les communications à l'échelle de la planète, puis le renseignement : le satellite d'observation voit par-dessus les frontières, voit large et apporte l'information en temps réel) ; il était entièrement gouverné par des agences d'États, qui ont construit une capacité technologique et industrielle sur leurs territoires : la NASA aux États-Unis, le Cnes en France puis l'ESA en Europe, etc.

## LES ANNÉES 1980-1990, L'EXPANSION VERS LE PRIVÉ ET L'ORBITE GÉOSTATIONNAIRE

Les années 1980-1990 ont introduit une inflexion vers l'économie privée, avec l'émergence d'opérateurs de télécommunication par satellites, partiellement ou totalement privés. Les opérateurs de lancement, tel Arianespace, société née au tout début des années 1980 pour opérer les lanceurs Ariane conçus sous l'égide de l'ESA, ont ainsi pu démultiplier le nombre d'opérations à l'année, en servant un marché de services spatiaux privés en pleine expansion, en plus du « marché » des lancements institutionnels.

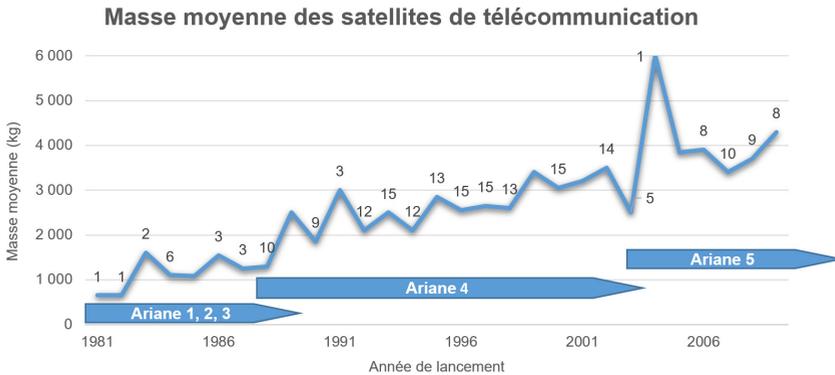


Figure 1 : Satcoms Géo : + 200 kg/an : l'évolution de la masse des satellites, accompagnée par l'évolution des lanceurs Ariane, d'Ariane 1 à Ariane 5 (source : ArianeGroup).



Notons à ce propos la singularité européenne en la matière : là où les autres grands pays spatiaux (États-Unis, Russie, Chine) réalisaient très majoritairement des lancements à but national / militaire, l'Europe et Arianespace étaient sur un régime inverse, avec typiquement 80 % de lancements commerciaux et 20 % de lancements institutionnels. Sur ce point, il faut bien identifier que l'Europe a bénéficié d'une erreur stratégique des États-Unis qui ont focalisé leur approche sur le Space Shuttle, dont les coûts de lancement se sont révélés sans commune mesure avec la promesse initiale et sans commune mesure avec ceux des lancements d'Arianespace, tandis que les lanceurs russes n'ont pas réussi à égaler la fiabilité acquise en Europe avec Ariane.

Sur ce point, il faut bien identifier que l'Europe a bénéficié d'une erreur stratégique des États-Unis qui ont focalisé leur approche sur le Space Shuttle, dont les coûts de lancement se sont révélés sans commune mesure avec la promesse initiale et sans commune mesure avec ceux des lancements d'Arianespace, tandis que les lanceurs russes n'ont pas réussi à égaler la fiabilité acquise en Europe avec Ariane.

Largement sous l'impulsion de la France, et avec les succès procurés par cette fiabilité, l'Europe était alors sur une belle dynamique, qui lui a permis d'anticiper et de servir les évolutions du « marché » du transport spatial, notamment l'attrait des satellites de télécommunication vers l'orbite géostationnaire<sup>1</sup> et le grossissement de ces satellites au fil des années : dans cette période et jusqu'aux années 2000, la masse de ces satellites a augmenté continûment, de 200 kg par an en moyenne. Cela a amené l'Europe à augmenter progressivement les capacités d'Ariane 4 jusque vers 4,7 tonnes de charge utile injectée sur l'orbite GTO<sup>2</sup>, puis à exploiter Ariane 5 (initialement développée pour lancer la navette européenne Hermès, abandonnée en 1992) et à en pousser la performance un peu au-delà de 10 tonnes sur cette même orbite.

Fiabilité et masse totale mise en orbite ont été ainsi les deux atouts majeurs de la filière Ariane sur cette période, lui permettant de capter entre 60 et 80 % du marché des lancements dits commerciaux, depuis la fin des années 1990 jusqu'aux années 2010.

## **LES ANNÉES 2000-2015 : LA TRANSITION VERS L'ÈRE INDUSTRIELLE, LA REDISTRIBUTION PUBLIC-PRIVÉ**

Les années 2000-2015 marquent pour leur part l'inflexion du monde des lanceurs lui-même vers le privé, en prolongement de l'évolution vue chez ses clients les années précédentes. Lancer des fusées devient une affaire industrielle, un lancement n'est plus une « tentative de lancement » comme autrefois, l'échec n'est plus une option, la disponibilité et la cadence attendues par les clients doivent être assurées.

À cet égard, en Europe, plus que l'échec de son premier vol en 1996, l'échec en vol d'Ariane 5 en 2002 à l'occasion du premier vol de sa version à haute performance est emblématique : il a déclenché une redistribution des rôles au sein de la communauté concernée, avec un transfert de la maîtrise d'œuvre depuis l'agence spatiale française, le CNES qui agissait dans ce rôle pour le compte de l'ESA, vers l'industrie. Évolution naturelle, très cohérente par exemple de celle de la filière nucléaire ou de certaines filières d'armement : les agences ont donné l'impulsion dans les années 1960 à 1980, elles ont permis de démontrer l'accessibilité du défi technologique initial, elles ont structuré une capacité industrielle qu'elles ont longtemps pilotée, et la recherche de l'efficacité industrielle dans un environnement devenu compétitif à l'échelle mondiale passe ensuite par une responsabilisation plus directe de l'industrie (à elle de trouver les clés de la compétitivité).

Côté américain, les leçons de l'erreur stratégique du Space Shuttle ont été tirées avec son retrait de service et le retour à des lanceurs plus conventionnels, mais la transition de l'ère des pionniers vers l'ère industrielle s'est matérialisée avant tout par l'arrivée sur scène de SpaceX, fondée en 2002 et commençant à opérer son premier lanceur « mi-lourd » en 2012, axé essentiellement vers l'orbite basse<sup>3</sup>. Partant d'une feuille blanche, dispo-

---

<sup>1</sup> Orbite géostationnaire : orbite circulaire à 36 000 km d'altitude, dans le plan de l'équateur terrestre, depuis laquelle un satellite tourne autour de la terre à la même vitesse angulaire que cette dernière, et reste donc en station fixe au-dessus du point de l'équateur sur lequel il a été positionné. De là, il voit un bon tiers de la surface terrestre.

<sup>2</sup> GTO : Geosynchronous Transfer Orbit, orbite de transfert géostationnaire. Orbite elliptique autour de la terre, dont l'apogée est à 36 000 km d'altitude. Sur cette orbite, en activant sa propre propulsion, le satellite augmente l'altitude de son périhélie, point de passage au plus près de la terre, pour le porter lui aussi à 36 000 km et à se trouver alors sur orbite circulaire et géostationnaire.

<sup>3</sup> Envoi de satellites vers les orbites circulaires entre 500 et 2 000 km d'altitude, avant que la capacité du lanceur ne soit progressivement accrue, lui permettant de lancer aussi des satellites de plusieurs tonnes vers l'orbite GTO, à l'instar d'Ariane 5 qui injecte deux satellites de ce type à la fois.

sant néanmoins d'un moteur hérité de l'époque de l'aventure américaine vers la Lune, et considérant que le développement et la production d'un lanceur ne sont désormais plus un exploit technique total mais doivent être approchés comme une activité industrielle visant bas coût et robustesse, SpaceX introduit sur le marché un lanceur, le Falcon 9, qui après presque 10 ans de mise au point révèle effectivement ses vertus économiques et sa fiabilité. De plus, SpaceX démontrera à partir de 2015 sa capacité à récupérer et réutiliser le premier étage de ses lanceurs, accédant ainsi à la fois à des cadences de lancement plus élevées et à des coûts d'opération encore réduits.

Cette impulsion de SpaceX a de multiples conséquences.

Elle montre que l'on peut accéder à l'espace circumterrestre avec une barrière à l'entrée nettement abaissée, le coût du lancement. Combinée à la miniaturisation des fonctions de communication ou des capteurs apportée en parallèle par l'électronique grand public, elle ouvre un champ nouveau, le New Space : de multiples acteurs apparaissent, développent et opèrent des satellites miniatures en orbite basse. Tandis que les opérateurs traditionnels de télécommunication envisagent désormais la constitution de constellations de centaines ou milliers de petits satellites en orbite basse, assurant des services de communication à haut débit et faible latence, dont les applications sont multiples et lucratives. SpaceX se lance même en premier dans cette approche, avec sa constellation Starlink.

Elle entraîne aussi un changement de paradigme de la part des autorités des États-Unis à commencer par la Nasa : elles achètent du service de lancement et non plus le développement d'une capacité de lancement qui leur permettra ensuite de lancer leurs satellites. Ce qui ne signifie pas, loin de là, qu'elles n'ont pas soutenu financièrement la constitution de la capacité apportée par SpaceX...

Enfin, plus globalement, elle engendre en partie et soutient en tout cas les prédictions réalisées dans les années 2015-2018 par les grands organismes financiers et prospectifs mondiaux : « il y a trois domaines qui vont connaître une expansion vers un volume d'affaire en trillions de dollars dans les 30 années à venir, il s'agit de ce qui est relatif à l'environnement durable, à la donnée et à son traitement, et enfin à l'espace. Et de plus il faut comprendre que l'espace est un levier clé pour les deux autres domaines ».

## **LES ANNÉES 2020 ET APRÈS : PERSPECTIVES GRANDIOSES, ÉMERGENCE D'UN VRAI MARCHÉ (?)**

Parlant de « l'espace » ci-dessus, on réfère en fait à un espace élargi par rapport au seul environnement circumterrestre (orbite basses et géostationnaires) que nous avons abordé jusque-là : il s'étend désormais jusqu'aux orbites lunaire et martienne, avec une recrudescence des missions vers la Lune, avec aussi la perspective de résidence sur place et d'exploitation des ressources minières par exemple, comme palliatif à l'épuisement à venir de certaines d'entre elles sur Terre. Cette perspective-là fait émerger un concept de « logistique spatiale » et l'on commence à considérer le transport spatial comme une chaîne logistique, avec des hubs intermédiaires sur certaines orbites et non plus des transports point à point comme par exemple le trajet direct de la Terre à la Lune qui requiert forcément des lanceurs très lourds.

Ceci influence directement la conception des lanceurs eux-mêmes, l'illustration la plus représentative en Europe étant celle du lanceur Ariane 6, qui va maintenant remplacer Ariane 5 : outre la nécessité de réduire drastiquement les coûts de lancement (- 40 %), l'abandon d'Ariane 5 et le passage au lanceur Ariane 6 ont été rendus nécessaires par la diversification des missions qui sont désormais demandées par les opérateurs spatiaux ; ainsi grâce à la possibilité d'allumer plusieurs fois le moteur de son étage supérieur en orbite, Ariane 6 autorise toute la panoplie des missions attendues en orbite circumterrestre et au-delà, là où Ariane 5 était spécialisée sur les missions GTO, autorisait

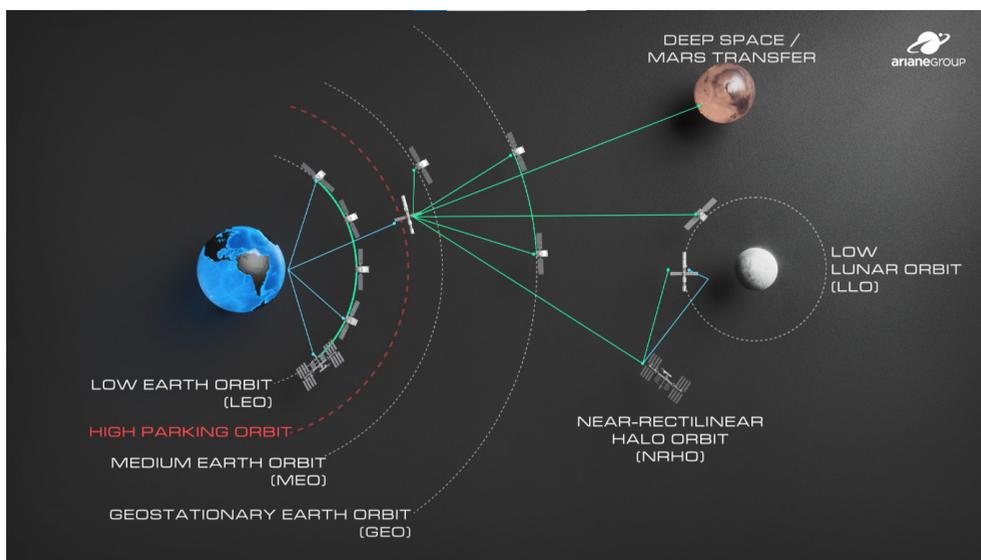


Figure 2 : Concept de logistique spatiale (source : ArianeGroup).

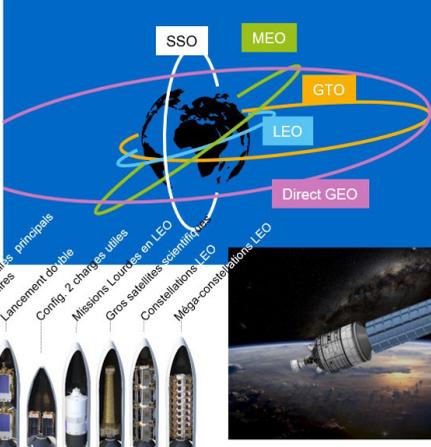
 <p><b>ARIANE 62 (2 BOOSTERS)</b></p> <p>Performance 4,5-5 t GTO</p> <p>Masse au décollage 530 t</p> <p>Poussée 816 t</p>		 <p><b>ARIANE 64 (4 BOOSTERS)</b></p> <p>Performance 12 t GTO</p> <p>Masse au décollage 860 t</p> <p>Poussée 1 530 t</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Figure 3 : Ariane 6 – Polyvalence et flexibilité (source : ArianeGroup).

quelques missions d'exploration comme les missions exceptionnelles récentes pour James Webb Space Telescope et pour JUICE, mais ne permettait pas le déploiement de constellations en orbite basse.

Côté américain, cette trajectoire vers la logistique spatiale engendre par exemple le projet de très gros lanceur Starship, de la part d'Elon Musk chez SpaceX, mais aussi le projet d'un autre milliardaire majeur de notre époque, Jeff Bezos avec son lanceur New Glenn.

Enfin, au-delà de ces cas célèbres, cet environnement et ces perspectives grandioses déclenchent une multiplication des initiatives : les projets de micro-lanceurs se comptent en dizaines par le monde et le paysage des lanceurs mi-lourds ou lourds connaît une expansion inédite. En dehors de rares exceptions, les États sont toujours derrière ces initiatives, mais de moins en moins dans l'approche initiale qui confiait ces développements à leurs agences, et de plus en plus par un soutien au privé.

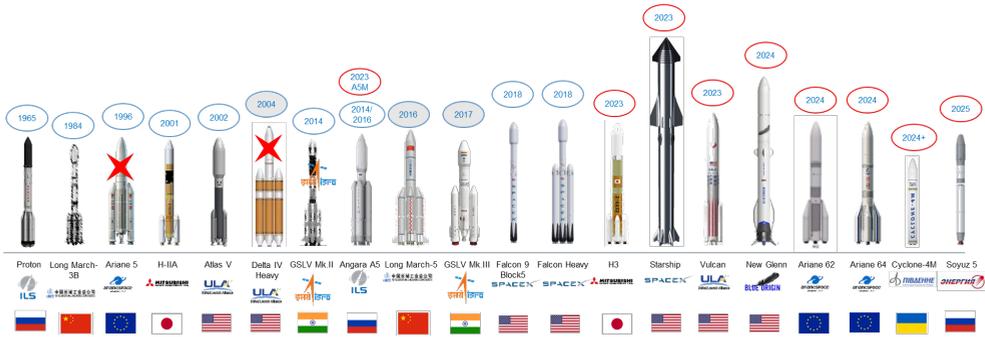


Figure 4 : La multiplication des développements de lanceurs lourds (source : ArianeGroup).

En Europe, cet état de fait s'est concrétisé très récemment lors du Sommet Spatial de Séville, en décembre 2023, lorsqu'il a été acté que la génération de lanceurs post-Ariane 6 ne serait plus développée sous l'égide directe de l'ESA mais que l'ESA agira d'une part en client de services de lancements, et d'autre part comme soutien au développement des technologies et des briques de base (par exemple les moteurs cryogéniques) des lanceurs européens du futur. Charge aux industriels, mis en compétition, de proposer eux-mêmes les solutions de lancement.

## CONCLUSION

À plusieurs reprises dans cet exposé intitulé « Le marché international des lanceurs », j'ai mis le mot « marché » entre guillemets. La raison en est simple : jusqu'à présent cette notion correspondait plutôt à une illusion, dans la mesure où le domaine des lanceurs requiert des niveaux d'investissement colossaux, pour des productions de série très limitées (quelques lanceurs à l'année) et un retour sur investissement rendu de fait inatteignable. Nulle possibilité de venir sur ce marché sans un soutien des États, direct ou indirect mais poussé.

Avec les perspectives d'expansion évoquées *supra*, va-t-on vers un vrai marché du transport spatial, un marché ouvert et classique avec des investisseurs privés purs et du retour sur investissement ? Difficile à dire, mais le milieu s'y prépare et anticipe *a minima* un apport financier privé nettement accru par rapport aux époques antérieures.

Tout en sachant que ce domaine d'activité conservera toujours son caractère stratégique pour les États, ainsi que son caractère dual (*cf.* l'introduction et le lien direct avec les armes balistiques) : les États voudront et devront quoi qu'il en soit garder encore longtemps une certaine mainmise sur le sujet.

À cet égard, référons simplement à l'actualité récente, avec cette situation critique qu'est la perte momentanée de l'accès autonome à l'espace par l'Europe.

# Aspects juridiques : les fréquences

Par Alexandre MARQUET et Thomas WELTER  
Agence Nationale des Fréquences (ANFR)

Les besoins satellites sont intimement liés à leurs besoins en communications, qui s'effectuent nécessairement sans-fil. Dans ce contexte, et vu l'aspect intrinsèquement mondial des déploiements spatiaux, une part importante des aspects juridiques liés au spatial est liée aux aspects réglementaires ayant traits aux radiocommunications. Ces derniers sont l'objet des travaux techniques et réglementaires, ainsi qu'aux procédures mises en place par le secteur Radiocommunication de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT-R). L'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) est l'interlocuteur français unique de l'UIT-R. À ce titre, elle est en charge de l'accompagnement de l'industrie et des entités étatiques françaises dans leurs démarches auprès du Bureau des radiocommunications de l'UIT-R, ainsi qu'auprès des autres administrations dans le cadre des processus de coordination. Elle est également en charge des études techniques, de la consolidation et de la défense des intérêts français liés aux ressources orbites-spectre.

## LE RÈGLEMENT DES RADIOCOMMUNICATIONS

La réglementation des fréquences radioélectriques est un sujet éminemment international. Dès le début du télégraphe sans-fil, des problèmes similaires à ceux posés par le télégraphe filaire se posent, essentiellement pour converger sur les moyens et procédures permettant la délivrance de messages au-delà des frontières. Ceci amène l'Allemagne à convoquer une conférence préliminaire des radiocommunications à Berlin dès 1903<sup>1</sup> (seulement 5 ans après que l'émetteur de la tour Eiffel n'émette ses premières ondes). Ces travaux mènent en 1906 au premier Règlement des Radiocommunications (RR), annexé à la Convention Radiotélégraphique Internationale, elle-même supervisée par l'Union Télégraphique Internationale, fondée en 1865 et qui deviendra ce qui est aujourd'hui l'Union Internationale des Télécommunications (UIT).

Dans les années 1920, l'explosion des usages des télégraphes sans-fil menacent la qualité de service en raison de brouillages, et c'est en 1927 que la Convention Radiotélégraphique Internationale consacre le désormais classique partage du spectre radioélectrique en bandes de fréquences, allouées à différents services de radiocommunications<sup>2</sup>. Depuis, les travaux de l'UIT-R continuent à réviser le cadre réglementaire, avec pour objectif un usage efficace du spectre. S'agissant des satellites, cette tâche est conséquente.

En effet, les services satellites ont une portée intrinsèquement mondiale : ils ont une large portion du globe en ligne de vue et, exception faite des satellites géostationnaires, défilent constamment autour de la terre. L'interférence générée ou reçue par un satel-

---

<sup>1</sup> Voir <http://handle.itu.int/11.1004/020.2000/s.210-fr>

<sup>2</sup> Voir <http://handle.itu.int/11.1004/020.1000/4.39>

lite est déterminée par les fréquences dont il fait usage, mais aussi par la géométrie de son orbite. Tout comme le spectre radioélectrique, l'ensemble des orbites constitue une ressource naturelle finie. Par conséquent, dans le cadre des radiocommunications, la ressource internationale consommée par un satellite est dite orbite-spectre.

Devant les complexités techniques et réglementaires uniques des services de radiocommunication par satellite, l'UIT-R s'est doté d'outils et de procédures propres au spatial. Ils seront traités dans la seconde partie de cet article. Les implications nationales de ces procédures feront l'objet de la troisième partie.

De nos jours, le RR est un traité international révisé tous les 4 ans à l'occasion des Conférences Mondiales des Radiocommunications (CMR) organisées par le secteur Radiocommunications de l'UIT (UIT-R), fort de ses 193 États membres<sup>3</sup>. Il est le principal document de référence, de portée internationale, pour la gestion du spectre. Les réglementations nationales s'appuient sur lui et dans nombre de situations, il est l'instrument opérationnel qui commande la pratique des gestionnaires.

Au niveau national, l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) est le point de contact vis-à-vis de ces procédures nationales et internationales. L'ANFR mène en outre les études permettant la définition des conditions techniques nécessaires à la coexistence entre services de radiocommunications. Sur la base de ces études, elle coordonne la définition des positions internationales françaises sur les conditions techniques et réglementaires à imposer ou non aux nouveaux services et applications proposées, et dont les services spatiaux constituent une part importante. Cette concertation implique les acteurs étatiques et industriels concernés. L'ANFR défend ensuite ces positions et intérêts français consolidés, notamment à l'UIT-R. Cet aspect sera traité dans la troisième partie de cet article.

## PROCÉDURES DE L'UIT LIÉES AUX SERVICES SATELLITAIRES

Le chapitre III du RR traite des procédures de coordination, de notification et de l'enregistrement des assignations de fréquences. C'est par le respect de ces dispositions que les droits des divers pays sont constitués et respectés, en particulier les droits d'antériorité. Toute procédure contentieuse en matière de fréquences examine au préalable si les procédures ont été bien exécutées. La description des procédures est très détaillée, et le bon aboutissement de ces démarches est un enregistrement des nouvelles assignations dans le fichier international de référence tenu par le Bureau des Radiocommunications (BR), le MIFR<sup>4</sup>.

Nécessitant une large anticipation et des précautions particulières, compte tenu de leurs coûts et délais de développement, les projets de systèmes à satellite doivent être notifiés et mis en service au plus tard 7 ans après la réception de la demande de la publication anticipée, ou d'une demande de coordination selon les cas. Cette publication anticipée est à l'initiative de l'État porteur du projet (administration notificatrice). Elle décrit les grandes lignes du système envisagé. Cette publication est annoncée dans une section spéciale de la Circulaire Internationale d'Information sur les Fréquences, la BRIFIC<sup>5</sup>, publiée régulièrement par l'UIT. Dès lors peuvent s'enclencher le processus de concertation entre les administrations concernées et, si nécessaires, les procédures de coordination avec les systèmes potentiellement perturbés par le nouveau projet. Toute administration

---

<sup>3</sup> Voir <https://www.itu.int/online/mm/scripts/gensel8>

<sup>4</sup> MIFR, en anglais, pour "Master International Frequency Register".

<sup>5</sup> BRIFIC, en anglais, pour "International Frequency Information Circular" du BR.

détentrices d'assignations enregistrées peut demander à être consultée formellement par l'administration notificatrice et peut formuler toute remarque, interrogation ou objection.

À l'issue du processus de concertation, et sous réserve d'un aboutissement satisfaisant, le projet est enregistré par le BR dans le MIFR. Cet enregistrement ouvre des droits à l'administration notificatrice. Ces droits courent à partir de la date de la publication anticipée, ou demande de coordination. L'administration notificatrice doit, le jour venu, notifier la mise en service des satellites qui s'inscrivent dans ces droits. Passé un délai de 7 ans, et sans mise en service, les droits tombent. Compte tenu des enjeux, il peut y avoir des polémiques sur cette « mise en service en temps utile » : c'est alors au Comité du Règlement des radiocommunications, le RRB<sup>6</sup>, d'arbitrer d'éventuels litiges.

Notons que dans toutes ces procédures, les interlocuteurs de l'UIT sont les États, et les droits acquis le sont au bénéfice des États. Il appartient à ceux-ci de définir les mécanismes juridiques et contractuels nationaux qui permettent de mettre ces droits à disposition de tiers.

## **AUTORISATIONS NATIONALES ET RELATIONS AVEC LE BUREAU DES RADIOCOMMUNICATIONS DE L'UIT-R**

En France, l'utilisation par les titulaires d'autorisation de fréquences radioélectriques constitue un mode d'occupation privatif du domaine public de l'État. Comme évoqué dans la section précédente, l'occupation de ces fréquences fait l'objet d'une réglementation particulière, qui est spécialement influencée par le droit international. Les assignations de fréquences nécessaires au fonctionnement des systèmes satellitaires ne peuvent être utilisées qu'après avoir été déclarées avec succès à l'UIT par une administration nationale.

Le titre 4 de la loi n°2004-575 du 21 juin 2004 pour la confiance dans l'économie numérique a introduit un titre 8 dans le livre II du code des postes et des communications électroniques intitulé « Assignation de fréquences relatives au système satellitaire ». Le code comporte désormais des dispositions spécifiques aux systèmes satellitaires (incluant stations spatiales et terriennes). Cette loi comble une lacune du droit des communications en soumettant à un régime d'autorisation l'occupation des couples orbite-spectre. Elle assure le transfert des droits d'utiliser ces ressources, que la France s'est vu attribuer par l'UIT, vers les opérateurs de système satellitaire. Elle fournit aux entreprises qui développent des projets de systèmes satellitaires un cadre légal clair, garantissant à un stade précoce la disponibilité d'une des ressources indispensables à leurs réalisations.

La procédure d'attribution d'une fréquence satellitaire s'effectue en deux étapes : la demande d'assignation, et l'autorisation d'exploitation. Pour le premier point, c'est à l'ANFR qui représente la France dans le cadre des concertations sous l'égide de l'UIT, que la demande d'assignation doit être adressée. L'ANFR vérifie notamment que l'assignation demandée est conforme au Tableau National de Répartition des Bandes de Fréquences (TNRBF) ainsi qu'au tableau d'attribution des bandes de fréquences de l'article 5 du RR. Elle procède ensuite à la déclaration de l'assignation auprès de l'UIT et engage la procédure prévue par le RR, dont l'un des objets est de prévenir les brouillages entre systèmes. C'est ensuite le ministre chargé des communications électroniques qui octroie l'autorisation d'exploitation de l'assignation de fréquences à un système satellitaire. Cette dernière est subordonnée à la justification de la capacité de l'opérateur à contrôler l'émission de l'ensemble des stations utilisant l'assignation de fréquence, et ne peut être refusée que dans certains cas énumérés par l'article L. 97-2 du code des postes et des communications électroniques. Elle est accordée à titre personnel et ne peut être cédée sauf accord de l'autorité administrative.

---

<sup>6</sup> RRB, en anglais, pour "Radio Regulations Board".

L'autorisation est délivrée pour une durée de 20 ans renouvelable. Elle ne dispense pas des autres autorisations prévues par les lois et règlements, notamment de celles délivrées par l'Arcep en matière de communication électronique ou par l'Arcom en matière de communication audiovisuelle.

## EXEMPLE D'ÉTUDE TECHNIQUE PRÉALABLE À UNE DÉCISION RÉGLEMENTAIRE MONDIALE

L'un de points d'agenda de la CMR-23 met à l'étude l'identification de plusieurs bandes de fréquences pour les réseaux mobiles cellulaires. Celle qui nous intéresse ici est la bande de fréquences 6425-7125 MHz, dite « 6 GHz ». Lors du cycle d'études, l'existence de mesures passives de la température de la surface de l'eau (SST, pour "sea surface temperature") par des satellites dans cette bande fut portée à l'attention des groupes de travail de l'UIT en charge des services scientifiques (GT-7C) et des services de téléphonie cellulaire (GT-5D). Ces mesures permettent de prédire des phénomènes climatiques tels que la formation de cyclones et d'ouragans. Des études ont donc été entreprises, pour déterminer le potentiel impact d'un déploiement de réseaux mobiles dans cette bande sur ces mesures, mais aussi pour rechercher des bandes de repli, où ces mesures pourraient être opérées tout en minimisant l'interférence reçue. Des études complémentaires ont également été entreprises afin de déterminer l'impact de potentiels déploiements *wifi* dans la même bande.

Sans rentrer dans leur détail, on peut mettre en avant les principales étapes communes à toute étude de compatibilité engagée à l'UIT-R. La première étape est de déterminer les caractéristiques techniques de tous les systèmes impliqués, leurs modèles de déploiements, ainsi que les modèles de propagation à appliquer. Enfin, la capacité des systèmes victimes à tolérer certains niveaux d'interférence est prise en compte *via* la définition de critères de protection. Ces données sont en général consignées dans des Recommandations UIT-R. En ce qui concerne les systèmes mobiles, ces données ne font pas encore l'objet de recommandations, mais sont connues du GT-5D qui les a développées pendant le cycle 2019-2023 afin d'étudier l'impact de l'introduction de services mobiles cellulaires dans la bande 6 GHz sur les services existants. Pour les caractéristiques techniques des systèmes *wifi*, le groupe de travail compétent est le GT-5A. Cependant, la difficulté pour la bande 6 GHz réside dans le fait que le *wifi* n'est actuellement déployé que dans un nombre réduit de pays, et que les caractéristiques utilisées pour les études au niveau régional (aux États-Unis par exemple) semblent indiquer des caractéristiques de déploiements significativement différentes de celles de la bande dite « 5 GHz » (5150-5350 MHz et 5470-5725 MHz, en Europe), pour laquelle des recommandations existent. Devant l'absence d'informations au niveau UIT-R quant aux systèmes *wifi* opérant dans cette bande, les études contribuées par l'ANFR se basent sur des paramètres préliminaires soumis à l'équipe-projet SE45 de la CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications), en charge des études techniques associées à l'éventuelle introduction du *wifi* dans de nouvelles bandes.

En deuxième étape, les études consistent à modéliser des déploiements représentatifs, puis à calculer l'interférence agrégée au niveau de récepteur, pour enfin comparer ce niveau d'interférence au(x) critère(s) de protection du système victime. Notons que l'interférence reçue exhibe une variabilité temporelle due à la variabilité aléatoire du trafic cellulaire ou *wifi*, de l'éventuel déplacement des appareils, mais aussi en raison de la variabilité du canal de propagation. Ces variations sont difficiles à retranscrire dans les résultats, ce qui mène parfois à de longues discussions quant à leur interprétation. Ils sont ici présentés sous la forme de cartes de la moyenne du dépassement du seuil d'interférence agrégée. Ils montrent que les déploiements de réseaux cellulaires ou *wifi* dans la bande 6 GHz mettent en péril la mesure de la température des océans par satellite, particulièrement auprès des côtes.

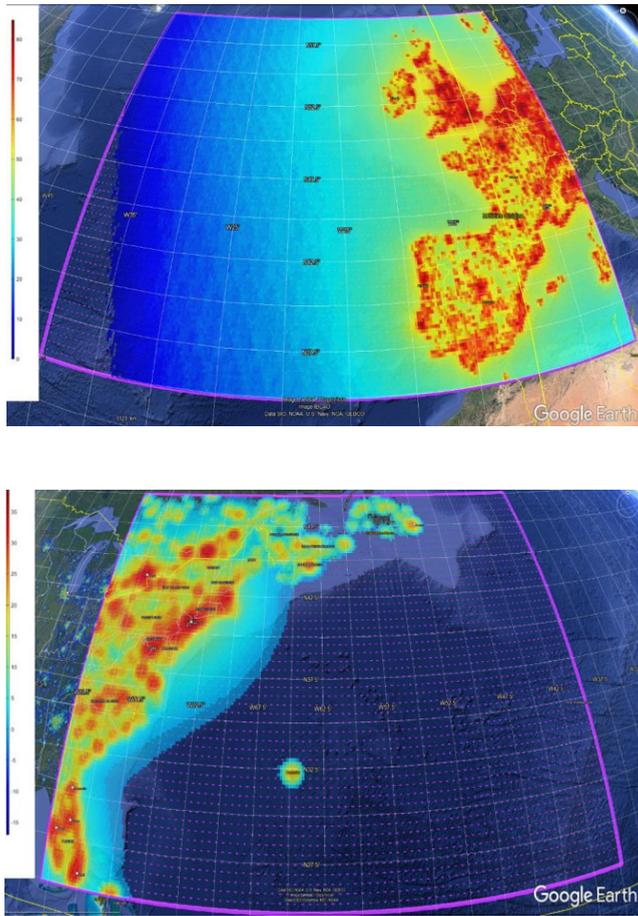


Figure 1 : Exemple d'impact d'un déploiement de systèmes cellulaires :  
en haut, dans la bande 6425-7125 sur un capteur spatial de mesure de la SST ;  
en bas, dans le cas d'un déploiement *wifi*. L'échelle donne le dépassement en dB  
du critère de protection en puissance du système SST.

Sur la base de ces études, et devant la certitude que la bande de fréquence 6 GHz fera l'objet soit d'un déploiement de réseaux cellulaires, soit de réseaux *wifi*, la France a pu convaincre les autres administrations de la CEPT d'inclure dans la proposition européenne commune aux travaux de la CMR-23, des propositions d'allocations de bandes de fréquences complémentaires pour le service d'exploration de la terre par satellite (passif) à titre primaire dans les bandes de fréquences 4.2-4.4 GHz et 8.4-8.5 GHz. Les débats mondiaux sur ces potentielles attributions ont lieu à la CMR-23, qui se déroule au moment où nous rédigeons ces lignes, et pourraient déboucher sur l'introduction de ces nouvelles attributions dans le RR. Dans le cas contraire, les études menées à l'UIT-R montrent que notre capacité collective à prédire ouragans et autres phénomènes climatiques d'importance sera dégradée à moyen terme.

## CONCLUSION

Les besoins satellitaires sont indissociables de leurs besoins en communications, qui s'effectuent nécessairement sans-fil. L'utilisation efficace et l'accès équitable aux ressources

orbites-spectre à l'échelle mondiale implique une coopération mondiale, qui est mise en œuvre par l'UIT. Nous avons vu comment cette dernière s'est adaptée depuis les débuts du télégraphe, pour prendre en compte et organiser l'accès au spectre pour les services satellites. Nous avons également présenté comment l'ANFR étudie, organise, consolide et défend les positions internationales française ayant traits aux ressources orbite-spectre, en coordination étroite avec les industriels et entités étatiques françaises concernées.

## BIBLIOGRAPHIE

AGENCE NATIONALE DES FREQUENCES (2020), « Guide pour faciliter l'accès des petites et moyennes entreprises aux fréquences spatiales françaises », Maisons-Alfort.

CHADUC J-M. (2005), *La Gestion des fréquences*, Hermès Science Publications, 352 pages.

PEZ-LAVERGNE T. (2011), *Le domaine public hertzien : attribution et exploitation des fréquences radioélectriques*, LGDJ, 214 pages.

UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS (2018), "ITU Radio regulatory framework for space services", Genève.

UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS (2020), *Règlement des radiocommunications*, édition 2020, Genève, 707 pages.

# Régulation des objets volants : une histoire centenaire à l'aube de la révolution digitale

Par Louis TEODORO, Pascale ROBERT et Orian DHEU  
Direction générale de l'Aviation civile (DGAC)

Des origines de la réglementation de la navigation aérienne internationale, prescriptive, à l'aviation innovante, les bases réglementaires de l'aviation civile internationale semblent avoir atteint leurs limites. Avec les évolutions techniques majeures qu'apporte le numérique à l'aviation civile depuis quelques années déjà, des modifications profondes des divers processus de certification et agréments et, plus généralement, du droit aérien devront voir le jour afin d'assurer un maintien des niveaux de sécurité des passagers et des tiers.

## LES ORIGINES DE LA RÉGLEMENTATION : LA « CONVENTION DE PARIS »

Entre 1890, année où Clément Ader élève son avion de quelques centimètres au-dessus du sol et 1909, celle de la traversée de la Manche par Louis Blériot, l'aviation accomplit des progrès manifestes. Son cadre juridique est en revanche lacunaire, comme l'illustre le périple de ce dernier, entrepris sans autorisation de la partie britannique ni même passeport ou papier d'identité. Aussi, l'idée germe-t-elle en France de convoquer une conférence internationale en vue d'établir des règles relatives à la navigation aérienne. Ses travaux s'interrompent lors de la Première guerre mondiale.

Quelques années plus tard, en 1917, le Comité Interallié d'Aviation est créé. Il a pour mission d'étudier les solutions d'uniformisation des types d'avions et équipements utilisés par les alliés pendant la guerre. Dissout en 1918, il inspire cependant le capitaine Albert Roper qui soumettra à Georges Clémenceau un projet d'instance similaire dédiée à l'aviation civile. La Conférence de la Paix, que préside le Père la Victoire de janvier 1919 à août 1920, en fournit l'occasion. Le Comité Interallié d'Aviation devient, en mars 1919, la Commission de l'Aéronautique, chargée de rédiger une convention internationale relative à la navigation aérienne.

La « Convention portant réglementation de la navigation aérienne » est signée le 13 octobre 1919, dans le Salon de l'Horloge du ministère des Affaires étrangères à Paris, par 27 États dont la France et les États-Unis. Partie intégrante des Traités, Protocoles et Conventions de la Conférence de la Paix, elle prévoit, à l'article 34, l'institution d'une Commission internationale permanente placée sous l'autorité de la Société des Nations, la future Commission internationale de la navigation aérienne (CINA). Elle pose le principe de la libre circulation internationale, dans le respect de la souveraineté des États sur leur espace aérien, consacre la notion de nationalité des aéronefs, définit les conditions de leur immatriculation. Elle impose le certificat de navigabilité et le brevet d'aptitude et la licence des pilotes entre autres dispositions.

Le 11 juillet 1922, la Convention entre en vigueur et la CINA siège à Paris. Sa première session est présidée par Pierre-Etienne Flandin et Albert Roper, élu Secrétaire général.



Figure 1 : La signature de la « Convention portant réglementation de la navigation aérienne » dans le salon de l'Horloge du ministère des Affaires étrangères (Source : Roger-Viollet).

La CINA veille à l'application de la Convention et crée des Annexes techniques, inspirées des travaux de la Convention de Paris, qui traceront la voie à ceux de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

## LA CONVENTION DE CHICAGO : L'ORGANISATION DE L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE (OACI)

Au sortir de la seconde guerre mondiale, les progrès de l'aviation commandent l'adaptation et l'extension des règles de la CINA, l'essor de l'aviation commerciale et des vols longs courriers ne faisant plus de doute. La Conférence de l'aviation Civile, à laquelle plus de 50 États participent à Chicago, élabore une nouvelle convention qui vise à « créer et préserver l'amitié et la compréhension entre les nations et les peuples » et ambitionne un « développement sûr et ordonné » du transport aérien. L'OACI, organe technique chargé de la mettre en œuvre, s'inscrit dans la continuité de la CINA. Albert Roper en devient d'ailleurs le Secrétaire général.

La convention est ratifiée par 26 États en 1947, plus de 100 en 1964, 193 en 2019. Depuis 2013, elle est dotée de 19 Annexes qui traduisent les objectifs stratégiques de l'OACI : sécurité, capacité et efficacité de la navigation aérienne, sûreté et facilitation, développement économique et protection de l'environnement. Remarquablement, les 15 premières Annexes, en vigueur depuis 1953, ont peu évolué dans leur périmètre, sinon le contenu. L'adjonction ultérieure d'Annexes souligne la sensibilité nécessaire et grandissante de l'aviation civile aux bouleversements du monde : en 1972, l'Annexe 16 introduit les normes relatives au bruit des aéronefs ; en 1974, l'Annexe 17 cible la lutte contre les actes malveillants (elle sera considérablement renforcée après le 11 septembre 2011) ; l'Annexe 16, encore, sera augmentée de nouveaux volumes, confirmant l'émergence des préoccupations environnementales : les émissions des moteurs d'aviation (polluants) et de CO<sub>2</sub> des avions sont normalisées respectivement en 1982 et 2018 ; enfin, le régime de

Compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale (CORSA) entre en vigueur en 2019.

En presque 80 ans d'existence, les succès de l'OACI en tant qu'instance normative sont notoires mais le modèle peut désormais interroger. Les audits qu'elle mène auprès des États montrent toute leur difficulté à transposer dans le droit national les plus de 12 000 normes et pratiques recommandées. À titre d'exemple, fin 2021, le taux moyen de mise en œuvre des normes s'élevait entre 50 % (règles relatives aux enquêtes de sécurité) et 82 % (règles de navigabilité).

Ces constats ont contribué à envisager des coopérations renforcées. Les accords bilatéraux sur la sécurité aérienne (BASA) ont ainsi pris une place d'importance dans le paysage réglementaire (*cf.* encadré sur BASA).

Ces constats ont aussi contribué à porter sur les fonds baptismaux l'Annexe 19, en 2013, qui impose des mesures de gestion de la sécurité dans tous les domaines de la Convention. Cette Annexe peut se lire comme une reconnaissance des limites de l'approche normative qui prévalait, où la simple conformité aux règles généralement prescriptives des 18 premières Annexes garantissait la sécurité. La numérisation, l'innovation technologique, l'intelligence artificielle (IA) rebattent également les cartes...

## IA ET AUTONOMIE DANS L'AÉRONAUTIQUE : UNE NOUVELLE FRONTIÈRE TECHNOLOGIQUE ET RÉGLEMENTAIRE

### Automatisation *versus* autonomisation

L'invention du pilote automatique dès 1914 par Lawrence Sperry<sup>1</sup> illustre combien et de longue date innovation et aviation ont emprunté un même chemin. Cette automatisation, d'abord mécanique, s'est particulièrement développée après la seconde guerre mondiale, avec le transport public de masse, l'exigence accrue de sécurité et l'avènement de l'électronique. Aujourd'hui, l'émergence de nouvelles technologies informatiques, du *big data* et de l'intelligence artificielle (IA) permettent d'entrevoir une (r)évolution socio-technologique, celle de l'autonomisation. Là où les automatismes assistent le pilote superviseur dans la réalisation d'une tâche bien définie, les systèmes autonomes permettent de déléguer tout ou partie de la réalisation de plusieurs fonctions d'une opération, y compris la prise de décision. Il convient de noter que différents degrés d'autonomie et niveaux d'interaction et d'implication homme-système (co)existent<sup>2</sup>. L'IA comme outil d'autonomisation peut être utilisée dans le (co)pilotage de l'aéronef, l'assistance de contrôleurs dans le service de contrôle de la circulation aérienne (ATC), etc.

### L'IA et ses enjeux de sécurité

Malgré les nombreux avantages de ces technologies, des défis se dressent. Il s'agit notamment d'améliorer leur acceptabilité sociétale et de démontrer la (cyber)sécurité des

---

<sup>1</sup> CALVERT B. (1985), "Aircrew and Automation", *The Journal of Navigation*, 38(1), pp. 1-18, doi:10.1017/S0373463300038121.

<sup>2</sup> En aéronautique, l'AESA classe les systèmes IA au regard de leur usage et de leur interaction avec les opérateurs humains. Sont distingués trois niveaux de délégation des pouvoirs décisionnels : niveau 1 (l'IA assiste l'humain), niveau 2 (l'IA coopère ou collabore avec l'humain) et niveau 3 (l'IA prend les décisions) (voir EASA (2023), "Artificial intelligence roadmap 2.0: human centric approach to AI in aviation", p. 18, <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/137919/en>).

### **BASA : les accords bilatéraux sur la sécurité aérienne**

Parmi les règles de sécurité aérienne, celles qui concernent la navigabilité des aéronefs, c'est-à-dire leur aptitude à voler en toute sécurité constituent un enjeu majeur.

Très tôt dans l'histoire de l'aviation, les États « aéronautiques » ont, pour les besoins de leurs importations et exportations d'aéronefs, négocié des accords bilatéraux portant sur la navigabilité de ces produits. Ces accords étaient conclus en forme plus ou moins solennelle, simple échange de lettres diplomatiques ou traité en bonne et due forme.

Ainsi, dès 1938, les Gouvernements français et belge ont signé une convention bilatérale concernant la reconnaissance de la validité du contrôle technique d'aéronefs civils effectués de part et d'autre de la frontière afin de faciliter la délivrance du certificat de navigabilité français aux aéronefs civils construits en Belgique et destinés à être importés et immatriculés en France, et inversement. Cette convention reposait sur le constat, côté français, que le contrôle de la fabrication, des performances et de l'entretien des aéronefs belges s'exerçait de façon analogue dans les deux pays tant pour les prototypes que pour la série, permettant ainsi la reconnaissance mutuelle de la validité des opérations de surveillance.

Hormis un accord multilatéral signé en 1960 entre 17 États européens relatif aux certificats de navigabilité des aéronefs construits sur le territoire de l'un des États signataires et importés dans un autre, la question de la reconnaissance des certificats de navigabilité a été réglementée de façon bilatérale au moyen d'accords dits BASA (Bilateral aviation safety agreement) négociés entre États.

La France a négocié des BASA bilatéraux avec des États non européens, comme les États-Unis et le Canada, en matière de reconnaissance réciproque des certifications de navigabilité délivrées par chaque partie. S'agissant des États-Unis, cette reconnaissance a résulté d'abord d'un échange de lettres entre ambassadeurs en 1973, puis d'un accord formel intergouvernemental de 1996 et, s'agissant du Canada, celle-ci a été convenue par un accord intergouvernemental de 1987.

Toutefois, à l'avènement en 2003 de l'AEASA, les États membres lui ont transféré leur compétence en matière de certification initiale, renonçant à l'exercice de leur compétence sur la scène internationale en la matière. Cette compétence est devenue une compétence externe exclusive mise en œuvre par la Commission européenne, négociatrice mandatée par le Conseil. Aussi, lors de l'entrée en vigueur et la ratification de chaque BASA européen, les États membres ont été contraints de dénoncer les dispositions de leur propre BASA dès lors qu'elles relèvent du champ de compétence européen.

À ce jour, il existe cinq BASA conclus et signés par l'Union européenne avec le Canada, les États-Unis, le Brésil, la Chine et le Japon, entrés respectivement en vigueur en 2011 pour les deux premiers, 2013, 2020 et 2021 pour les autres.

Le domaine de prédilection des BASA est la certification de navigabilité et environnementale et la maintenance. Toutefois, depuis l'extension du champ d'application du BASA initial entre l'UE et les États-Unis à d'autres thématiques telle celle des licences les BASA les plus récents prévoient un domaine élargi de coopération.

Si les BASA ressemblent à des accords de reconnaissance mutuelle, ils s'en distinguent car ils ne relèvent pas de la politique commerciale commune de l'Union européenne mais de sa politique extérieure dans le domaine de la sécurité aérienne. Ils définissent des modalités pratiques permettant l'acceptation réciproque des certificats et des divers agréments mais n'ont pour ambition ni l'acceptation, ni la reconnaissance des normes et règlements techniques propres à chacune des parties.

systèmes utilisant de l'IA. La réglementation horizontale et sectorielle des moyens de transport, l'un des principaux leviers pour assurer un niveau de sécurité satisfaisant, soulève certaines problématiques qu'ont commencé d'analyser les différentes autorités, dont l'Agence de l'Union européenne pour la sécurité aérienne (AESA) pour l'aviation, chargée d'élaborer des règles techniques dans le domaine de l'aviation et de délivrer des certifications et dont la compétence est allée croissante depuis 2003.

### Défis réglementaires

Les défis réglementaires concernent de nombreux domaines, parmi lesquels la certification. Là où les avions conventionnels et les systèmes embarqués sont certifiés sur la base de la démonstration de leur conformité à des normes, les systèmes intégrant l'IA devront être évalués suivant de nouvelles méthodes : si la logique actuelle de certification repose sur des systèmes programmés déterministes dont le fonctionnement est testé *a priori*, avec des systèmes autonomes dotés d'algorithmes d'apprentissage automatique ou statistique (*machine learning*) susceptibles d'évoluer de manière indépendante, un nouveau paradigme de certification est nécessaire. Parmi les pistes de réflexion, des exigences portant sur l'évaluation du modèle d'apprentissage machine et la fiabilité des données plutôt sur le système lui-même sont explorées. D'autres difficultés se feront jour : l'explicabilité des décisions de l'IA, l'incertaine interaction homme-machine et IA, la cybersécurité ou encore l'analyse des causes racine des incidents ou accidents, fondement de l'amélioration de la sécurité.

### Une évolution du droit en perspective

Les autorités européennes et nationales ont pris conscience de la nécessité d'évaluer et de faire évoluer les cadres réglementaires. Après la parution en 2023 d'une feuille de route sur l'intelligence artificielle dans l'aviation civile<sup>3</sup>, l'AESA a publié ses premières lignes directrices pour les IA « *apprentissage machine* » de niveaux 1 et 2 en aviation civile<sup>4</sup>. Ces documents posent les jalons des possibles évolutions de la réglementation aérienne.

À l'échelle européenne, le projet AI Act du Parlement européen et du Conseil a été agréé le 8 décembre 2023. Il pose les dispositions générales applicables aux systèmes d'IA à haut risque. Les activités aéronautiques pourraient être soumises à certaines de ses règles<sup>5</sup>. Au-delà, l'adoption d'instruments spécifiques à l'IA dans l'aviation civile et l'évolution du règlement de base<sup>6</sup> ainsi que des règlements d'exécution ou délégués sont étudiés. Un des défis de l'élaboration de ces textes consistera à dépasser les silos réglementaires et à assurer une cohérence juridique globale de l'ensemble du dispositif normatif pour assurer efficacement la sécurité des usagers et des tiers.

---

<sup>3</sup> AESA (2023), "EASA Concept Paper: guidance for Level 1 & 2 machine learning applications. A deliverable to the EASA roadmap", Issue 2, <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/137919/en>

<sup>4</sup> EASA (2021), "EASA Concept Paper: first usable guidance for level 1 machine learning applications", <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/134357/en> ; EASA (2023), "EASA Concept Paper: first usable guidance for level 1 & 2 machine learning applications. A deliverable to the EASA roadmap", <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/137631/en>

<sup>5</sup> Selon l'article 81 du projet, les futurs règlements aéronautiques qui concernent des systèmes IA devront prendre en compte les exigences mentionnées au titre III, chapitre 2 du projet de législation IA. Voir EASA (2023), "Artificial Intelligence Roadmap 2.0. Human centric approach to AI in aviation", version 2.0, p. 8, <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/137919/en>

<sup>6</sup> Règlement (EU) 2018/1139 du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2018 concernant des règles communes dans le domaine de l'aviation civile, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018R1139>



Figure 2 : Volocopter (Source : Richard METZGER / DGAC – STAC).

# Le mythe des frontières disparues

Par Jacques ARNOULD

Expert éthique au Centre national d'études spatiales (Cnes)

Voir la Terre depuis l'espace : ce pouvoir acquis grâce à l'astronautique ne finit pas de nous fasciner. Sans doute les mieux placés parmi nous, les astronautes répètent que, depuis là-haut, presque toutes les frontières terrestres disparaissent : des propos sans doute exagérés. Non seulement nous avons besoin de diversifier le regard que nous portons sur le réel et sur nous-mêmes, mais nous devons aussi reconnaître l'existence de frontières nécessaires, l'exigence de laisser et de respecter la place de soi et celle de nos *alter ego*.

## AVEC LES YEUX DE L'AUTRE

Dans *La Prisonnière*, le récit d'un concert privé chez madame Verdurin donne à Marcel Proust l'occasion d'une pensée qui devrait troubler les évidences dont est tissé l'habituel discours astronautique : « Le seul véritable voyage, le seul bain de Jouvence, ce ne serait pas d'aller vers de nouveaux paysages, mais d'avoir d'autres yeux, de voir l'univers avec les yeux d'un autre, de cent autres, de voir les cent univers que chacun d'eux voit, que chacun d'eux est. ». Avec la remarquable lucidité et l'élégance littéraire que nous lui connaissons, Proust nous offre une singulière définition de l'exploration, voire de l'essence de l'exploration : explorer consisterait à voir l'univers, et en tout premier lieu la Terre, avec les yeux d'un autre...

Ce soir-là, Yi So-yeon, la première astronaute sud-coréenne, s'adressait à un groupe d'étudiants de l'International Space University. Habillée d'une combinaison en toile grise qui ne devait rien aux raffinements dont sont capables les artisans tailleurs d'Asie, elle avait été invitée à nous partager son extraordinaire destin de jeune ingénieur et docteur en biotechnologie, sélectionnée pour rejoindre la station internationale en 2008. Je fus surpris et heureux de l'entendre expliquer comment, depuis son « balcon » spatial, elle avait pu observer la frontière qui sépare les Corées du Sud et du Nord, en particulier la nuit à cause du contraste très accentué qui existe entre les modes d'éclairage des deux territoires. Surpris, parce que, pour la première fois, j'entendais un(e) astronaute expliquer que, depuis l'espace, elle avait observé les frontières qui séparaient les humains et, en l'occurrence, un pays, un peuple, des familles, une culture.

Probablement sans le savoir, dans sa combinaison un peu terne et avec des mots probablement souvent répétés, Yi So-yeon ne faisait pas moins que réaliser devant nous et pour nous l'intuition de Proust : elle nous permettait de voir l'univers ou, plus exactement, une petite portion de l'univers avec les yeux d'un autre, avec les siens. Ce soir-là, nous étions et elle avec nous des explorateurs.

## LES FRONTIÈRES DE LA NUIT

Le propos de Yi So-yeon tranchait en effet avec le discours commun aux astronautes : « Depuis l'espace, aucune frontière n'est visible à la surface du globe », avec, parfois, une raisonnable restriction : « ... sauf les frontières naturelles ! ». De tels propos m'ont d'abord étonné, puis agacé, surtout lorsque je me suis rendu compte qu'ils faisaient partie non seulement du langage commun, mais aussi du discours attendu. Je peux aisément

comprendre qu'un astronaute, qui travaille le plus souvent dans un contexte international, puisse tenter d'illustrer l'esprit de coopération qui existe au sein des équipages, entre les agences spatiales et entre les États, et je peux tout aussi aisément admettre qu'il ait envie d'en trouver un reflet dans la vision de la Terre. Au temps des missions Apollo comme à celui de la station spatiale internationale, comment ne pas rêver à un monde d'où aurait disparu toutes les frontières, tous les murs qui deviennent trop souvent le motif de tensions, de conflits, de massacres. Pourtant, ces frontières non seulement existent, mais sont bel et bien visibles, même à quelques centaines de kilomètres d'altitude.

Que Yi So-yeon ait précisé que la séparation entre les deux Corées apparaisse plus nette encore lorsque les deux nations étaient plongées dans la nuit n'est pas étonnant. Examinons cette image-mosaïque de la Terre, construite uniquement de photos satellitaires « nocturnes ». Cette vision est totalement artificielle puisque jamais notre planète ne se trouve intégralement et au même moment dans l'obscurité ; elle n'en révèle pas moins des frontières plus tragiques encore que celles tracées au cours des siècles par les conflits et les accords entre les peuples et les nations. Voir la Terre de nuit depuis l'espace n'est pas seulement une expérience esthétique intense, que la NASA, l'agence spatiale américaine, a élégamment baptisée Black Marble (Marbre noir) ; c'est aussi accepter de regarder en face les différences, les inégalités dont souffrent une large portion de l'humanité : nous ne possédons pas tous les moyens d'éclairer le ciel ! À côté de régions aux taches lumineuses presque éblouissantes (la côte Ouest des États-Unis, le centre de l'Europe, l'Extrême-Orient), d'autres régions deviennent presque invisibles lorsque les rayons du soleil ne les atteignent plus, comme l'Afrique ou même de larges parties de l'Inde. La nuit, plus encore que sa présence, c'est la vérité de notre humanité qui s'impose aux astronautes. Ils nous voient ; nous nous voyons à travers leur propre regard.

## LE BALCON D'ÉROSTRATE

Prendre de la hauteur, faire un pas de côté afin de pouvoir contempler la Terre, en observer les habitants, acquérir ainsi le devoir de les protéger ou le pouvoir de les dominer : les humains en avaient souvent rêvé et, à défaut d'en être eux-mêmes dotés, avaient prêté ces attributs aux êtres célestes. Dans sa nouvelle intitulée *Érostrate*, Jean-Paul Sartre imagine un personnage qui prétend s'être placé au-dessus du commun des mortels et qui, pour les observer, les dominer, aime s'accouder à la fenêtre de son sixième étage ; une prétention, le syndrome d'Érostrate, qui le conduit à la folie. Cette « perspective plongeante », commente le philosophe, peut donc devenir le « grand ennemi de l'Humain ».

Perspective plongeante : j'ai retenu cette expression française pour traduire celle d'*overview effect*, désormais prisée de la communauté des astronautes, des gens de l'espace et de l'air. Elle a été forgée par Frank White, à la fin des années 1980. White a entrepris d'interroger les astronautes qui ont volé autour de la Terre et ont rejoint la Lune. De ces rencontres, il a tiré cette notion d'*overview effect*, l'une des expériences les plus fortes éprouvées par les hommes et les femmes qui font un séjour dans l'espace. L'expérience ultime de ce que Michel de Certeau a qualifié de « pulsion scopique et gnostique », de ce désir si humain de voir, de savoir... et de dominer. Les astronautes en témoignent tous : l'expérience spatiale dépasse de loin toutes celles que peut offrir l'aérien ; elle confère à la vision de la Terre une atmosphère onirique, un caractère dramatique d'une extrême intensité, au point de transformer l'apparence des structures et des phénomènes les plus familiers, d'offrir l'accès à un monde magique, presque inhumain.

## LE BESOIN DE FRONTIÈRE

« Votre identité, témoigne Russel Schweickart de la mission Apollo 9, appartient à la réalité tout entière » : dans l'espace, soumis à l'effet de perspective, les astronautes

pensent globalement et voudraient que tous les Terriens fassent de même pour faire taire les conflits, pour mieux protéger notre planète. Le sentiment qu'ils éprouvent prend donc la double teinte d'une « euphorie interconnectée » (cette fois, le mot est d'Edgar Mitchell) et d'un souci pour l'avenir de notre belle bille bleue et de ses occupants. Faut-il pour autant promouvoir le mythe des frontières disparues ?

Les biologistes nous apprennent que le vivant n'est apparu, n'a évolué, s'est propagé sur notre planète qu'à partir du moment où des frontières, physiques ou chimiques, sont apparues et se sont maintenues : le vivant, pourrions-nous dire, c'est avant tout l'autre, l'expérience de l'autre. Si, par moments, il y a fusion, le processus ne doit pas aller jusqu'à la confusion afin que de nouveaux êtres puissent émerger, distincts eux aussi de ceux dont ils sont issus. Gérer ses frontières est le b-a-ba des êtres vivants.

Cette leçon n'est évidemment pas une leçon politique, moins encore un appel à la défense violente des frontières terrestres et humaines. Elle est plutôt l'invitation à prendre de la hauteur pour mieux appréhender ce qui, au sein de l'espèce humaine et au sein de la biosphère terrestre, nous rassemble aussi bien que ce qui nous distingue. Je ne suis pas l'autre ; mais l'autre doit devenir un autre moi-même.

# Les enjeux juridiques de l'observation de la Terre depuis l'espace dans le contexte de la nouvelle économie spatiale

Par Philippe CLERC

Responsable de la conformité et de l'éthique d'entreprise  
à l'Inspection générale du Cnes

Cet article met en perspective les enjeux publics, privés et juridiques qui ont jalonné la construction de l'observation de la Terre depuis l'espace, de ses origines dans les années 1960, jusqu'à nos jours à l'heure du *Big Data*. Il détaille les caractéristiques les plus saillantes de son cadre juridique afin de préciser dans quelles conditions cette observation est-elle licite, comment les investisseurs ou exploitants peuvent-ils protéger le résultat de leur effort, et comment leurs données doivent être mises à disposition sur un marché concurrentiel ou auprès du grand public ?

Cette réflexion intègre les bouleversements techniques et politiques qui ont frappé cette activité, aux échelles nationale, européenne et internationale, en suivant l'essor de la conquête spatiale, le développement de l'informatique, de l'internet, des applications mobiles, de l'économie numérique mondialisée, puis l'avènement du *New Space* ; tout cela concomitamment à l'émergence de législations qui d'une part permettent d'assurer la protection intellectuelle, la réservation, le contrôle voire l'exclusivité de l'exploitation de ces données d'origine spatiale et d'autre part peuvent en imposer l'accès libre et gratuit, l'*open data*, tout en en préservant certaines restrictions.

## PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES ET JURIDIQUES DE L'OBSERVATION DE LA TERRE DEPUIS L'ESPACE

Les satellites permettent d'observer la Terre dans tous ses états, continental, océanique, atmosphérique, et bien évidemment toutes les activités humaines qui y sont détectables. Ils observent l'évolution de ces situations de façon répétitive, continue et traçable, sans se soucier des frontières nationales, avec une acuité de plus en plus fine grâce au progrès technologique.

Cette activité se développe à partir des années 1960 sous la conduite des premières puissances spatiales et de leurs agences spécialisées, d'abord pour augmenter leur capacité de renseignement militaire à l'échelle internationale mais aussi, sur le plan civil, pour satisfaire les besoins des premiers programmes de coopération scientifique sur le climat, l'atmosphère, la biosphère, la physique du globe et de l'Univers<sup>1</sup>. Ces détecteurs spatiaux

---

<sup>1</sup> Dans le sillage notamment des actions coordonnées à l'échelle globale lors de l'Année Géophysique Internationale (AGI) entre juillet 1957 et décembre 1958, en vue d'une meilleure connaissance des



Figure 1 : Satellite d'observation de la Terre (source : Cnes).

suscitent rapidement l'intérêt d'autres communautés d'utilisateurs opérationnels ou émergents comme l'océanographie, l'hydrographie, la météorologie, la cartographie, l'urbanisme et l'aménagement du territoire, la gestion des ressources géologiques et renouvelables ou l'environnement.

Juridiquement, la possibilité de programmation de la prise de vue du satellite suivant la zone, la nature de l'observation ou le capteur que l'on veut privilégier repose sur un choix humain, par définition subjectif ou original. À l'instar du photographe, cette faculté de choix permet à l'opérateur de revendiquer, dès la captation en orbite, un droit d'auteur sur la donnée ainsi générée. Cette protection est inaugurée par le Cnes pour les données de sa filière Spot<sup>2</sup> lancée en 1986, exploitée par sa filiale commerciale Spot Image aujourd'hui privatisées au bénéfice d'Airbus.

Les données d'observation captées à bord du satellite sont ensuite restituées au sol par télémétrie en temps réel directement à des stations de réception fixes ou mobiles autorisées, ou enregistrées pour être téléchargées à la station principale du pays ou de l'entreprise concerné. Tous les acteurs de la chaîne de traitement et de diffusion qui apportent une contribution intellectuelle à la donnée initiale peuvent bénéficier de la protection du

---

interactions entre le Soleil et notre planète. Cet événement va conduire au lancement des premières missions spatiales scientifiques, avec pour la France sous l'impulsion du professeur J.E. Blamont, le développement de la version AGI de la fusée Véronique, pouvant emporter une charge utile de 60 kg à 210 km d'altitude.

<sup>2</sup> Acronyme de Satellite Probatoire pour l'Observation de la Terre, ou pour des mauvaises langues à l'époque, satellite pour occuper Toulouse.

droit d'auteur sur leur valeur ajoutée, pour autant que celle-ci soit traçable tout au long de la chaîne ou reconnaissable sur le produit final.

L'essor de cette activité se conjugue aussi avec les progrès des technologies de l'information qui ont bouleversé notre société. Au début, les données étaient consignées sur des supports physiques et analogiques non réversibles par un non initié (papier, image ou photo, films ou pellicules, disques, bandes ou cassettes) et pouvaient être livrées simplement sous contrat de vente classique, sauf application de lois de censure ou droit d'auteur opposable.

Arrivent les supports numériques (fiches cartonnées, disquettes, CD Rom, disques durs) permettant de traiter et reproduire les données par des grosses machines et leurs logiciels ou algorithmes dédiés, eux-mêmes protégés juridiquement selon le cas par des brevets (*hardware*), le droit d'auteur qui s'impose dans les années 1980 sur les logiciels et les données enrichies (*software, enhanced data*) ou par la simple confidentialité suivant contrat ou chiffrement (pour les algorithmes ou données dénuées d'originalité) qui va bénéficier du renfort des législations sur le secret professionnel, commercial ou de la défense.

C'est ensuite les ordinateurs et les logiciels pour tous, la dématérialisation grâce au réseau internet et sa mobilité, les réseaux sociaux, avec une possibilité de mise en ligne ouverte en tout lieu. Les producteurs ou fournisseurs d'accès de données vont dans le même temps bénéficier, en Europe notamment, d'un droit spécifique ou *sui generis*<sup>3</sup>, inspiré du droit commun de la responsabilité civile, du droit de la concurrence déloyale ou parasitaire. Ce droit leur permet d'interdire toute extraction ou réutilisation substantielle du contenu de leur fonds de données, sans préjudice toutefois des droits privés existants sur ces données ou des autres restrictions légales d'ordre public (défense, sécurité, protection civile, etc.). Il est réservé aux producteurs qui ont fait des investissements, financiers, matériels, humains substantiels pour la création de la base et à son enrichissement. La jurisprudence retient en cela les investissements réalisés pour cette infrastructure, les moyens consacrés à la recherche des éléments existants, à leur vérification et correction et à leur intégration dans la base et non les investissements propres à la création des données<sup>4</sup>.

On notera toutefois que le bénéfice de cette protection n'est pas étendu aux organismes publics, lesquels au contraire, seront contraints par défaut d'ouvrir gratuitement leurs données suivant l'*open data*.

Ce qui caractérise pour sa part la donnée d'origine spatiale, dès la programmation du satellite, est qu'elle chemine par un réseau fermé Terre-Espace-Terre avant d'être accessible au sol. Ce cheminement est strictement gouverné par un droit public international qui associe celui de l'espace extra-atmosphérique et celui des télécommunications, complété par des législations nationales spécifiques.

En outre, rappelons que la génération de telles données exige en amont des investissements considérables, de plusieurs centaines de millions d'euros, que ce soit pour concevoir construire et lancer les satellites avec leurs instruments de détection, développer au sol le réseau des stations de contrôle, de réception et de traitement, et de gérer l'exploitation de l'écosystème jusqu'à la délivrance de la donnée.

Ces besoins ont engendré la création d'organisations dédiées pour fédérer, à l'échelle internationale ou régionale en Europe, des partenaires publics et privés de divers statuts, missions et cultures. Ces parties définissent entre elles le partage des droits sur les

---

<sup>3</sup> Directive 96/9/CE du 11 mars 1996 relative à la protection des bases de données, transposée en France par la loi n°98-536 du 1<sup>er</sup> juillet 1998. Code de la propriété intellectuelle, articles L.112-3 et L.342-1.

<sup>4</sup> Guide ouverture des données de recherche, page 19, cité ci-après.

données du futur système, dans un cadre supranational civil qui doit seulement respecter les grands principes universels du libre accès et de la circulation de l'information et du savoir.

## LA LIBERTÉ INTERNATIONALE D'OBSERVATION À DES FINS CIVILES



Figure 2 : Logo des Nations unies (source : Cnes).

Ces principes peuvent s'appuyer sur le traité du 27 janvier 1967 qui consacre la liberté de l'exploration et de l'utilisation pacifique de l'espace extra-atmosphérique y compris la Lune et les autres corps célestes avec une interdiction de toute forme de revendication d'appropriation, de juridiction ou de contrôle territorial de la part des États et donc de leurs entreprises. La question s'est posée de savoir dans quelle mesure cette ouverture, préconisée au bénéfice d'opérations sur des véhicules spatiaux ou sur des corps célestes ou autres planètes pouvait s'étendre à l'observation de phénomènes terrestres qui intéressent d'abord le droit de l'information et la souveraineté des États concernés.

La résolution de principe sur la télédétection, votée par l'Assemblée générale des Nations unies le 3 décembre 1986 (n°41/65)<sup>5</sup>, a levé une partie de l'incertitude en reconnaissant cette capacité, sans avoir à obtenir de consentement préalable de l'observé, pour autant que cette activité respecte le droit de l'espace de 1967, et les instruments pertinents de l'Union Internationale des Télécommunications (Principe III), qu'elle soit conduite à des fins d'amélioration de la gestion des ressources naturelles, d'aménagement du territoire ou de protection de l'environnement (Principes I et II) et respecte le principe de souveraineté ou les intérêts légitimes de l'État concerné (Principe IV).

On notera que cette présomption de liberté propre à la télédétection spatiale tranche avec l'observation aérienne qui demeure sujette au contrôle préalable de l'État observé. Cette différence fondamentale s'est révélée lors de la destruction d'un avion espion américain Lockheed U-2 au-dessus du territoire de l'URSS en 1960. Cet incident avait gravement relancé la tension de la guerre froide mais n'a jamais pu appuyer une action juridique de la part des États-Unis qui avait enfreint la juridiction territoriale de l'URSS.

---

<sup>5</sup> [https://www.unoosa.org/pdf/publications/st\\_space\\_11rev2F.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/publications/st_space_11rev2F.pdf)

Pour le reste, cette résolution applicable aux États et non contraignante à l'origine semble avoir acquis aujourd'hui valeur de « droit coutumier ». Elle ne préjuge pas cependant des conditions d'appropriation et de mise à disposition des données auprès des utilisateurs commerciaux ou individuels.

## LA CAPACITÉ DE RÉSERVATION ET D'APPROPRIATION DES DONNÉES SPATIALES FACE À L'OPEN DATA

Toute entité qui entend développer en propre ou en coopération un système spatial d'observation doit naturellement s'assurer qu'elle pourra en retirer un juste retour, en fonction de sa mission qu'elle soit gouvernementale ou commerciale. C'est ainsi que leurs promoteurs s'attachent à définir au préalable les mécanismes d'appropriation ou de réservation juridique des données aptes à satisfaire ce juste retour.

Le mode de réservation peut se distinguer autour de trois grands blocs de systèmes ou de missions spatiales.

### Les instruments scientifiques

Pour ces instruments embarqués, le droit consiste à réserver, sur une période limitée de quelques mois, un accès exclusif aux données pour les seuls chercheurs principaux (traduction de *principal investigator* ou PI) à savoir les équipes scientifiques ayant la mission de contribuer à la spécification de la conception et du fonctionnement des instruments d'observation à embarquer sur le satellite puis de réaliser les premières expériences et publications à partir de ces données. Ces PI sont sélectionnés par les agences spatiales chargées de développer et opérer le système spatial, en coopération internationale, sur des fonds de recherche. En contrepartie de cette période d'accès privilégié, les PI vont devoir contribuer à la calibration et à la validation des données relativement aux phénomènes observés *in situ*. À l'issue de cette période, dont la durée aujourd'hui tend à se réduire sous la pression de la communauté américaine de recherche, les données deviennent accessibles librement et gratuitement à tous les chercheurs sans discrimination. Ce régime qui déroge pour une durée limitée à l'*open data* reste cohérent avec le droit commun de la recherche qui autorise l'organisme à ne pas divulguer les données non achevées ou liées à un contrat avec un tiers non soumis à une obligation de service public<sup>6</sup>.

### Missions spatiales contribuant à des services d'intérêt général (météorologie, océanographie, protection civiles, navigation, etc.)

Elles sont théoriquement soumises doublement au régime de l'*open data*, soit au titre de l'ouverture des données publiques en général dans le sillage de la directive PSI de 2017<sup>7</sup> soit, pour les données géographiques et environnementales, suivant la directive INSPIRE

<sup>6</sup> Cf. MESRI (2017), « Ouverture des données de recherche | Guide d'analyse du cadre juridique en France – V2 », <https://www.ouvrirelascience.fr/ouverture-des-donnees-de-recherche-guide-danalyse-du-cadre-juridique-en-france-v2/>, pp. 8 et 21.

<sup>7</sup> La directive dite PSI pour "Public Sector Information" transposée par la loi du 28 décembre 2015 (dite Walter) relative à la gratuité et aux modalités de la réutilisation des informations du secteur public, complétée par la loi du 7 octobre 2016 pour une République numérique (dite Axelle Lemaire) pour une mise en ligne par défaut des données publiques, l'utilisation des formats favorisant l'interopérabilité des systèmes et données et le droit à la portabilité, à savoir la possibilité de récupérer une partie de ses données personnelles dans un format lisible par une machine.

de 2007<sup>8</sup>. En réalité ces programmes en Europe sont d'origine intergouvernementale et régis par des instruments juridiques *ad hoc* à valeur supranationale<sup>9</sup> et plus récemment intégrés dans le programme de l'Union européenne suivant une compétence partagée spécifique à la recherche et à l'espace (art. 4.3 et 189 du TFUE), et depuis peu sous sa propre agence spatiale (EUSPA).

Parmi ceux-ci, Copernicus et sa filière de satellite Sentinel assure le développement et la continuité opérationnelle des grands programmes probatoires civils d'observation développés à l'origine par les agences spatiales dans un cadre intergouvernemental. La coordination et la gestion du programme sont assurées par la Commission européenne en partenariat avec l'Agence spatiale européenne, les membres de l'Union européenne et leurs agences.

L'Union s'intéresse également à la connaissance et à surveillance du trafic spatial (SSA et SST) et à l'élaboration de législations associées.

On notera enfin que lors du dernier sommet européen conjoint réuni en novembre 2023 à Séville, les États membres de l'agence spatiale européenne (ESA) se sont accordés pour faire de l'observation de la Terre une priorité des investissements futurs face au changement climatique. Ceci renforce également les actions concrètes du "Space for Climate Observatory", créé en 2019 à l'initiative du Cnes, afin de croiser les données spatiales avec les observations *in situ* pour produire des outils d'analyse et de simulation qui permettent aux populations de s'adapter localement.

En réalité les politiques de données de ces programmes opérationnels d'intérêt général ont convergé autour de trois régimes : les données grand public accessibles à tous gratuitement et librement réutilisables depuis des sites dédiés ; les données interdites car portant atteinte à des secrets protégées par la loi (défense, sûreté sécurité, professions) ; et celles dont la communication est autorisée sous réserve de ne pas porter atteinte à certains droits publics ou privés comme la protection du potentiel scientifique et technique (PPST), les zones à accès restrictifs, la propriété intellectuelle et les engagements conclus avec un tiers non soumis à une obligation de service public et enfin le respect de la personne et de la vie privée. Ces restrictions peuvent consister en un accès différé ou une qualité dégradée de la donnée.

## Autres missions à vocation commerciale

Cette catégorie regroupe tous les anciens systèmes publics civils privatisés et les nouveaux systèmes privés. Ils relèvent de la liberté du commerce ou de l'industrie et de l'accès au marché avec les limites habituelles du droit de la concurrence, des aides, marchés ou concessions publics, et bien évidemment de la protection de la vie privée pour les données à très haute résolution<sup>10</sup>. S'y ajoutent les restrictions propres aux opérations et données d'origine spatiale. Ces dernières visent à assurer la sécurité des biens, des personnes et de l'environnement et le respect des intérêts de la sécurité et de la défense.

---

<sup>8</sup> Acronyme issu de l'anglais INfrastructure for SPatial InfoRmation in the European community, n°2007/2/CE du 14 mars 2007.

<sup>9</sup> Le programme d'observation de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), METOSAT pour la météorologie conduit par une EUMETSAT, JASON et SWOT pour l'altimétrie, l'océanographie et d'hydrologie en coopération avec les États-Unis, COSPAS-SARSAT pour la détection et la localisation des alertes de détresse qui regroupe les États-Unis, la Russie, le Canada, la France et maintenant l'UE, etc.

<sup>10</sup> Suivant la loi du 6 janvier 1978 dite « Informatique et libertés » créant son autorité indépendante la CNIL, modifiée par la loi relative à la protection des données personnelles promulguée le 20 juin 2018 en transposition du règlement général sur la protection des données (RGPD), du 27 avril 2016.

À cet égard, la France a instauré avec la loi du 3 juin 2008 un système de licence préalable qui permet à l'État d'autoriser puis de contrôler toutes les opérations spatiales (lanceur et satellite) afin de garantir leur sécurité et l'indemnisation des tiers-victimes en cas d'accident. Elle y a ajouté un chapitre dédié aux données d'origine spatiale qui oblige leur exploitant, à savoir celui qui programme l'instrument d'observation ou reçoit les données, à se déclarer auprès de l'autorité administrative, le SGDSN, afin que cette dernière puisse lui notifier directement les éventuelles restrictions à leur accès, archivage et diffusion.

La modification par l'ordonnance du 22 février 2022 a étendu la définition des données d'origine spatiale ne visant initialement que l'observation de la Terre. Ce régime s'étend désormais à toutes les « données d'observation, d'interception de signaux ou de localisation acquises depuis l'espace et provenant de la Terre, d'un corps céleste, d'un objet spatial ou de l'espace ». L'extension vise les données propres à l'espace, devenues stratégiques pour la surveillance du trafic, la prévision des collisions, la prévention des déchets spatiaux, voire l'implantation de bases extra-terrestres habitées en permanence. Cette révision instaure également un cadre de réquisition, amiable par convention ou par autorité, afin de permettre à la défense nationale, de bénéficier de données ou de services d'origine spatiale ou d'un transfert temporaire de contrôle du satellite privé.

L'observation de la Terre privée garde donc toute sa spécificité par rapport au droit des affaires et de l'information, d'autant qu'un même satellite peut être conçu pour être exploité en même temps par plusieurs catégories d'utilisateurs, selon un modèle initié là aussi par le Cnes pour la filière Pléiades lancée à partir de 2011. Cette mixité fait cohabiter plusieurs canaux, le canal défense prioritaire pour un certain quota de données, le canal civil institutionnel avec une tarification réduite pour des services d'intérêt général et le canal commercial ouvert au prix du marché.

La communauté de l'observation spatiale, publique et privée, a donc su s'organiser pour protéger l'innovation et la continuité de sa filière grâce à un cadre juridique original alliant réservation, ouverture et tarification différenciée. On retiendra toutefois que ce droit spécifique s'efface dès que la donnée est mise en ligne et devient libre et gratuite.

## CONCLUSION -

### LES NOUVEAUX ENJEUX DU *NEW SPACE*

Suivant la privatisation de l'industrie et des opérateurs spatiaux qui s'achève dans les pays de l'OCDE à la fin du siècle dernier, s'est développé l'ère de l'internet mobile, avec une génération exponentielle de données et d'applications géo-spatialisées devenues utilisables par tous et en tout lieu, le tout sous la domination des Gafam<sup>11</sup> et de la Silicon Valley, bientôt rejoints par de grands acteurs chinois.

Les géants du numérique ont également investi la filière spatiale à l'instar d'Elon Musk, Jeff Bezos, avec une ambition de maîtriser toute la chaîne de la valeur, de la conception à la fabrication et aux opérations de véhicules spatiaux, à la fourniture des données et leurs services associés sur Terre, et bientôt la délivrance de services infra spatiaux et l'installation de bases habitées permanentes sur la Lune ou Mars.

Cette nouvelle économie a engendré de nouvelles formes de soutiens gouvernementaux comme le préachat de services ou de données. Ces formules peuvent s'exonérer des exigences traditionnelles des agences spatiales sur la conception des systèmes mis en œuvre ou sur l'utilisation de ceux-ci à d'autres fins.

---

<sup>11</sup> Acronyme des premiers opérateurs historiques de l'industrie numérique : Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft, etc.

Ces entrepreneurs sont ainsi devenus les premiers bénéficiaires de l'*open data*, à l'échelle de la planète, par leur immense capacité de siphonage des données publiques et le privilège de pouvoir les enrichir par d'autres sources privées, sous réserve d'anonymisation, à savoir celles qui transitent dans leurs moteurs de recherches, leurs applications mobiles ou leurs services. En retraitant et fusionnant toutes ces données, ils peuvent aussi requalifier le contenu, en extraire l'information utile, effacer l'originalité des sources et avec elle le droit des auteurs concernés, voire contourner toute restriction réglementaire sur la donnée initiale. Ceci à terme peut conduire à démotiver la création, épuiser la concurrence et à terme l'investissement dans la filière spatiale.

Ces mêmes entreprises se tournent maintenant vers le marché en plein essor de l'intelligence artificielle générative, en s'appuyant sur un gisement immense de données qui va continuer à s'enrichir de jour en jour. Cette dominance menace plus particulièrement les opérateurs de la donnée spatiale, laquelle reste très coûteuse à générer, difficile à protéger et dont l'investissement doit bénéficier d'un juste retour. Cette évolution devrait conduire à un réexamen des politiques d'*open data* telles que mises en œuvre au cours des dernières décennies dans le monde occidental.

# Nanosat : une révolution de petite taille

Par Imane EL KHANTOUTI et Didier DONSEZ

Centre spatial universitaire de Grenoble (CSUG)

L'avènement des nanosatellites a transformé et démocratisé l'accès à l'espace en présentant une option plus économique et modulaire par rapport aux satellites traditionnels. Ces satellites compacts et normalisés sont utilisés dans divers domaines, de l'observation de la Terre aux télécommunications, alimentant ainsi la dynamique du *New Space*. Le déploiement des nanosatellites est réalisé par des acteurs privés et des institutions académiques. Cette approche se caractérise par des technologies légères, des cycles de développement courts, l'agilité dans la gestion de projet et une tolérance accrue à l'échec, se distinguant ainsi de l'approche plus classique de l'*Old Space*. L'écosystème du *New Space* englobe une variété d'acteurs, des équipementiers, aux transporteurs, aux lanceurs, aux agences gouvernementales et aux universités. Malgré les opportunités offertes par les nanosatellites, des défis persistent, notamment la gestion des débris spatiaux, les interférences radio dans les communications et les menaces de cyberattaques.

## INTRODUCTION

Avant d'examiner de plus près les nanosats, commençons par un peu de contexte. L'histoire des nanosats a débuté en 1999 en tant qu'initiative collaborative entre Jordi Puig-Suari, professeur à l'Université d'État polytechnique de Californie (Cal Poly), et Bob Twiggs, professeur au Laboratoire de développement de systèmes spatiaux de l'Université Stanford (SSDL). L'objectif initial de ce projet était de démocratiser l'accès à l'espace pour la communauté scientifique universitaire. Le premier CubeSat a été lancé en orbite en 2003, marquant le début d'une ère nouvelle dans l'exploration spatiale permettant à de nombreuses universités, *start-up*, petites et moyennes entreprises, ainsi que des pays en développement de disposer de programmes spatiaux basés sur les nanosats<sup>1</sup>. Ceci en profitant de la standardisation et de la miniaturisation des composants et des services proposés par la multitude des acteurs privés *New Space* qui ont émergé dans les années 2000 sur le marché spatial.

Le contraste entre le *New Space* et le *Old Space* marque l'évolution dynamique de l'industrie spatiale, présentant des différences notables en termes de technologies, modèles économiques et mentalités. L'approche technologique de l'*Old Space* était historiquement caractérisée par des technologies coûteuses et robustes, principalement développées par des agences gouvernementales, avec des missions souvent planifiées sur de longues périodes avec des budgets colossaux.

---

<sup>1</sup> NASA (revision dated October 2017), "CubeSat 101 – Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers", 96 pages, [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa\\_csli\\_cubesat\\_101\\_508.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf)

En revanche, le *New Space* adopte des technologies nouvelles, plus légères et abordables, utilisant des composants commerciaux parfois réutilisables comme certains lanceurs et des approches innovantes. Le *New Space* recherche un *time-to-space* réduit avec des cycles plus courts et avec l'acceptation plus importante de l'échec. Les missions *New Space* sont lancées par des entreprises privées, des *start-up* opportunistes et des acteurs académiques cherchant à rentabiliser l'accès à l'espace et mettant l'accent sur la commercialisation des services spatiaux.

## LES NANOSATELLITES

Les nanosats, également appelés nanosatellites, sont de petits satellites artificiels de taille réduite conçus pour effectuer diverses missions dans l'espace comme les télécommunications, l'observation de la Terre et de l'Espace, ou bien encore des expériences scientifiques en micro-gravité.

Ces satellites sont caractérisés par leurs dimensions compactes et standardisés et leur poids relativement faible par rapport aux satellites conventionnels également appelé *fatsats*<sup>2</sup>. Les Cubesats sont une catégorie populaire de nanosatellites. Ils sont normalisés en unités cubiques (U), où 1U équivaut à 10 x 10 x 10 centimètres et peut peser jusqu'à 1,33 kg. Les Cubesats peuvent être assemblés en plusieurs unités, par exemple, 2U, 3U, 6U et jusqu'à 16U voir 48U. Les PocketQubes sont encore plus petits que l'unité d'un cubesat. Ils sont normalisés en unités p, où 1 p équivaut à 5 x 5 x 5 centimètres et peut peser de 0,1 à 0,15 kilogramme. Il existe des formats encore plus compacts tels les FemtoSats (1F équivaut 3 x 3 x 3 centimètres) ou bien encore les ThinSats dont les dimensions, qui sont celles d'une tranche de pain de mie, sont compatibles avec les *Pods* des cubesats 3U.

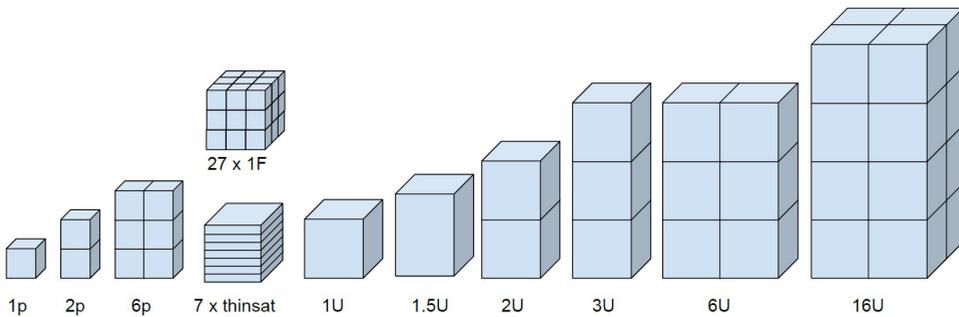


Figure 1 : Exemples de dimensions de nanosats : PocketQube, Thinsat, Femtosat, Cubesat (© Didier Donsez et Imane El Khantouti).

L'avantage majeur des nanosatellites réside dans leur coût réduit par rapport aux *fatsats*. Leur conception modulaire et leur capacité à partager des lanceurs avec d'autres charges utiles contribuent également à réduire les coûts de lancement et des mises en orbite sur des orbites basses conventionnelles principalement, les orbites héliosynchrones (SSO) et ISS. Leur construction repose sur l'assemblage de composants sur étagère dont d'autres exemplaires ont déjà servi dans des satellites ayant volé (*flight heritage*) ou non, disponibles chez des nombreux fournisseurs concurrents. La durée de vie des nanosats varie selon la mission et la robustesse des composants aux aléas de

<sup>2</sup> En comparaison, la masse d'un des 3 200 satellites Starlink est de 260 kg, 6 200 kg pour télescope James Webb et 420 000 kg pour la Station spatiale internationale (ISS).

la météo spatiale. Les missions courtes durent quelques mois. La durée des missions prolongées dépasse la décennie.

Le coût de développement d'un nanosat est encore réduit quand il est développé pour une constellation homogène de plusieurs nanosats. À titre d'exemple, Planet Labs Inc. a mis en orbite successivement plusieurs constellations de cubesats pour l'observation de la Terre. La première constellation Flock 1 est constituée des 28 cubesats 3U pesant 5 kg lancés en 2014. La constellation de l'opérateur français Kineis pour l'Internet des Objets par Satellite est composée de 25 cubesats 16U.

Selon la base de données Nanosats Database, au 30 octobre 2023, il y avait plus de 2 400 nanosatellites lancés dont 2 213 cubesats, dont 12 à usage interplanétaire. Connaissant une croissance remarquable, 82 pays et 682 entreprises sont impliqués dans des missions de nanosatellites. 60 % de nanosats mis en orbite sont pour des applications de télécommunication<sup>3</sup>.

## LES APPLICATIONS

Les nanosatellites, grâce à leur conception compacte et économique, partagent des similitudes d'utilisation avec les satellites de plus grande taille, touchant divers domaines d'application.

Dans le domaine de l'observation de la Terre, les nanosatellites sont équipés de systèmes d'imagerie multi-spectrale et hyperspectrale, de spectromètres ainsi que de capteurs infrarouges. Ces technologies permettent d'étudier les changements environnementaux, de fournir des données météorologiques précises et de réaliser une cartographie détaillée de la surface terrestre.

En ce qui concerne les télécommunications, les nanosatellites offrent un large éventail de services, notamment l'accès à Internet à haut débit, l'Internet des objets (IoT), la surveillance des avions et des navires *via* les systèmes de suivi ADSB et AIS ou les services d'urgence *phone-to-sat*, ainsi que la distribution quantique de clés cryptographiques<sup>4</sup> pour assurer une communication sécurisée.

Sur le plan scientifique, ces satellites compacts sont utilisés pour des missions diverses telles que l'étude de la météo de l'espace, les études en microgravité telles que la croissance de cristaux de molécule pharmaceutiques, des végétaux et des champignons ou la fabrication additive. D'autres missions scientifiques concernent l'astronomie en capturant des données sur des phénomènes célestes ou bien l'exploration interplanétaire pour des missions spécifiques vers d'autres planètes ou corps célestes (*deep space*).

## LA GESTION DE PROJET NANOSATELLITE

Dans l'industrie spatiale, les projets suivent une méthodologie bien définie, articulée autour de sept phases conformes aux normes européennes. La phase 0 initie le processus par une analyse approfondie de la mission, évaluant les besoins, les coûts et la faisabilité. La phase A précise ces besoins pour établir la viabilité du projet, tandis que la phase B

---

<sup>3</sup> KULU E. (2023), "Small Launchers - 2023 Industry Survey and Market Analysis", 74<sup>th</sup> International Astronautical Congress (IAC 2023), Baku, Azerbaijan, 2-6 October 2023, [https://www.newspace.im/assets/Small-Launchers-2023\\_Erik-Kulu\\_IAC2023.pdf](https://www.newspace.im/assets/Small-Launchers-2023_Erik-Kulu_IAC2023.pdf)

<sup>4</sup> KERSTEL E., GARDELEIN A., BARTHELEMY M., The CSUG Team, FINK M., JOSHI S. K. & URSIN R. (2018), "Nanobob: a CubeSat mission concept for quantum communication experiments in an uplink configuration", *EPJ Quantum Technology*, 5(1):6, <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-018-0070-7>

affine le concept avant une évaluation préliminaire. La conception détaillée prend forme lors de la phase C, suivie par la phase D axée sur la production, l'assemblage et les tests du matériel. Enfin, la phase E se concentre sur les opérations de lancement, approvisionnement et l'exploitation du satellite répondant aux besoins identifiés pour achever les objectifs de la mission. Chaque phase est validée par une revue avant de passer à la suivante<sup>5</sup>.

Dans une équipe de mission nanosatellite, plusieurs rôles clés contribuent à la réussite du projet. Le chef de projet, souvent nommé *mission manager* ou *project manager*, assume la responsabilité globale. Un responsable qualité assure la conformité aux normes de l'industrie et aux réglementations (notamment la Loi sur les Opérations Spatiales pour la France), tandis que l'ingénieur système supervise le développement du système spatial en garantissant la conformité aux exigences spécifiques. Des experts en différents domaines tels que la mécanique, l'informatique, les télécommunications, l'électronique embarquée ou encore la transmission, jouent un rôle crucial. D'autres experts peuvent intervenir selon les objectifs de la mission comme les opticiens. L'équipe peut faire appel à un support juridique et réglementaire puisque la mission doit être conforme aux lois nationales et réglementations internationales portant sur des opérations spatiales, et devoir déclarer l'exploitation des données d'origine spatiale et procéder à la déclaration des fréquences pour les télécommunications.

Face aux contraintes temporelles et budgétaires des projets nanosatellites, l'agilité devient un impératif pour ces équipes, nécessitant une flexibilité et une adaptabilité constante, notamment dans un contexte où les reports de lancement sont fréquents et aussi l'évolution des normes réglementaires<sup>6</sup>. Dans le cadre d'une constellation lancée en plusieurs lots, l'agilité devient nécessaire du fait qu'il est parfois nécessaire de reprendre la mission sur des phases C et D, fort des expériences des mises en orbite précédentes.

## L'ARCHITECTURE D'UNE PLATEFORME CUBESAT

Les Cubesats, en tant que satellites miniatures, intègrent plusieurs sous-systèmes pour assurer leurs missions dans l'espace<sup>7</sup>. Voici une liste des principaux sous-systèmes présents dans un CubeSat :

- Charge utile (*Payload* en anglais) : le cœur de la mission, elle est adaptée aux objectifs spécifiques du projet, elle peut être une caméra, un spectromètre, une carte de télécommunication et antenne à gain dédiée.
- Ordinateur de Bord (OBC) : il est le cerveau du CubeSat, responsable du contrôle, de la gestion des charges utiles, de la navigation et de la synchronisation des opérations à bord.
- Contrôle Thermique : il permet de surveiller et réguler la température de tous les composants du satellite, en définissant une plage de température de vol autorisée

---

<sup>5</sup> NASA (revision dated October 2017), "CubeSat 101 – Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers", 96 pages, [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa\\_csl\\_cubesat\\_101\\_508.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2017/03/nasa_csl_cubesat_101_508.pdf)

<sup>6</sup> EL KHANTOUTI I. (2023), "Guidelines for Processes and methods for a successful space mission in a very tight schedule for project programme managers", 74<sup>th</sup> International Astronautical Congress (IAC 2023), Baku, Azerbaijan, 2-6 October 2023, <https://iafastro.directory/iac/paper/id/79681/abstract-pdf/IAC-23,D5,1,4,x79681.brief.pdf?2023-03-31.19:38:52>

<sup>7</sup> OLIVA A. A., SCHAALMAN G. P. & STALEY S. L. (2011), "Design and Analysis of Subsystems for a CubeSat Mission", <https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/2756>

pour chaque élément, garantissant leur résistance aux conditions thermiques extrêmes de l'espace.

- Alimentation électrique : composé de panneaux solaires fixes ou déployables et de batteries rechargeables, ce sous-système garantit l'autonomie énergétique du CubeSat en générant et stockant l'électricité nécessaire aux opérations diurnes et nocturnes des autres sous-systèmes.
- Communication : il comprend les équipements de transmission et de réception de données, tels que les cartes multi-bande et les antennes fixes ou déployables, permettant d'établir les liens entre le nanosat et le réseau de stations terrestres ou d'autres satellites dans le cas des liaisons inter-satellites
- Déploiement : il est responsable du déploiement des antennes, des panneaux solaires ou d'autres équipements une fois le CubeSat en orbite.
- Détermination et de contrôle de l'environnement (EDCS) : il surveille les paramètres environnementaux tels que la température, la pression, le rayonnement, etc., afin de garantir le bon fonctionnement du satellite.
- Navigation et de positionnement : intégrant un récepteur GNSS, une horloge atomique miniature pour les missions extra-terrestres ou encore des capteurs stellaires, il assure le positionnement précis du CubeSat dans le temps et dans l'espace.
- Contrôle d'altitude et détermination de l'orientation (ADCS ou SCAO) : ce sous-système comprend des capteurs, des actionneurs et des algorithmes permettant de contrôler et stabiliser l'orientation du CubeSat dans l'espace. Les actionneurs sont principalement des roues à réaction et de magnéto-coupleurs utilisant le champ magnétique terrestre.
- Propulsion : il peut inclure des moteurs, des propulseurs chimiques ou électriques ou des systèmes de contrôle de la poussée, pour ajuster l'orbite, effectuer des manœuvres d'évitement ou de changement d'orbite ou maintenir la stabilité du satellite. Ce système reste néanmoins exceptionnel dans les CubeSats les plus petits.
- POD (Picosatellite Orbital Deployer) : c'est une structure modulaire externe, souvent attachée au transporteur spatial, permettant de le transporter dans le lanceur puis d'éjecter un ou plusieurs nanosats simultanément sur l'orbite choisie.

Les sous-systèmes sont assemblés au sein d'une plateforme assurant le bon fonctionnement du CubeSat. Ils sont reliés entre eux par l'interface mécanique et électrique de la plateforme. Cette interface suit plus ou moins un standard pour faciliter l'utilisation des sous-systèmes en provenance de plusieurs fabricants. Ces fabricants proposent souvent des sous-systèmes offrant une interface de type PC104. L'OBC communique avec les autres sous-systèmes en utilisant divers moyens tels qu'Ethernet, CAN, UART, RS-485 RS-422, SPI, I2C, etc. Ces connexions peuvent être également établies à l'aide de nappes flexibles ou de câbles coaxiaux, en particulier lorsqu'ils sont reliés à des antennes externes.

Le dimensionnement de la plateforme (structure, panneaux solaires, batteries et antennes) dépend des dimensions de la charge utile de la mission et des besoins en électricité de celle-ci et des autres sous-systèmes (principalement ADCS, communication, thermique, OBC). À titre d'exemple, les panneaux solaires d'un CubeSat 3U produisent de 5 à 7 W.

La plateforme et les sous-systèmes sont soumis à des contraintes de vibration, de température et de compatibilité électromagnétique lors de la phase de lancement et de mise en orbite par le transporteur. Dès qu'ils se trouvent en orbite, les sous-systèmes sont soumis à la fois aux changements extrêmes de température et aux radiations spatiales. Ces contraintes impliquent une qualité de fabrication des sous-systèmes par l'utilisation des composants mécaniques et électroniques *a minima* de qualité automobile et militaire.

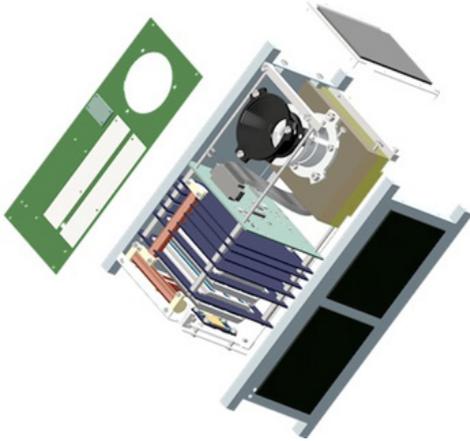


Figure 2 : Vues du cubesat 2U AMICAL (Identifiant NORAD 46287) du Centre spatial universitaire de Grenoble pour l'observation des aurores boréales en orbite basse (© CSUG, Université Grenoble Alpes).

Il faut s'assurer également que les matériaux ne dégazent pas ou ne cristallisent pas dans le vide. L'utilisation des composants durcis aux radiations (radiation hardened) renchérit beaucoup le coût des systèmes. Les tests environnementaux (*a minima* vibration, vide thermique, CEM) planifiés dans la phase C du projet limitent des risques pour la mission.

Dans les cas des PocketQubes, Thinsats et FemtoSats, l'architecture est complètement intégrée, du fait des contraintes de taille.

## LES COMMUNICATIONS

Les nanosatellites utilisent divers moyens de communication qui servent à la fois à leur pilotage par l'envoi des commandes des communications de l'opérateur et la réception de télémétrie (appelé TM TC), et au transfert des données de la charge utile. Leur taille réduite impose des contraintes en termes de consommation énergétique qui influent sur le débit des transferts. Les nanosats en orbite basse ne communiquent que de manière transitoire avec le réseau de stations terrestres ce qui réduit le volume de données échangés.

Les communications utilisent des liaisons radiofréquences (RF). Les liaisons radiofréquences peuvent se faire au travers d'antennes omnidirectionnelles ou bien directives à polarisation circulaire. L'utilisation d'antennes directives impose l'usage d'un ADCS. Les bandes de fréquence utilisées par les opérateurs de CubeSat sont très majoritairement les bandes UHF (400 à 438 MHz, la bande S (2,2-2,4 GHz) et les bandes X (8,2 Ghz, 8,4 Ghz, 10,5 Ghz). L'usage de ces bandes est sujet à déclaration auprès des agences nationales de régulation des fréquences (ANRF en France) qui se coordonnent au sein de l'UIT/IUT (Union Internationale des Télécommunications). Certaines bandes de fréquence sont gérées par l'AMSAT, l'association des radio-amateurs satellite. Les communications Laser (LaserCom) offriront des débits importants et ne nécessitent pas de déclarations. Cependant, elles requièrent un ADCS précis couplé avec un mécanisme de stabilisation optique (type gimbal...).

Les communications sont établies entre le nanosatellite (appelé bord) et des stations terrestres (appelé sol) pour établir des liaisons montantes (sol-bord) et descendantes

(bord-sol). Plusieurs entreprises gèrent des réseaux de stations terrestres dans plusieurs téléports répartis sur la Terre. Les communications peuvent être établies également avec les satellites de constellations de télécommunication (MEO, GEO) comme Iridium ou Globalstar. Les liaisons inter-satellites (ISL pour Inter-Satellite Link) sont utilisées notamment pour réaliser des constellations de télécommunication globale à faible latence. Les routages dans ces constellations sont dynamiques car les liaisons apparaissent et disparaissent rapidement avec le déplacement des nanosatellites.

## LES ACTEURS *NEW SPACE*

Le *New Space* est caractérisé par une diversité d'acteurs, allant des équipementiers de sous-systèmes et de plateformes, des opérateurs, d'agences de facilitation (*broker*) dans la gestion de projet nanosatellite, des transporteurs et des lanceurs, des téléports aux assureurs et agences gouvernementales et de régulation. Ils contribuent collectivement à l'essor de l'exploration spatiale. Les nouvelles approches économiques, les modèles de services innovants comme le partage d'un lanceur par un grand nombre de satellites, le partage d'une nanosat par les charges utiles de plusieurs clients et la collaboration au sein des communautés ouvertes (*open source*) sont des éléments clés de cette dynamique. Cette approche permet ainsi de réduire drastiquement le coût de lancement par kilogramme.

Les universités participent également à la dynamique *New Space* en formant les techniciens et ingénieurs qui feront carrière dans l'industrie astronautique. Plusieurs formations existent aujourd'hui en France, en Europe et dans le monde. Nous pouvons citer l'ISAE SupAero et l'ensemble du groupe ISAE et l'École de l'Air et de l'Espace qui sont des acteurs phares dans la formation en France. L'International Space University (ISU) qui est située à Strasbourg est un acteur de renommée internationale dans la formation au milieu spatial en général.

Une douzaine d'universités et écoles d'ingénieurs françaises ont établi des Centres spatiaux universitaires (CSU) dans le but de guider les étudiants vers une carrière dans l'industrie spatiale au travers du domaine émergent du *New Space*. Ces centres privilégient une approche pédagogique axée sur des projets concrets, impliquant le développement de missions nanosatellites en collaboration avec des chercheurs de laboratoires de recherche. Le financement de ces missions provient d'appels à projets ainsi que du mécénat d'entreprises géré par les fondations des établissements universitaires. Elles collaborent entre elles et avec le Cnes qui a développé le programme spécifique Nano-Lab-Academy dans le but d'accélérer le développement des missions des CSU.

## CONCLUSION

Les nanosatellites, grâce à leur taille réduite et à leur coût abordable, sont polyvalents et contribuent de manière significative à des domaines aussi variés que l'observation terrestre, la recherche scientifique spatiale et les télécommunications avancées. Les constellations de nanosats de télécommunication sont maintenant partie prenante de l'architecture des futurs réseaux 6G pour obtenir une couverture totale du globe terrestre sans aucune zone blanche.

L'industrie et les recherches sur les nanosatellites sont très dynamiques et prennent une part de plus en plus grande dans les manifestations internationales comme l'International Astronautical Congress (IAC). Cependant, de nombreux défis doivent être traités par les acteurs du *New Space* incluant les agences spatiales, les gouvernements et les régulateurs.

La multiplication des lancements entraîne rapidement une accumulation de débris et de satellites non fonctionnels ou non manœuvrables en orbite. Ceux-ci persistent en orbite

pendant plusieurs années, voire des décennies, ce qui augmente le risque de collision avec d'autres satellites. Les agences spatiales lancent des programmes de recherche visant à sécuriser le trafic des objets en orbite et à mettre en place des mesures pour « nettoyer » l'orbite terrestre des débris spatiaux. Certains opérateurs de lanceurs exigent désormais des opérateurs de satellites qu'ils démontrent la capacité de désorbitation de leurs satellites en moins de 5 ans, notamment par l'intégration de sous-systèmes de propulsion.

L'augmentation de la densité en orbite basse génère une demande croissante en communication radiofréquence. Les opérateurs de nanosatellites sont de plus en plus en concurrence pour l'utilisation des fréquences radio spatiales, entraînant ainsi une multiplication des interférences lors des transmissions.

Comme tout système informatique, le nanosatellite est exposé au risque des cyberattaques. Un défaut dans le logiciel embarqué du nanosatellite peut être exploité par des hackers privés ou gouvernementaux pour corrompre sa mission ou pour en prendre le contrôle et donc sa possession définitive. Des agences lancent des concours sur certains de leurs satellites comme le Hack-A-Sat de l'US Air Force pour découvrir les potentiels faiblesses. De plus, l'avènement des ordinateurs quantiques annonce des menaces pour les échanges sécurisés des satellites pour lesquels le logiciel de bord ne peut être mis à jour afin d'ajouter les nouveaux algorithmes cryptographiques résistants (aussi appelé Post-quantum Cryptography) en cours de standardisation par le NIST.

# Une technologie de rupture pour la détection et la géolocalisation de navires en mer

Par Rachid NEDJAR

Directeur marketing Unseenlabs

Et Maël TORCA

Chargé de communication Unseenlabs

Alors que les activités humaines impactent de plus en plus notre planète, nos mers et océans font face à des défis considérables : protection de la biodiversité, réchauffement climatique, conflits entre nations et multiplication des activités illégales (piraterie, surpêche, trafic de matières illicites, pollution...) difficiles à contrôler.

Malgré les réglementations, les quotas et les contrôles, les systèmes de sécurité maritime conventionnels montrent leurs limites et ne fournissent pas une vue exhaustive des activités humaines en mer, et de leurs conséquences parfois néfastes.

En effet, les zones maritimes à protéger sont très vastes, souvent loin des côtes et les systèmes de sécurité dits coopératifs (AIS<sup>1</sup>, VMS<sup>2</sup>) peuvent être désactivés, ou manipulés.

Unseenlabs a mis au point une technologie de détection radiofréquence par satellite pour détecter, géolocaliser et suivre n'importe quel navire en mer coopératif ou pas, à tout moment du jour ou de la nuit, quel que soit l'endroit du globe et les conditions météorologiques.

Cette capacité, pleinement opérationnelle depuis 5 ans, offre une solution novatrice pour la préservation des océans et la sécurité mondiale, et ouvre de nouveaux horizons pour la surveillance maritime depuis l'espace. L'objectif de cet article est de montrer comment la technologie d'Unseenlabs révolutionne la surveillance maritime.

## LES OCÉANS ET LA SURVEILLANCE MARITIME

Dans un monde où les activités humaines influencent profondément notre planète, les océans sont au cœur des enjeux liés à la biodiversité, à l'impact environnemental et climatique, aux tensions géopolitiques, et à la prolifération des activités illégales difficilement contrôlées et contrôlables.

<sup>1</sup> AIS : Automatic Identification System (<https://www.imo.org/fr/OurWork/Safety/Pages/AIS.aspx>).

<sup>2</sup> VMS : Vessel Monitoring System (<https://www.wcpfc.int/vessel-monitoring-system>).

Les océans couvrent près de 72 % de la surface de la planète, représentent plus de 90 % de l'habitat du vivant et jouent un rôle essentiel dans la production de notre oxygène (50 %), la captation du CO<sub>2</sub> (25 %), l'alimentation, le commerce mondial, etc.

Ils soutiennent par ailleurs directement la vie de plus de 38 millions de personnes grâce à la pêche<sup>3</sup>, tandis que 80 % de la valeur du commerce mondial transite par voie maritime, et que près de 99 % du réseau internet mondial repose sur des câbles sous-marins.

Pourtant, les espaces maritimes sont le théâtre d'activités illégales (trafic de drogues, d'armes, contrebande, piraterie) et leurs écosystèmes sont aujourd'hui gravement impactés par une pollution croissante et une baisse préoccupante de biodiversité (faune et flore) : avec près de 30 % des stocks halieutiques mondiaux surexploités, la pêche non déclarée ou illégale engendre l'équivalent de 10 à 23 milliards de dollars en revenus illicites par an, soit environ 15 % de l'ensemble des revenus générés par la pêche dans le monde.

La surveillance maritime apparaît comme la réponse la plus appropriée pour aborder les divers enjeux rencontrés dans la protection mondiale de l'océan. Ainsi, elle répond à plusieurs problématiques :

- la protection de l'environnement avec la lutte contre la pollution en mer (dégazage), la surpêche ou la pêche illégale ;
- la surveillance et la sécurisation des côtes, eaux territoriales et zones économiques exclusives (ZEE) ainsi que la lutte contre la contrebande ou les actes de piraterie dans certaines zones sensibles du globe ;
- les recherches et secours pour intervenir plus rapidement et sauver des vies ;
- l'optimisation des trajets et des chargements pour les compagnies maritimes, les ports et les acteurs de la logistique ;
- la protection d'actifs en mer dans le domaine des énergies offshore (fossiles, éoliennes, etc.) ou des infrastructures stratégiques en mer.

Une prise de conscience de ces défis majeurs pour notre planète a permis la mise en place de réglementations, de quotas et de contrôles successifs qui ont aidé à limiter la progression de la pêche illégale.

On peut citer le PSMA<sup>4</sup> (accord sur les mesures du ressort de l'État du port, ratifié par 30 États en 2016, dont l'UE et les États-Unis) et soutenu par la FAO. Depuis le premier One Ocean Summit qui s'est tenu à Brest en Février 2022, cet accord rassemble aujourd'hui 71 États dans le monde.

Pour autant, bon nombre d'espèces marines (poissons ou mammifères) ainsi que des écosystèmes sont encore vulnérables ou menacées d'extinction avec des conséquences directes et indirectes irréparables.

En effet, les réglementations internationales reposent sur la volonté (ou non) des États d'y souscrire et les moyens de contrôle et d'intervention restent très largement insuffisants au regard de l'immensité des zones à surveiller.

En outre, de nombreux acteurs, qu'ils soient étatiques, portuaires, maritimes, ou des ONG, utilisent encore majoritairement des données d'identification et de géolocalisation

---

<sup>3</sup> L'industrie de la pêche dans le monde représente près de 38 millions d'emplois directs déclarés en 2020 dans le monde (source : Statista 2022, <https://www.statista.com/statistics/248768/number-of-persons-working-in-fishing-and-aquaculture-worldwide/>).

<sup>4</sup> Port-State Measures Agreement (source : <https://www.fao.org/port-state-measures/fr/>).

qui ne fournissent pas une évaluation exhaustive du trafic maritime sur une zone donnée, à un instant précis.

En effet, ces technologies conventionnelles :

- ne sont pas obligatoires pour tout type de bateau ;
- ne sont pas imposées par tous les États ou dans les eaux internationales ;
- sont basées sur le principe de la coopération (activables ou désactivables) ou limitées en portée de détection (radars côtiers) ;
- sont falsifiables (manipulation des données, positions fantômes...).

Ces systèmes ne sont pas universellement obligatoires pour tous les bateaux. Pour information, l’AIS, le système de référence mondial a été mis en place pour limiter les risques de collision maritime et s’impose principalement aux navires de gros tonnage.

Ainsi, selon Global Fishing Watch, seuls 2 % des navires de pêche dans le monde utilisent l’AIS. Cette technologie, comme le VMS, ne sont pas exigés par tous les États et fonctionnent sur un principe coopératif ; elles peuvent être désactivées à tout moment sur décision du personnel à bord. De plus, elles sont sujettes à la falsification, permettant la manipulation des données ou la création de positions fictives.

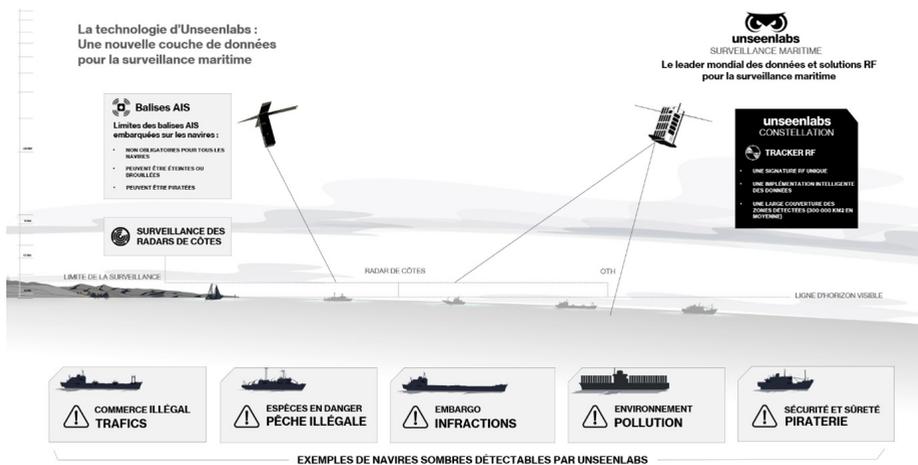


Figure 1 : La surveillance maritime (source : Unseenlabs).

D’autres technologies existent, telles que les radars côtiers ou OTH<sup>5</sup> mais sont limitées par leur portée de détection.

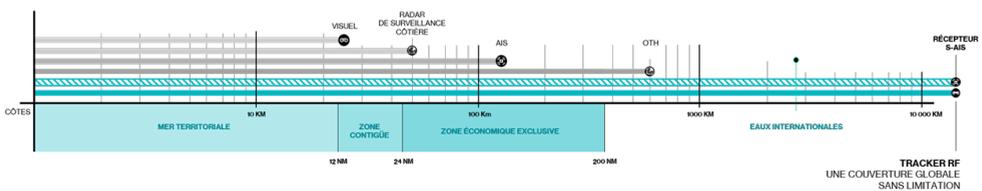


Figure 2 : Autres technologies de détection (source : Unseenlabs).

<sup>5</sup> OTH : Over-The-Horizon (<https://www.radartutorial.eu/07.waves/wa51.en.html>).

Enfin, les zones maritimes sont souvent très vastes et difficiles à surveiller. Les eaux internationales, quant à elles, manquent d'instances de contrôle et restent souvent encore aujourd'hui des zones de non droit.

## UNSEENLABS, UNE ENTREPRISE DU SPATIAL TOURNÉE VERS LES OCÉANS

Dans le même temps, depuis presque une décennie, l'industrie spatiale mondiale connaît une mutation technologique et industrielle majeure, avec l'émergence de nouvelles entreprises qui proposent des technologies disruptives pour répondre aux défis actuels et futurs.

Unseenlabs, spécialiste de la géolocalisation de navires en mer par satellite, se positionne comme l'un des pionniers de cette révolution. *Leader* mondial de la détection des signaux radiofréquence (RF) depuis l'espace, cette entreprise française du spatial déploie sa technologie propriétaire unique en développant sa propre constellation : onze satellites aujourd'hui, une vingtaine à l'horizon 2025.

Les satellites d'Unseenlabs couvrent tous les jours des zones de plusieurs centaines de milliers de km<sup>2</sup>, en détectant les signaux électromagnétiques émis par les bateaux en mer, qu'ils soient coopératifs ou pas, permettant leur géolocalisation jusqu'au kilomètre près.

Cette technologie d'interception permet de détecter des activités potentiellement non déclarées ou illégales de navires en mer ("dark vessels"), sans limite de distance par rapport aux côtes, indépendamment de leur équipement en systèmes conventionnels de sécurité maritime (AIS, VMS ou LRIT<sup>6</sup>).

Les données produites peuvent être alors fusionnées à d'autres données disponibles telles que le SAR<sup>7</sup>, l'imagerie optique, le VMS ou l'AIS pour approfondir ou mieux cibler les analyses.

Les acteurs de la sécurité maritime (garde-côtes, marines, douanes ou acteurs privés) ont ainsi une évaluation plus exhaustive du trafic maritime réel, avec une meilleure capacité à se focaliser sur des zones spécifiques d'intérêt.

Cette approche optimise également l'utilisation des moyens navals et aériens, souvent limités et coûteux, pour un contrôle in situ plus efficace des activités dissimulées en mer.

## CAS D'USAGE : DÉTECTION DE NAVIRES SE LIVRANT À LA PÊCHE ILLÉGALE EN MER D'ARABIE

### Le contexte de la mer d'Arabie

La mer d'Arabie est située au nord-ouest de l'océan Indien, au large de la côte est du continent africain, de la péninsule arabique et de l'Inde. Cette mer d'une superficie de 3,8 millions de km<sup>2</sup> fait partie de l'océan Indien et communique avec la mer Rouge et le golfe Persique.

Outre les activités de pêche, cette zone connaît également de nombreux passages de navires de fret et de transport d'hydrocarbures. Ces derniers laissent souvent leur balise

---

<sup>6</sup> LRIT : Long Range Identification and Tracking (<https://www.imo.org/fr/OurWork/Safety/Pages/LRIT.aspx>).

<sup>7</sup> SAR : Synthetic Aperture Radar – radar à synthèse d'ouverture ([https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_FR/SEM7L7D6UQH\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_FR/SEM7L7D6UQH_0.html)).

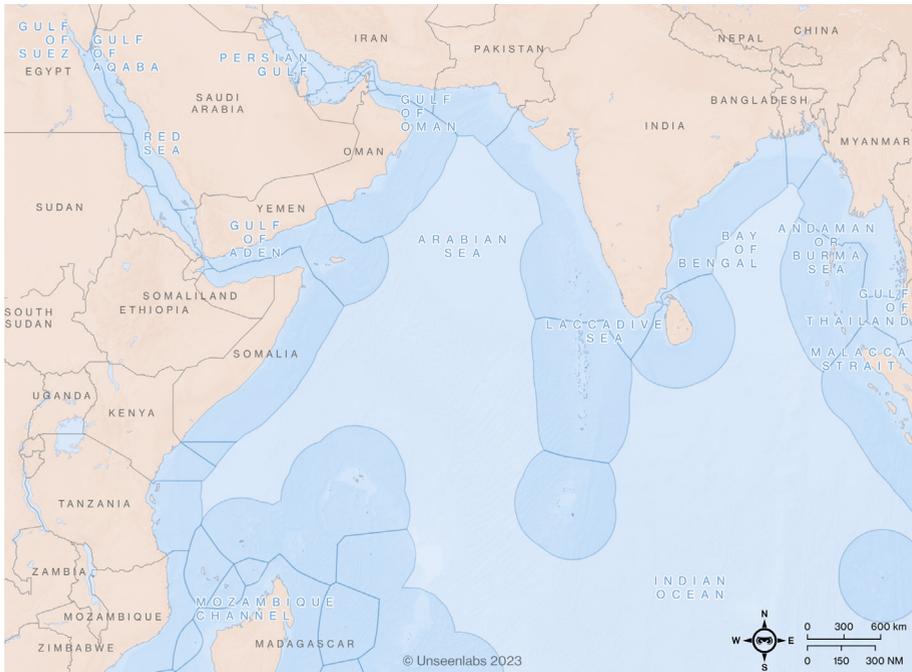


Figure 3 : Carte de la mer d'Arabie (© Unseenlabs).

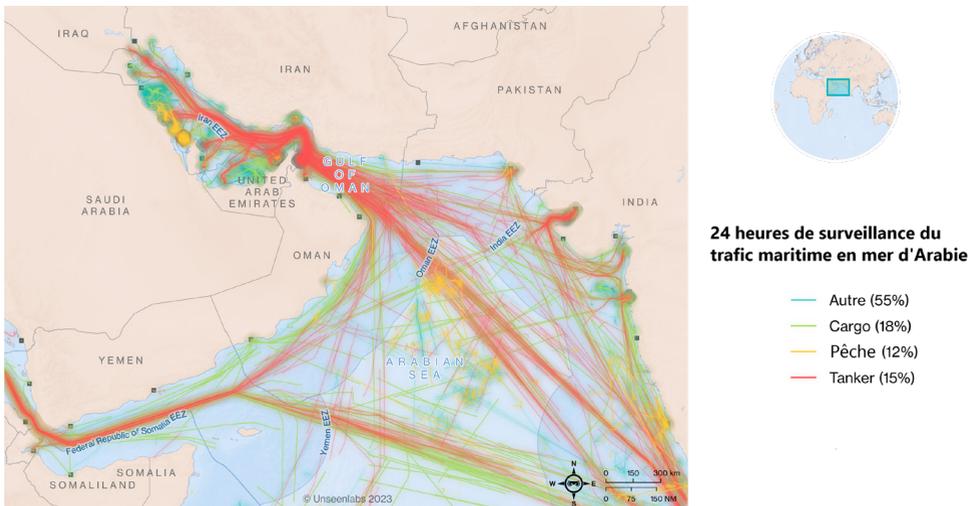


Figure 4 : Carte de surveillance du trafic maritime en mer d'Arabie (© Unseenlabs).

AIS active pour éviter les collisions avec les autres navires en transit ou les bateaux de pêche sur place.

Longtemps riche en ressources halieutiques, la mer d'Arabie connaît un lent déclin depuis plus d'une décennie. Cela est principalement lié à la surpêche, à la pollution (plastique, hydrocarbures) et au réchauffement climatique. Certaines espèces sont particulièrement menacées.

On peut citer des espèces de requins telles que le requin-taupo ou le requin Mako qui sont prisées dans certains pays d'Asie pour leur chair ou leurs ailerons. Ils peuvent également être victimes de prises accidentelles ; ils sont le plus souvent rejetés sans vie à la mer.

Face à ces défis, des mesures de conservation et de gestion durable des ressources marines sont essentielles. Les initiatives de protection des zones sensibles, de limitation de la surpêche et de régulation des activités polluantes sont indispensables pour restaurer la santé de la mer d'Arabie.

## La mer d'Arabie, une zone très active en trafic maritime

Unseenlabs a mené 13 jours d'acquisition de signaux radiofréquence émis par les navires séjournant dans cette région.

Cette vue retrace plusieurs jours de collecte et fait apparaître trois zones principales de regroupement de navires sans balises AIS actives (points rouges) : les eaux internationales en dehors des zones économiques exclusives (ZEE), la ZEE omanaise et la ZEE Indienne.

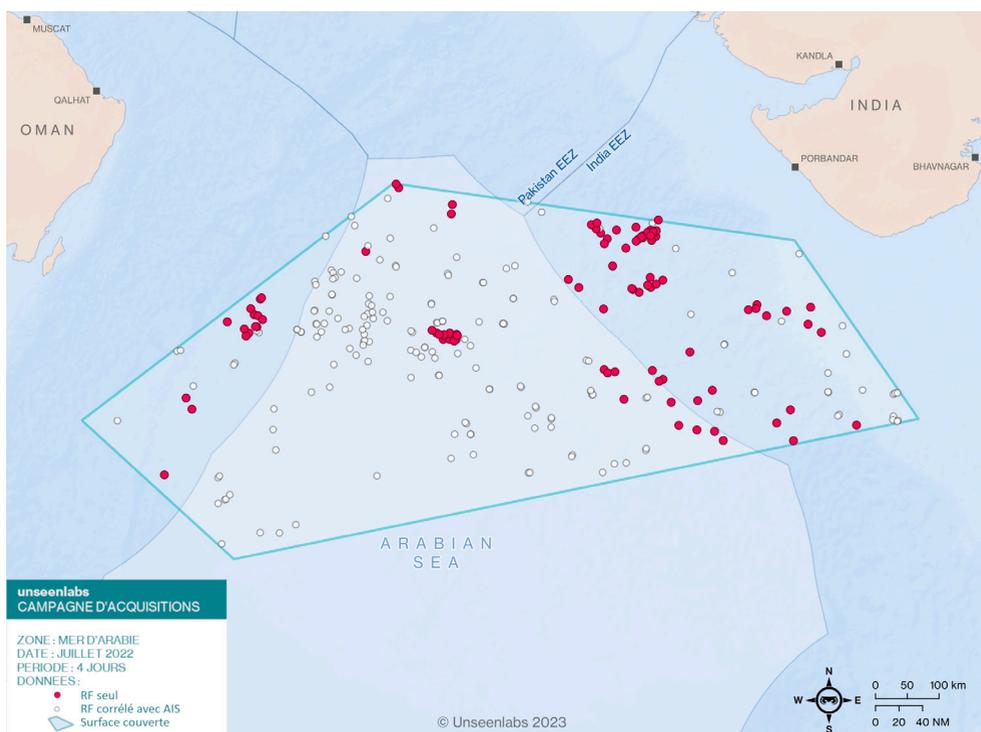


Figure 5 : Carte des navires en mer d'Arabie (© Unseenlabs).

Cette zone est aussi connue pour accueillir de nombreux navires de pêche asiatiques. Avec la croissance de la demande de produits halieutiques en Asie ainsi que l'augmentation des capacités techniques (réfrigération/congélation à bord), les flottes de pêche asiatiques (notamment chinoises, taïwanaises et thaïlandaises) se sont étendues en nombre, tonnage et en rayon d'action.

À titre d'exemple, le nombre de navires de pêche chinois présents sur cette zone pendant la période de l'étude est de 120 navires de pêche et 10 navires frigorifiques.

Aussi, des bateaux usines sillonnent le globe en ciblant les mers et océans les plus prolifiques. Ils sont souvent secondés par de plus petits navires de pêche. Cela permet d'intensifier leur champ d'action locale lors des campagnes de pêche.

Certains navires de pêche coupent leur signal AIS pendant plusieurs heures (ou jours) pour devenir invisibles. Ils pénètrent dans des zones économiques exclusives pour pêcher et en sortent souvent ponctuellement pour décharger leur cargaison dans d'autres bâtiments à grande capacité de stockage, localisés en dehors de ces ZEE.

Ces allers-retours peuvent être effectués discrètement sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines, épuisant ainsi davantage les ressources halieutiques de certains pays.

Cet exemple illustre un cas relevé dans la zone économique exclusive indienne. On y observe un navire de pêche chinois qui a désactivé sa borne AIS.

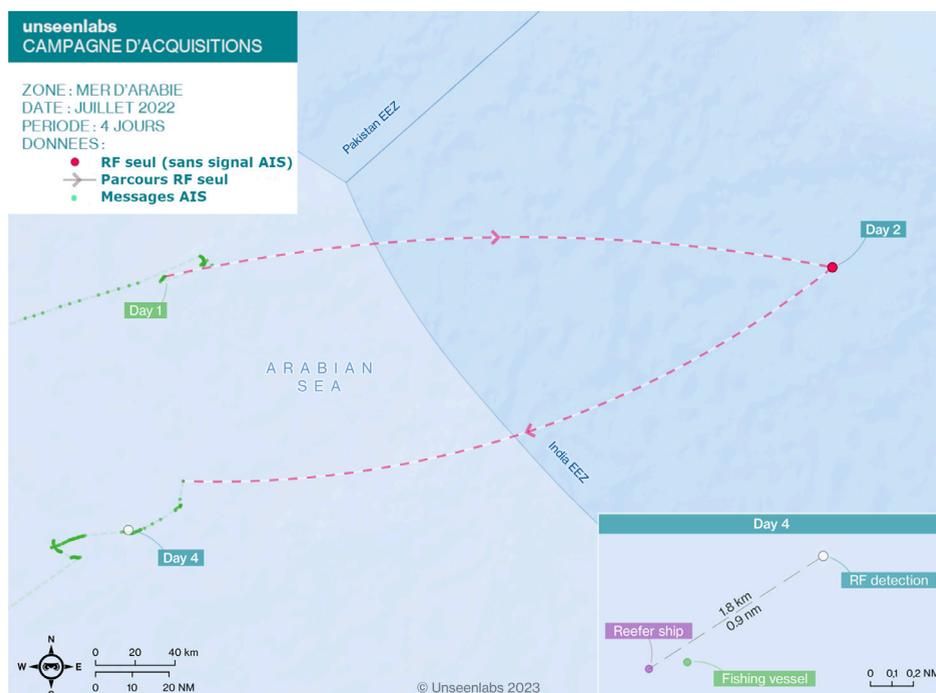


Figure 6 : Exemple d'activité d'un navire de pêche (© Unseenlabs).

La cinématique<sup>8</sup> sur plusieurs jours du navire permet d'identifier une activité possible de pêche illégale :

- jour 1 : un navire de pêche battant pavillon chinois (> 1 100 tonneaux de jauge brute) est localisé à 60 NM<sup>9</sup> de la bordure extérieure de la ZEE indienne, avant de couper son signal AIS pendant une durée totale de 42 heures ;
- jour 2 – soir : grâce à la caractérisation de ses émetteurs RF, Unseenlabs géolocalise ce bateau à 100 NM à l'intérieur de la ZEE indienne ;

<sup>8</sup> L'étude des mouvements des navires sur une zone donnée.

<sup>9</sup> NM : 1 *nautic mile* = 1,85 km environ.

- jour 3 – mi-journée : après 42 heures d'interruption AIS, ce navire se trouve désormais à 80 NM à l'extérieur de la ZEE et navigue en direction sud-ouest ;
- jour 4 – matin : le navire rencontre un autre navire de pêche chinois de plus gros tonnage (> 5 000 GT).

Les navires coupent leur balise AIS pour ne pas être identifiés. Cela peut arriver pour des raisons de sécurité lorsque qu'ils veulent éviter d'être repérés par d'autres navires hostiles (pirates) ou pour ne pas être interceptés par les autorités locales en charge de la surveillance de leurs eaux territoriales et ZEE.

La détection des activités illégales en mer, notamment la pêche non déclarée dans la mer d'Arabie, est un enjeu crucial pour la préservation de cet écosystème marin fragilisé.

Les observations réalisées soulignent les défis persistants liés à la surveillance de ces vastes étendues maritimes. Unseenlabs livre les données recueillies au client, qui peut, par la suite, décider des actions à mener sur la zone.

## CONCLUSION

La surveillance maritime est devenue essentielle pour répondre aux multiples défis qui pèsent sur les océans. Ces vastes étendues d'eau, vitales pour la biodiversité, l'économie mondiale et la vie de millions de personnes, sont confrontées à des menaces croissantes telles que la surpêche, la pollution et les activités illégales difficilement détectables.

Elles englobent une gamme d'actions telles que la pêche illégale, la surpêche, le dégazage sauvage, la piraterie et d'autres pratiques clandestines. Ces activités non réglementées dégradent la faune et la flore, perturbent les cycles naturels et dégradent la qualité des eaux. Elles compromettent également la sécurité des voies navigables et impactent le commerce maritime légal. La difficulté de surveillance dans les vastes étendues océaniques ainsi que les limites des réglementations internationales ne découragent pas ces activités illégales en mer, posant ainsi des défis considérables pour la préservation des océans et de leur intégrité environnementale.

Unseenlabs s'est engagé à relever ces défis en développant une technologie révolutionnaire de détection des signaux radiofréquence émis par les navires en mer. Cette approche permet de combler les lacunes des systèmes conventionnels de surveillance maritime comme l'AIS, en offrant une vision plus complète du trafic maritime, y compris dans les zones économiques exclusives où la désactivation intentionnelle des balises AIS est courante pour des activités non déclarées.

La technologie d'Unseenlabs représente un atout crucial dans la lutte contre ces activités illégales en mer. Elle est la seule à offrir une visibilité accrue sur le trafic maritime réel, permettant la géolocalisation et le suivi des "dark vessels". Cette capacité à détecter et surveiller les navires clandestins est essentielle pour renforcer la lutte contre les activités non déclarées ou illégales en mer.

## BIBLIOGRAPHIE

FAO (2022), "State of the World's fisheries and aquaculture 2022", <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc0461en>

IUCN Shark Specialist Group, <https://www.iucnssg.org/>

REGIONAL MARITIME INFORMATION FUSION CENTER, « Les requins de la mer d'Oman sont peut-être les plus menacés au monde », <http://crfimmadagascar.org/environnement-marin/info-mer-darabie-les-requins-de-la-mer-doman-sont-peut-etre-les-plus-menaces-au-monde/>

DEFENSE FORUM Étude 2020 de Fish & Fisheries, <https://adf-magazine.com/fr/2021/02/la-peche-illegale-joue-un-role-dans-le-trafic-international/>

GREENPEACE, <https://www.greenpeace.fr/enquete-peche-destructrice-dans-locean-indien/>

WWF FRANCE, <https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/peche-illegale-enjeux-et-solutions>

WIKIPEDIA, « Mer d'Arabie », [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mer\\_d%27Arabie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mer_d%27Arabie)

HUFFINGTON POST, « Des dizaines d'espèces de requins menacées », [https://www.huffingtonpost.fr/2019/03/22/des-dizaines-despeces-de-requins-menacees\\_a\\_23698618/](https://www.huffingtonpost.fr/2019/03/22/des-dizaines-despeces-de-requins-menacees_a_23698618/)

TECHNO-SCIENCE, « Mer d'Oman », <https://www.techno-science.net/definition/1223.html>

AFM, « Des chalutiers chinois soupçonnés de pêche illégale au nord-ouest de l'océan Indien », <https://afm.media/2022/02/07/des-chalutiers-chinois-soupconnes-de-peche-illegale-au-nord-ouest-de-locean-indien/>

NATIONAL GEOGRAPHIC, « Des pêcheurs indiens ouvrent la voie de la dépollution des océans », <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/des-pecheurs-indiens-ouvrent-la-voie-de-la-depollution-des-occeans>

LAM V. *et al.* (2016), “Projected change in global fisheries revenues under climate change”, <https://www.nature.com/articles/srep32607>

IFREMER, <https://www.ifremer.fr/fr/biodiversite-marine-ecosystemes>

FAO (2022), « La consommation mondiale de poissons par habitant dépasse les 20 kilos par an », <https://www.fao.org/3/cc0461fr/online/sofia/2022/consumption-of-aquatic-foods.html>

WWF France, « Pêche illégale : enjeux et solutions », [https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/peche-illegale-enjeux-et-solutions?gad\\_source=1&gclid=EAIaIQobChMIhOHXufrXggMVWpRoCR2XJw0DEAAYASAAEgKtm\\_D\\_BwE](https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/peche-illegale-enjeux-et-solutions?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIhOHXufrXggMVWpRoCR2XJw0DEAAYASAAEgKtm_D_BwE)

LE MONDE (2021), « Géo-ingénierie et changement climatique ».

SCIENCEDIRECT (2021), “The promises and perils of Automatic Identification System data”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417421004164>

MARITIMETRAFFIC(blog), “Vessel details that can be changed in AIS transponders”, <https://www.marinetraffic.com/blog/vessel-details-that-can-be-changed-in-ais-transponders/>

MARITIME TRAFFIC, “Seven things you should know about AIS”, <https://www.marine-traffic.com/blog/seven-things-know-ais/>

DRDC (2021), “Analysis of space-based passive RF for Earth Observation”, [https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc372/p813637\\_A1b.pdf](https://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc372/p813637_A1b.pdf)

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DE LA SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE (2017), « Système de surveillance des navires par satellite (VMS) », <https://agriculture.gouv.fr/systeme-de-surveillance-des-navires-par-satellite-vms>

GLOBAL FISHING WATCH, <https://globalfishingwatch.org/our-technology/>

BDM (2023), “Dark Ships – what are they and why are they a problem?”, <https://bdmlawllp.com/blog/dark-ships-what-are-they-and-why-are-they-a-problem/>

# Des cartes pour panser le monde

Par Sébastien SORIANO

Directeur général de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)

À l'heure des grands changements environnementaux, les cartes doivent devenir des boussoles pour naviguer dans l'anthropocène et corriger nos excès. Un pan entier de la politique publique de la donnée est à structurer. Fournir de bonnes cartes aux décideurs peut les aider à être ambitieux et même courageux. Cette révolution de la cartographie est à la fois démocratique et technologique.

Démocratique car il ne faut pas seulement ouvrir la donnée mais la co-construire, en faire un commun avec les acteurs de terrain. Il y a là un immense défi, qui est de « désiloter » les initiatives d'acteurs souvent éclatés. Technologique car seuls l'IA et les jumeaux numériques permettront de piloter à temps les changements nécessaires.

Lorsque Mercator invente sa projection au XVI<sup>e</sup> siècle, c'est pour répondre aux besoins des navigateurs. Grâce à la projection « conforme », la route qui joint deux points en gardant le même cap est figurée par une droite sur un plan.

À chaque époque sa cartographie. Les cartes portent une intention. Elles ont un pouvoir d'entendement et aussi de guide. En mettant en perspective, en dégagant des phénomènes parfois complexes, elles sont une « version du monde », une invitation à l'arpenter d'une certaine manière, voire à le façonner. À l'heure de l'anthropocène, où l'être humain est devenu la principale force de changement sur Terre, la carte doit permettre non seulement de se repérer, mais aussi de réparer. Non seulement de penser mais aussi de panser.

## ARTIFICIALISATION DES SOLS, IMPLANTATION

### D'ÉOLIENNES, GESTION DE LA FORÊT...

#### LA CARTE EST POLITIQUE

Pour réussir la planification écologique, ce n'est pas un bon mot que de dire qu'il faudra de bons plans. Les sols et leur occupation vont prendre une acuité nouvelle dans le débat démocratique. La fin de l'abondance, c'est le début de la rareté, et avec elle, la nécessité de prioriser, répartir, renoncer... bref de choisir. Et aussi vrai que la politique est l'art des choix, les élus de la Nation et des territoires devront pouvoir s'appuyer sur des données fiables et partagées, pour parler un langage commun avec tous les acteurs et les citoyens.

Les arbitrages seront cornéliens entre des objectifs souvent contradictoires de développement économique, de logement, de biodiversité, d'implantation d'énergies renouvelables, de souveraineté alimentaire... Les nouvelles règles définies par la loi Climat et résilience (2021) – le fameux ZAN pour « zéro artificialisation nette » – en matière de réduction de l'artificialisation des sols à l'horizon 2030 et 2050, auront à cet égard valeur d'exemple.

## LA CARTE AU CŒUR DE LA POLITIQUE PUBLIQUE DE LA DONNÉE

La donnée peut jouer un rôle crucial dans la planification écologique car celle-ci porte une très grande dimension territoriale. Elle est un puissant levier d'efficacité des politiques publiques en matière d'aménagement à enjeux agro-écologique :

- La donnée est l'ingrédient de base pour comprendre le territoire. Baromètre de l'artificialisation des sols, identification des passoires thermiques... sont autant d'informations indispensables aux arbitrages territoriaux à opérer pour la transition.
- La donnée est le socle sur lequel on peut développer des systèmes de simulation et de prédiction pour se projeter vers l'avenir. Elle ouvre la voie à des jumeaux numériques, répliques dynamiques du territoire sur lesquelles on peut faire jouer des scénarios dans de multiples secteurs (transports, réseaux, urbanisme, prévention des risques).
- La donnée, ouverte, est comme un marchepied pour développer des usages parfois inattendus et permettre une appropriation large des enjeux et des décisions. Elle est un vecteur d'innovation par les territoires (cartes des circuits courts, des matériaux biosourcés...) ou *via* des solutions pour orienter et suggérer les comportements à adopter (par exemple les calculateurs d'empreinte écologique).

En France et en Europe, la politique publique de la donnée se conjugue avec l'*open data*, l'ouverture des données. C'est particulièrement vrai pour les enjeux environnementaux et de connaissance du territoire à travers la directive Inspire (2007) et la décision de la Commission européenne sur les jeux de données à haute valeur ajoutée (2022). En France, le service Etalab, chargé de cette politique au sein de la direction interministérielle du numérique (Dinum) vient de fêter ses 10 ans. Dans le secteur de la santé, c'est cette politique qui a permis l'émergence d'outils citoyens durant la crise de la Covid-19.

Mais pour partager la donnée, il faut d'abord la produire et c'est souvent ce qui est le plus complexe et coûteux. La politique d'ouverture des données a parfois donné lieu à un raccourci : il suffirait de « rassembler » les données et de les mettre à disposition. Pourtant, la réalité d'un acteur comme l'IGN est de faire vivre un cycle complet de la donnée, dont la mise à disposition et le partage n'est que la partie émergée de l'iceberg (environ 10 % du coût total).

Prenons l'exemple du référentiel OCSGE (occupation des sols à grande échelle) en cours de production par l'IGN. Il s'agit d'une carte réalisée à la demande de la direction du logement, de l'aménagement et de la nature (DGALN) du ministère chargé de l'écologie, qui recense l'occupation des sols sur toute la France à une échelle jamais égalée. Offrant une « photo » de la situation tous les trois ans en mobilisant des technologues d'intelligence artificielle (IA), l'OCSGE doit permettre le suivi du « zéro artificialisation nette » (ZAN) avec les acteurs des territoires.

Pour mener un tel projet, dont le coût total est évalué à 20-25 M€ sur 4 ans, il a fallu faire murir les travaux issus de la recherche, mobiliser données sources (vues aériennes et satellites, bases de données de l'IGN, fichiers fonciers...), étiqueter les données issues de zones représentatives de la variété des paysages français pour initialiser la chaîne de production IA, faire tourner l'IA et opérer les contrôles et corrections nécessaires, intégrer les retours des collectivités locales associées à la production des données en amont de leur publication, prendre en compte les évolutions du cadre législatif et réglementaire, après l'adoption de la proposition de loi ZAN (2023), qui est venue corriger le dispositif, il a fallu recenser les jardins publics et les panneaux photovoltaïques installés au sol qui n'étaient pas prévus initialement – enfin il faudra mettre à jour les données tous les 3 ans.

On le voit dans cet exemple, la donnée n'apparaît pas comme par magie. Les référentiels sont à produire, mobilisant des processus industriels dont les coûts sont très significatifs.

## IA, JUMEAUX NUMÉRIQUES : DES DÉFIS TECHNOLOGIQUES

Assurer la souveraineté du pays sur les choix à opérer en matière de planification écologique implique une capacité de production des données de référence. Les défis technologiques sont nombreux.

Il faut diversifier les sources de données, pour combiner des relevés de terrain avec des vues aériennes et satellitaires à des précisions et des fréquences variées. Ainsi l'État porte un projet (60 M€) de mobilisation de la technologie Lidar par impulsions laser, grâce à laquelle nous disposerons d'une maquette 3D de la France d'ici 2025. La communauté spatiale (Galileo, Centre national d'études spatiales, Airbus, acteurs du *New Space*...) investit dans des constellations qui permettront d'accroître encore la précision et la fréquence des prises de vue.

L'intelligence artificielle va permettre de démultiplier les capacités d'analyse. La reconnaissance automatique des formes et du changement seront précieuses pour suivre la santé des forêts, lutter contre les décharges sauvages, prévenir les incendies, lutter contre l'étalement urbain... C'est tout un éventail de politiques publiques qui peuvent être enrichies par l'observation en continu du territoire. Pour dépasser le stade des expérimentations et des POC, la puissance publique doit se structurer pour passer à l'échelle.

Renforcer l'impact des politiques environnementales sur les territoires implique aussi de développer des jumeaux numériques, solutions de visualisation explicite des phénomènes décrits par les données. Isochrones des services publics de proximité, carte des temps de transports, des revenus moyens, simulateurs, etc. améliorent le pilotage des politiques publiques. La mise en scène des données pourra également aider à sensibiliser les citoyens au travers de solutions immersives.

Sur le plan technologique, il faut enfin signaler les opportunités de partenariats avec des acteurs industriels. À l'IGN, le réseau Datalliance rassemble les solutions technologiques de l'IGN et de ses partenaires publics et privés (*start-up*, industriels comme Airbus et Thalès) pour proposer une offre intégrée de production de référentiels de données à la demande des pouvoirs publics. Des *start-up* comme Preligens, NamR, LuxCarta, Kayrros... ont rejoint le réseau pour apporter le meilleur des deux mondes du public et du privé pour répondre au besoin croissant en données des pouvoirs publics.

## OPEN DATA, COMMUNS, TERRITOIRES : LE DÉFI DU « DÉSILOTAGE »

Pour mieux valoriser les données, assurer le déploiement de mesures adaptées, il faut saisir les besoins et les attentes des territoires et des acteurs. Il y a un réflexe du « aller vers » à créer, à l'attention des utilisateurs et co-contributeurs pour identifier et adapter en continu les référentiels de données. Cette logique d'animation de communautés est une dimension essentielle de l'efficacité des politiques publiques.

Mais il faut aussi souligner que l'impulsion donnée depuis une dizaine d'années par les pouvoirs publics autour de la donnée, qui est évidemment positive, s'est accompagnée d'une certaine dispersion des forces à tous les niveaux. Ainsi les données ne « communiquent » que difficilement entre elles : par exemple la définition d'une haie bocagère ou d'un cours d'eau n'est pas la même suivant qu'on veut l'appréhender sous le prisme agricole ou celui de l'écologie. On trouve également beaucoup de donnée « experte » dans

les domaines de la connaissance des milieux naturels et des impacts de l'activité humaine, qui ne sont pas organisées pour piloter les politiques publiques ou organiser le dialogue État-collectivités.

Pour lutter contre cette dispersion, rassembler les forces et gagner en impact, il est indispensable de « désiloter » les initiatives pour parler un langage commun. On peut à cette fin créer des dynamiques partenariales, dans une logique d'« action publique en réseau » permettant de mobiliser les acteurs nationaux et locaux. En voici quelques exemples.

Au plan national, la Géoplateforme est une infrastructure nationale, ouverte et mutualisée, qui offre à l'ensemble de la sphère publique des services d'hébergement, exploitation, partage et mise en forme des données territoriales. La mise en place a commencé et va monter en puissance sur 2024. Cette infrastructure offre un lieu de travail en commun pour tous les acteurs de la donnée : héberger des *hubs* de données, développer des portails cartographiques, croiser les données et faire des *dataviz*...). Elle va offrir des services directement opérationnels pour toutes les administrations *via* une interface conviviale : [www.cartes.gouv.fr](http://www.cartes.gouv.fr)

La création de plateformes régionales de données a précédé la Géoplateforme. Il s'agit d'un modèle intéressant, qui a permis pour rassembler les données publiques interoperables, rendre l'APIsation systématique et coordonnée, ouvrir des webservices ergonomiques...

Ces outils vont permettre de rassembler les énergies en créant des observatoires ou portails afin de faire converger les expertises et la connaissance en un espace partagé. Quelques premiers exemples :

- L'Observatoire des forêts françaises, lancé en juillet 2023 de façon partenariale et qui rassemble pour la première fois les données de toute la forêt française (domaniale, communale et privée, hexagone et DOM, toutes thématiques – prévention des feux, enjeux sanitaires, équilibre forêt-gibier, ressource en bois, puits carbone, biodiversité...), <https://agriculture.gouv.fr/lancement-de-lobservatoire-des-forets-francaises>.
- Le portail cartographique des énergies renouvelables : l'IGN et le Cerema, centre d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, ont été mandatés par le Gouvernement pour déployer un portail rassemblant l'ensemble des informations structurantes sur ce sujet. Un premier portail a été réalisé en deux mois. L'IGN a apporté sa compétence et ses outils transverses sur la donnée territoriale et le Cerema sa compétence métier sur les énergies renouvelables et les données correspondantes. Depuis le 11 décembre 2023, ce portail permet aux collectivités de déclarer leurs « zones d'accélération » pour les énergies renouvelables, <https://www.ecologie.gouv.fr/lancement-du-portail-cartographique-des-energies-renouvelables>.

On peut également mobiliser des logiques de « communs ». L'on s'inspire ici de la notion de commun, qui est une ressource entretenue par une communauté selon ses règles propres (par exemple Wikipedia). Les « appels à communs » et les initiatives de type « Fabrique des communs » permettent de rassembler de larges communautés d'acteurs pour résoudre ensemble des défis d'intérêt général, notamment dans la donnée. Ces défis partagent la difficulté de ne pouvoir être résolus par un acteur isolé. Qu'il s'agisse de l'État, de collectivités territoriales, d'acteurs associatifs, d'industriels... Pourtant, ils sont utiles à l'activité quotidienne d'un grand nombre d'acteurs. À travers cette approche, il devient possible de fédérer des acteurs de nature et de besoins hétérogènes s'unissant pour résoudre des problématiques sectorielles. Quelques exemples de communs repris ou initiés par l'IGN dans sa Fabrique des géocommuns :

- La Base Adresse Nationale est le référentiel d'adresses officiellement reconnu par l'administration. Elle répond à des besoins importants des services publics comme, par exemple, l'intervention des services d'urgence – pompiers, ambulances, Samu. Elle permet aux opérateurs publics et privés de mieux coordonner leurs chantiers,

de simplifier les dépôts de permis de construire et de cartographier la voirie, par exemple les panneaux de signalisation ; et aux services de vente à distance de livrer les colis. La BAN est au départ une *start-up* d'État lancée par l'agence nationale de cohésion des territoires, l'ANCT, et la DINUM.

- Panoramax répond à un défi posé par OpenStreetMap France, qui est un collectif de bénévoles qui construisent des cartes collaboratives sur le modèle de Wikipedia. Il s'agit de se poser en alternative aux outils de vues immersives de Google Street-View – le « petit bonhomme jaune de Google » – et Mapillary (Meta). Il faut pour cela une solution de partage d'images pour augmenter la valorisation du travail de chacun dans sa collecte de photos. Un tel outil libre permettra à tout un chacun de développer les usages de son choix : repérer et recenser les panneaux de signalisation, les arbres, de créer des outils de comparaison d'images dans le but de déceler d'éventuelles *fake news* ; de proposer son propre outil de navigation. Panoramax a été lancé et en quelques mois a rassemblé plus d'un million de photos sur 10 000 km de voirie. Un démarrage encourageant.

## LA DONNÉE : UN SERVICE PUBLIC DONT IL FAUT SE SOUCIER

On le voit, la donnée est un service public en lui-même. Et il faut s'en soucier si la Nation ne veut pas se retrouver aveugle et finalement impuissante à résoudre les grands défis de l'époque.

Au plan RH, il faut en particulier des moyens humains. Toutes les administrations ne pourront pas atteindre la taille critique en matière d'ingénierie des données, de labellisation massive des données, de puissance computationnelle mobilisée (calcul), d'algorithme, de développement, de *cloud*... Des moyens humains substantiels sont à prévoir aussi pour l'animation de communautés si l'on veut franchir la « vallée de la mort » entre la donnée et son usage. La mise en donnée des politiques publiques doit s'accompagner d'une mise en réseau des acteurs, en mobilisant les communautés techniques dans une logique de commun.

En France, la connaissance du territoire mobilise de nombreux acteurs qui doivent être soutenus. Leur mise en réseau en sera un élément clé. À cet égard le travail constant du Commissariat général au développement durable (CGDD), du Conseil national de l'information géolocalisée (CNIG) et plus récemment du secrétariat général pour la planification écologique (SGPE) sont particulièrement à souligner.

C'est au prix d'un investissement dans le service public de la donnée que notre pays pourra développer une voie souveraine pour son avenir.

# Pour cartographier le territoire, des technologies en haute altitude

Par Valérie DERÉGNAUCOURT

Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)

Imagerie spatiale, intelligence artificielle, technologie LiDAR... Pour cartographier le territoire et faire parler finement les observations aériennes et spatiales, l'IGN déploie en continu un bouquet technologique de pointe. Explications.

Les crises climatique et environnementale auxquelles nous devons faire face collectivement demandent de produire et de diffuser, quasiment en continu, les données de description du territoire et de ses évolutions. Ces données sont tout simplement indispensables, aujourd'hui, à la conception et au suivi des politiques publiques, et au pilotage de la transition écologique. Pour outiller ainsi la puissance publique, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) s'est donné pour ambition de cartographier l'anthropocène, autrement dit de donner à voir les transformations rapides de notre environnement. Cette entreprise exigeante soulève des défis technologiques majeurs. Or l'IGN a toujours été pionnier en matière d'innovations, que ce soit pour la mise en œuvre des premiers avions de relevés topographiques, les techniques de photogrammétrie ou d'observation des sols par satellite... Aujourd'hui, des solutions encore inimaginables il y a quelques années ouvrent de nouvelles perspectives : intelligence artificielle, *New Space*, couverture LiDAR haute résolution, jumeau numérique... Le bouquet technologique déployé par l'IGN doit être une nouvelle fois à la hauteur des enjeux.

## CROISER LES SOURCES DE DONNÉES POUR ENRICHIR LA DESCRIPTION DE L'ANTHROPOCÈNE

La complémentarité des sources d'acquisition est au cœur de l'observation en continu des territoires, essentielle pour répondre aux enjeux actuels. Pour suivre l'état de santé des forêts, l'érosion du relief, l'évolution des cours d'eau, la perte de biodiversité ou l'artificialisation des sols, l'IGN mobilise ainsi des sources d'observation variées et déploie ses capacités d'acquisition et de traitement pour croiser tous types de source de données (terrain, aérien, LiDAR, satellite...) en décloisonnant et en faisant fructifier ces innovations. Cela lui permet de consolider les données socles qu'il s'emploie à optimiser constamment et qui sont indispensables à l'enrichissement des représentations thématiques.

## LE SPATIAL, UNE PLACE GRANDISSANTE AU SEIN DU MIXTE TECHNOLOGIQUE DE L'IGN

L'IGN entretient depuis plus de trente ans une expertise pointue dans le domaine de l'exploitation des données satellitaires. Ses services de l'imagerie spatiale (Toulouse) et de géodésie et de métrologie (Saint-Mandé) sont des centres d'expertise reconnus au plan international, respectivement dans la maîtrise de la géométrie des capteurs satellitaires

d'intérêt cartographique, et dans celle des données de localisation précises issues des systèmes GNSS (dont GPS et Galileo).

Les besoins liés aux politiques publiques évoluent vers des données plus spécifiques, plus détaillées ou fréquemment actualisées, et les sources de données se multiplient. À cet égard, le déploiement de nouvelles constellations satellitaires à très haute résolution, notamment Pléiades Neo (30 cm) et CO3D (stéréo synchrone à 50 cm) ouvre de nouvelles perspectives d'observation du territoire et de suivi des politiques publiques. Tout comme les données issues des constellations Sentinel du programme Copernicus, caractérisées par une grande richesse spectrale et un fort potentiel d'analyse des dynamiques temporelles des territoires.

Cela amène aujourd'hui l'IGN, d'une part, à définir un nouveau mixte technologique d'acquisition de données, d'autre part à adapter ses chaînes de traitements pour les rendre agnostiques en termes de sources, notamment dans le cadre des travaux plus larges en matière de détection du changement.

Par exemple, pour répondre aux besoins de suivi des massifs forestiers, l'association des images à très haute résolution spatiale avec des séries temporelles d'images Sentinel offre des perspectives très intéressantes pour cartographier de manière automatique la répartition des différentes essences forestières. À la suite du déploiement en 2021 des satellites Pléiades Neo, un partenariat d'expérimentation a été signé avec Airbus DS et une démarche d'évaluation complète a été mise en place, allant de la qualification des images jusqu'au transfert d'apprentissage de modèles d'occupation du sol.

L'enjeu est aujourd'hui de repositionner la donnée satellitaire en appui aux politiques publiques dans une démarche multi-sources, multi-capteurs et multi-acteurs tandis qu'un vaste écosystème d'innovation se développe autour de la donnée satellitaire et du croisement des sources de données. Cette richesse ouvre un grand potentiel d'exploitation pour les politiques publiques.

## CARTOGRAPHIER LA FRANCE ENTIÈRE EN 3D GRÂCE AU LiDAR AÉRIEN HAUTE RÉOLUTION

L'IGN a lancé en 2021 le programme LiDAR HD, un chantier d'une ampleur inédite porteur d'un objectif ambitieux : acquérir des données LiDAR haute densité sur l'ensemble du territoire métropolitain, des DROM et des collectivités territoriales uniques (hors Guyane) pour en proposer la description 3D la plus fine jamais établie à l'échelle de la France entière. Inscrit dans le plan France relance et soutenu par de multiples commanditaires publics, notamment *via* des fonds FEDER, ce projet séquencé sur cinq ans répond aux besoins d'observation et d'analyse spatiale dans de nombreux domaines de l'action publique (prévention des risques, observation de la ressource forestière, aménagement du territoire...) et constitue un levier pour le développement de futurs services à valeur ajoutée. Les données issues du programme sont d'ailleurs mises à disposition de tous en *open data* au fil de leur production pour inciter le plus grand nombre à en exploiter le potentiel et à en développer les usages.

Le LiDAR (*Light Detection And Ranging*) est une technique de télémétrie qui utilise les propriétés de la lumière. Qu'il soit terrestre ou embarqué dans un avion, le LiDAR repose sur un même procédé d'acquisition : un scanner, dont la position et l'orientation sont mesurées en continu, émet vers un objet ou vers le sol des impulsions laser infrarouges à haute fréquence puis enregistre très précisément le temps écoulé entre l'émission de ces impulsions et leur retour à l'émetteur afin d'en déduire la position des points impactés. À raison de plusieurs centaines de milliers d'impulsions émises par seconde, l'appareil génère rapidement une grande quantité de points géoréférencés. Les données sont ensuite traitées pour élaborer des modèles numériques en 3D : modèles numériques de terrain

(description altimétrique du sol), modèle numérique de surface (description altimétrique du sol et du sur-sol), etc.

La technologie LiDAR HD, par sa capacité à décrire finement le sol (même sous couvert végétal), le chevelu hydrographique (fleuves, rivières...) et les différents étages de la végétation, se révèle être un puissant outil d'analyse et de suivi des évolutions du territoire.

Concrètement, le programme LiDAR HD piloté par l'IGN vise la mise à disposition de données 3D relatives au sol et au sur-sol qui seront à la fois homogènes, riches, fiables, ouvertes et accessibles à tous. Pour mener à bien le projet, l'IGN s'est entouré de plusieurs sous-traitants spécialisés dans l'acquisition de ce type de données. Il réquisitionne aussi sa flotte d'avions Beechcraft King Air 200 embarquant à leur bord des modèles de capteurs LiDAR en complément du matériel dédié aux prises de vue aériennes.

L'ambition à terme est de mettre en place un important équipement numérique 3D voué à constituer le socle géométrique du futur « jumeau numérique » de la France, une réplique numérique et dynamique du territoire. Outil collaboratif d'aide à la décision croisant les données géographiques, mais aussi météorologiques, climatiques ou démographiques, le jumeau numérique permet d'effectuer des simulations et de tester des scénarios d'avenir dans de nombreux domaines de la transition écologique : aménagement du territoire, transition énergétique, gestion durable des ressources agricoles et forestières, prévention des risques naturels...

### Utilisations du LiDAR

#### *Le LiDAR pour prévenir le risque inondation...*

En matière de prévention du risque inondation, les données LiDAR sont exploitées pour élaborer des cartographies du risque et diminuer la vulnérabilité des territoires exposés. En octobre 2020, les avions de l'IGN ont par exemple effectué en urgence des levés LiDAR dans les zones sinistrées par la tempête Alex afin de modéliser précisément les évolutions topographiques des vallées touchées par les intempéries et de faciliter la mise à jour rapide des plans de prévention des risques.

#### *... ou connaître les ressources forestières*

Le potentiel d'usage du LiDAR HD est également élevé dans la perspective d'une meilleure connaissance des peuplements forestiers à l'échelle très fine de la parcelle forestière (et non plus d'un massif). Les données facilitent l'élaboration et le suivi des documents de gestion sylvicole, la dématérialisation des procédures administratives forestières et environnementales (télédéclarations, demandes d'aides), l'amélioration de la desserte forestière et du transport du bois, le suivi et le contrôle des défrichements et des replantations, le suivi de l'état sanitaire des forêts et la prévention des risques (feux de forêts, érosion du cordon dunaire, éboulement...).

## ACCÉLÉRER L'INTERPRÉTATION DES DONNÉES GRÂCE À L'IA POUR RÉPONDRE AU DÉFI DE L'OBSERVATION EN CONTINU

Les techniques d'intelligence artificielle qui ont bouleversé la plupart des domaines du traitement de l'information (traitement du langage, vision par ordinateur, robotique...) révolutionnent aussi très largement les activités qui constituent le cœur de métier de

l'IGN (télédétection, localisation, cartographie). Aujourd'hui l'intégration de l'IA dans les modes de traitement de la donnée permet d'imaginer une actualisation en temps réel des données géographiques, ainsi qu'une restitution de plus en plus précise des résultats.

## DES PERFORMANCES SATISFAISANTES À PLUS DE 73 % POUR LA DESCRIPTION DE L'OCCUPATION DU SOL

Zéro artificialisation nette en 2050. C'est l'objectif inscrit dans la loi climat et résilience d'août 2021 pour enrayer l'artificialisation des sols. L'enjeu, pour chaque collectivité, est dès maintenant de parvenir à maîtriser sa propre expansion et d'adopter une consommation foncière la plus sobre possible. Pour observer, planifier et contenir la croissance urbaine, les territoires pourront bientôt s'appuyer sur le référentiel d'occupation du sol à grande échelle (OCS GE), une base de données géographiques homogènes qui décrira finement la couverture et l'usage des sols ainsi que leur évolution dans le temps pour la France entière. Ce référentiel produit par l'IGN en collaboration avec le Cerema et l'INRAE à la demande du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires offre un terrain d'expérimentation idéal pour exploiter l'IA. De fait, depuis plusieurs années déjà, l'IGN déploie pour cette production un mode opératoire reposant sur des techniques d'intelligence artificielle à la source d'un gain de temps substantiel qui lui permettra d'actualiser les données tous les trois ans. Couvrir la France entière nécessiterait de traiter 16 billions de pixels d'orthophotographies correspondant aux 641 184 km<sup>2</sup> de l'ensemble du territoire français. Difficile, avec des moyens traditionnels, d'atteindre une telle fréquence de mise à jour. Les données sont actuellement produites à un rythme de croisière de quatre départements par mois.

En pratique, l'institut s'appuie sur les capacités apprenantes de l'IA (*deep learning* ou apprentissage profond) développées par ses équipes de recherche pour automatiser la télédétection d'objets (habitations, zones imperméables, espaces agricoles, végétation...) à partir de prises de vue aériennes. L'IA a aujourd'hui la capacité d'apprendre des traits spécifiques à certaines classes et de les généraliser. Selon une méthode dite d'« apprentissage supervisé », l'IA apprend à reconnaître 16 types d'occupation du sol à partir d'un jeu de données constitué de 2 500 km<sup>2</sup>, sélectionnés en fonction de la représentativité du territoire et sur lesquels des photo-interprètes ont annoté le type de couverture du sol. Il s'agit de zones littorales, montagneuses, et plus globalement de tous les macro-paysages repartis sur 64 départements français. Une fois le modèle obtenu, il est appliqué à d'autres régions inconnues de l'IA. En tout, 17 classes de couverture du sol sont référencées par l'intelligence artificielle.

Le résultat est ensuite croisé avec des données issues de référentiels nationaux décrivant l'usage des sols comme la BD TOPO® (la base de données qui regroupe les informations géographiques structurantes comme le bâti et l'ossature, c'est-à-dire le réseau routier, les voies ferrées, les cours d'eau), les bases de données forêt ou encore des données foncières ou relatives aux aides agricoles (Registre parcellaire graphique). Ces croisements permettent de corriger la couverture et de compléter les informations avec l'usage.

Quand on travaille à cette échelle, l'hétérogénéité des données peut devenir problématique et complexifier la tâche de l'IA : concernant la classe bâtiments par exemple, les spécificités locales peuvent être des tuiles en toit, en zinc, en bois... Par ailleurs, couvrir la France requiert environ trois ans. Sur une même zone, les données peuvent être acquises en mars ou en novembre. Un champ de maïs évolue dans ce laps de temps. Le défi de l'IA est d'être robuste à ces variations. Et malgré de rares écueils démontrant le caractère indispensable de l'expertise humaine, les performances du modèle IA et des traitements géomatiques associés sont largement satisfaisantes. Elles permettent d'atteindre une

bonne classification des couvertures et des usages supérieurs à 73 % pour les premiers départements produits.

Dans sa feuille de route IA, l'IGN prévoit d'ailleurs d'entretenir et de renforcer ses capacités techniques en matière d'IA pour la production automatisée des grands référentiels cartographiques (occupation du sol, modèle 3D France entière, etc.).

## CONCLUSION

La capacité à innover de l'Institut fait partie de son ADN. Mais pour relever les défis actuels, l'IGN ne travaille pas seul. Il se positionne aujourd'hui comme le catalyseur des acteurs de la donnée géographique, capable de réunir autour d'une même table les acteurs publics, le secteur privé, le monde de la recherche et des *startup*. Le réseau Datalliance, constitué à l'initiative de l'IGN, illustre cette volonté : son objectif est de réunir les compétences des secteurs publics et privés en matière de données autour des meilleures technologies. Elle doit lui permettre de former un arsenal solide dédié à la transition écologique. L'ampleur des défis actuels exige de les relever ensemble, pour allier les savoir-faire de pointe et le meilleur des technologies.

# La mesure des émissions de CO<sub>2</sub> depuis l'espace et la compréhension de leurs évolutions

Par Philippe LANDIECH

Chef de projet MicroCarb au Centre national d'études spatiales (Cnes)

Et François Marie BRÉON

Responsable scientifique de la mission MicroCarb, CEA-LSCE

Le CO<sub>2</sub> est le principal gaz à effet de serre dont l'augmentation de la concentration dans l'atmosphère est responsable du changement climatique. La concentration « de fond » en augmentation annuelle de l'ordre de 2,5 ppm, est mesurée au sol avec une très haute précision sur une centaine de sites dans le monde. Cette concentration montre des variations saisonnières importantes en particulier dans l'hémisphère nord. Ces variations sont dues aux flux naturels du carbone : absorption par les végétaux par le processus de la photosynthèse, émissions lors de la respiration des plantes, échanges avec les masses d'eau océaniques... Le principe de ces échanges est bien compris mais ils sont encore mal quantifiés. En plus du besoin de connaître les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> et leur évolution dans le temps, cette meilleure quantification des flux naturels passe par une mesure dense aussi bien spatialement que temporellement des concentrations. L'observation spatiale est bien adaptée à cet objectif. Le satellite MicroCarb, de 180 kg, développé par le Cnes et emportant un spectromètre à réseau dispersif compact, devrait être lancé en 2024 et prendre le relais du satellite OCO-2 de la NASA, précurseur en la matière. Des satellites opérationnels devraient leur succéder, afin de remplir ce besoin de densification des mesures, notamment dans le cadre du projet européen Copernicus.

## L'APPORT DU SPATIAL POUR LA MESURE DU CO<sub>2</sub>

Plusieurs rapports<sup>1</sup> et <sup>2</sup> ont souligné la contribution nécessaire des systèmes spatiaux à la surveillance et à la compréhension du cycle du carbone. Une meilleure compréhension est essentielle dans le contexte du changement climatique actuel, causé par l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et ayant un fort impact sur les écosystèmes qui régulent le cycle naturel du carbone. L'augmentation récente des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines (et en particulier la combustion de combustibles fossiles) a rompu l'équilibre naturel existant. Elle est cependant partiellement compensée par un effet de puits des océans et des surfaces terrestres (végétation). Une question clé est de savoir comment ces puits évolueront à l'avenir, car le changement climatique peut avoir un

---

<sup>1</sup> CEOS (2014), "Strategy for carbon observations from space", CEOS report April 2014.

<sup>2</sup> IPCC (2013), "Fifth Assessment Report - Climate Change 2013".

impact significatif sur les écosystèmes. Le principe des échanges entre milieux est certes bien compris mais ils sont encore mal quantifiés. Ainsi, on observe des anomalies très importantes du taux de croissance atmosphérique du  $\text{CO}_2$  lors des événements El Niño et autres anomalies climatiques, ou du fait des grands incendies qui se multiplient avec le changement climatique. En plus du besoin de connaître les émissions anthropiques de  $\text{CO}_2$  et leur évolution dans le temps, il est donc primordial de comprendre les flux naturels. Si les mesures *in situ* (en surface) de la concentration des gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ...) fournissent des mesures de haute précision, elles restent inégalement réparties sur la surface de la terre et sont difficiles à inter-étalonner. À l'inverse, un système spatial peut collecter des données de manière globale et homogène, si les conditions météorologiques le permettent (absence de couvert nuageux).

La communauté réclame désormais un système opérationnel capable de combiner les inventaires, les mesures *in situ* et les observations spatiales, avec des exigences ambitieuses pour le système spatial en termes de précision, de résolution spatiale, de couverture et de temps de revisite<sup>3</sup>. Dans le cadre de la COP-21, qui s'est tenue en décembre 2015 à Paris, le Gouvernement français a annoncé la décision de mener à bien le développement du programme MicroCarb et a demandé au CNES de conduire les travaux, conjointement avec la communauté scientifique nationale. Ce projet se situe entre la mission pionnière, toujours en fonctionnement, OCO-2 (USA) et un futur système opérationnel tel que Copernicus CO2M, dont la mission se concentrera principalement sur la quantification des flux anthropiques. MicroCarb, dont le lancement est prévu en 2024, assurera la continuité de la surveillance du  $\text{CO}_2$  et explorera également des concepts d'instruments innovants qui pourraient s'avérer être des pierres angulaires pour de futurs instruments et missions. MicroCarb est un microsatellite d'une masse totale d'environ 180 kg, composé d'un instrument compact, conçu pour la surveillance des concentrations de  $\text{CO}_2$  dans la colonne d'atmosphère, aménagé sur une plateforme issue de la ligne de

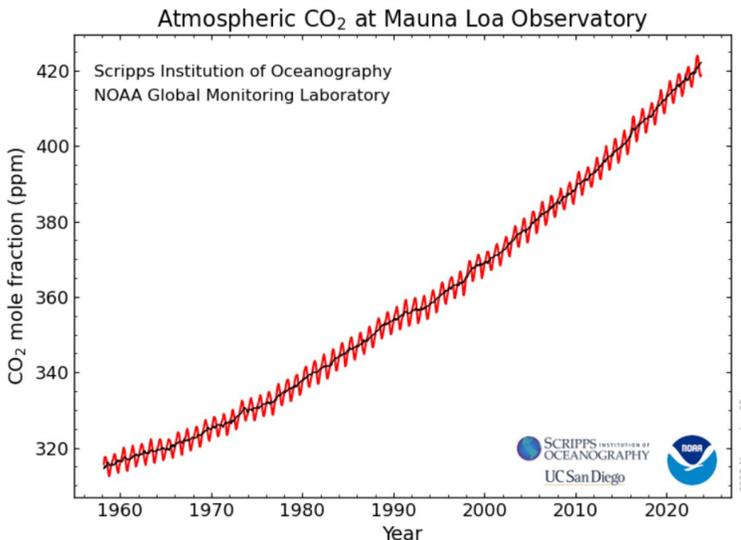


Figure 1 : L'augmentation observée du  $\text{CO}_2$  depuis les années 1960 (Source NOAA).

<sup>3</sup> CEOS (2018), "Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team. A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space", 8 October 2018.

produits Myriade développée par le CNES et déjà utilisée pour une vingtaine de satellites scientifiques ou militaires. Malgré un volume et un coût de développement bien inférieurs à ceux d'OCO-2, MicroCarb devrait fournir une précision de mesure conforme aux recommandations internationales<sup>4</sup>.

## UNE PHYSIQUE DE LA MESURE TRÈS COMPLEXE

On distingue trois grands concepts instrumentaux aptes à mesurer le CO<sub>2</sub> depuis l'espace, les actifs à base de Lidars et les passifs utilisant soit le rayonnement émis par le soleil et réfléchi par la surface de la terre, soit le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère. Pour la mesure Lidar, on utilise des impulsions à deux longueurs d'onde proches, choisies pour leur propriété à subir des absorptions énergétiques différentes par les molécules de CO<sub>2</sub>. Le rapport des mesures peut être relié à la concentration moyenne dans l'atmosphère. Avec les mesures basées sur le rayonnement du Soleil, la lumière traverse deux fois l'atmosphère et le signal retour est analysé au travers d'un spectromètre qui va permettre de mesurer la profondeur des raies d'absorption (cf. Figure 2 ci-dessous) qui est reliée à la quantité de molécules de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

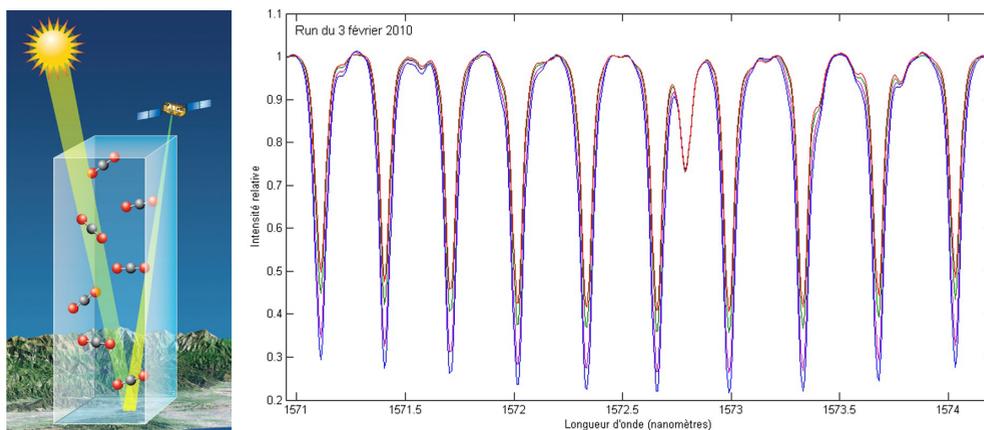


Figure 2 : Principe de mesure (Source : Cnes).

Cette mesure est donc reliée à la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'air (la quantité recherchée), mais aussi à l'épaisseur de l'atmosphère qui est en lien avec la pression de surface. Cette pression varie considérablement avec l'altitude du point visé. C'est pourquoi une mesure complémentaire est nécessaire pour laquelle on applique le même principe à des raies d'absorption générées par l'oxygène atmosphérique. Cette mesure donne accès à la pression de surface, la relation entre la quantité d'oxygène et la pression de surface étant homogène et très bien connue.

La mesure ne peut être valide qu'en cas de ciel dégagé de tout nuage, sans quoi la lumière sera réfléchi par les nuages et non par la surface terrestre, ce qui reviendra à négliger les couches basses de l'atmosphère, qui se trouvent être les plus denses.

La taille du pixel au sol résulte de l'ouverture de l'instrument et de la résolution de ses détecteurs. Dans ce pixel, le signal mesuré dépend de l'albédo, en lien avec la nature des

<sup>4</sup> GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM (2011), "Systematic observation requirements for satellite-based data products for climate", GCOS-154, December 2011.

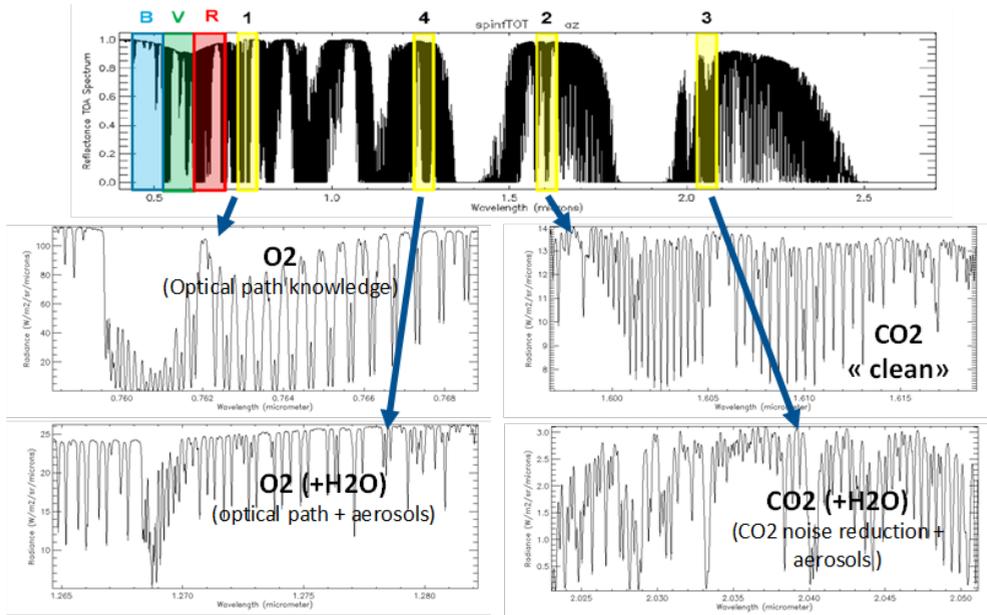


Figure 3 : Positionnement des bandes MicroCarb dans le spectre de transmission atmosphérique visible et proche IR (Source : Cnes).

sols et l'état du couvert végétal, mais aussi de la pente du terrain observé. Viennent s'y ajouter des effets induits comme la fluorescence de la végétation induite par les processus chimiques de la photosynthèse.

En pratique, l'interprétation des mesures de MicroCarb fera appel à des modèles numériques de terrain globaux, additionnés de tapis d'images pouvant donner à plusieurs saisons une estimée de cet état de surface. Des systèmes globaux comme Copernicus, sont à même de fournir périodiquement de telles bases de référence.

D'autres effets sont à considérer pour traduire les spectres mesurés en concentrations de  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Ainsi, la présence d'aérosols dans l'atmosphère modifie le trajet optique du signal mesuré (de façon potentiellement plus complexe que les nuages), et doit donc être prise en compte. De même, les atomes d'oxygène de la très haute atmosphère, excités par le rayonnement solaire, émettent une lumière (phénomène appelé "Airglow") qui contribue au signal mesuré et doit être déduit.

Une fois en vol, l'instrument devra être étalonné, pour pouvoir interpréter les comptes numériques du détecteur en termes de luminance. Pour ce faire, on se base sur des mesures dans des conditions qui sont bien connues. Ainsi, on pourra utiliser les mesures de nuit pour évaluer le *dark*, des lampes calibrées placées devant les détecteurs, mais aussi dans le cas des systèmes passifs, des visées directes de l'instrument vers la Lune ou à travers d'atténuateurs vers le Soleil, ce qui permet d'évaluer directement la mesure à un spectre connu.

Les algorithmes d'inversion permettent d'interpréter les spectres mesurés en termes de  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Pour avoir un intérêt scientifique, l'estimation de la concentration de  $\text{CO}_2$  doit avoir une précision qui est significativement meilleure que le ppm (partie par million =  $10^{-6}$ ). On a vu que le signal global du  $\text{CO}_2$  avait dépassé 400 ppm, ce qui fixe un niveau de précision relative très exigeant. Notons que la mesure du  $\text{CH}_4$  atmosphérique est plus "facile" car les signaux observés sont, en relatif, nettement plus forts que ceux du  $\text{CO}_2$ .

## L'INSTRUMENT ET LE SATELLITE MICROCARB

L'instrument MicroCarb est passif et utilise le concept du réseau à échelle pour disperser la lumière dans les 4 bandes spectrales considérées, 2 pour échantillonner les raies d'absorption du CO<sub>2</sub> et 2 pour les raies d'absorption de l'oxygène. Cet instrument a été développé par Airbus sur la base d'un concept du CNES. Pour être emporté sur un microsattellite de 180 kg au total, 80 kg sont alloués à l'instrument, ce qui implique une très grande compacité. Le concept optique permet ainsi de « replier » les 4 bandes spectrales sur une même matrice de détection, au moyen de prismes intermédiaires puis à travers des fentes calibrées avant d'attaquer le réseau dispersif et de finalement étaler les spectres sur le détecteur.

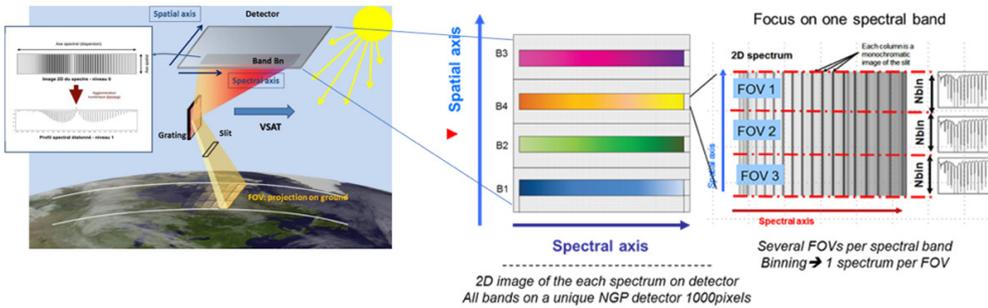


Figure 4 : Concept instrumental (Source : Cnes).

Le concept optique comprend un télescope et un spectromètre. Une partie du signal en sortie du télescope est dirigée vers le spectromètre, l'autre vers un imageur, ce qui permet d'obtenir, en plus des spectres à très haute résolution, des images de la scène et y détecter la présence ou non de nuages. Pendant la phase d'étalonnage, ces images permettent aussi d'affiner la connaissance du positionnement du champ de vue au sol, par comparaison à des images de référence géolocalisées. La matrice de détection du spectromètre, quant à elle, ne reflète qu'une dimension spatiale, la seconde dimension étant utilisée pour balayer les longueurs d'onde des bandes spectrales. La taille du champ de vue au sol est définie le long de la trace par le temps d'intégration nécessaire à l'obtention du bon rapport signal à bruit, de l'ordre de 1,4 s, ce qui correspond à 9 km à la vitesse orbitale et hors de la trace, donc en largeur, par le moyennage que l'on fera sur plusieurs pixels du détecteur, là encore pour atteindre le rapport signal à bruit nécessaire aux exigences de la mission. Dans le cas de MicroCarb, le meilleur compromis entre temps d'intégration, rapport signal à bruit et probabilité de nuage conduit à des champs de vue totaux de 13,5 km (*across track*) x 9 km (*along track*), découpés au sol en 3 mesures moyennes *across track* de 4,5 km.

Dans le spectrogramme mesuré, comme ce qui est recherché est au final la mesure de la profondeur des raies d'absorption par rapport au niveau de signal transmis appelé continuum, on comprend que le niveau de signal étant très faible en fond de raie, ce seuil de rapport signal à bruit est majeur. Pour aider à la mesure, une très bonne résolution spectrale aidera, si on peut attribuer plusieurs échantillons de mesures à chaque raie et donc disposer de mesures additionnelles des flancs de la raie. Les autres postes d'erreur principaux à maîtriser sont la non linéarité, qui impactera également les bas flux, la lumière parasite qui doit être proscrite pour éviter des signaux fantômes, ainsi que la réponse spectrale de l'optique de l'instrument qui doit être connue pixel par pixel de façon à savoir dans quelle mesure chaque longueur d'onde précise en entrée est étalée sur plusieurs pixels voisins du détecteur.

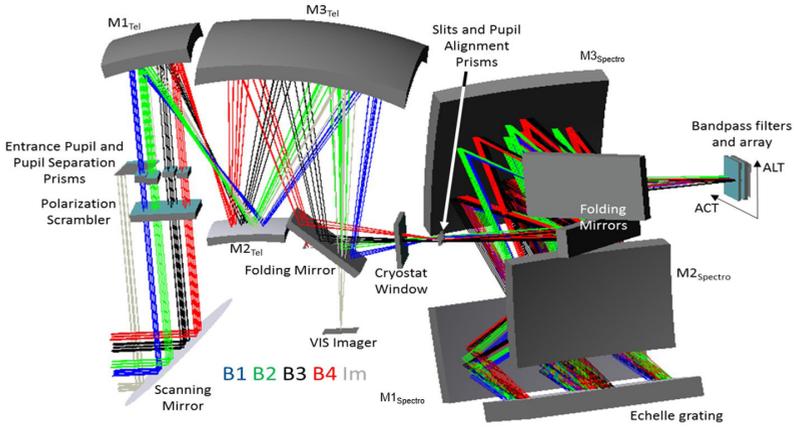


Figure 5 : *Design* de l'instrument (Source : Cnes).

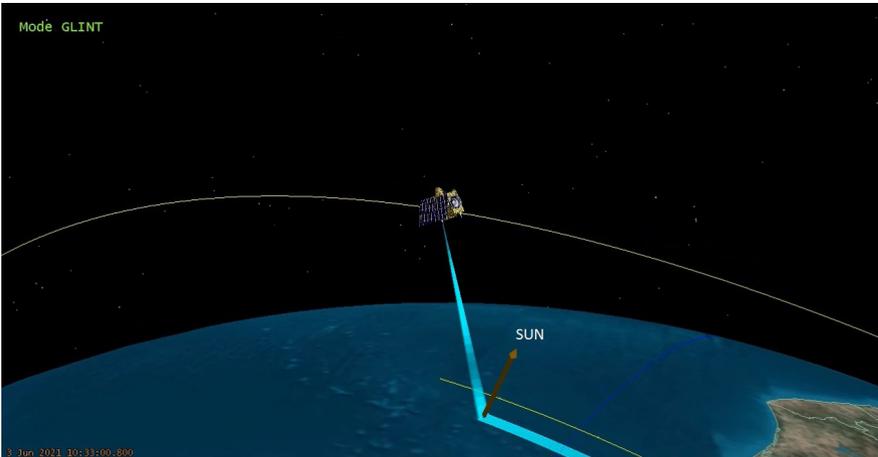
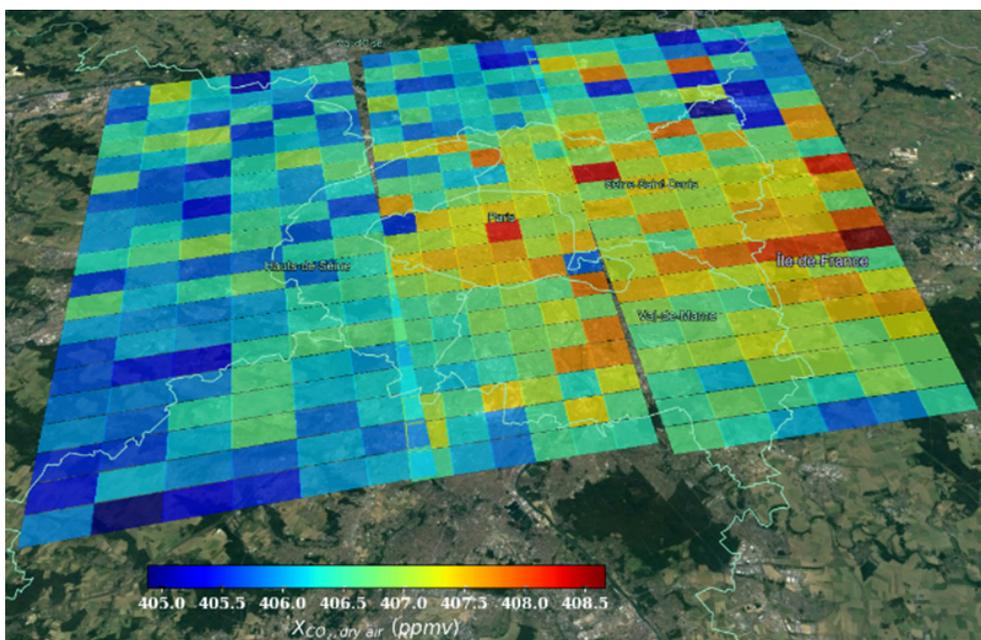


Figure 6 : Principaux modes de prise de vue de l'instrument : Nadir (terres émergées) et *Glint* (océans) (Source : Cnes).

Pour bien fonctionner, notamment dans l'infrarouge, le détecteur doit être refroidi à des températures de l'ordre de  $-110^{\circ}\text{C}$ . L'emport d'une machine cryogénique étant difficile sur un microsatellite du fait de sa consommation électrique et des micro-vibrations générées, un système passif avec un radiateur collé au dos du détecteur, isolé du reste de l'instrument et protégé par un baffle empêchant toute entrée solaire ou liée à la Terre, lui a été préféré.

Les modes principaux d'observation sont le mode Nadir au-dessus des terres émergées (verticale locale), et *Glint* au-dessus des océans (le *Glint* est le reflet du Soleil vu par le satellite à la surface de la Terre, c'est cette direction qui est visée au-dessus des océans), ce qui est nécessaire car l'océan est trop sombre dans les longueurs d'onde observées en dehors de cette direction particulière. D'autre part, de nombreux modes de prise de vue sont utilisés pour étalonner l'instrument (étalonnages radiométrique, spectral, géométrique), par exemple en observant la Lune et le Soleil comme déjà évoqué. D'autres modes permettent une validation des concentrations de  $\text{CO}_2$  issues des mesures MicroCarb par comparaison avec des mesures acquises au sol par des sites de référence vers lesquels le satellite est capable de pointer sa ligne de visée. Pendant la phase de calibration/validation, des lâchers de ballons instrumentés, qui fourniront un profil vertical du  $\text{CO}_2$  atmosphérique jusqu'à une altitude de l'ordre de 35 km, seront réalisés de façon synchronisée avec les passages de MicroCarb à proximité des sites de largage (Aire-sur-Adour...).

Pour pointer l'instrument dans la direction voulue, le satellite pourra compter à la fois sur son agilité en tangage, roulis et lacet, mais aussi sur un miroir pivotant en entrée du chemin optique de l'instrument, qui accroît la dynamique de suivi de cibles en roulis (direction *across track*). Ces capacités seront mises à profit pour tester un mode probatoire d'évaluation des activités anthropiques au-dessus de villes comme Paris, en combinant des balayages en tangage successivement vers l'avant et l'arrière du satellite réalisés par le satellite et des décalages du miroir, de façon à agréger une surface englobant toute l'agglomération.



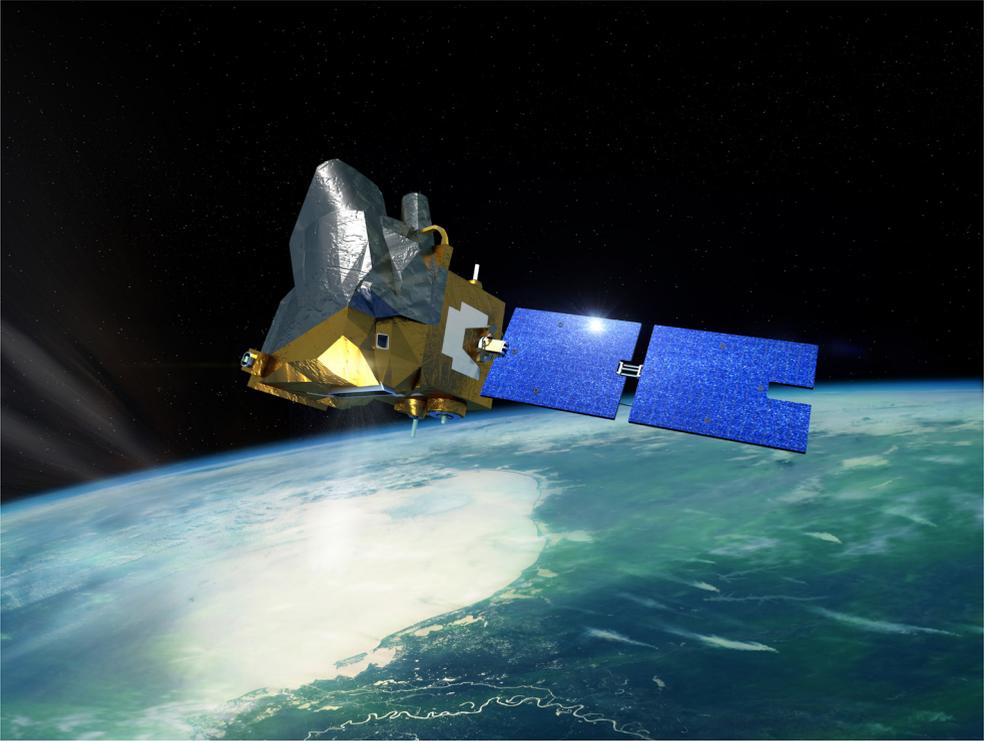


Figure 8 : Vue d'artiste du microsatellite MicroCarb (© Cnes/Sattler Oliver).



Figure 9 : Le microsatellite MicroCarb en intégration (© Cnes).

L'orbite du satellite est héliosynchrone, à 650 km d'altitude. Le caractère « héliosynchrone » est nécessaire pour rester proche de midi solaire, permettant alors un niveau de signal suffisant pour la mesure. Une orbite permet un échantillonnage des concentrations atmosphériques entre les deux pôles. Un peu moins de 15 rotations de la Terre sont réalisées chaque jour, répartissant les traces au sol d'acquisitions uniformément selon les longitudes. D'un jour à l'autre, le positionnement des traces au sol sur Terre évolue, ce qui permet une couverture complète du globe. L'orbite est choisie pour un cycle de 25 jours, période au bout de laquelle la trace au sol du satellite se superpose à celle du cycle précédent.

L'intégration du satellite s'est achevée en décembre 2023 et le lancement est espéré désormais en 2024, avec une incertitude liée à la disponibilité des lanceurs, perturbée en Europe par les échecs de ces dernières années sur le lanceur Vega.

## LES TRAITEMENTS EN AVAL

Pour fixer des ordres de grandeur, l'amélioration de la connaissance des flux naturels du CO<sub>2</sub> nécessite une connaissance de la mesure à mieux que 0,2 ppm sur des moyennes spatiales (≈ 500 km) et temporelles (≈ hebdomadaires). Cet objectif est piloté par le besoin de suivi des flux naturels de carbone. Pour le suivi des émissions des villes ou des sites industriels, c'est plutôt l'erreur aléatoire (bruit spatial) qui est essentielle. Le panache issu des émissions d'une ville comme Paris est de l'ordre de 1 ppm (et varie en fonction des conditions atmosphériques) et l'erreur aléatoire doit donc être significativement inférieure à ce seuil.

L'ensemble de la télémessure scientifique du satellite sera dirigé vers un centre de mission apte à l'exploiter, à raison de l'ordre de 70 Go de données par jour, obtenus au travers de 6 passages journaliers en visibilité des stations de réception sol localisées pour certaines à hautes latitudes.

Il s'agit ensuite de traiter ces mesures par niveaux, tels que représentés sur la Figure 10 située page suivante : les données brutes sont décommutées et agrégées avec diverses données sol telles que la météo et la localisation fine du satellite pour constituer le produit de départ de niveau 0 (L0). Le passage au travers des paramètres de calibration de l'instrument permet ensuite de générer des niveaux L1, à savoir des spectrogrammes dans les 4 bandes spectrales, géo-référencés sur une grille, lorsque la mesure est considérée valide, notamment en fonction de la présence de nuages dans le champ de vue.

Puis vient le gros du traitement d'inversion de ces spectres pour remonter à la concentration de CO<sub>2</sub> par rapport à l'air sec (ou à l'O<sub>2</sub>) en utilisant les 4 bandes spectrales, en utilisant un algorithme itératif apte à encaisser toutes les non linéarités du transfert radiatif atmosphérique. L'algorithme minimise une fonction de coût, qui porte sur la différence entre le spectre mesuré et corrigé au niveau 1, et un spectre calculé par l'algorithme de transfert radiatif appliqué à un vecteur d'état *a priori*. Il ajuste ainsi plusieurs paramètres (profils de CO<sub>2</sub>, de vapeur d'eau, pression de surface, densité et altitude des aérosols...) de manière itérative. Les colonnes de CO<sub>2</sub> qui sont déduites de ce processus forment le cœur du produit dit de niveau 2.

Les produits de niveau 3 sont des moyennes spatiales et temporelles des produits de niveau 2. Leur utilité est essentiellement pour la validation (on vérifie qu'il n'y a pas de structures manifestement erronées) et la communication. Les produits de niveaux 4 sont les flux de surface déduits des colonnes de CO<sub>2</sub> et obtenus avec la connaissance du transport atmosphérique. Ils sont obtenus avec des outils dits d'inversion atmosphérique qui sont développés dans les laboratoires de recherche.

Lors de la première année en orbite, aura lieu la phase dite de CALVAL, visant dans un premier temps à affiner tous les traitements d'étalonnage des spectres et des images (niveau 1), puis mettre au point tous les traitements d'inversion des spectres (passage du niveau 1 au niveau 2). Pour cela, en premier lieu seront utilisés les modèles globaux disponibles, que MicroCarb cherchera ensuite à améliorer tout au long de sa mission en exploitation, prévue sur au moins 5 ans. Mais aussi toutes les mesures sol disponibles, qui pourront être densifiées voire même regroupées dans des campagnes multi-capteurs (stations sol, avions, ballons), telles que les campagnes MAGIC organisées régulièrement en France. Des inter-comparaisons avec d'autres satellites alors en vol seront aussi recherchées, grâce à des accords de coopération interagences (NASA, JAXA...).

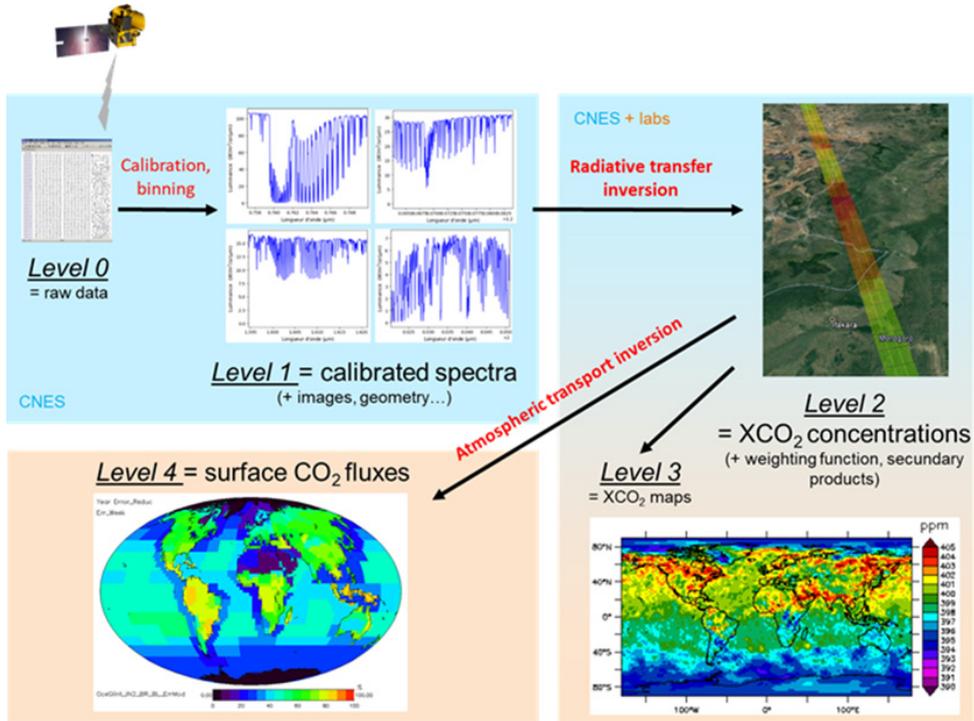


Figure 10 : Les niveaux de produit jusqu'à l'obtention de cartes globales de flux (Source : Cnes).

## MUTUALISATION DES DONNÉES

Comme on l'a vu, la période de couverture globale de la Terre par MicroCarb sera de 25 jours. La proportion de scènes non nuageuses ne devrait être que de l'ordre de 25 % d'après les statistiques météorologiques. Pour de futurs systèmes opérationnels, il sera nécessaire d'observer les cibles d'intérêt le plus fréquemment possible afin d'une part de suivre les évolutions temporelles des émissions liées à la température (chauffage), au cycle hebdomadaire des émissions, ou à des événements particuliers (vacances, incidents industriels) mais aussi de compenser la couverture nuageuse. C'est pourquoi la mise en orbite d'une flotte de plusieurs satellites identiques est envisagée. Rien n'empêchera de compléter leurs mesures par des initiatives de nanosatellites, qui ne pourront cependant

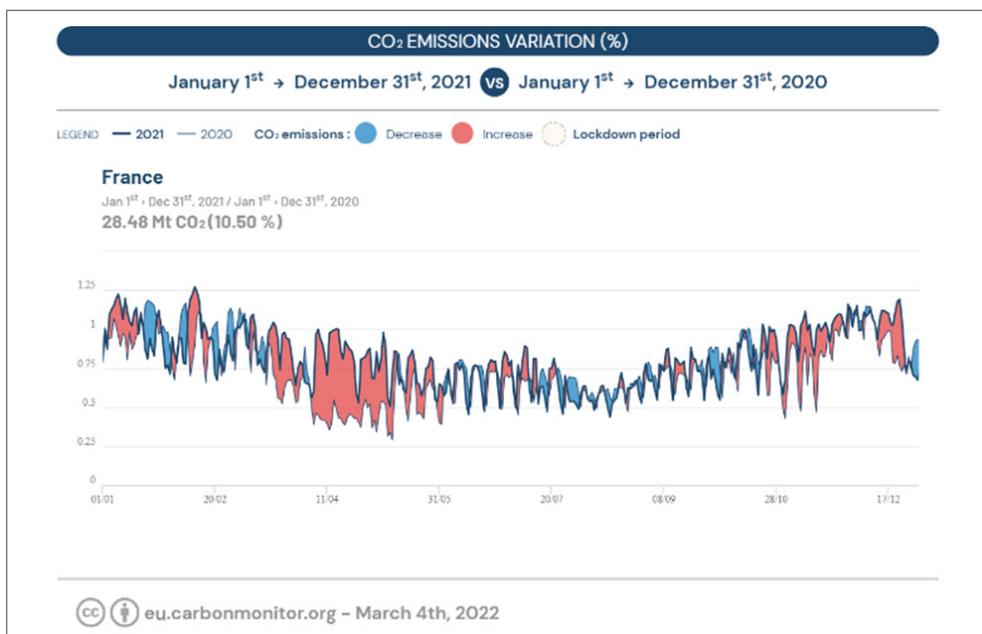


Figure 11 : Évolution des émissions en % de CO<sub>2</sub> entre 2020 et 2021 pour la France (Communication P. Ciais, LSCE et site Carbon monitor).

vraisemblablement apporter que des mesures partielles, avec par exemple uniquement la mesure des bandes CO<sub>2</sub> donc besoin de données exogènes pour en déduire les caractéristiques de la colonne d'air.

*In fine*, pour atteindre un objectif de disponibilité satisfaisant, les données collectées par MicroCarb puis ses successeurs, auront vocation à être assimilées avec non seulement les mesures au sol disponibles localement en continu, mais aussi d'autres approches basées sur la notion d'inventaire des consommations d'énergie ou de matières premières, pour tenter d'évaluer objectivement les émissions des États et assier les négociations suite aux accords de Paris. À titre d'illustration, le site Carbon monitor offre un tel outil de suivi des émissions par pays, ville ou zone géographique.

## CONCLUSION

L'accroissement de la quantité des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et le réchauffement climatique qui en découle, renforcent la nécessité de mesure avec une bonne répétitivité spatiale et temporelle de la concentration de CO<sub>2</sub>, en vue non seulement d'évaluer les effets liés aux activités anthropiques, mais surtout en premier lieu d'appréhender les mécanismes de circulation et d'échange du CO<sub>2</sub> entre l'atmosphère et les autres milieux et leurs évolutions en réaction au réchauffement global déjà observé.

Le domaine spatial est à même de fournir des systèmes permettant ce renforcement des capacités de mesure, au prix toutefois d'un investissement important pour venir à bout d'une physique de la mesure complexe, soumise à de nombreux postes d'erreur à maîtriser, non seulement au niveau des instruments mais aussi de la modélisation de l'atmosphère. MicroCarb, mission précurseur européenne apportera une première pierre à cet édifice dans la perspective de systèmes opérationnels futurs.

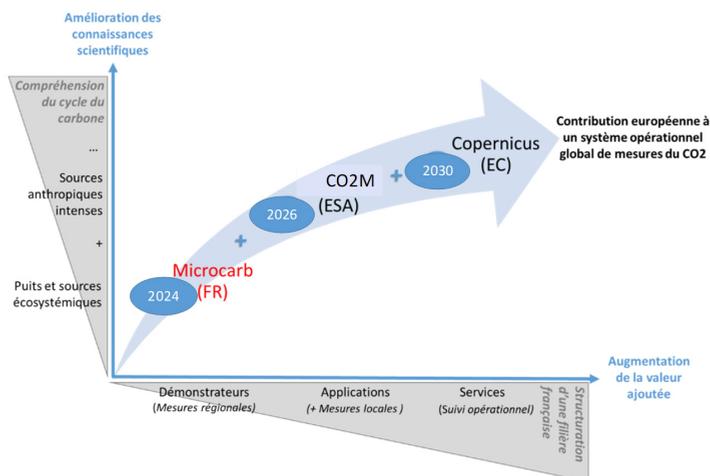


Figure 12 : Roadmap des missions CO<sub>2</sub> (Source : CEOS, Committee on Earth Observation Satellites).

## BIBLIOGRAPHIE

CEOS (2014), “Strategy for carbon observations from space”, CEOS report April 2014.

IPCC (2013), “Fifth Assessment Report - Climate Change 2013”.

CEOS (2018), “Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team. A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space”, 8 October 2018.

GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM (2011), “Systematic Observation requirements for satellite-based data products for climate”, GCOS-154, December 2011.

PASTERNAK F. *et al.* (2016), “The MicroCarb instrument”, International Conference on Space Optics, Biarritz France, 18-21 October 2016.

PASCAL V., BUIL C. *et al.* (2014), “An improved MicroCarb dispersive instrumental concept for the measurement of greenhouse gases concentration in the atmosphere”, International conference on Space Optics, Tenerife, Canary Island, Spain, 7-10 October 2014.

IBOS R., JAUBERT J., PRADINES D. & VARINOIS A. (2016), “MicroCarb Microsatellite: Mission and system analysis for pointing modes definition and constraints management”, International Conference on Space Optics, Biarritz France, 18-21 October 2016.

CNES, “Website Scientific missions”, <https://microcarb.cnes.fr/fr/MICROCARB/Fr/index.htm>

BÖSCH H. (2006), “Space based near infrared CO<sub>2</sub> measurements: testing the orbiting carbon observatory retrieval algorithm and validation concept using SCIAMACHY observations over Park Falls, Wisconsin”, *Journal of Geophysical Research atmospheres*, December 2006.

BUISSON F. (2019), “The MicroCarb Project: an initiative for a global monitoring of the CO<sub>2</sub> atmospheric concentration”, IAC-19-B1.2.3x48834.

JOUGLET D., BRÉON F. M. & LANDIECH P. (2023), “The MicroCarb CO<sub>2</sub> mission: status and technical insight”, IWGGMS-19.

# Observer la Terre et son atmosphère pour améliorer les prévisions météorologiques

Par Philippe CHAMBON, Quentin LIBOIS

Direction de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Météo-France, Toulouse

Et Bruno PIGUET

Direction des Systèmes d'Observation, Météo-France, Toulouse

Météo-France s'appuie sur des prévisions météorologiques pour assurer ses missions de protection des populations et des biens. Ces prévisions sont basées sur des modèles numériques, alimentés par des observations diverses, provenant en majeure partie des satellites d'observation de la Terre. Ces satellites sont en renouvellement continu grâce aux efforts des agences spatiales. L'agence EUMETSAT, opérant les satellites météorologiques opérationnels européens, s'apprête par exemple à lancer une nouvelle génération d'instruments spatiaux qui permettront d'améliorer les capacités de prévision. En parallèle, des travaux de recherche permettent d'améliorer ses modèles en utilisant des observations *in situ* et spatiales. Les progrès à venir en matière de prévision du temps s'appuieront sur des observations plus fréquentes et à plus haute résolution spatiale avec de nouvelles générations de satellites, ainsi que l'émergence de technologies comme l'IA.

## INTRODUCTION

Afin d'assurer ses missions de protection des populations et des biens, Météo-France s'appuie sur des prévisions météorologiques réalisées grâce à des modèles numériques. Ces derniers permettent, à partir de conditions initiales, de prédire l'évolution des conditions météorologiques jusqu'à 4 jours à l'avance sur tout le globe avec une résolution variant de 5 à 25 km, et jusqu'à 2 jours à l'avance sur l'Europe de l'Ouest à une résolution beaucoup plus fine de 1,3 km. Ces conditions initiales sont obtenues grâce à des algorithmes qui combinent de manière optimale des observations et une prévision antérieure, en tenant compte de leurs erreurs respectives. On parle d'assimilation de données.

Aujourd'hui, plus de 90 % des observations utilisées pour initialiser le modèle global ARPEGE proviennent des satellites d'observation de la Terre. Dans le cas du modèle régional AROME, les données satellitaires sont en proportion moins nombreuses (environ 10 %) car des observations plus adaptées à ce modèle à fine échelle sont utilisées, telles que les observations des réseaux de radars français et européen. Le modèle AROME bénéficie tout de même largement des observations satellitaires de par ses conditions aux limites fournies par ARPEGE. Météo-France s'appuie également sur une grande variété d'observations complémentaires, qu'il s'agisse de valider des produits satellite, d'avoir une mesure plus précise, ou d'accéder à des variables qui peuvent difficilement être mesurées depuis l'espace : réseaux opérationnels installés au sol mais aussi, instruments pouvant être déployés lors de campagnes de mesure, au sol, sous des ballons, des drones ou des avions.

Grâce aux efforts des agences spatiales, le système d'observation de la Terre depuis l'espace est en perpétuel renouvellement. Une amélioration continue de la capacité des systèmes de prévision à intégrer de nouvelles observations satellitaires est ainsi nécessaire afin d'améliorer les prévisions météorologiques, aux bénéfices des usagers. Au niveau européen, le premier fournisseur de données satellitaires est l'agence EUMETSAT. Cette organisation européenne, fédérant 30 États membres européens, s'apprête à renouveler l'intégralité de sa flotte de satellites en orbite basse (Metop Seconde Génération (MetopSG), à environ 800 km de la Terre) et en orbite géostationnaire (Meteosat Troisième Génération (MTG), à environ 36 000 km de la Terre), en déployant des technologies nouvelles et très prometteuses. La Figure 1 montre les deux premiers satellites Metop-SG en tests dans les salles blanches d'Airbus Defence and Space (ADS) à Toulouse. EUMETSAT s'appuie sur les développements instrumentaux de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) ainsi que d'autres partenaires tels que le Centre national d'études spatiales (CNES), le Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (DLR) ou encore Copernicus, le programme d'observation de la Terre de l'Union européenne. Au niveau international, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) définit les bonnes pratiques d'échanges de données d'observations entre nations depuis des décennies. C'est ainsi que d'autres acteurs, principalement Nord-américains et asiatiques, jouent aussi un rôle clé en partageant, tout comme les Européens, leurs données d'observation.



Figure 1 : Photo des satellites Metop-SG A (positionné à l'horizontale à gauche) et Metop-SG B (positionné à la verticale à droite) en test dans les locaux d'Airbus Defence and Space le 10 novembre 2023 à Toulouse lors d'un évènement presse organisé par ADS, EUMETSAT et l'ESA (Crédits photographie EUMETSAT).

En amont de ces systèmes opérationnels de prévision, Météo-France mène également des recherches afin d'améliorer les modèles numériques eux-mêmes. Cela implique l'amélioration de la compréhension des processus physiques, dans l'objectif de mieux les modéliser. Pour ces recherches, si les mesures *in situ* ont joué et continuent de jouer un rôle important, en particulier à travers des campagnes de mesures ponctuelles, les mesures spatiales prennent une importance grandissante. En effet, elles permettent de systématiser l'observation de phénomènes, sur de longues périodes et de grandes zones géographiques. Certaines missions spatiales visent plus spécifiquement à suivre

l'évolution du climat, en assurant une continuité des mesures dans le temps. Il est ainsi possible de construire des séries temporelles de plusieurs décennies, indispensables pour détecter les changements climatiques et déterminer leurs causes ; ces séries temporelles sont largement utilisées pour contraindre les modèles qui simulent le climat futur. Pour ces missions, la qualité des mesures et leur inter-calibration avec les mesures passées sont fondamentales. En parallèle, d'autres missions visent à exploiter les dernières technologies disponibles afin d'enrichir notre compréhension du système Terre en déployant en orbite des instruments innovants permettant d'accéder à des informations nouvelles.

Le domaine de l'observation de la Terre est en évolution très rapide, et les perspectives en matière de recherche et d'applications en météorologie sont nombreuses, en particulier grâce à la miniaturisation des capteurs permettant d'envisager des constellations, et à l'essor de l'intelligence artificielle.

## PHYSIQUE DE LA MESURE (*IN SITU* ET TÉLÉDÉTECTION) ET VARIABLES MESURÉES

Historiquement, les premières explorations de la dimension verticale de l'atmosphère ont été faites avec des mesures *in situ*, utilisant sur divers vecteurs (ballons, cerfs-volants, avions) des instruments similaires à ceux utilisés au sol. Ainsi Jean-Baptiste Biot et Louis Gay-Lussac utilisaient en 1804 une montgolfière pour des mesures de pression et de température jusqu'à 4 000 m d'altitude, et Robert Bureau et Pierre Idrac inventaient la radiosonde en 1929. Dans ces instruments, un élément sensible est au contact de l'air dont on veut mesurer les propriétés. Au fil du temps, ces capteurs ont été améliorés et adaptés aux conditions rencontrées : grande dynamique de mesure, besoin de plus grande rapidité de réaction. Ainsi, le capteur de température d'une radiosonde moderne est de très petite taille (pour diminuer son inertie), il n'a pas d'abri de protection du rayonnement (pour minimiser le poids et éviter les accrétions de givre), mais il est recouvert d'un film très réfléchissant, et les données sont corrigées *a posteriori* pour tenir compte des imperfections du capteur. Sur les avions, les carters de protection des sondes de température font encore l'objet de développements, pour s'approcher d'un *optimum* conciliant des besoins *a priori* antagonistes : amener un flux d'air le moins perturbé possible sur l'élément sensible, tout en le protégeant des gouttes d'eau, des cristaux de glace, et en ayant une partie réchauffée pour la protection contre le givrage, le tout en garantissant un temps de réponse suffisamment faible pour capturer la variabilité de l'atmosphère à l'échelle métrique sur un vecteur qui se déplace à une centaine de mètres par seconde.

Même si ces mesures restent locales, les progrès apportés par le spatial leur ont directement bénéficié. Le développement de la radionavigation par satellite, qui fournit la position et la vitesse de déplacement du ballon (donc le vent), a beaucoup apporté au radiosondage, avec une précision telle que depuis une vingtaine d'années les sondes n'ont plus besoin de capteur de pression : la pression calculée à partir de celle mesurée au sol et de l'intégration de la densité de l'air le long de la trajectoire de la sonde est plus précise que celle d'un baromètre embarqué. Les sondes s'en retrouvent allégées, les plus récentes pesant 36 g. Les données des avions sont aussi transmises en temps quasi-réel par satellite.

Les mesures par télédétection, réalisées depuis le sol ou l'espace se sont développées depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, et s'appuient sur diverses gammes du spectre électromagnétique et plusieurs méthodes.

Les méthodes actives consistent à émettre une onde, puis à mesurer ce qui est rétrodiffusé par l'atmosphère. Ainsi les radars, selon leur longueur d'onde (dans les micro-ondes), sont sensibles aux gouttes de pluie, aux gouttelettes des nuages ou aux propriétés de la surface. Les lidars (utilisant un laser) peuvent être sensibles aux nuages, aux aérosols

(poussières désertiques, cendre volcanique, feux de biomasse, pollution anthropique) ou à certaines espèces chimiques, lorsque leur fréquence correspond à une raie du spectre de la molécule, et même à la température ou la pression en mesurant une espèce chimique dont la proportion est stable (oxygène, azote). Lorsque ces instruments ont la capacité de mesurer le décalage en fréquence de l'onde reçue (capacité Doppler), ils donnent accès au vent. Ces méthodes actives ont été déployées dans l'espace pour effectuer des mesures météorologiques depuis la fin des années 1990.

Parmi les méthodes passives, une première catégorie consiste à mesurer les émissions naturelles des constituants atmosphériques (hydrométéores, aérosols, molécules), dépendant de leur température, leur concentration et leur forme, ce qui permet de remonter à ces informations. Les radiomètres permettent de mesurer ce rayonnement, du spectre solaire jusqu'aux micro-ondes. Ces instruments étant capables de fournir un profil vertical, ils sont souvent désignés sous le nom de « sondes ». La Figure 2 montre un exemple d'observations acquises dans le domaine des micro-ondes depuis un satellite défilant américano-japonais et dont les observations, informatives sur les nuages et les précipitations, sont utilisées à Météo-France.

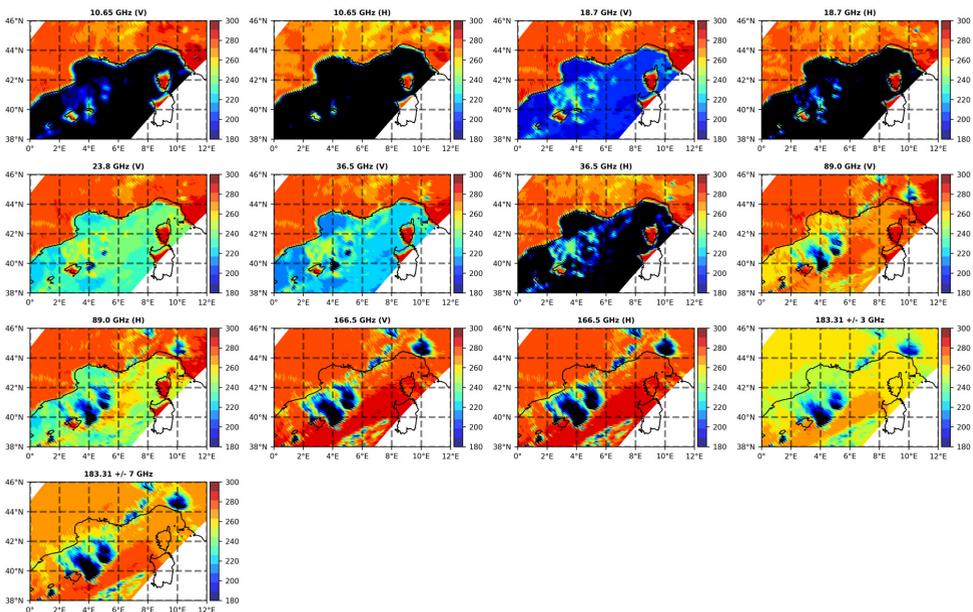


Figure 2 : Exemple d'observations du satellite GPM-Core en mer Méditerranée le 18 août 2022 à différentes bandes de fréquences permettant d'obtenir des informations sur le contenu en vapeur d'eau, en pluie et en glace au sein de l'événement convectif observé (Thèse Élisabeth Chardon-Légrand, Météo-France).

L'autre catégorie de méthodes passives consiste à mesurer une modification (absorption, réfraction) apportée par l'atmosphère à une onde connue. Ainsi, depuis le sol, avec un récepteur GNSS, il est possible de mesurer le délai induit sur le signal par l'humidité de la troposphère, et donc d'en déduire une mesure de celle-ci. Depuis l'espace, également avec un récepteur GNSS, les techniques dites de radio-occultation mesurent la courbure du trajet d'une onde traversant l'atmosphère entre deux satellites pour en déduire un gradient d'indice de réfraction puis un profil de température. De même, l'atténuation du rayonnement solaire renseigne sur la composition atmosphérique.

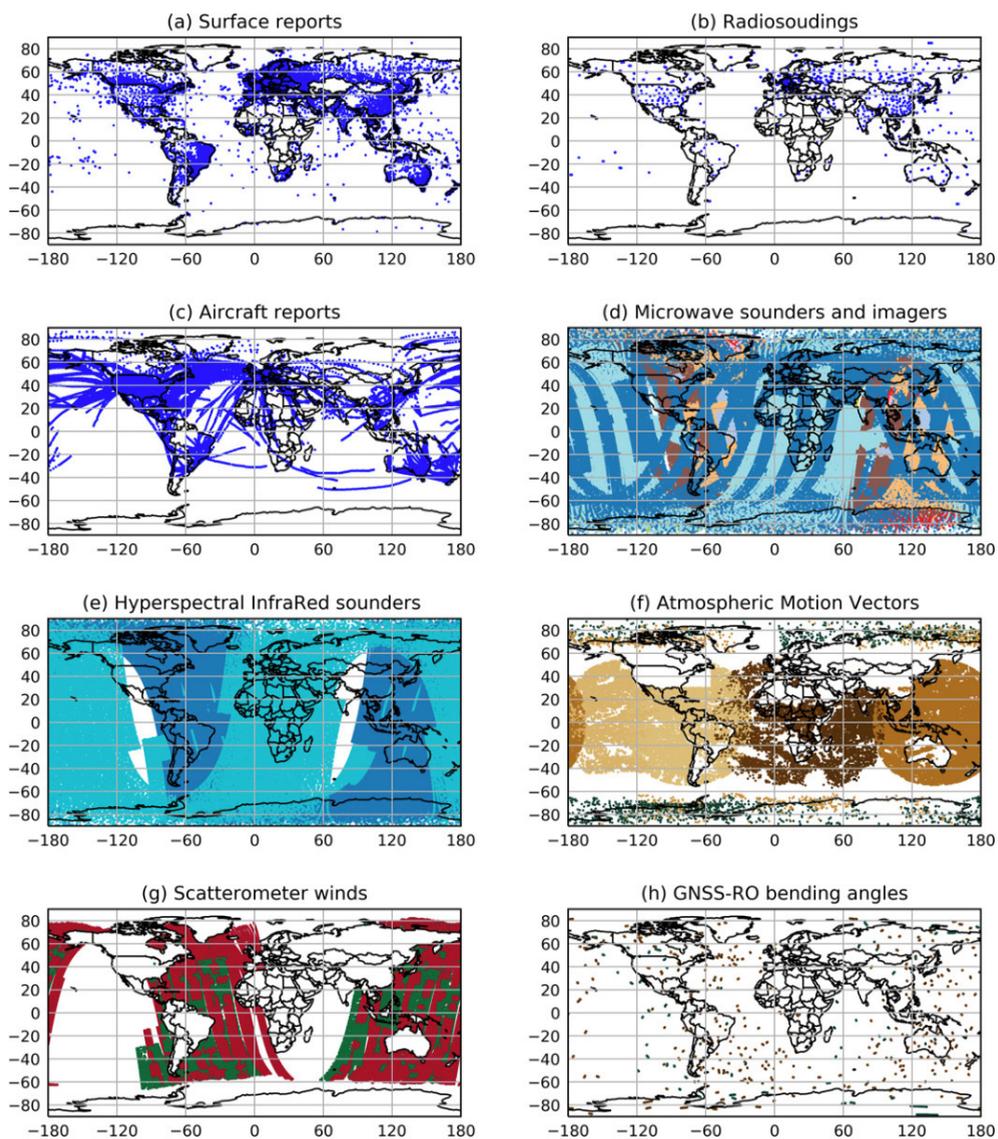


Figure 3 : Illustration de la couverture géographique obtenue sur une période de 6 heures pour différents types d'observations utilisés pour initialiser le modèle ARPEGE :

- a) les observations provenant des stations de surface, b) des radiosondages,
- c) des avions de ligne, d) des instruments de télédétection dans le domaine des micro-ondes à partir de satellites défilants en orbite basse,
- e) comme d) mais dans le domaine infrarouge, f) les observations issues des satellites géostationnaires, g) de vent de surface provenant des instruments de type diffusiomètres à partir de satellites défilants en orbite basse,
- h) utilisant le principe de radio-occultation grâce à la constellation de satellites du système de navigation global (GNSS) (Source : Chambon *et al.*, 2022

<https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0087.1>).

## OBSERVATIONS UTILISÉES POUR LA MÉTÉOROLOGIE OPÉRATIONNELLE

Pour que des observations soient utiles en prévision numérique du temps opérationnelle, un certain nombre de contraintes doivent être satisfaites. Les observations doivent en premier lieu être disponibles en temps réel (délai compris entre 10 minutes et 3 heures selon l'application considérée, entre l'acquisition de la mesure et son stockage). Elles doivent aussi être suffisamment nombreuses et bien réparties géographiquement. Un exemple de la répartition des observations utilisées à Météo-France pour le modèle ARPEGE est montré Figure 3.

Les observations doivent aussi être informatives sur les paramètres météorologiques dont le modèle a besoin à différentes altitudes et jusqu'à la surface : la température, l'humidité, la pression, le vent, les nuages et les précipitations. Toutes ces variables ne sont pas mesurées de façon directe depuis l'espace, c'est notre connaissance des interactions entre les ondes électromagnétiques et la matière qui nous permet, à partir de ce qui est observé, d'inférer une information utile pour la météorologie.

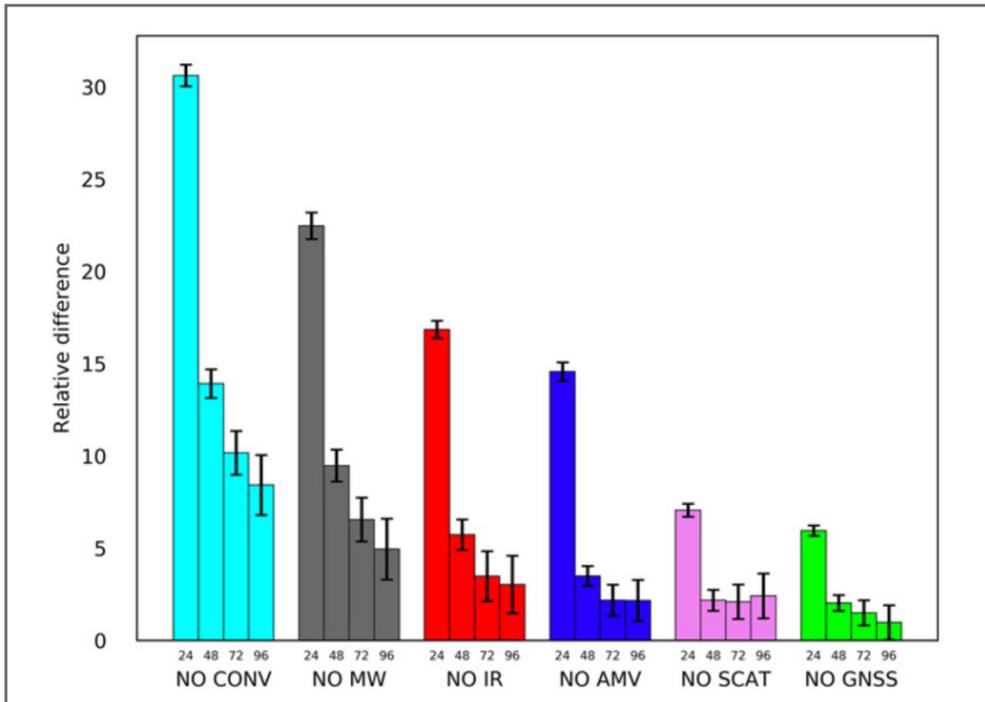


Figure 4 : Impact du retrait de différents systèmes d'observations sur la qualité des prévisions du modèle ARPEGE pour les échéances de + 24 h à + 96 h, NO CONV indique l'impact du retrait de toutes les données *in situ* du modèle ARPEGE (stations de surfaces, radiosondages, données avions), NO MW indique l'impact du retrait de la constellation de sondeurs micro-ondes,

NO IR indique celui du retrait des sondeurs infrarouges, NO AMV indique celui du retrait des données de vents en altitude dérivées de l'imagerie satellitaire, NO SCAT celui des vents de surfaces dérivées des satellites, et NO GNSS l'impact du retrait des données spatiales de radio-occultation (Source : Météo-France).

Chaque observation reçue se voit immédiatement comparée à une observation simulée à partir des champs du modèle par un opérateur d'observations. Les différences entre la réalité observée et l'état du modèle permettent de corriger ce dernier pour la prévision suivante. Dans ce domaine, la modélisation physique du transfert radiatif joue un rôle clé mais l'émergence de l'Intelligence Artificielle devrait permettre dans les années à venir de construire des opérateurs plus rapides et plus performants qu'aujourd'hui.

Les missions spatiales fournissant des informations sur l'atmosphère doivent être d'une durée suffisamment longue (au moins 1 an pour des instruments connus et 3 ans pour de nouveaux instruments). Cette nécessité provient des besoins en recherche et développement avant de pouvoir ingérer de nouvelles données (développement de nouveaux opérateurs d'observations, caractérisation des erreurs de mesure, évaluation des améliorations amenées par le nouveau capteur sur des situations météorologiques passées).

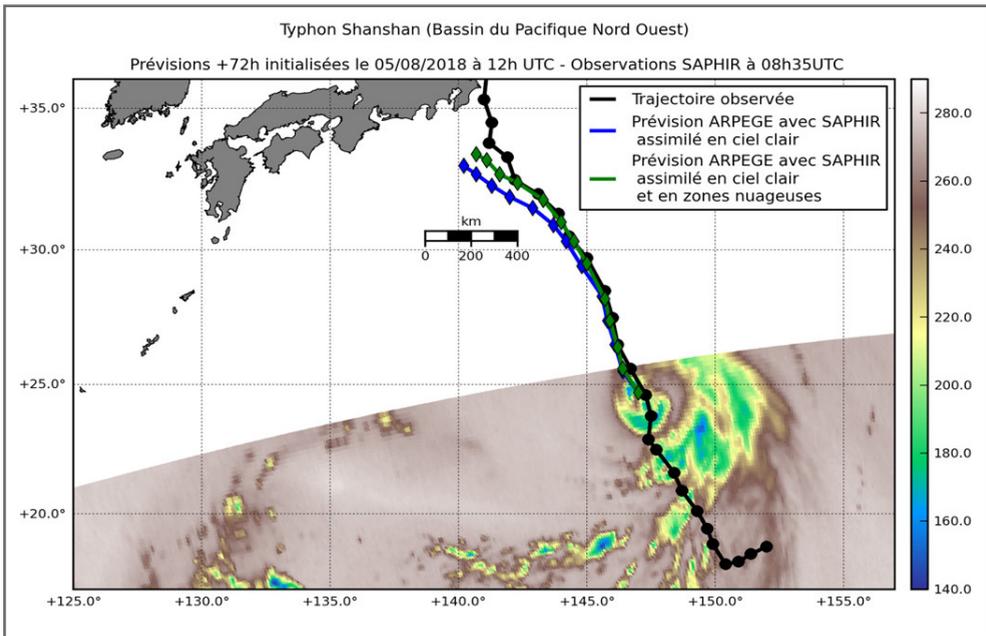


Figure 5 : Exemple de typhon observé depuis l'espace le 5 août 2018 par le satellite franco-indien Megha-Tropiques et dont la prévision de la trajectoire a été améliorée d'une centaine de kilomètres grâce à l'exploitation des observations de ce satellite (Source : Météo-France).

Les données spatiales sont aujourd'hui centrales pour la prévision du temps. Les Figures 4 et 5 montrent ainsi à la fois l'impact statistique de différents types de données mais aussi l'impact sur un cas d'étude. On peut ainsi voir que les données de sondage dans les domaines micro-ondes et infrarouge pèsent à elles seules pour près de 40 % de la qualité des prévisions à 24 h d'échéance.

## OBSERVATIONS UTILISÉES POUR LA RECHERCHE EN MÉTÉOROLOGIE

Les progrès des systèmes de prévision opérationnels reposent largement sur l'amélioration continue des modèles numériques qui permettent de simuler l'évolution de l'atmosphère et ses interactions avec la surface. Ces modèles physiques sont d'une grande complexité

et essaient d'intégrer tout ce qui dans notre environnement peut impacter les propriétés physiques de l'atmosphère et de la surface. Une grande partie des processus physiques concernés opèrent à des échelles de temps et d'espace très inférieures à la résolution des modèles de prévision, qui est typiquement kilométrique. Ils doivent donc être paramétrisés. Le développement de ces paramétrisations physiques s'appuie très fortement sur des observations de fine échelle qui permettent de comprendre les processus.

Parmi ces observations on retrouve des satellites orientés recherche qui visent à mesurer depuis l'espace des variables jusque-là non mesurées et qui reposent souvent sur des technologies avant-gardistes mais à haut risque. Ces satellites permettent de raffiner notre connaissance du système Terre, et d'explorer des régions difficiles à observer autrement (haute atmosphère, régions polaires, océans). On peut citer par exemple le tandem lidar-radar CALIPSO-CloudSat qui a permis des avancées remarquables dans notre compréhension des interactions entre aérosols, nuages, et rayonnement, ou l'instrument CryoSat qui a permis de mieux comprendre le cycle saisonnier de la glace de mer.

Plus généralement, le développement des paramétrisations physiques repose aussi largement sur des campagnes de mesure rassemblant ponctuellement des instruments de pointe permettant de répondre à une question scientifique bien spécifique. De telles campagnes, qui sont au cœur des activités de Météo-France depuis des décennies, se focalisent sur des phénomènes météorologiques bien identifiés : mousson africaine, tempêtes des moyennes latitudes, brouillard, convection profonde, climat urbain (voir la Figure 5), émission et transport des aérosols, etc. Ces activités de recherche s'appuient régulièrement sur des observations aéroportées (en France *via* l'unité d'appui à la recherche SAFIRE et ses avions scientifiques). Ces dernières années se développent les observations à partir de drones (voir la Figure 6) ou sous des ballons captifs, qui permettent d'explorer des régions complémentaires de celles accessibles en avion, avec une complexité logistique et un coût financier souvent moindres. Ces mesures dédiées initialement à la recherche ont vocation, pour certaines, à devenir opérationnelles, une fois la technologie suffisamment mature ou les algorithmes de traitement consolidés. À Météo-France, les liens sont ainsi très forts entre la Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et la Direction des Systèmes d'Observation, en particulier pour ce qui concerne le développement des réseaux d'instruments de télédétection (lidar aérosol, radiomètre micro-ondes, etc.). De la même manière, les instruments spatiaux éprouvés dans des programmes de recherche peuvent devenir opérationnels, comme c'est envisagé pour AEOLUS, un satellite du programme Earth Explorer qui a permis de mesurer le vent horizontal sur tout le globe à partir de mesures d'un lidar Doppler.

Les observations *in situ*, en particulier aéroportées ou depuis des ballons stratosphériques (opérés en France par le CNES), sont aussi largement utilisés en parallèle des développements d'instruments spatiaux. L'enjeu est alors de simuler des observations satellite pour préparer ou tester des algorithmes d'inversion de propriétés physiques, de tester les performances d'un prototype dans des conditions d'opération exigeantes ou de valider les inversions faites par satellite à partir d'une réalité de terrain. On parle de campagnes de calibration/validation. Réciproquement, les observations satellite permettent de systématiser spatialement des mesures *in situ* souvent très locales.

Si les observations demeurent indispensables pour mieux comprendre les processus physiques et les représenter dans les modèles, elles sont aussi utilisées pour évaluer les modèles, tant pour la météo que pour le climat. Les climatologies (par exemple de nébulosité, de précipitations, de rayonnement solaire réfléchi par la Terre) développées à partir des observations satellite sont ainsi largement utilisées pour calibrer les modèles de climat, et ainsi leur donner du crédit pour les projections futures. Les modèles de prévision du temps sont eux aussi comparés en continu à des produits satellite de référence, ce qui permet de suivre de manière objective et cohérente l'évolution des développements et de juger de leur amélioration.

Systèmes instrumentaux déployés par le CNRM à Paris en 2022 et 2023  
lors de la campagne PANAME dédiée à l'étude du climat urbain :



Figure 6 : Drone permettant de caractériser l'effet rafraîchissant des parcs végétalisés en conditions de canicule (Source : Météo-France).



Figure 7 : Radar à 95 GHz permettant d'étudier les propriétés physiques des nuages, en particulier en conditions orageuses (Source : Météo-France).

## UTILISATION FUTURE DES OBSERVATIONS

La place centrale des observations pour la météorologie et le climat va certainement être accentuée dans les années à venir. Tout d'abord, les nouvelles générations de satellites se caractérisent souvent par des observations plus fréquentes (par exemple le sondeur IRS sur MTG permettra d'avoir un profil de température et d'humidité sur tout le disque terrestre toutes les 30 minutes) et à plus haute résolution spatiale (par exemple FCI sur MTG à la suite de SEVIRI sur MSG réalisera de l'imagerie en continu à résolution hectométrique). Cela permettra une avancée déterminante pour les prévisions du modèle AROME qui saura tirer pleinement bénéfice de ces observations spatiales à haute fréquence et à haute résolution, notamment sur l'Europe de l'Ouest, avec un nouveau système innovant d'assimilation de données. Le développement de nouvelles technologies peut aussi permettre d'accéder à de nouvelles variables (observation des nuages de glace avec ICI, de l'intégralité du spectre d'émission infrarouge avec FORUM ou de la pression de surface avec le projet BARODAR). On peut aussi s'attendre à une multiplication des acteurs dans le domaine de l'observation spatiale avec l'émergence du *New Space*, en particulier *via* le développement massif de petits satellites (nanosats, microsats, cubesats), bien moins coûteux à développer et à mettre en orbite que les satellites météorologiques opérationnels. Ces satellites peuvent se focaliser sur des questions scientifiques très spécifiques (par exemple PREFIRE pour le bilan d'énergie de l'Arctique), et peuvent aussi être envisagés en constellations, parfois de plusieurs dizaines d'instruments (par exemple EPS-Sterna pour mesurer la température et l'humidité). De telles constellations peuvent répondre à la limitation des satellites opérationnels dont l'échantillonnage spatio-temporel demeure souvent limité, ne permettant pas de suivre le cycle journalier.

Plus proche de la surface, on voit aussi émerger des capteurs à bas coût (par exemple certains capteurs "Internet of Things"), ainsi que des données dites d'opportunité, pouvant provenir de stations météo de particuliers, de véhicules connectés ou d'avions de ligne. On voit aussi une recrudescence des mesures réalisées par des drones, parfois en flotte coordonnée, qui permettent un échantillonnage spatial inaccessible par avion et une répétition de la mesure souvent impossible avec d'autres systèmes. Certaines de ces mesures par drones sont déjà opérationnelles (par exemple, radiosondages Meteomatics en Suisse, Menapia en Angleterre) et l'on peut imaginer que des drones puissent être déployés à la demande dans des régions et à des moments particuliers pour apporter une information optimale dans des situations météorologiques critiques. En vue d'embarquer une instrumentation toujours plus complexe, et donc informative, sur les drones, les défis technologiques liés à la miniaturisation et à la consommation d'énergie des capteurs sont nombreux, mais le potentiel est immense.

Avec l'abondance et la diversité de ces données et de leur qualité se pose la question de leur gestion, de leur traitement et de leur utilisation. On réalise que dans ce domaine comme dans bien d'autres l'IA peut apporter beaucoup, que ce soit pour l'accélération des traitements ou l'extraction de l'information utile des observations. Une chose est certaine, il reste encore énormément de processus physiques mal compris dans les domaines de la météorologie et du climat, et les observations, avec des liens toujours plus forts entre mesures satellites et *in situ*, resteront centrales pour l'amélioration des systèmes de prévision.

D'ici à 2026, l'ESA et EUMETSAT démarreront leurs réflexions pour les futurs programmes Meteosat Quatrième Génération et Metop Troisième Génération. Météo-France contribuera à la définition de ces futurs systèmes (prévus pour 2040 et au-delà) en exprimant ses besoins futurs en observations. Les capacités de simulation de l'établissement, unique en Europe, permettront également d'évaluer l'intérêt de ces futurs capteurs spatiaux en apportant des éléments quantitatifs clés pour leur définition.

# Les satellites altimétriques au service de la mesure du niveau de la mer

Par Cyril GERMINEAUD,

Centre national d'études spatiales (Cnes), Toulouse

Claire DUFAU et Pierre PRANDI

Collecte Localisation Satellites (CLS), Ramonville-Saint-Agne

Depuis les années 1990, l'altimétrie par satellite a révolutionné notre compréhension de la dynamique océanique, offrant plus de 30 ans de mesures continues. Les satellites altimétriques, tels que Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3, et Sentinel-6 MF, ont permis de surveiller avec précision l'évolution du niveau moyen global de la mer. La mission SWOT, lancée en 2022, introduit une technologie innovante avec un radar interférométrique KaRIn, permettant une résolution spatiale dix fois supérieure à celle des satellites conventionnels. Cette avancée offre une vision inédite des structures de fine échelle de la circulation océanique. Une élévation du niveau moyen global de la mer d'environ 10 cm a été observée depuis 1993, avec une accélération significative depuis la fin des années 2000. Deux principaux facteurs contribuent à cette augmentation : l'expansion thermique des océans et la contribution des eaux de fonte des glaciers et calottes polaires. Cependant, cette élévation masque des variations régionales très importantes qui sont détectables par les satellites altimétriques. Les risques de submersion marine liés à l'élévation du niveau de la mer représentent des enjeux économiques majeurs. Les communautés côtières du monde entier font face à des menaces, nécessitant des solutions d'adaptation. Des initiatives telles que Littoscope en France utilisent des données satellites pour évaluer les risques de submersion, anticiper les impacts, et proposer des solutions pour réduire la vulnérabilité des zones côtières. En conclusion, l'altimétrie spatiale a été cruciale pour comprendre la dynamique océanique à différentes échelles spatiales et temporelles, mesurer l'élévation du niveau de la mer, et anticiper les risques de submersion. Les avancées technologiques, telles que le radar KaRIn de Swot, ouvrent de nouvelles perspectives pour une observation encore plus détaillée des océans, fournissant des informations cruciales pour faire face aux défis posés par le changement climatique.

## L'ALTIMÉTRIE SPATIALE : PLUS DE 30 ANS DE MESURES CONTINUES

Depuis le début des années 1990, l'altimétrie par satellite a changé le regard porté sur la dynamique océanique en permettant l'observation des mers et des océans avec une couverture spatio-temporelle sans précédent. Les mesures, réalisées de manière continue depuis maintenant plus de 30 ans, permettent notamment de construire des indicateurs climatiques comme le niveau moyen global de la mer.

Les satellites altimétriques permettent de mesurer avec une grande précision et stabilité l'évolution de la hauteur de la surface de la mer, fournissant une couverture quasiment complète du domaine océanique tous les 10 jours. La mission altimétrique Topex/Poseidon, lancée en 1992 et développée conjointement par le Cnes en France et la Nasa aux États-Unis, est la première mission ayant permis d'atteindre le niveau de performance requis pour mesurer l'évolution du niveau moyen global de la mer. Topex/Poseidon a été suivi par plusieurs satellites altimétriques destinés à surveiller l'océan sur le long terme : Jason-1 en 2001 puis Jason-2 en 2008, Jason-3 en 2016 et la mission Sentinel-6 Michael Freilich (MF) en 2020. Ces missions sont appelées « missions de référence » et assurent la stabilité à long terme du système d'observation. Ces missions ont été lancées sur la même orbite, elles observent donc le même océan et une inter-calibration précise est possible grâce à la réalisation systématique d'une phase tandem pendant laquelle les deux satellites sont placés l'un derrière l'autre à quelques minutes d'intervalle.

Des missions complémentaires, telles que la mission Saral/AltiKa lancée en 2013, sont utilisées pour accroître la couverture et la résolution spatiales, en particulier aux hautes latitudes. En décembre 2022, une nouvelle mission altimétrique, Swot (*Surface Water and Ocean Topography*), conjointe entre le Cnes et la Nasa a été lancée. Swot embarque pour la première fois dans l'histoire de l'altimétrie spatiale un radar interférométrique large fauchée dénommé KaRIn (*Ka-band Radar Interferometer*). KaRIn fournit des mesures avec une résolution spatiale sans précédent, dix fois supérieure à celle obtenue avec les satellites altimétriques actuels. Cette véritable rupture technologique permet d'observer pour la première fois les structures dites de fine échelle de la circulation océanique de surface, comme l'évolution de petits tourbillons, de filaments ou encore de courants étroits. Ces petites structures jouent un rôle essentiel dans le transport vertical et horizontal des flux d'énergie (chaleur), de carbone et de nutriments ; leur prise en compte constitue donc une avancée importante.

Par ailleurs, la mission Swot ne se limite pas à l'océanographie, l'instrument KaRIn fournit aussi des mesures hydrologiques permettant le suivi des niveaux d'eau des lacs, et autres réservoirs mais aussi des rivières avec une précision de l'ordre du centimètre. Cette capacité de Swot à mesurer environ 90 % des eaux de surface de la planète offre donc la possibilité d'acquérir une meilleure compréhension du cycle de l'eau en général, et de suivre l'impact du changement climatique sur les ressources en eau.

## Principe de l'altimétrie par satellite

L'instrument principal installé sur un satellite altimétrique est un radar, capable de mesurer avec une grande précision le temps de trajet aller-retour d'une onde électromagnétique émise verticalement et réfléchi par la surface de la mer (voir la Figure 1). Ce temps converti en distance (en utilisant la vitesse de la lumière) permet ainsi d'obtenir une mesure précise de la distance entre le satellite et la surface océanique en moyennant les estimations sur une seconde.

La détermination de l'altitude du satellite par rapport à un ellipsoïde de référence se fait avec un léger délai grâce à un calcul d'orbite précis. Ce calcul nécessite un modèle complet des forces agissant sur le satellite et des mesures très précises des distances et des vitesses relatives entre le satellite et des stations géodésiques au sol. Des mesures acquises par des systèmes de localisation tels que Doris (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*), et les constellations GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) sont utilisées pour suivre et ajuster en permanence la trajectoire du satellite, permettant ainsi de déduire son altitude par rapport à l'ellipsoïde de référence et, par conséquent, la hauteur de la surface de la mer au-dessus de cet ellipsoïde (voir la Figure 1).

L'hypothèse initiale de la propagation des ondes radar à la vitesse de la lumière s'avère inexacte dans l'atmosphère. Par conséquent, diverses corrections doivent être appli-

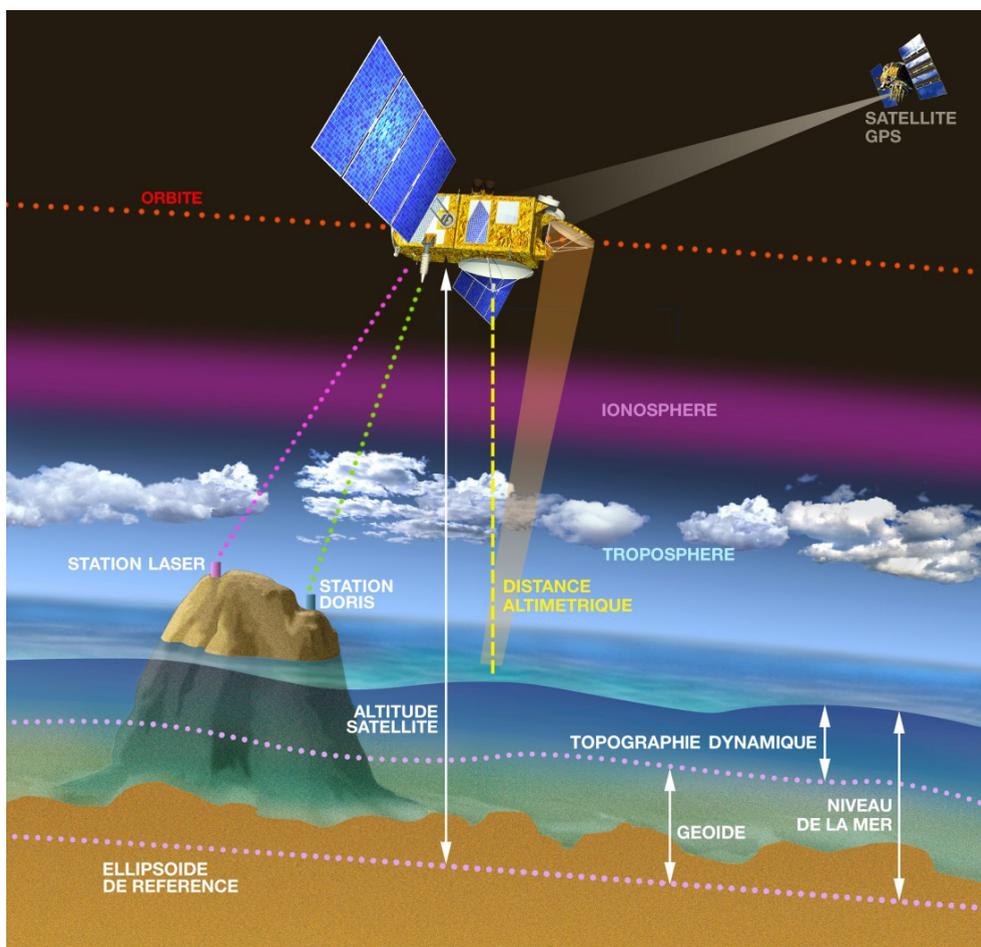


Figure 1 : Schéma illustrant le principe de l'altimétrie par satellite (Crédits : Cnes/Aviso).

quées à la distance altimétrique pour compenser les effets de ralentissement causés par l'ionosphère, l'air et la vapeur d'eau présents dans la troposphère. Ces corrections comprennent l'utilisation d'un radiomètre embarqué pour mesurer le contenu en vapeur d'eau et l'application de corrections ionosphériques basées sur l'analyse des ondes radar à différentes fréquences. D'autres corrections sont nécessaires pour prendre en compte des facteurs tels que l'état de la surface de la mer, les marées océaniques et la réponse de l'océan aux forces exercées par la pression atmosphérique et le vent. La quantité qui intéresse principalement les océanographes est la hauteur de mer par rapport au géoïde, appelée topographie dynamique. C'est en effet cette quantité qui contient l'information sur la circulation océanique totale, et qui permet d'étudier les processus complexes qui se produisent à la surface des océans.

Le géoïde correspond à la topographie qu'aurait un océan au repos sous le seul effet de la gravité. Cette surface présente des creux et des bosses reflétant les variations de l'attraction terrestre d'un point à l'autre de la Terre et la topographie des fonds marins. Les fines échelles du géoïde sont mal résolues et on utilise en pratique une méthode indirecte pour reconstruire la topographie dynamique : la hauteur de mer est exprimée en anomalies par rapport à un état moyen de la surface océanique calculé par rapport à l'ellipsoïde de référence. Ces anomalies sont ajoutées à la topographie dynamique moyenne qui corres-

pond à la même surface mais exprimée par rapport au géoïde. Pour donner un ordre de grandeur les creux et bosses de la surface marine ont une amplitude de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres. Le signal océanique variable (c'est-à-dire les anomalies de hauteur de mer) a pour sa part une amplitude maximale de l'ordre de quelques dizaines de centimètres après correction des effets de marée.

## Variabilité temporelle du niveau de la mer observée par altimétrie spatiale

Les observations altimétriques continues depuis 1993 jusqu'à aujourd'hui ont permis d'établir un indicateur climatique majeur : le niveau moyen global de la mer (ou *Global Mean Sea Level*, GMSL dans la littérature scientifique). Cet indicateur est actuellement calculé à partir des observations recueillies par les missions de référence Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3 et Sentinel-6 MF, après avoir retiré les variations semi-annuelles et annuelles. Un filtre temporel de 6 mois et une correction du rebond postglaciaire (- 0,3 mm/an) sont aussi appliqués avant d'estimer l'élévation du niveau moyen global de la mer, estimée à 3,6 mm/an (avec une incertitude de 0,3 mm/an) pour la période 1993-2023 ; correspondant à une augmentation d'environ 10 cm depuis 1993 (voir la Figure 2). Cependant, il est important de préciser qu'une accélération significative de cette augmentation a été observée depuis la fin des années 2000, estimée à 0,12 mm/an/an. Cela implique qu'à chaque décennie, le rythme d'augmentation du niveau moyen global de la mer augmente d'1,2 mm/an. Au cours de la dernière décennie (2014-2023) une hausse de 4,4 mm/an du niveau moyen a été observée (voir la Figure 2).

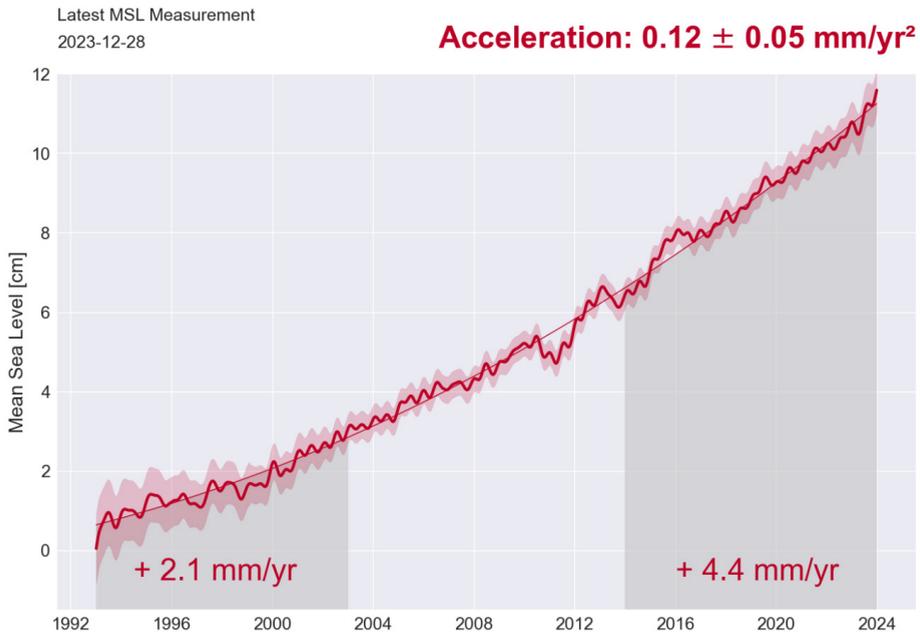


Figure 2 : Niveau moyen global du niveau de la mer (*Mean Sea Level*, MSL) estimé à partir des données altimétriques Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3 et Sentinel-6 Michael Freilich sur la période 1993-2023 (Crédits : Cnes, Legos et CLS).

Deux facteurs principaux en lien avec le réchauffement climatique actuel expliquent cette augmentation du niveau moyen : l'expansion du volume des océans et l'apport d'eau douce

provenant de la fonte des glaces et des glaciers. D'une part, l'océan global absorbe plus de 90 % de l'excédent de chaleur accumulé dans le système climatique induit par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (von Schuckmann *et al.*, 2016) ; la température moyenne des océans augmente donc, et l'eau de mer se dilate. D'autre part, l'excédent de chaleur accumulé dans le système provoque la fonte des calottes polaires (Groenland et Antarctique) et des glaciers de montagnes. Ces eaux de fonte contribuent à l'augmentation de la masse de l'océan et donc à la hausse du niveau de la mer (Oppenheimer *et al.*, 2019) observée par satellite depuis 1993.

La courbe du niveau moyen de la mer masque toutefois une variabilité régionale significative du niveau moyen de la mer, avec des régions où celui-ci augmente trois fois plus rapidement que la moyenne globale (voir la Figure 3). Cette variabilité spatiale est principalement due à la redistribution de la chaleur sous l'influence des grandes oscillations climatiques, en particulier l'oscillation Australe/El Niño, l'oscillation Pacifique Décennale ou encore l'oscillation Nord Atlantique. Les tendances régionales du niveau moyen de la mer reflètent aussi des variations à différentes échelles spatiales, des grandes structures à l'échelle des bassins océaniques aux structures plus fines dites de méso-échelle dans les grands courants tels que le Gulf Stream, le Kuroshio et le courant circumpolaire austral (autour de l'Antarctique). L'accès à cette dynamique régionale constitue un apport majeur de l'altimétrie par satellite pour comprendre et suivre les variations du niveau de la mer en complément des marégraphes installés à la côte.

En plus de ces indicateurs du niveau moyen de la mer, la combinaison des mesures provenant de différents altimètres permet de construire des cartes quotidiennes de hauteurs de mer, telles que celles diffusées par le service marin<sup>1</sup> (*Copernicus Marine Service*, CMEMS) du programme Copernicus de l'Union européenne.

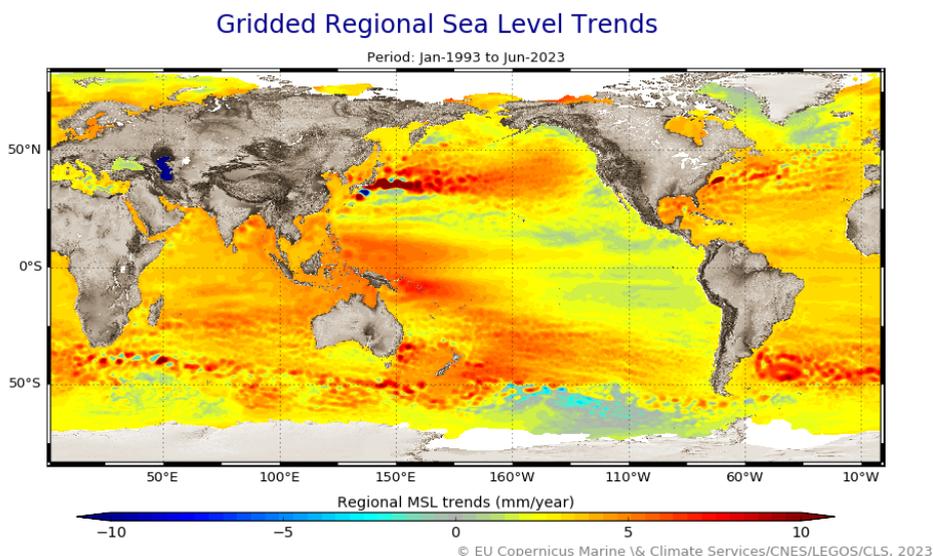


Figure 3 : Carte des tendances régionales du niveau moyen de la mer (*Regional Mean Sea Level Trends*) sur la période de janvier 1993 à juin 2023. Cette carte des tendances grillées au 1/4 de degré est obtenue à partir des données altimétriques multi-missions du service climatique de Copernicus, C3S Ssalto/Duacs.

<sup>1</sup> <https://marine.copernicus.eu/fr>

## ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER ET RISQUES DE SUBMERSIONS MARINES

Les enjeux économiques liés aux risques de submersion en zone côtière dans le monde sont colossaux. De nombreuses communautés côtières à travers le monde vivent déjà avec la menace de l'élévation du niveau de la mer. Ces risques de submersion peuvent impacter des quartiers d'habitations entiers, endommager les infrastructures, et donc mettre la vie des populations en danger et causer de lourdes pertes socio-économiques (IPCC<sup>2</sup>, 2022).

Réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète et limiter la hausse de la température moyenne à la surface du globe à 1,5 voire 2°C par rapport à l'ère pré-industrielle est une nécessité absolue pour de nombreuses villes du monde qui seront confrontées à une forte menace de la montée des eaux d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (IPCC, 2019). Selon une analyse de l'impact du changement climatique sur les plus grandes villes (Rosenzweig *et al.*, 2018), la population urbaine totale menacée par l'élévation du niveau de la mer, si les émissions ne diminuent pas, pourrait compter plus de 800 millions de personnes, vivant dans 570 villes, d'ici 2050. Selon les estimations, les coûts économiques mondiaux pour les villes, en raison de la montée des eaux et des submersions induites, pourraient s'élever à 1 000 milliards de dollars d'ici le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle. Comme pour d'autres aléas climatiques, les villes connaîtront un impact de l'élévation du niveau de la mer à des rythmes différents en fonction des régions. Les villes de la côte Est des États-Unis, ainsi que les grandes villes d'Asie du Sud-Est, sont particulièrement vulnérables, car elles connaissent une élévation du niveau de la mer plus rapide que la moyenne globale.

Face à ces risques, des solutions sont possibles pour les anticiper et les réduire au maximum en concevant des initiatives d'adaptation, en identifiant les zones à haut risque avec une meilleure cartographie des risques de submersions et en incitant leurs habitants à se reloger, en renforçant le drainage des eaux, l'approvisionnement en eau douce et les liaisons de transport pour réduire la vulnérabilité. Une analyse coûts-bénéfice des stratégies d'adaptation pour réduire les risques a notamment été réalisée dans la baie d'Osaka, au Japon (Ha *et al.*, 2021) : les auteurs estiment que sans mesures d'adaptation, le coût annuel attendu des dommages dus au risque d'inondation par ondes de tempête y augmentera, passant de 9,85 milliards de JPY (75 millions d'euros) à 69,17 milliards de JPY (517,5 millions d'euros) dans le scénario RCP8.5 du GIEC (AR5) projeté jusqu'en 2100. Ces actions d'adaptation peuvent être encouragées par la sensibilisation des élus et gestionnaires des territoires aux échelles nationale, régionale et locale.

En France, la solution Littoscope<sup>3</sup> a été développée, avec le soutien du Cnes et son Observatoire Spatial du Climat (SCO), pour évaluer les impacts de la montée des océans dans les zones côtières à partir des observations satellites. Elle repose sur trois piliers : a) estimer les aléas de submersion côtière futurs à partir d'images satellitaires optiques haute résolution et de données altimétriques satellitaires ; b) évaluer les risques associés en prenant en compte les enjeux locaux ; et c) proposer une plateforme de visualisation dédiée aux décideurs locaux. L'estimation des aléas de submersion s'appuie sur la combinaison d'un modèle numérique d'élévation des terres à haute résolution (0,5 m) estimé à partir des images satellites Pléiades<sup>4</sup> combinées avec les tendances du niveau de la mer estimées à partir des missions altimétriques ou des projections climatiques du Giec. L'intensité décennale des tempêtes et des ondes de marée est également prise en compte à partir d'un

---

<sup>2</sup> GIEC en anglais - IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

<sup>3</sup> <https://www.spaceclimateobservatory.org/fr/littoscope>

<sup>4</sup> <https://www.pleiades-cnes.fr>



Figure 4 : Estimation d'une submersion côtière en 2100 en prenant en compte les tendances régionales liées à l'élévation du niveau de la mer observée par altimétrie depuis 1993 et des effets d'une onde de tempête décennale (hauteur d'eau au-dessus des terres en mètres) (Crédits : CLS et Cnes).

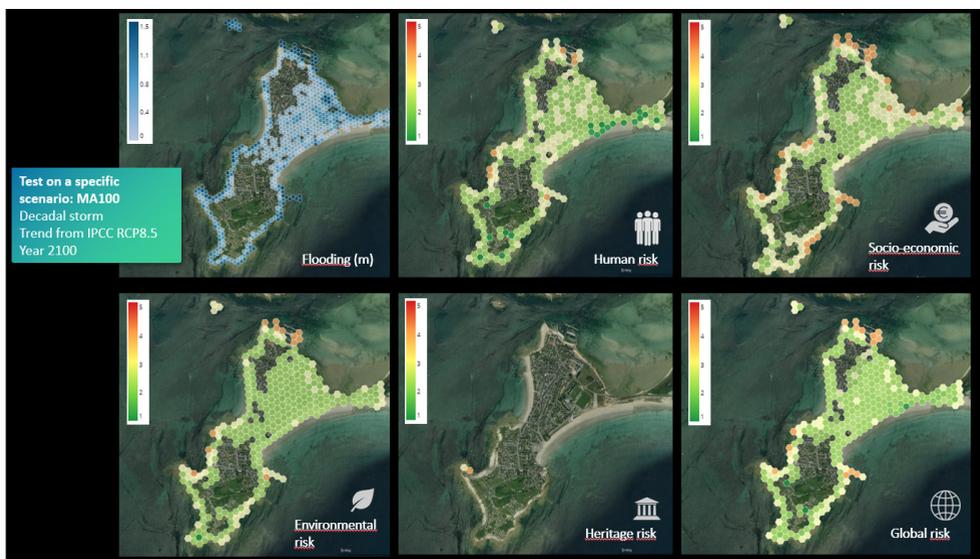


Figure 5 : Risques côtiers (humains, socio-économiques, environnementaux et patrimoniaux) estimés à partir d'un aléa de submersion et des enjeux locaux issus d'informations satellitaires (occupation des sols) et de bases de données socio-économiques locales (Crédits : CLS et Cnes).

modèle océanique dédié. Les hauteurs d'eau de submersion potentielle sont estimées à l'aide d'une approche "bathtub" (Gesch, 2018) comparant les hauteurs d'eau pour chacun des 24 scénarios (voir la Figure 4). Les risques qui en résultent (voir la Figure 5) sont estimés en croisant l'intensité de l'aléa avec des enjeux sociaux, économiques et culturels provenant de données socio-économiques nationales, régionales et locales, combinées à des informations sur l'utilisation des terres dérivées des images Pléiades.

La méthode Littoscope a été expérimentée sur deux zones de démonstration en France : la presqu'île de Gâvres en Bretagne et une zone plus large autour des étangs près de Palavas-les-Flots sur la côte méditerranéenne. Ces expérimentations ont démontré comment l'usage de données satellites en combinaison avec d'autres données peut proposer un outil de sensibilisation facilement reproductible pour les territoires littoraux à risque à l'échelle du globe.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

VON SCHUCKMANN K., PALMER M., TRENBERTH K. *et al.* (2016), "An imperative to monitor Earth's energy imbalance", *Nature Climate Change*, 6, pp. 138–144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>

OPPENHEIMER M., GLAVOVIC B.C., HINKEL J., VAN DE WAL R., MAGNAN A.K., ABD-ELGAWAD A., CAI R., CIFUENTES-JARA M., DECONTO R.M., GHOSH T., HAY J., ISLA F., MARZEION B., MEYSSIGNAC B. & SEBESVARI Z. (2019), "Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities" *In: IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 321-445. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>

IPCC (2022), *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability, contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 p., <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

IPCC (2019), "Summary for policymakers" *In: IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-35. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.001>

ROSENZWEIG C., SOLECKI W. *et al.* (2018), "The Future we don't want, how climate change could impact the world's greatest cities", UCCRN Technical Report, February, <https://www.c40.org/what-we-do/scaling-up-climate-action/adaptation-water/the-future-we-dont-want/>

HA S., TATANO H., MORI N., FUJIMI T. & JIANG X. (2021), "Cost-benefit analysis of adaptation to storm surge due to climate change in Osaka Bay", Japan, *Climatic Change*, 169, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03282-y>

GESCH D. B. (2018), "Best practices for elevation-based assessments of sea-level rise and coastal flooding exposure", *Frontiers of Earth Science*, 6, 230, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00230>

# Opérationnaliser la donnée satellite pour suivre l'amélioration des pratiques agricoles

Par Antoine LEFEBVRE

Président-directeur général et co-fondateur de Kermap

Considérée comme un impératif pour faire face aux enjeux environnementaux et climatiques, la transition agricole est aujourd'hui impulsée par des objectifs politiques et des programmes de financement ambitieux. Ceux-ci commandent de s'équiper de solutions de mesure conciliant objectivité, envergure géographique et réactivité. Les produits d'analyse satellite élaborés par Kermap répondent à ces enjeux. Ils permettent de consolider la chaîne de valeur environnementale de la filière agricole en livrant des indicateurs fiables et opposables sur les pratiques agricoles durables : diversification culturale, couverture des sols, gestion des prairies, des infrastructures agro-écologiques ou encore de l'irrigation. Une « opérationnalisation » concrète des données issues de l'imagerie satellite qui fait écho aux objectifs du plan France 2030, visant à faire émerger des acteurs innovants valorisant la donnée spatiale au bénéfice de la transition écologique.

## PRATIQUES AGRICOLES : UNE INDISPENSABLE TRANSITION

Près de 30 % de la population mondiale a souffert d'insécurité alimentaire grave ou modérée en 2022<sup>1</sup>. Un chiffre alarmant qui tend à reléguer au second plan l'urgence environnementale et climatique. Et pourtant. L'accélération et l'intensification des événements climatiques extrêmes perturbant la production agricole démontrent bel et bien que le changement climatique figure parmi les principaux facteurs d'insécurité alimentaire.

L'enjeu est double : construire des modèles agricoles résilients qui permettront de subvenir aux besoins de près de 10 milliards d'êtres humains à horizon 2050. Mais aussi réduire les émissions de CO<sub>2</sub> générées par le secteur afin d'atténuer sa propre empreinte climatique. C'est le sens des différentes politiques publiques et initiatives privées visant à réorienter rapidement le modèle agricole vers des pratiques véritablement durables, tout en restant productives et rémunératrices pour les agriculteurs.

## L'ENJEU DES SOLS

### Un appauvrissement alarmant

Au centre de cette dynamique figure un élément incontournable : le sol. Son état est aujourd'hui plus qu'alarmant : selon la Commission européenne, la proportion des sols

---

<sup>1</sup> L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde, FAO, 2023.

dégradés sur le territoire européen serait comprise entre 60 et 70 %<sup>2</sup>, pour des coûts associés estimés à 50 milliards d'euros par an, dont 54 % liés à la perte de services écosystémiques (stockage carbone, contrôle hydrologique, cycle des nutriments, biodiversité des sols...).

Les causes de cet appauvrissement des sols sont connues : niveaux excessifs d'intrants, érosion hydrique, surcompaction...<sup>3</sup>. Les solutions pour y remédier aussi : elles consistent entre autres à rompre avec le modèle de monoculture intensive, *via* l'agriculture biologique, l'agroforesterie, l'agriculture de régénération des sols ou la gestion durable des prairies.

## Vers un autre régime des sols

Ces pratiques intègrent un ensemble d'actions visant à redonner au sol ses qualités écosystémiques : stimulation de la biodiversité et de la fertilité naturelle du substrat, meilleure rétention d'eau, fixation des nitrates, stockage de carbone... Ces actions comprennent :

- la diversification culturale et allongement des rotations ;
- la réduction du labour ;
- la couverture permanente des sols (couverts d'interculture) ;
- la préservation des prairies permanentes ;
- la préservation et la réimplantation de haies et autres éléments paysagers favorables au développement de la biodiversité.

Leur généralisation implique l'accompagnement des agriculteurs, notamment au moyen d'incitations financières. Pour justifier l'efficacité de ces appuis, il s'agit de mesurer, rapporter, vérifier leur impact, sous des modalités adaptées aux enjeux de ces initiatives.

## Des modalités de suivi spécifiques

Les donneurs d'ordre ont en effet besoin de disposer d'informations remplissant une ou plusieurs des conditions suivantes :

- Une vision objective : la vérification de la bonne mise en œuvre des pratiques, ainsi que l'évaluation des progrès réalisés, nécessitent de disposer d'éléments quantifiables et non plus seulement déclaratifs.
- Une vision globale : il ne s'agit plus d'expérimenter sur quelques parcelles, mais de généraliser des pratiques à des milliers d'exploitations. Cela suppose le suivi de vastes territoires, logistiquement et financièrement trop lourd pour être réalisé par des humains. Ce passage à l'échelle est rendu possible par l'intelligence artificielle.
- Une vision à jour et instantanée : le suivi des programmes agro-écologiques implique de disposer d'une connaissance la plus à jour possible des cultures en place et des surfaces de production. Par ailleurs, la détection en quasi temps réel de modifications de l'état des sols agricoles rend possible la mise en place de systèmes d'alerte.

C'est le sens des produits de suivi satellitaire développés par Kermap.

---

<sup>2</sup> EU Soil Strategy for 2030: Reaping the benefits of healthy soils for people, food, nature and climate, 17 novembre 2021.

<sup>3</sup> Caring for soils is caring for life, Commission européenne, 2020.

## MOBILISER L'OBSERVATION DE LA TERRE POUR ACCOMPAGNER LA TRANSITION AGRICOLE

Fondée en 2017, Kermap s'est développée *via* la fourniture de services aux collectivités, sur la base de son expertise en extraction et classification automatique d'informations dans des images, principalement *via* des techniques d'apprentissage profond (*deep learning*). Anticipant les besoins liés au suivi agricole pour l'accompagnement des programmes de transition, Kermap a ensuite développé des produits d'analyse et de mesure des conditions et pratiques de culture, basés sur l'analyse d'images satellite, qui répondent aux contraintes citées plus haut.

### Un préalable : la connaissance des cultures

#### *L'identification des cultures majoritaires*

Dès 2020, Kermap a mis à profit son expertise dans le domaine du traitement d'images par intelligence artificielle, notamment *via* son modèle propriétaire de mosaïques désennuagées Nimbo, pour développer un procédé de suivi des cultures. En exploitant à la fois la dimension temporelle et la dimension spectrale des séries d'images satellites, ce réseau produit aujourd'hui une information détaillée sur les cultures occupant chaque parcelle agricole en Europe (voir la Figure 1), ainsi que les surfaces de production associées, avec une précision globalement supérieure à 90 % (voir la Figure 2). Il est intégré dans une chaîne de production capable de traiter rapidement de vastes territoires, ce qui permet à Kermap de livrer cette information dès la fin de saison culturale. En France, elle est disponible avec un an d'avance sur le Registre parcellaire graphique (RPG), recensant les zones de culture déclarées par les exploitants.

#### *La distinction hiver / été*

En parallèle, Kermap a également développé sur la France un algorithme de classification qui distingue les grandes cultures d'hiver et d'été, principalement le blé tendre d'hiver, le



Figure 1 : Cartographie des parcelles agricoles sur 20 pays européens en 2020, capture d'écran du site agri.kermap.com (© Kermap).

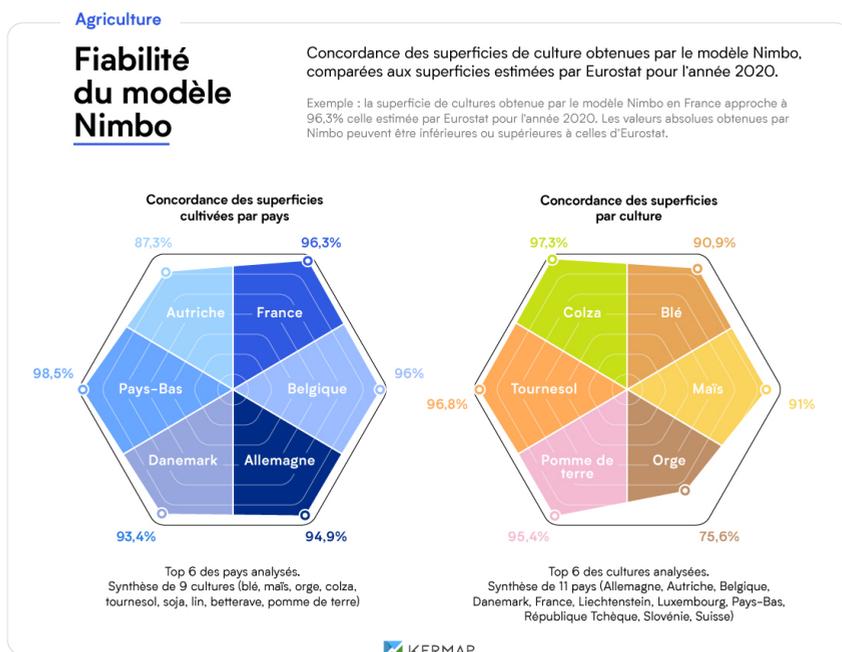


Figure 2 : Estimation de la fiabilité de du modèle d'identification des cultures par Kermap par comparaison aux données Eurostat en 2020 (© Kermap).

colza d'hiver, l'orge d'hiver, le lin, etc. Un produit particulièrement innovant car il n'existe actuellement ni sur le marché, ni dans la recherche académique.

### *L'identification "In Season"*

Enfin, Kermap a mis au point une approche permettant de fournir des produits de classification des cultures en quasi temps réel, ainsi que des estimations des surfaces de production en cours de saison, que ce soit à l'échelle de petites régions agricoles ou à des pays entiers. La Figure 3 présente l'évolution des surfaces de production des trois principales cultures d'hiver (blé tendre d'hiver, orge d'hiver et colza d'hiver) estimées par Kermap par rapport aux surfaces déclarées à la PAC sur l'aire d'influence d'une coopérative. On remarque un écart très faible dès le mois de mars pour le colza. Pour le blé tendre et l'orge d'hiver, cet écart se réduit sensiblement dès le mois de mai.

## Intercultures et durée de couverture

### *Une typologie des couverts intermédiaires*

Kermap mène également des activités de R&D sur le suivi des couverts intermédiaires depuis 2021, en collaboration avec le Centre d'études spatiales de la biosphère (Cesbio) et l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae).

Ce travail mené pendant 2 ans a permis de produire la première carte inédite de la typologie des couverts intermédiaires à l'échelle de la France métropolitaine (voir la Figure 4), avec une précision comprise entre 82 et 95 % selon le territoire, et une précision globale de 89 % (à l'échelle de la France).

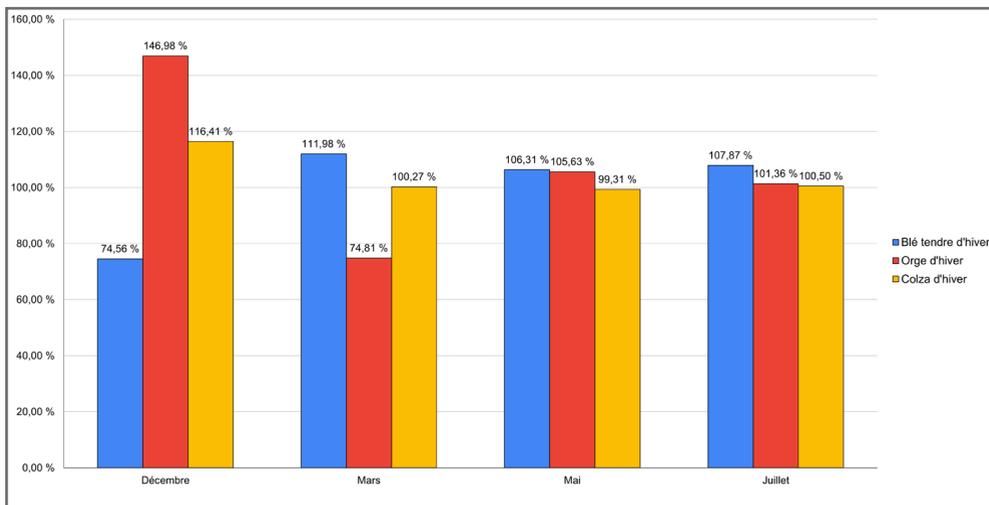


Figure 3 : Évolution des surfaces de production estimées par Kermap en 2020 par rapport à la déclaration PAC considérée comme vérité terrain : écart relatif entre surfaces prédites et surfaces de référence (© Kermap).

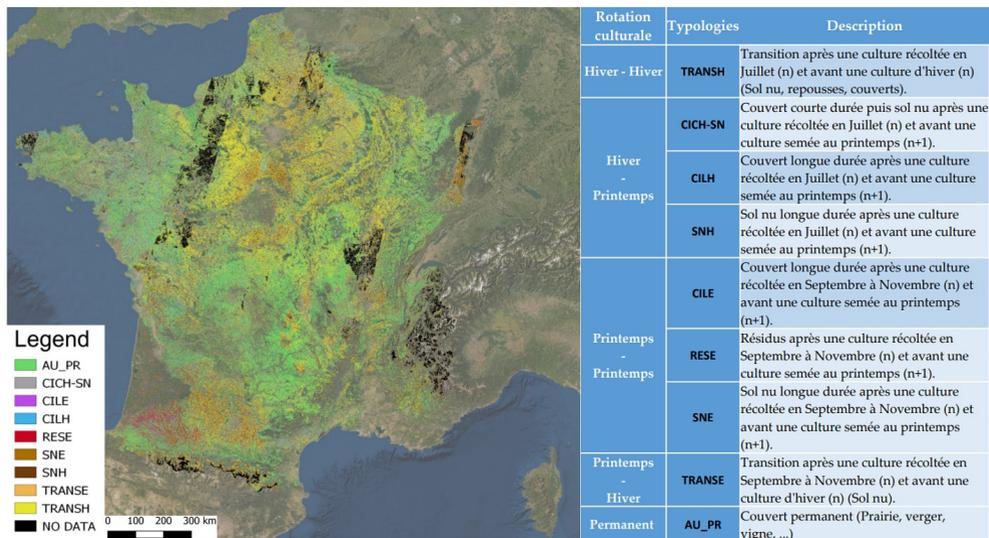


Figure 4 : Cartographie nationale des typologies de couvert intermédiaires.

Kermap, en collaboration avec le Cesbio, est le premier acteur à avoir fourni ce produit à l'échelle nationale (© Kermap).

### Mesurer la durée de couverture du sol

Sur la base de ces travaux, Kermap produit aujourd'hui des cartes de typologie simplifiées autour de deux critères : la temporalité (durée entre deux cultures principales) et la présence ou non d'un couvert intermédiaire. La société commercialise ainsi des produits d'estimation de durée de couverture des sols (DDC) à l'échelle de la parcelle (voir la Figure 5), de l'exploitation ou de la petite région agricole, d'estimation de la densité de

couvert végétal *via* le Leaf Area Index, et d'évaluation de l'hétérogénéité intraparcellaire *via* le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Ces produits ont rapidement fait écho aux besoins d'acteurs publics et privés souhaitant disposer d'un indicateur de durée de couverture des sols non plus alimenté par des éléments déclaratifs, mais par des observations objectives.

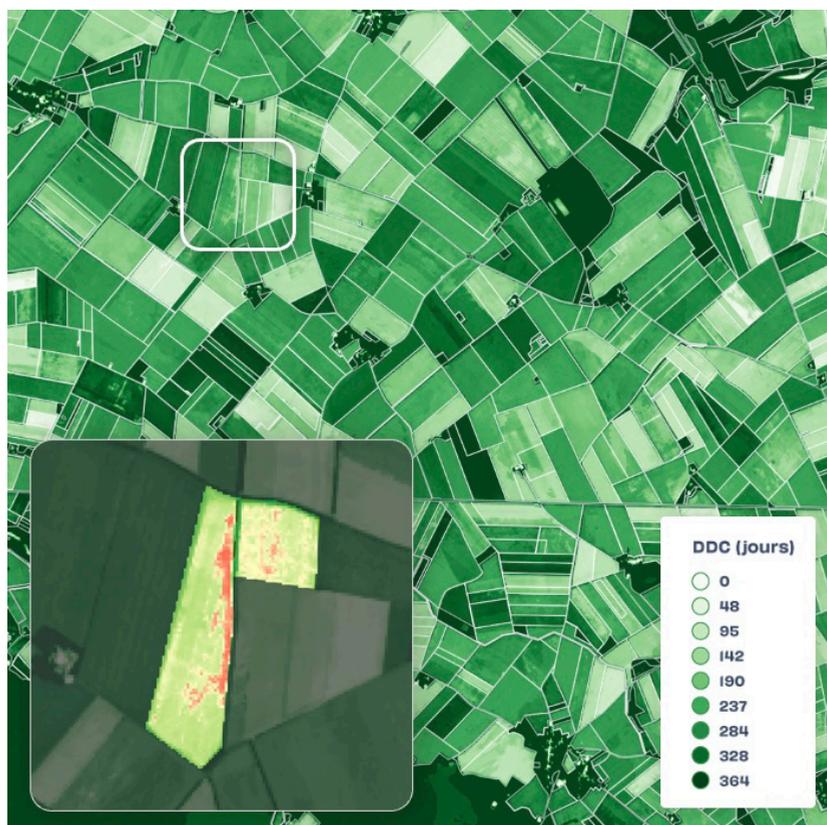


Figure 5 : Illustration du produit de mesure de la durée de couverture des sols et d'hétérogénéité intra-parcellaire (© Kermap).

### *Sols et biomasse*

Par ailleurs, la société travaille sur l'estimation de la biomasse des intercultures à partir d'une base de prélèvements de biomasse fraîche sur le terrain. Une activité de R&D consiste aujourd'hui à aboutir à l'estimation d'une biomasse sèche, appelée à intégrer une méthodologie de calcul robuste de la séquestration de carbone par les sols, dans le cadre de la valorisation des crédits carbone agricoles.

Ces travaux s'intéressent également au potentiel de fertilisation naturelle par la diffusion dans le sol des matières organiques issues de la décomposition des couverts végétaux d'interculture.

### *Infrastructures écologiques et biodiversité*

Kermap propose depuis sa création des services de cartographie des espaces végétalisés. Ceux-ci s'appuient sur ses modèles de *deep learning* réalisant automatiquement

l'extraction des infrastructures agro-écologiques. Ces modèles peuvent évoluer en milieu complexe comme les villes, ou en territoire plus dense comme les espaces bocagers, et ce à partir d'images à très hautes résolutions ou orthophotographies aériennes.

Cette approche est notamment utilisée pour réaliser le suivi des linéaires de haies et autres composantes du patrimoine arboré et arbustif agricole, éléments essentiels pour la préservation et la stimulation de la biodiversité (voir la Figure 6).



Figure 6 : Résultat de l'extraction automatique du bocage (illustré en rouge) à partir d'orthophotographies et de la méthode d'apprentissage profond, dit *deep learning* sur la Communauté de communes de Loudéac (© Kermap).

## Préserver la ressource en eau

Qualité de l'eau et modalités de partage de la ressource figurent également parmi les impératifs de la transition agricole. La mesure de durée de couverture des sols réalisée par Kermap est ainsi mise à profit par Eau de Paris, dans le cadre d'un programme de Paiement pour services environnementaux (PSE) destiné à préserver ses Aires d'alimentation et de captage (AAC).

Par ailleurs, Kermap a développé une compétence forte dans l'identification des cultures irriguées dans le cadre d'un projet R&D européen à TRL élevé, en partenariat avec les sociétés Farmleap et OKP4 et les coopératives Océalia et Val de Gascogne. Baptisé CROP, ce projet financé par le Centre national d'études spatiales (Cnes) a pour objectif d'identifier les cultures irriguées à l'échelle de la France métropolitaine à partir de données satellites et de données terrain. Forte de très bons résultats (précision de 89,6 %), l'expérimentation a donné lieu à la réalisation d'une première cartographie sur la région Occitanie, et une nouvelle version à l'échelle de la France est en cours de production.

Fort de cette expertise, Kermap s'est vu attribuer fin 2023 l'un des lots de l'appel d'offres « hydrologie » lancé par le Cnes et le ministère de La Transition écologique et de la Cohésion des territoires, dans le cadre du volet spatial France 2030. Intitulé « détection des parcelles agricoles irriguées et suivi de la densité du couvert végétal pour la protection

des eaux », ce dernier vise à produire des outils d'aide à la décision destinés aux services de l'État et aux acteurs des territoires.

## **L'IMAGERIE SATELLITE, UN ATOUT ENVIRONNEMENTAL ET ÉCONOMIQUE**

### **Répondre à des initiatives multiples**

La transition du modèle agricole se trouve à la croisée de plusieurs objectifs de développement durable de l'Unesco à horizon 2030 : faim zéro, eau propre, vie terrestre, consommation et production responsables... Pour les atteindre, de nombreux leviers d'action politique et financiers sont mobilisés *via* diverses initiatives supranationales de grande envergure (ONU/FAO, Union européenne, Banque mondiale, Forum économique mondial).

La transition agricole constitue notamment un élément central du Pacte Vert européen, *via* les stratégies « De la ferme à l'assiette », biodiversité et Sols 2030. À l'échelon français, la Stratégie nationale bas carbone et l'initiative 4 pour 1 000, ou plus récemment les volets agricoles du plan France Nation Verte, affirment l'engagement des autorités au soutien d'actions agro-écologiques. Parallèlement, de nombreux autres acteurs s'emparent du sujet, qu'ils soient privés ou publics, par le biais de programmes de Paiement pour services environnementaux (PSE) ou d'autres initiatives spontanées.

### **Démocratiser l'observation de la Terre, au service de la Terre**

Des éco-régimes de la PAC aux PSE en passant par les actions privées, aucune de ces initiatives ambitieuses ne peut se passer d'indicateurs objectifs, fournis à grande échelle et de manière régulière sur le long terme, pour certifier la mise en œuvre des programmes et en évaluer l'efficacité. Des exigences que le couple imagerie satellite/ intelligence artificielle est aujourd'hui en mesure de satisfaire.

Cependant, si la ressource et les moyens de l'exploiter existent, les solutions peinent encore à sortir des milieux académiques pour devenir opérationnelles.

L'enjeu pour une société comme Kermap est donc de faire en sorte que les fruits de ces avancées soient accessibles au plus grand nombre. Non seulement en produisant ces informations, mais en les livrant sous des formats immédiatement exploitables par les utilisateurs, *via* des plateformes de datavisualisation pour le *reporting*, ou des API pour l'intégration fluide des données dans leur système d'information.

### **Faire émerger des champions européens**

Ainsi démocratisée, la donnée issue de l'imagerie satellite trouve des applications concrètes et répliquables pour alimenter la chaîne de valeur environnementale de l'amont agricole, en demande de données de certification agro-écologique fiables et opposables. Kermap a développé une offre aujourd'hui commercialisée auprès d'acteurs agro-industriels comme Nestlé, McCain, Saint Louis Sucre, de coopératives agricoles comme Vivescia, ainsi qu'auprès d'acteurs publics comme Eau de Paris. D'autres partenaires agricoles tels que Groupe Carré, Noriap, Groupe Soufflet ou Bonduelle bénéficient aussi de ces indicateurs dans le cadre du programme Sols Vivants, porté par la Fondation Earthworm.

Cette trajectoire illustre le potentiel de création de valeur généré par la transition agricole pour les applications spatiales, dès lors que de véritables produits opérationnels et clé-en-main sont élaborés à destination des utilisateurs finaux. Ceux-ci ont vocation à s'interna-

tionaliser, tout en s'inscrivant dans l'ambition de souveraineté numérique de l'UE. Les produits Kermap s'appuient en effet sur une ressource d'imagerie 100 % européenne, les images du programme Copernicus, pour élaborer des données traitées et stockées localement et *via* un partenariat stratégique avec un opérateur *cloud* français majeur.

Ce positionnement fait écho à l'ambition affichée par le plan France 2030, qui fait de l'émergence de nouveaux usages du spatial, notamment « la valorisation des données spatiales », l'un de ses axes stratégiques<sup>4</sup>. C'est le sens, par exemple, de deux initiatives lancées en 2023 par le Cnes dans le cadre du plan France 2030 : l'appel d'offres portant sur l'utilisation de données spatiales pour le suivi et la gestion de l'eau, et de l'Appel à manifestation d'intérêt destiné à recenser les besoins des acteurs publics en données spatiales et services associés « qui peuvent contribuer aux 22 chantiers du plan France Nation Verte »<sup>5</sup>.

Les pouvoirs publics entendent ainsi favoriser « l'émergence et la croissance des acteurs innovants ». De futurs champions français et européens qui contribueront au dynamisme économique du territoire, à la souveraineté numérique et aux objectifs climatiques et environnementaux européens.

## BIBLIOGRAPHIE

FAO, FIDA, OMS, PAM & UNICEF (2023), « L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2023. Urbanisation, transformation des systèmes agroalimentaires et accès à une alimentation saine le long du continuum rural-urbain », Rome, FAO.

COMMISSION EUROPÉENNE (novembre 2021), « Stratégie de l'UE pour la protection des sols à l'horizon 2030 : Récolter les fruits de sols en bonne santé pour les êtres humains, l'alimentation, la nature et le climat ».

DENIZE J., BEAUGENDRE N. & LEFEBVRE A. (janvier 2021), « Utilisation des données satellitaires Copernicus Sentinel afin d'identifier et caractériser les pratiques agricoles pour mieux protéger la ressource en eau », Colloque Contribution du spatial face aux enjeux de l'eau.

DENIZE J., ROUJEAN J-L, DEJOUX J-F, BEAUGENDRE N., LEFEBVRE A. & CESCHIA A. (2022), "Using Sentinel-2 data time series for the mapping of land use typologies during fallow periods over France", ESA Living Planet 2022, Bonn.

DENIZE J., CESCHIA E., DEJOUX J-F. & LEFEBVRE A., "Mapping land use typologies during fallow periods over France in using Sentinel-1 and -2 time-series, Remote Sensing of Environment", soumis.

EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION, VEERMAN C., PINTO CORREIA T., BASTIOLI C. *et al.* (2020), "Caring for soil is caring for life – Ensure 75% of soils are healthy by 2030 for food, people, nature and climate – Report of the Mission board for Soil health and food", Publications Office.

UNION EUROPÉENNE (2020), "Farm to fork strategy, for a fair, healthy and environmentally-friendly food system".

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2019), « Stratégie Nationale Bas-Carbone », Fiche Agriculture.

---

<sup>4</sup> Présentation de la stratégie spatiale, ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance, Communiqué de Presse du 6 décembre 2021.

<sup>5</sup> Communiqué de Presse, Gouvernement, 11 avril 2023.

# L'espace, un enjeu stratégique

Par le capitaine de frégate Alexandre ARKWRIGHT

Commandement de l'Espace (CDE)

Aujourd'hui, l'Espace est devenu le centre névralgique d'un nombre exponentiel de services indispensables à nos sociétés, du GPS aux télécommunications en passant par l'imagerie ou les prévisions météorologiques. Cette hausse de l'activité spatiale entraîne une augmentation des risques et l'émergence de menaces dans ce milieu. La description de cette évolution majeure, les effets concrets visibles et les conséquences sur les armées méritent d'être détaillées afin d'avoir une vision réaliste de l'espace souvent perçu comme lointain, inaccessible et paisible alors que tout nous montre le contraire. Le Commandement de l'Espace (CDE) incarne l'ambition spatiale militaire française. Il contribue à la définition de la politique spatiale militaire et la met en œuvre. Il conduit par ailleurs les opérations spatiales militaires. L'armée de l'Air et de l'Espace, au travers du CDE, joue un rôle essentiel dans la montée en puissance du spatial de défense afin que la France puisse conserver sa liberté d'action dans l'espace au service de notre autonomie stratégique ; les défis qui restent à relever sont importants mais passionnants.

Aujourd'hui, l'espace est devenu le centre névralgique d'un nombre exponentiel de services indispensables à nos sociétés, du GPS aux télécommunications en passant par l'imagerie ou les prévisions météorologiques. Cette hausse de l'activité spatiale entraîne une augmentation des risques et l'émergence de menaces dans ce milieu. La description de cette évolution majeure, les effets concrets visibles et les conséquences sur les armées méritent d'être détaillées afin d'avoir une vision réaliste de l'espace souvent perçu comme lointain, inaccessible et paisible alors que tout nous montre le contraire.

## L'ESPACE, UN NOUVEAU THÉÂTRE D'OPÉRATIONS

Une quarantaine de fois par jour, chacun d'entre nous utilisons des ressources spatiales :

- observation pour les prévisions météorologiques, l'étude du réchauffement climatique, le renseignement, le suivi du trafic aérien ou maritime ;
- communication pour l'accès à Internet ou la transmission d'une vidéo en direct de la transat Jacques Vabre ;
- positionnement et synchronisation par la constellation américaine GPS et désormais son équivalent européen Galileo pour le guidage de nos déplacements quotidiens, la construction et la surveillance d'ouvrage, l'aide à l'agriculture de précision, le fonctionnement de nos réseaux informatiques ou 4G, la datation des transactions boursières.

Depuis le début des années 2010, l'activité dans l'espace s'est accélérée. Une nouvelle ère de l'industrie et de l'économie du spatial tire profit de l'émergence de technologies innovantes, dans un contexte de miniaturisation des composants et de division par dix en 10 ans des coûts de lancement, permis notamment par les lanceurs réutilisables de la société SpaceX. Pour la seule année 2023, SpaceX aura effectué près de 90 lancements.

En comparaison, il y a eu 117 tirs d'Ariane 5 entre 1996 et 2023. Ce *New Space* se traduit logiquement par une hausse du nombre de satellites en orbite. On compte près de 10 000 satellites actifs aujourd'hui, et ce chiffre pourrait atteindre plusieurs dizaines de milliers d'ici 2030 au regard des projets de constellations en orbite basse comme Starlink, Kuiper ou encore OneWeb.

Entre cette effervescence économique et la déferlante numérique, le domaine spatial est un centre de gravité de nos sociétés, qui attise les convoitises, encourage les contestations et augmente progressivement le risque d'affrontement ou pour le moins développe des chemins possibles d'escalade. L'espace devient un nouveau champ de conflictualité, en terme militaire, il est désormais un nouveau domaine opérationnel au même titre que les milieux terrestre, maritime, aérien et Cyber.

## AUGMENTATION DES RISQUES

L'augmentation du nombre de satellites dans l'espace a également pour conséquence une prolifération des débris. Aujourd'hui, l'agence spatiale européenne (ESA) estime à un million le nombre de débris de plus d'un centimètre et 36 000 celui de plus de dix centimètres. Le poids cumulé de tous ces objets approche les 10 000 tonnes, l'équivalent du poids de la tour Eiffel. Avec des vitesses orbitales de l'ordre de sept kilomètres par seconde, chaque collision peut potentiellement entraîner la création d'un nombre conséquent de nouveaux débris, augmentant dès lors le risque d'une réaction en chaîne. On appelle cela le syndrome de Kessler. Plusieurs fois par an, il est nécessaire de manœuvrer nos satellites militaires ou stratégiques pour éviter une collision. Sans être désorbité en fin de vie opérationnelle, un satellite à 800 kilomètres d'altitude peut rester plusieurs centaines d'années en orbite. Ainsi, il existe actuellement plusieurs initiatives au niveau de l'Onu, mais également de la Commission européenne, pour gérer cette congestion des orbites. La France a pour sa part déjà légiféré. La loi du 3 juin 2008 relative aux opérations spatiales impose notamment aux opérateurs de désorbiter leurs satellites en moins de 25 ans, à compter de la fin de vie opérationnelle. Concernant l'orbite géostationnaire (la plus éloignée, 36 000 kilomètres), il est d'usage de repositionner le satellite 300 kilomètres au-dessus de l'arc sur une orbite dite cimetière.

## ÉMERGENCE DE NOUVELLES MENACES

Aux risques qui augmentent s'ajoutent les menaces qui se précisent. L'espace est devenu un enjeu crucial en cas de conflit comme cela a été le cas au début de l'invasion de l'Ukraine. En effet, la guerre a débuté le 24 février 2022 par une attaque cyber qui a rendu inopérant des dizaines de milliers de terminaux reliés au satellite Ka-Sat paralysant les réseaux de communication ukrainiens à un moment critique, mais également l'accès Internet de particuliers en France ou encore le fonctionnement d'éoliennes en Allemagne. L'offre d'Elon Musk d'utiliser gratuitement la constellation Starlink est arrivée à point nommé pour que les forces armées ukrainiennes retrouvent une capacité de communication essentielle à leurs opérations. Cette influence directe d'une société privée, emblématique du *New Space*, dans le déroulement d'une guerre est renforcée lorsque son propriétaire affirme avoir coupé certaines liaisons six mois plus tard dans le secteur de la Crimée au moment de la préparation d'une offensive ukrainienne sur la flotte de Sébastopol. Cette expérience est riche d'enseignement.

Autre exemple d'action militaire vers l'espace, le 15 novembre 2021, quatre mois avant le début de l'offensive russe en Ukraine, la Russie procède à la destruction d'un de ses vieux satellites avec un tir de missile à ascension directe depuis le sol. Cette démonstration, qui s'apparente à un signalement stratégique, a créé plus de 1 500 débris, dont certains sont encore dans l'espace deux ans plus tard. Ce tir est le dernier d'une série inquiétante

amorcée par la destruction d'un ancien satellite météorologique chinois en 2007, suivi en 2008 par les États-Unis puis par l'Inde en mars 2019, tous n'ayant pas eu nécessairement les mêmes conséquences en termes de productions de débris de longue durée. À l'initiative des États-Unis un moratoire sur les essais de tir à ascension directe de destruction de satellites, générateur d'un nombre important de débris a depuis été signé par 37 pays dont la France.

Certaines menaces sont plus discrètes voire insidieuses et demandent une attention particulière. Ainsi, plusieurs satellites ont pour spécialité de patrouiller dans l'espace, certains effectuent des rapprochements entre eux à des distances de plus en plus faibles ou procèdent à l'éjection de plus petits objets. Ces satellites inspecteurs ou guetteurs pourraient disposer de capacités offensives. Cependant, le cadre juridique actuel très libéral de l'espace n'empêche pas ce genre de manœuvre. Si le traité de l'espace de 1967 interdit formellement de placer des armes de destruction massive dans l'espace, il ne bannit pas les armes conventionnelles. D'ailleurs, dans l'espace la définition d'une arme est relativement difficile. Un simple objet inerte lancé précisément sur une orbite de collision devient un projectile capable de détruire un satellite. L'aveuglement d'un satellite d'observation par un laser venant de l'espace ou du sol est un acte sans doute grave, il reste potentiellement réversible et il sera certainement difficilement attribuable. Alors que le triptyque compétition-contestation-affrontement est devenu la grille de lecture de la conflictualité dans la doctrine française à la place de la classique mais idéalisée distinction entre paix, crise et conflit, l'espace se prête tout particulièrement aux développements de stratégies hybrides : dissimulation dans un milieu isotrope mais opaque sans véritables frontières ni territorialité, exploitation de la nature duale civile et militaire des infrastructures spatiales, déni d'accès à certaines orbites ou fréquences, harcèlement de basse intensité, stratégie normative contraignante ou activisme diplomatique. Ainsi, les forces armées se préparent à gérer ces risques et juguler ces menaces en faisant un effort important de transformation, en renouvelant ou créant des capacités opérationnelles spatiales. En cas d'attaque, la riposte militaire variera en fonction de la situation et s'appuiera sur la notion de légitime défense en accord avec le droit des conflits armés. L'enjeu réside dans la préservation des intérêts de la France, tout en évitant une escalade non maîtrisée. C'est le concept de défense active.

## LE COMMANDEMENT DE L'ESPACE, AU CŒUR DU SPATIAL MILITAIRE FRANÇAIS

Pour la France, c'est le rapprochement du satellite patrouilleur russe Luch-Olymp à proximité du satellite franco-italien Athéna-Fidus en 2017, qui fait prendre conscience de ces nouvelles menaces. La ministre des Armées Florence Parly condamne publiquement cette tentative d'espionnage jugée inamicale. Dès lors, la France, attachée à sa souveraineté, se doit de pouvoir agir, depuis l'espace, dans l'espace et vers l'espace.

En toute transparence, elle fait le constat de l'évolution du milieu spatial en publiant une stratégie spatiale de Défense (SSD) qui affirme la volonté de défendre les moyens et intérêts spatiaux français. Le 3 septembre 2019 dans la foulée de l'adoption de la SSD, le Commandement de l'Espace (CDE) est créé au sein de l'armée de l'Air qui devient armée de l'Air et de l'Espace le 11 septembre 2020. Ses missions sont d'améliorer l'efficacité opérationnelle, la cohérence, la visibilité et la simplicité de l'organisation et de la gouvernance du spatial de défense au sein du ministère des Armées. Le CDE, organisme à vocation interarmées joue un rôle essentiel dans la montée en puissance du spatial de défense. Porteur de l'expertise spatiale militaire du ministère, le CDE conseille le chef d'état-major des armées ainsi que tous les organismes du ministère ou extérieurs au ministère sur les questions spatiales militaires. En coopération avec de nombreux acteurs au premier rang desquels le Centre national d'études spatiales (Cnes), il contribue à la

définition de la politique spatiale militaire et la met en œuvre. Il conduit par ailleurs les opérations spatiales militaires.

Ainsi, le CDE poursuit sa montée en puissance suivant une feuille de route claire. Elle consiste d'abord à conduire les opérations spatiales militaires (OSM) pour communiquer, écouter, décider et agir. Les forces militaires ont besoin de communiquer de manière sécurisée, en tout lieu et tout temps. Le renseignement militaire est basé pour une grande part sur des images optiques ou radar ou l'observation des signaux électromagnétiques. Avant de décider, il faut connaître ce qui se passe dans l'espace et enfin pour agir il faut se doter de moyens de centraliser l'information, de commander et de contrôler. Le premier pilier des OSM est le soutien aux capacités spatiales à travers les lancements jusqu'à la mise à poste, puis le maintien à poste des satellites militaires. Le deuxième pilier repose sur la connaissance de la situation spatiale qui lorsqu'elle est enrichie de l'évaluation de la menace devient une connaissance augmentée de la situation spatiale. Le troisième pilier, historique et majeur, est l'appui aux opérations terrestres, maritimes, ou aériennes au travers des télécommunications, de la cartographie ou de la géolocalisation. Cela participe à la connaissance et à l'appréciation autonome de la situation autour des opérations comme actuellement avec la force Aigle en Roumanie<sup>1</sup>. Le cyberspace, nouveau champ d'action immatériel a des relations très fortes avec le spatial étant donné le degré important de numérisation, de connexion et de gestion de données. Enfin, le quatrième pilier des OSM est l'action dans l'espace. Cette nouveauté en cours de conception et de déploiement a été créée en réponse aux évolutions des menaces dans l'espace vues précédemment.

La loi actuelle de programmation militaire permet de concrétiser cette stratégie avec notamment de nouveaux moyens de surveillance et d'action dans l'espace.

## DES MOYENS À LA HAUTEUR DES AMBITIONS

Avec 6 milliards d'euros, l'ensemble des budgets consacrés au spatial de défense sur la période s'étalant jusqu'en 2030 permet de poursuivre le renouvellement et de créer des capacités spatiales militaires dans les quatre piliers des opérations dans un délai contraint. Ce renouvellement capacitaire ambitieux, s'accompagne d'autres défis comme la génération d'expertises humaines. Il est indispensable de recruter les talents, les former et les garder. De la simple formation initiale espace d'une semaine aux ingénieurs officiers programmes spatiaux en passant par les futurs opérateurs de satellite, la diversité des métiers est riche et toutes les candidatures sont étudiées y compris dans la réserve opérationnelle.

La France dispose de trois types de satellites militaires souverains dont le remplacement est en cours. Chacun remplit une mission précise : renseignement, observation, télécommunications. Le triplet de satellites CERES (Capacité de Renseignement Électromagnétique Spatiale), lancé en 2021, permet ainsi de localiser précisément les signaux électromagnétiques des radars et des systèmes de communications. Les deux satellites CSO (Composante Spatiale Optique) permettent de réaliser des images de très grande qualité dans le visible et l'infrarouge. Enfin, deux satellites Syracuse IV (Système de radiocommunication utilisant un satellite) assurent les communications sécurisées depuis l'orbite géostationnaire à très longue distance. Pour protéger nos satellites géostationnaires, un démonstrateur de satellite patrouilleur-guetteur dénommé YODA (pour Yeux en Orbite pour un Démonstrateur Agile) sera mis en orbite à l'horizon 2025. Il préfigure une nouvelle capacité d'observer *in situ* l'activité spatiale et d'aider à analyser les futurs concepts d'emploi d'une défense active.

---

<sup>1</sup> Partie du dispositif militaire sur le flan Est.

## IL S'AGIT D'ACQUÉRIR UNE CERTAINE MAÎTRISE DE L'ESPACE

Pour réaliser cette mission, le CDE dispose d'une force de 350 personnes, amenée à augmenter jusqu'à presque 500 personnes en 2030. Si à Balard, se trouve l'état-major du commandement de l'espace, le cœur opérationnel du CDE est quant à lui incarné par la brigade aérienne des opérations spatiales (BAOS) dont la mission est de planifier et conduire les opérations spatiales militaires. Cette brigade regroupe une part importante des effectifs du CDE et regroupe différents organismes comme le centre de commandement et de contrôle des opérations spatiales (C3OS), le centre militaire d'observation par satellites (CMOS), le centre opérationnel de surveillance militaire des objets spatiaux (COSMOS) et le Centre de renseignement d'intérêt spatial (CRIS).

Le C3OS, véritable tableau de bord des opérations spatiales militaires établit la situation spatiale, effectue des analyses et conduit les opérations. De ce centre peuvent venir des alertes concernant des rentrées atmosphériques d'objets qui peuvent générer un risque pour les populations comme un morceau de lanceur ou un satellite trop volumineux pour se désintégrer entièrement dans l'atmosphère.

Situé pour l'instant sur la base aérienne de Creil, le CMOS garantit l'accès aux images et aux écoutes d'origine spatiale. Il assure le lien avec les utilisateurs en France, mais aussi vers l'étranger avec des pays partenaires avec lesquels nous avons parfois des accords de partage de capacité comme l'Allemagne avec le système SAR-Lupe ou l'Italie avec les satellites Cosmo-Skymed.

Historiquement situé sur la base aérienne 942 de Lyon, le COSMOS assure la mission de construction, consolidation et le maintien d'une situation spatiale autonome de référence. Il dispose pour cela du radar de veille GRAVES qui permet la détection de nombreux objets dans l'espace et d'en restituer leur orbite. L'objectif est d'analyser tout événement spatial menaçant les intérêts nationaux. Ce centre apporte également un soutien aux opérations, notamment en prévoyant la météo solaire spatiale potentiellement très perturbante pour les fréquences utilisées pour les systèmes de positionnement et les communications.

En marge des opérations, le Laboratoire d'Innovation Spatiale des Armées (LISA), situé à Toulouse, au cœur de l'écosystème de *start-up* du spatial, œuvre en coordination avec l'Agence Innovation Défense (AID) pour mettre en avant des solutions audacieuses dans le domaine du spatial qui pourraient avoir une utilité pour le ministère des Armées.

Pour orchestrer efficacement ces capacités opérationnelles, toutes ces unités ont vocation à se déployer à l'horizon 2025 à Toulouse, au sein d'une infrastructure en cours de construction, située à proximité immédiate du CNES, et qui disposera de capacités de calculs importantes.

## CONCLUSION

Au regard de l'évolution rapide du domaine spatial, de la compréhension des nouveaux risques, de la prise en compte des nouvelles menaces, il s'agit pour les armées d'être prêtes et d'anticiper ce qui pourrait être un nouveau champ de conflictualité. Cette ambition spatiale militaire française est incarnée par le Commandement de l'Espace qui monte en puissance afin que la France puisse conserver sa liberté d'action dans l'espace au service de notre autonomie stratégique ; les défis qui restent à relever sont importants mais passionnants.

# Exploiter le potentiel du *New Space* au profit du renseignement extérieur

Par Nicolas LERNER

Directeur général de la Sécurité extérieure (DGSE)

L'avènement du *New Space* représente une opportunité majeure pour le renseignement extérieur français. Les constellations de nanosatellites offrent en effet des possibilités sans précédent en matière de surveillance des télécommunications mondiales. Cependant, pour exploiter tout le potentiel de ce nouveau « capteur » de renseignement, plusieurs défis de taille restent à relever :

- nous devons construire des partenariats étroits et mutuellement bénéfiques avec les entreprises françaises innovantes du *New Space*, dans une approche résolument duale ;
- nous devons nous préparer à intégrer ce capteur dans une stratégie « multi-capteurs », en le considérant non pas comme une capacité additionnelle juxtaposée aux capacités historiques, mais comme un nouveau rouage d'un appareil de renseignement multi-vectoriel ;
- enfin, et c'est probablement le point le plus structurant, nous devons sans attendre décupler notre capacité à traiter, exploiter et analyser les volumes de plus en plus importants de données que nous collectons sur les réseaux internationaux, en nous appuyant sur l'intelligence artificielle.

## UN NOUVEAU CAPTEUR AU POTENTIEL INÉDIT

Les nanosatellites, moins coûteux et plus rapides à produire que les satellites traditionnels, offrent des possibilités sans précédent en matière de surveillance des réseaux de télécommunications. Le lancement d'une constellation de nanosatellites dédiée au renseignement électromagnétique permettrait en effet de superviser une grande partie de l'activité radioélectrique mondiale, et donc de suivre des événements d'intérêt en tout point du globe. En outre, de telles constellations sont susceptibles d'offrir des « taux de revisite » très élevés, et donc une quasi-permanence de notre visibilité télécom. Leur caractère modulaire permettrait enfin de leur confier un large spectre de fonctionnalités et de les concevoir de façon agile et évolutive. Le *New Space* porte ainsi un immense potentiel pour le renseignement extérieur, comparable à aucun autre capteur technique par son caractère global et quasi-permanent.

Les cas d'usage potentiels d'une constellation de renseignement télécom pour un service extérieur sont presque illimités :

- la connaissance, depuis l'espace, des réseaux télécoms mondiaux (téléphonie mobile, *wifi*, communication et navigation par satellite, réseaux militaires, réseaux IoT, etc.) ;
- la détection précoce de crises en toute zone du monde, en identifiant des anomalies radioélectriques (augmentation ou réduction soudaine de l'activité télécom

d'une zone, par exemple), qui sont souvent des indicateurs d'activités humaines inhabituelles. La détection de ces anomalies pourra conduire à déployer sur la zone concernée des capacités de renseignement plus ciblées ;

- la caractérisation des flux qui présentent un intérêt en matière de renseignement, et le recueil de premiers éléments techniques (signatures, métadonnées, clés cryptographiques, etc.) permettant de préparer des opérations de renseignement plus complexes ;
- la géolocalisation précise, depuis l'espace, d'une large variété d'émetteurs (drones, satellites de communication, véhicules, radars, téléphones mobiles, équipements radio, etc.).

Il convient par ailleurs de noter les nouvelles générations de satellites de communication sont, et seront de plus en plus, en mesure de communiquer entre eux, constituant de véritables « réseaux en orbite » s'affranchissant des infrastructures terrestres et permettant ainsi des liaisons « point à point » entre utilisateurs. Disposer de capteurs placés dans l'espace sera sans doute utile pour être en mesure, demain, de recueillir du renseignement sur de tels réseaux.

## LA NÉCESSITE D'UNE APPROCHE DUALE

En matière de *New Space* comme dans la plupart des domaines technologiques de rupture (intelligence artificielle, calcul quantique, etc.), le temps où les services régaliens disposaient d'une avance technique sur la sphère privée civile est révolu. L'innovation dans ces domaines est aujourd'hui largement portée par les entrepreneurs et pensée avant tout pour des usages civils. Dans le domaine des télécommunications, les services offerts par les opérateurs privés ont dorénavant des performances avancées susceptibles d'être exploitées par les États.

Pour les États, et en particulier pour les services de renseignement, la seule stratégie viable pour éviter le décrochage technologique est donc de construire des partenariats stratégiques avec les entreprises innovantes nationales. Ces partenariats doivent être pensés dans une logique de réciprocité. D'un côté, l'État doit soutenir ces entreprises en mobilisant les leviers à sa disposition : financements, commande publique, mise à disposition d'installations techniques, protection contre la prédation étrangère, soutien à l'exportation, projets de R&D communs, etc. Réciproquement, l'État doit pouvoir bénéficier, y compris au profit de ses usages les plus régaliens comme le renseignement, des solutions innovantes de ces entreprises, voire d'une certaine capacité à orienter l'innovation à leur profit. La clé de voûte de cette démarche reste évidemment le maintien du caractère souverain de ces entreprises – dont certaines, qui peinent à trouver en Europe les financements nécessaires à leur croissance, envisagent de se tourner vers des investisseurs étrangers, notamment américains. Cette situation nécessite des politiques publiques ambitieuses qui dépassent largement les missions des services de renseignement, mais qui sont nécessaires pour répondre aux besoins de ces derniers.

Ce n'est que par cette démarche, fondamentalement « duale », que le renseignement extérieur français pourra demeurer à la pointe de la technologie. C'est un changement de paradigme important, puisqu'il implique que des services de l'État, pour des missions régaliennes, s'appuient dans certains domaines sur des services commerciaux privés, et non sur des capacités patrimoniales. C'est le cas dans le domaine spatial, où l'État s'appuie historiquement sur des capacités patrimoniales développées dans le cadre de grands programmes spatiaux.

Cette approche duale, fondée sur la coopération publique-privée, est particulièrement pertinente dans le domaine du *New Space*, dans lequel la France dispose d'un tissu indus-

triel dynamique et performant. Les constellations de surveillance du spectre électromagnétique, en particulier, sont adaptées à des usages duaux : à titre d'exemple, une telle constellation serait en mesure, au-delà de son apport pour le renseignement extérieur, de suivre le déploiement de la 5G sur le territoire national (en localisant les antennes), de surveiller l'usage des fréquences accordées aux opérateurs télécoms, d'être mobilisée à des fins de surveillance de l'espace et de surveillance maritime, ou de détecter des avions au profit de l'aviation civile et militaire.

Une des clés du succès de cette démarche publique-privée dans le domaine du *New Space* sera la capacité des industriels et des services de l'État à travailler main dans la main, en mettant en commun leur expertise, dès la phase de conception des projets. En effet, une spécificité des satellites est l'impossibilité d'intervenir physiquement, après leur lancement, pour renouveler les capteurs qu'ils embarquent. La conception d'une constellation de renseignement télécom nécessite donc une capacité avancée à anticiper les évolutions télécoms sur plusieurs années, pour s'assurer que les capteurs placés dans l'espace demeurent pertinents dans les années qui suivent leur mise en orbite.

## LA CLÉ DU RENSEIGNEMENT TECHNIQUE : L'APPROCHE MULTI-CAPTEURS

Si l'émergence de ce nouveau capteur offrira des possibilités inédites en termes de recueil de données, et s'il sera performant pour une large gamme de tâches, son efficacité restera limitée s'il est utilisé isolément. La complexité des missions de renseignement, notamment lorsqu'il s'agit de cibles « dures », c'est-à-dire bien protégées et difficiles à atteindre, requiert une approche plus holistique.

Pour demeurer dans le peloton de tête des services de renseignement occidentaux, nous devons continuer à développer notre capacité à intégrer et à combiner les différents types de capteurs et d'effecteurs de notre arsenal. Cela est indispensable pour être en mesure de recueillir du renseignement sur les cibles les plus dures, car la sécurité de ces cibles est souvent pensée pour « résister » à chaque capteur pris isolément : mesures d'hygiène numérique contre les intrusions cyber, chiffrement robuste contre les interceptions passives, etc.

Rien que dans le milieu spatial, les opérations de renseignement sont d'autant plus efficaces que nous sommes en mesure de penser chaque vecteur comme un rouage d'un système de renseignement multi-vectorel. À titre d'illustration, dans le cadre d'une opération de lutte anti-terroriste sur une zone donnée : tandis que les nanosatellites offriront une vue d'ensemble et permettront de suivre les changements à grande échelle, les drones embarqueront des capteurs plus flexibles pour des missions tactiques, et les plateformes de haute altitude fourniront quant à elles, de façon complémentaire, une surveillance discrète, continue et stable de la zone, grâce à leur capacité à embarquer des capteurs plus lourds et plus complets.

Au-delà du domaine spatial, pour aborder des cibles dures, il est indispensable d'intégrer toutes les capacités de renseignement technique dans une approche multi-capteurs. Qu'il s'agisse des interceptions passives, de la cryptanalyse, des intrusions cyber, du piégeage des terminaux ou des capacités spatiales, chacune de ces capacités apporte un élément unique et complémentaire dans la construction d'un accès ou la conception d'une opération. La combinaison de ces diverses capacités de renseignement crée une synergie où l'efficacité globale dépasse de loin la simple addition de la force de frappe individuelle de chaque capteur. La capacité à apprécier comment ces capteurs et effecteurs s'entrecroisent et se renforcent mutuellement, dans le cadre d'opérations sophistiquées, est la marque des rares services de renseignement capables de pénétrer les cibles les plus dures.

Si l'approche multi-capteurs est déjà une réalité dans le domaine du renseignement, un défi structurant dans les années à venir sera de nous doter d'une capacité à coordonner automatiquement la manœuvre de nos capteurs, en particulier à l'aide de systèmes d'intelligence artificielle. L'introduction de cette forme d'automatisation nous permettra de franchir une nouvelle étape dans l'intégration de nos capteurs, pour atteindre des performances opérationnelles inédites. Les capteurs issus du *New Space*, en particulier, auront un impact d'autant plus massif sur nos capacités de renseignement qu'ils seront intégrés dans une telle approche globale.

## **LE PLUS GRAND DÉFI DU RENSEIGNEMENT MODERNE : EXPLOITER LES DONNÉES RECUEILLIES**

Mais à quoi bon développer de nouveaux capteurs et construire de nouveaux accès si nous ne sommes pas en mesure d'exploiter les données qu'ils produisent ?

En réalité, les services de renseignement modernes sont, aujourd'hui déjà, confrontés au défi immense que constitue l'exploitation de la donnée. L'augmentation des quantités de données recueillies et l'hétérogénéité extrême de leur format constituent un défi inédit. Il s'agit d'un changement de paradigme majeur pour les services de renseignement car, historiquement, le principal enjeu était de recruter de nouvelles sources humaines et de conquérir de nouveaux accès techniques. Or aujourd'hui, le « réactif limitant » est notre capacité à traiter les données déjà recueillies et stockées, pour en extraire du renseignement pertinent. Autrement dit, l'avantage stratégique d'un service de renseignement n'est désormais plus une question de volume de données collectées, mais repose sur la capacité à identifier rapidement la donnée utile.

À mesure que nous déployons de nouveaux types de capteurs et que nous nous intéressons à de nouvelles zones du monde – ce qui s'accompagne généralement de nouveaux formats de données à ingérer – ce défi s'annonce toujours plus titanesque. Les nouveaux capteurs issus du *New Space*, les drones, les plateformes de haute altitude : ces nouveaux capteurs sont prometteurs, mais leur apport concret restera très limité si nous n'avons pas, en amont, su investir massivement dans l'innovation autour de la donnée, pour changer d'échelle dans notre capacité à traiter la donnée.

Relever ce défi majeur suppose avant tout de continuer à investir dans des outils d'intelligence artificielle spécialisés dans l'analyse de la donnée (transcription et traduction automatique, reconnaissance de locuteur, interprétation d'images satellitaires, etc.), afin de permettre aux exploitants de se concentrer sur des tâches à haute valeur ajoutée. Cet effort a été engagé par la direction générale de la Sécurité extérieure (DGSE) depuis plusieurs années.

Mais nous devons aussi, et c'est un des enjeux les plus structurants du renseignement technique pour les années à venir, réussir à exploiter tout le potentiel de l'IA générative pour révolutionner notre capacité à détecter l'information utile dans l'information massive – et, plus généralement, assister les analystes dans tout le cycle du renseignement. Cet axe d'effort nécessite sans doute que la France investisse pour se doter d'un modèle fondateur souverain, car il est difficilement imaginable de dépendre pour cela de solutions commerciales étrangères, à plus forte raison que ces modèles sont nativement bridés pour interdire les usages « offensifs » propres à un service de renseignement extérieur.

Enfin, au-delà des outils, les services de renseignement extérieurs devront changer de culture pour adopter une approche du renseignement qui soit davantage centrée sur la donnée. Il s'agira demain, par exemple, d'identifier une potentielle source humaine en recherchant, dans une zone d'intérêt, un profil adéquat par l'analyse automatique d'un large volume de données géolocalisées. Ce changement de paradigme nous appelle à faire évoluer nos métiers, nos pratiques, nos critères de recrutement, et à préparer tous nos

« officiers traitants » à travailler autour de la donnée, en symbiose avec des intelligences artificielles. C'est notamment pour répondre à ce défi que la DGSE a profondément transformé son organisation ces derniers mois.

## CONCLUSION

Ainsi, ce n'est qu'au prix d'efforts majeurs sur plusieurs axes que nous serons en mesure d'exploiter tout le potentiel du *New Space* au profit du renseignement extérieur : un travail « main dans la main » avec le tissu de *start-up* français, l'intégration des capteurs du *New Space* dans une stratégie multi-capteurs et une révolution de notre capacité à travailler la donnée, en nous appuyant sur l'intelligence artificielle.

Pour relever ces défis, la DGSE s'appuiera sur sa relation très étroite avec la direction générale de l'Armement (DGA) et l'Agence de l'innovation de défense (AID), car dans le domaine du spatial comme dans celui de l'intelligence artificielle, il ne serait ni réaliste ni pertinent que la DGSE avance seule. Elle a notamment besoin de la force de frappe de la DGA en matière de veille technologique, d'outils de financement et de planification. Réciproquement, la DGSE constitue pour le ministère des Armées un véritable laboratoire d'innovation opérationnelle, grâce à son agilité en termes d'acquisition et ses capacités de maîtrise d'œuvre, qui lui permettent d'intégrer rapidement l'innovation dans ses opérations.

Enfin, dans le domaine du *New Space* comme dans les autres domaines technologiques de rupture, les projets doivent être pensés dans une logique de co-construction et de mutualisation au sein de la communauté nationale du renseignement (CNR), sous la coordination de la CNRLT : partage des données interceptées, mutualisation des acquisitions de données, co-développement, etc. Dans des domaines aussi dynamiques et complexes que le *New Space*, l'IA ou le calcul quantique, les services de la CNR ne peuvent se permettre d'avancer en silo et nous devons éviter toute forme de compétition entre services sur les talents ou les ressources.

# Comment la propulsion hybride peut participer à retrouver une souveraineté française et européenne pour l'accès à l'espace

Par Sylvain BATAILLARD

Co-fondateur et directeur opérationnel de HyPrSpace

Depuis le début de la course à l'espace, nous utilisons la même technologie de propulsion : la propulsion liquide. La majorité des acteurs du spatial font la course sur les mêmes rails... Tandis que certains ont décidé de construire une nouvelle voie : la propulsion hybride. La promesse est simple, une réduction de 75 % des coûts de lancement, qui permettrait de rattraper même les plus grands. Mais il existe un verrou technologique qui empêche à cette technologie d'être utilisée sur de gros véhicules. HyPrSpace, *start-up* bordelaise, pense avoir trouvé le moyen de contourner ce verrou, et d'accéder au graal de la propulsion.

## INTRODUCTION

Depuis la conclusion du programme Ariane 5, la France se retrouve dépourvue de moyens autonomes pour lancer ses satellites. L'une des rares alternatives qui s'offrent à nous est de recourir aux services du principal concurrent d'Ariane Group : Space X. Cette situation, qui a réellement commencé depuis le dernier vol de notre fleuron spatial français, résulte d'un processus complexe ayant pris racine il y a 12 ans, avec l'émergence de Space X. Le virage vers le *New Space* a été largement sous-estimé, voire négligé par l'Europe. L'approche américaine s'est révélée plus efficace, plus rapide, et par conséquent, plus compétitive que notre modèle hérité de l'après-guerre. Cette réalité nous place aujourd'hui dans une position des plus inconfortables, où notre accès à l'orbite dépend désormais principalement des Américains.

Le retard s'étant trop accumulé, notamment face au géant Space X d'Elon Musk, nous nous trouvons face à une course déséquilibrée où les Américains jouissent d'une avance considérable. Mais la France n'a pas dit son dernier mot, et une des issues qui s'offrent à nous est d'investir nos ressources dans de l'innovation de rupture.

Cet article présente les technologies de propulsion existantes en matière de lanceurs, et établit une comparaison avec la technologie développée par HyPrSpace, ayant pour objectif de diminuer drastiquement les coûts liés à la propulsion, qui sont le principal facteur du prix actuel d'accès à l'espace, et qui a le potentiel d'apporter une réponse à la demande grandissante de la prochaine décennie.

## LES TECHNOLOGIES EXISTANTES

En premier, la technologie de propulsion « bi-liquide ». Elle consiste en un mélange de carburant liquide et de comburant liquide, ce qui est très simple à première vue, mais

nécessite en réalité des composants très complexes, comme les turbopompes<sup>1</sup>, pour fonctionner. Cette technologie a permis à l'humanité d'accéder à l'espace depuis les premiers succès de la course aux étoiles commencée pendant la guerre froide. Cependant, elle possède un inconvénient majeur : son coût de production, qui la rend difficilement rentable. Il est dû notamment à la complexité des composants nécessaires, tant lors de la conception que de la production, et nécessite souvent l'internalisation de nombreux processus de fabrication, pour parvenir difficilement à une viabilité économique précaire.

Une autre méthode de propulsion est la propulsion solide, que l'on retrouve sur les missiles principalement, mais aussi certains lanceurs comme, par exemple, sur les boosters d'Ariane 5. Une fois le propergol allumé, il est impossible de l'éteindre. Beaucoup plus simple et beaucoup plus fiable que la propulsion liquide, cette technologie présente néanmoins d'autres inconvénients : la poussée ne peut être ni modulée ni arrêtée, et implique des règles de sécurité drastiques en tant que matériau pyrotechnique.

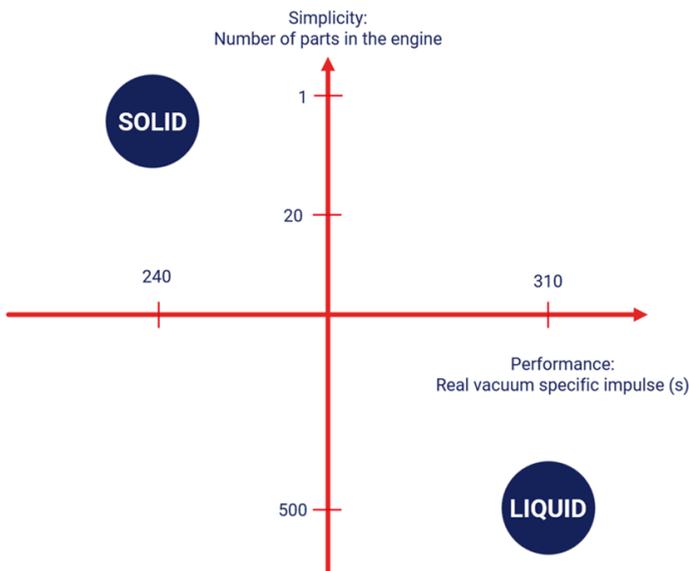


Figure 1 : Schéma comparatif des différentes technologies de propulsion en fonction de la simplicité et de la performance.

Il existe également une troisième technologie qui est une hybridation des deux précédentes.

## LA PROPULSION HYBRIDE : UN RÊVE INATTEIGNABLE ?

Cette technologie de propulsion, connue depuis plus de 50 ans, regroupe tous les avantages de la propulsion bi-liquide et de la propulsion solide, sans s'encombrer de leurs inconvénients. Bien qu'apparemment parfaite d'un point de vue économique, écologique,

---

<sup>1</sup> Une turbopompe est en astronautique une pompe à comburant ou à combustible entraînée par une turbine tournant à plusieurs milliers de tours par minute, qui met sous pression les ergols (carburant et comburant) avant leur injection dans la chambre de combustion d'un moteur-fusée à ergols liquides. Cet élément du moteur joue un rôle essentiel dans la performance du moteur-fusée, car la poussée de celui-ci dépend de la pression des ergols arrivant dans la chambre de combustion.

et réglementaire, cette technologie n'est pas utilisée sur des véhicules orbitaux. Ceci est dû à un verrou technologique dont souffre cette technologie jusqu'à maintenant.

L'hybridation réside dans le mélange entre un carburant solide et un comburant liquide. Dans l'état de l'art actuel l'oxydant est stocké dans un réservoir et est dans une chambre de combustion qui contient le bloc de carburant à l'état solide, bloc qui va se pyrolyser et alimenter la combustion. Les produits de combustions sont ensuite accélérés à travers la tuyère, afin de propulser le véhicule. Pendant la phase de tir, le carburant est consommé petit à petit vers l'extérieur, augmentant le volume de la chambre de combustion. Ceci aura pour conséquence d'augmenter la distance entre la flamme et le bloc carburant, diminuant ainsi la quantité de carburant vaporisé, et donc la quantité de masse réactive à éjecter à travers la tuyère. Aussi le volume interne de la chambre de combustion devient de plus en plus grand, et les structures turbulentes internes ne permettent plus de correctement mélanger comburant et carburant, ce qui amène à des imbrûlés. Ces deux aspects diminuent très fortement la performance propulsive qu'il est possible d'obtenir avec un moteur à propulsion hybride.

HyPrSpace a développé une architecture innovante permettant de régler ces deux effets et d'obtenir une performance propulsive optimale tout en gardant les avantages de la propulsion hybride : un moteur simple et peu onéreux, permettant de moduler la poussée, d'éteindre et de rallumer le moteur, tout en utilisant un carburant solide issue de la filière du recyclage.

Cette architecture est constituée d'une chambre de combustion toroïdale comprise entre deux blocs carburants concentriques, avec le réservoir d'oxydant en son centre.

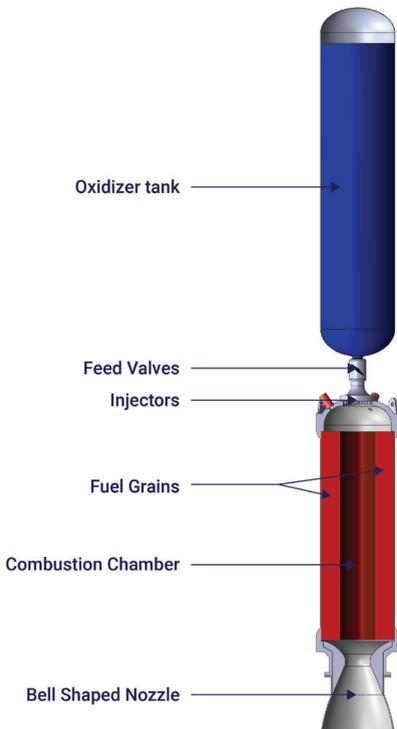


Figure 2 : Schéma d'une architecture de moteur hybride classique.

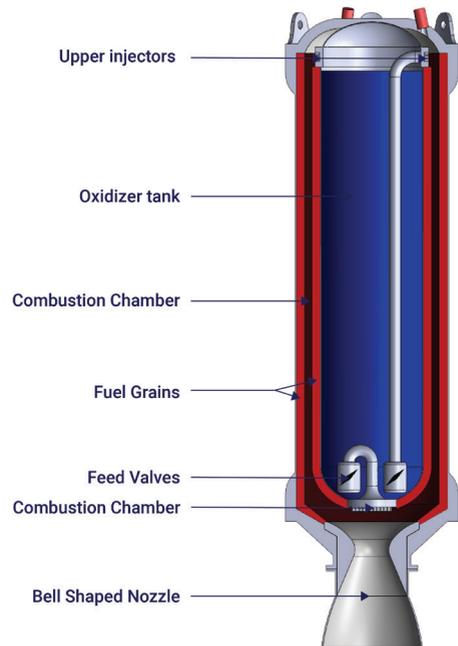


Figure 3 : Schéma de l'architecture de moteur hybride brevetée par HyPrSpace.

Quelle que soit la taille du moteur, l'espace entre les deux blocs carburants est très faible, forçant mécaniquement la flamme à rester très proche des blocs, et de vaporiser beaucoup de carburant, ce qui règle le premier problème que rencontre la propulsion hybride en architecture standard. Aussi, le volume interne de la chambre de combustion est beaucoup plus faible, ce qui permet un mélange optimal des réactifs, réglant alors le second problème de la propulsion hybride.

Ces deux aspects permettent d'obtenir une combustion optimale et efficace même pour des propulseurs de très grande taille, comme ceux utilisés pour un véhicule orbital, et ce pour une fraction du coût d'un moteur aux performances équivalentes en propulsion liquide.

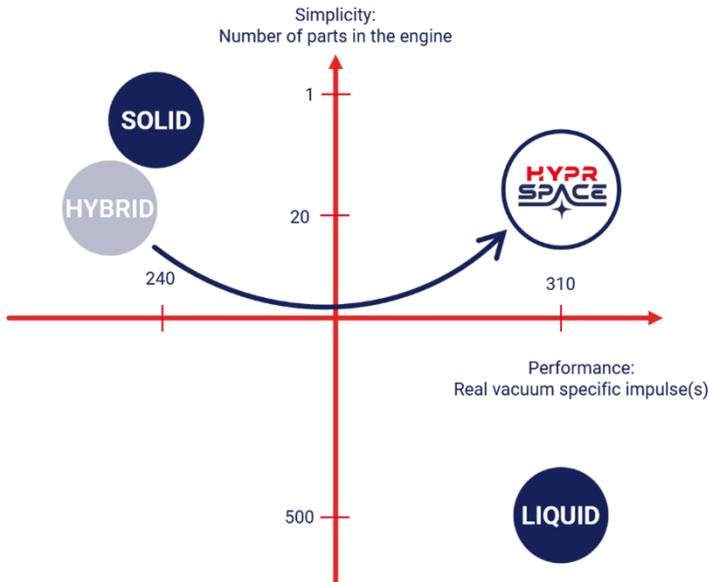


Figure 4 : Graphique représentant l'impact de l'innovation d'HyPrSpace sur les performances de la propulsion hybride.

## QUEL IMPACT SUR L'AVENIR DU SPATIAL ?

L'introduction de la propulsion hybride représente un changement majeur sur le marché des lanceurs et micro-lanceurs spatiaux. Constituant la majorité du coût total d'une fusée, une technologie de propulsion plus économique permettra de réduire considérablement les coûts (de plus de 50 %) et donc d'accroître la rentabilité, là où les lanceurs bi-liquides, notamment les micro-lanceurs, sont limités. Un autre impact notable est la disponibilité accrue des lanceurs hybrides. Cette technologie, à la fois fiable et simple, permet une mise en œuvre rapide et facilite des lancements plus dynamiques, répondant ainsi à des besoins très spécifiques, notamment dans le domaine de la défense.

Aussi, le développement d'une nouvelle brique technologique propulsive permet d'être utilisée sur d'autres types de véhicules que les micro-lanceurs : lanceurs plus lourds, véhicules hypersoniques atmosphériques et extra-atmosphériques ou encore plateformes de mobilité en orbite.



Figure 5 : Illustration du lanceur Orbital-Baguette 1 (OB-1).

# Les communications militaires par satellite (MilSatCom) : une nécessité pour le soldat connecté

Par Vincent SATGE et Grégoire CHAUCHAT  
Groupe Thales

Le besoin croissant des forces armées en connectivité est un constat qui ne cesse de s'imposer. Au-delà d'un simple accroissement de connectivité, le SatCom procure des avantages incomparables en termes d'élongation qui le rendent indispensable dans certains cas d'usage. Face à l'irruption des constellations commerciales en basse orbite, le SatCom militaire doit dorénavant coexister avec son versant civil au profit des forces armées. Ces dernières bénéficieront ainsi des atouts de la diversité du Satcom (dualité civile/militaire ; complémentarité orbite géostationnaire/orbite moyennes ou basses).

## INTRODUCTION

La connectivité joue un rôle essentiel dans la doctrine des armées contemporaines. Dans un monde hyperconnecté, la supériorité informationnelle en continu *via* des systèmes de communications sécurisés est nécessaire à nos forces armées pour mener à bien leurs missions.

L'ensemble des types d'intervention sont concernés par ces évolutions. Pour les conflits étatiques classiques de haute intensité, la guerre en Ukraine a démontré toute l'importance d'une bonne connectivité, à la fois pour des missions de renseignement mais aussi d'attaque par drones. À l'extrême opposé, les conflits asymétriques, de type opération de lutte contre le terrorisme au Sahel, soulignent l'intérêt de technologies de communication à forte élongation, à la fois pour couvrir de larges territoires, mais aussi pour assurer une réactivité maximale dans le cadre, par exemple, de frappes sur des cibles évasives à forte valeur ajoutée.

Le SatCom présente un ensemble de caractéristiques développées dans notre propos en particulier sur le naval et l'aérien. Dans un monde (militaire comme civil) toujours plus caractérisé par l'hyperconnectivité, il permet de couvrir un ensemble de cas opérationnels spécifiques. Connaissant lui-même une rupture stratégique majeure (l'irruption du SatCom commercial, notamment en basse orbite), sa composante militaire reste néanmoins indispensable à la conduite des opérations.

## L'ACCROISSEMENT DES BESOINS EN CONNECTIVITÉ

La nécessité de moyens de communication pour les forces armées aux débits toujours plus importants ne cesse de se confirmer. Pour réaliser leurs missions, les forces armées s'appuient sur une combinaison de plateformes aériennes, navales et terrestres, de capteurs, d'armements et de centres de commandement et de conduite. Afin de pouvoir

appréhender leurs environnements et faire face aux menaces, les forces doivent pouvoir communiquer aux centres de commandements ainsi qu'à d'autres unités (possiblement évoluant dans d'autres milieux) les renseignements qu'ils auront collectés, jouant ainsi un rôle majeur dans la chaîne de détection et de traitement.

La connectivité est ainsi nécessaire pour permettre une communication continue et nourrie entre les centres de commandements et les systèmes hébergés par des plateformes en mission, afin d'échanger notamment ordres, statut de l'ordre et analyse de la situation. À ce titre, l'amélioration du partage en temps réel de la situation opérationnelle à travers des échanges par voix ou par prises de vues photographiques ou vidéos à partir d'avions de combat (en direct ou *via* un nœud de communications comme le MRTT), d'hélicoptères ou de drones, nécessite des volumes de données de plus en plus importants.



Figure 1 : Connectivité sécurisée *via* le SatCom (© Thales).

La tendance accrue au combat collaboratif est un autre vecteur de l'augmentation des besoins en connectivité. Cette collaboration peut se faire entre divers milieux (l'aéronavale par exemple), mais également interarmées et, plus complexe encore, en coalition. La fourniture de services opérationnels repose notamment sur l'échange des données de divers capteurs équipant les plateformes (électro-optiques, infrarouges, radars), qui permettent aux forces en présence d'apprécier la situation opérationnelle et son évolution. La coordination des parties prenantes de ce combat collaboratif dépend en outre de moyens de communication robustes, fiables et résilients, permettant des échanges de données et d'information volumineux. La connectivité est également nécessaire pour assurer son propre maintien : ainsi, l'échange de données de guerre électronique souveraines entre acteurs inter-forces et en coalition permet de pouvoir obtenir, conserver, reconquérir la maîtrise du spectre électromagnétique et ainsi garantir l'échange d'informations au sein de son camp tout en empêchant l'adversaire de pouvoir faire de même au sein du sien.

De manière générale, détenir la supériorité informationnelle implique de pouvoir recevoir et échanger des informations de toutes natures, et ainsi de disposer de moyens de communications disponibles, résilients et sécurisés. Les communications par satellite (le SatCom) peuvent y contribuer fortement.

## L'INTÉRÊT DU SATCOM POUR LE SOLDAT CONNECTÉ

Fin 2021, le chef d'État-Major de la Marine française, Pierre Vandier, décrivait la nouvelle donne géopolitique pour les forces navales, marquée par un retour des tensions : « Nous sommes entrés dans une ère carnivore sur le plan naval, où la démonstration de force et l'affrontement font partie de la feuille de route des dirigeants de ces puissances navales. Ils se donnent les moyens de changer les règles ». Une déclaration qui vaut aussi pour l'espace aérien. Les espaces maritime et aérien sont, en effet, traversés par de nombreuses crises, mêlant les postures désormais courantes dans les relations internationales : compétition, contestation, affrontement direct.

Afin d'assurer les missions décrites ci-dessus, le fait de pouvoir disposer d'un lien permanent entre les différentes composantes (avions de chasse, bâtiments de guerre, SNA, etc.) et des structures de commandement (aussi bien au niveau tactique, opérationnel ou stratégique) est essentiel et est rendu possible par un réseau SatCom, accélérant ainsi la boucle OODA (boucle d'Observation, Orientation, Décision et Action). Ainsi, l'utilisation de communications par satellites, dont la capacité d'élongation est sans égal, facilite les frappes sur des cibles évasives. Cette boucle OODA peut également être mise au profit de forces terrestres de type « opérations spéciales » : embarquant un terminal SatCom portable, elles peuvent ainsi établir des communications directes avec le quartier général depuis n'importe quel point du globe (sous réserve de couverture satellitaire).

Dans le cadre d'opérations avec asymétrie des forces en présence (Serval au Mali), elle permet de diriger ou rediriger des chasseurs dans des opérations justement dénommées "Time sensitive targeting" et de mesurer les impacts de la frappe/d'une offensive (*Battle damage assessment*) pour les actions suivantes à mener. Cette même capacité d'élongation garantit l'absence d'intermédiaire de communication entre le centre de commandement



Figure 2 : Porte-avions (© Thales).

et le porteur, du fait de son bout en bout, évitant ainsi la déformation de l'information et permettant un nombre d'échanges plus important.

Pour les opérations aériennes, le SatCom peut également se révéler pertinent dans le cadre de la pénétration de zones protégées par des défenses comme des moyens de détection (radars), de neutralisation (brouillage) et de destruction (défense antiaérienne par missiles). Face à ces menaces, l'une des contre-mesures consiste en l'utilisation de vols à basse altitude, afin de mener des opérations de renseignement, de frappes en profondeur ou contre les défenses anti-aériennes. Les moyens de communications non SatCom, soumis aux aléas de la topologie du terrain (un relief montagneux bloque une liaison radio), peuvent devenir limitants dans des missions où la permanence du lien entre centre de commandement et chasseurs se révèle critique. Le SatCom, du fait du lien ininterrompu entre le porteur et le satellite, permet d'éviter cet obstacle.

Au-delà des raids de basse altitude, la capacité d'élongation du SatCom permet de relier des bulles de connectivité à des centres C2 qui seraient, autrement, totalement empêchés de communiquer du fait de la topologie. Une élongation qui est essentielle aux forces marines pour le déploiement sur des zones très étendues, permettant aux différents bâtiments de la marine de bénéficier d'une connectivité partout sur le globe.

Enfin, l'élongation est très adaptée à l'une des armes particulièrement utilisées dans les conflits aussi bien de basse que de haute intensité, à savoir les drones. Pouvant opérer dans des environnements très hostiles sans exposer de combattants, réalisant des opérations d'Intelligence, Surveillance et Reconnaissance (aussi bien situation *awareness* que *patterns of life*) mais également de frappes, les drones ont montré leur intérêt aussi bien dans le cadre de luttes insurrectionnelles (guerres civiles irako-syriennes débutées en 2014) que de conflits interétatiques (tel que celui débuté en Ukraine en 2022). Le SatCom est particulièrement précieux dans ce cas d'usage, tant il permet au pilote du drone de pouvoir opérer de n'importe quel point du globe sans risque de perdre sa liaison et donc le contrôle du drone, ou de s'exposer au feu ennemi.

## LES APPORTS DU SATCOM CIVIL DANS LES OPÉRATIONS EN COMPLÈMENT DU SATCOM MILITAIRE

Si l'apparition et le développement à marche forcée des constellations satellitaires commerciales (en basse et moyenne orbite) est indispensable, l'opportunité d'utiliser ces nouvelles ressources peut légitimement se poser. Les constellations géostationnaires militaires (MILGEO) disposent d'une bonne couverture du globe et de débits largement suffisants pour opérer les cas d'usages que nous avons détaillés. Cependant, leur comparaison avec les constellations commerciales en orbite moyenne et basse reste en leur défaveur. En contrepartie, un examen plus détaillé des garanties que propose le MILGEO en fait l'incontestable « noyau dur » des communications militaires pour l'aéronautique.

Les constellations militaires géostationnaires bénéficient d'un niveau de protection de leurs communications beaucoup plus fort que celui des constellations commerciales. Face à la menace la plus fréquemment mentionnée tel que le brouillage, la technologie de saut de fréquence permet d'éviter la rupture des communications. Certifié STANAG 4606 par l'OTAN pour les communications critiques sécurisées et protégées, le Modem 21 de Thales bénéficie d'une forte expertise, démontrée sur les théâtres d'opérations depuis de nombreuses années. L'intégrité des communications est, elle, assurée par un chiffrement des données grâce aux mesures COMSEC et NETSEC du même Modem 21. Enfin, étant opérées par des acteurs souverains (les forces armées elles-mêmes et non pas un opérateur externe commercial), les communications et les informations qu'elles transportent sont moins concernées par des risques de fuites/piratages. La disponibilité des constellations militaires géostationnaires est un autre facteur à considérer. Là où les

constellations commerciales opèrent un partage de la capacité pour tous les utilisateurs présents sur un même spot, la constellation militaire garantit des ressources dédiées pour l'opérateur militaire, d'autant plus si les moyens satellitaires sont souverains, ce qui renforce l'autonomie d'action des forces armées concernées. Par ailleurs, le SatCom militaire est par définition mieux adapté aux fortes contraintes auxquelles doivent répondre les forces armées. L'impératif de discrétion est assuré par les modems militaires tels que le Modem 21, qui protègent de la géolocalisation, à l'inverse de stations SatCom civiles qui sont, elles, localisables par triangulation.

En outre, le SatCom militaire géostationnaire offre une plus grande garantie de service que les constellations commerciales. Situé à une altitude de 36 000 kilomètres, il est naturellement plus protégé d'attaques incapacitantes, qu'elles soient balistiques ou électromagnétiques que les constellations MEO (8 000 km) ou LEO (orbites inférieures à 2 000 km). De même, en cas d'attaque électronique ou de cyberattaque, un satellite militaire géostationnaire offrira une résistance plus grande, car conçu dans cette optique et faisant partie de constellations moins volumineuses. En effet, une constellation géostationnaire peut se contenter de deux ou trois satellites là où des constellations LEO doivent être des milliers pour assurer une couverture globale : or, il n'est pas économiquement tenable d'assurer les mêmes niveaux de protection destinés à une constellation de trois satellites que pour une constellation en comptant des milliers. Enfin, le caractère souverain de la constellation militaire géostationnaire offre un argument de poids. Considérées comme des atouts militaires essentiels à la survie et à l'intégrité des nations qui les opèrent, toute attaque à leur encontre peut être considérée comme un acte de guerre et entraîner une réponse autrement plus dissuasive que les récriminations qu'un acteur commercial pourrait émettre dans la même situation pour sa constellation civile en LEO/MEO.

C'est pourquoi, l'utilisateur final peut ainsi décider de bénéficier du meilleur de chaque système, dans une logique notamment d'hybridation de réseaux. Des combinaisons qui peuvent être ainsi réalisées sur un axe constellations civiles/militaires (disponibilité et débits généralement plus forts sur le civil, sécurité renforcée et disponibilité garantie sur le militaire), sur un axe multi-fréquences (utilisation de la bande Ka pour des débits plus importants, de la bande X pour sa plus forte résilience aux perturbations atmosphériques, et de la bande Ku pour un surcroît de connectivité), ou sur enfin un axe multi-orbites (débit, couverture, plus importants sur les constellations LEO/MEO contre une sécurité plus grande sur constellations GEO).

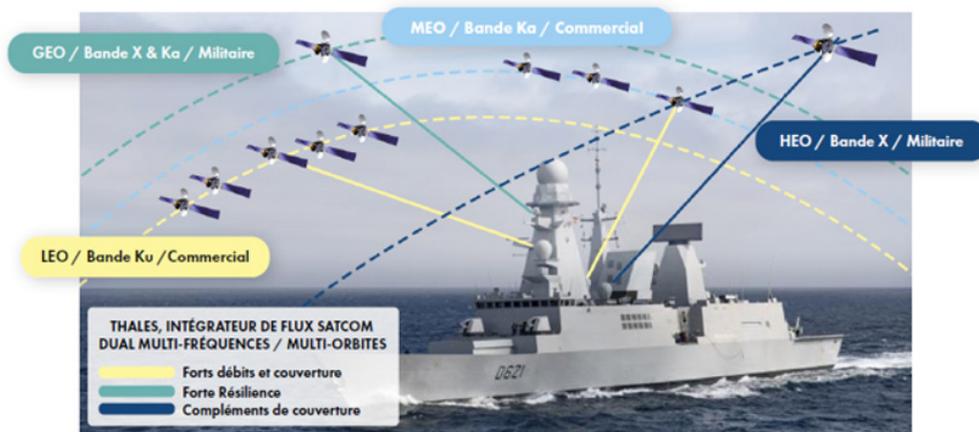


Figure 3 : Intégrateur de flux SatCom (© Thales).

Au-delà des avantages opérationnels importants que permet cette approche modulaire pour les communications critiques sur les parties les plus souveraines du spectre opérationnel (ordre d'engagement, données stratégiques), elle autorise également un meilleur traitement des flux organiques et Welfare, soit l'ensemble des besoins en SatCom que nécessitent les équipages pour la qualité de vie à bord lors de missions de longue durée (appels aux familles, visionnage de contenus divertissants...).

## CONCLUSION

Face à des besoins de connectivité qui explosent, le SatCom est une nécessité évidente pour les forces armées. Parmi les diverses constellations satellitaires en service, les géostationnaires militaires offrent la possibilité d'assurer les missions des forces armées dans des conditions optimales. Néanmoins, l'usage de constellations MILGEO ne saurait exclure les avantages offerts par les constellations commerciales. L'hybridation, harmonisant une dualité civile et militaire permet un partage des tâches idéal entre les ressources satellitaires civiles et militaires : aux ordres non stratégiques/critiques/opérationnels, les ressources satellitaires civiles aux flux opérationnels, le versant militaire du SatCom. Élément fondamental au service de nos forces pour assurer leurs missions, le SatCom est en passe d'effectuer sa mue vers davantage de dualité civil-militaire/multi-orbite afin de faire bénéficier le meilleur des deux mondes au soldat connecté.

# Un tsunami en télécommunications par satellite

Par **Didier LE BOULC'H**  
Thales Alenia Space

Le secteur des communications spatiales n'échappe pas à la déferlante de changements rapides, voire de disruptions. L'arrivée de nouveaux acteurs verticalisés comme Starlink de Space X, les évolutions dans les usages (*via* les plateformes de services), les progrès rapides des technologies notamment digitales, la convergence avec les normes terrestres mobiles issues du 3GPP (5G), l'évolution de l'intérêt des opérateurs terrestres, les changements de modes de financement, ainsi qu'une attention croissante portée à la soutenabilité et à l'empreinte écologique sont autant de facteurs qui modifient en profondeur l'écosystème des télécommunications spatiales. Les développements en cours permettent de répondre à ces enjeux, avec un rythme d'innovation que le spatial commercial, jadis quelque peu conservateur, n'avait jamais connu jusque-là.

La seule stabilité dans le monde actuel est le changement... De plus en plus rapide et complexe à prévoir. Le secteur des communications spatiales n'échappe pas cette déferlante. Cet article présente les changements profonds de ce secteur d'activité, à la fois commercial et stratégique. Commercial car ce secteur demeure le premier secteur d'application de l'espace en volume d'activité, en nombre et masse de satellites lancés, en capitalisation de son écosystème... Stratégique car les États sont de plus en plus nombreux à vouloir maîtriser le domaine spatial et à se doter d'une forme de souveraineté de leurs réseaux de communication y compris par satellites.

## LA DISRUPTION DE STARLINK

C'est la plus récente et probablement la plus forte vécue par le secteur. Cette constellation d'Elon Musk compte actuellement de plus de 6 000 satellites en orbite basse. Sa conception a démarré il y a 15 ans, autour d'un terminal utilisateur très compact, produit en grande série avec des composants électroniques français (de STMicroelectronics). Ce terminal est une démocratisation parfaitement réussie de la technologie des antennes actives (coût grand public inférieur à 500 €). Le succès technique et commercial de cette constellation est indéniable, avec déjà près de deux millions d'abonnés, et un *cash-flow* positif, après toutefois une dizaine d'années d'investissements massifs à perte, ce qui est peu compatible des modèles économiques traditionnels.

L'impact de ce nouveau réseau devient très perceptible sur l'écosystème Satcom qui réagit afin de continuer à développer un *business* profitable dans l'accès par satellite large bande. Avec quelques années de décalage par rapport à Starlink, qui utilise la bande Ku, Amazon prépare sa constellation similaire, Kuiper, en bande Ka. Elle ajoutera probablement une pression additionnelle sur le marché de l'accès à haut débit par satellite. Ce sera une manière de tester l'élasticité de ce marché qui bénéficie de la croissance forte de la consommation en flux digitaux sur toute la planète.

Ces disruptions, outre leur verticalisation très forte, marquent aussi un changement profond dans le modèle de financement. Dans l'industrie spatiale, les développements technologiques étaient majoritairement financés par les gouvernements (agences spatiales, ou acteurs de la défense), et les acteurs privés recouraient à du financement bancaire pour investir dans des infrastructures visant une rentabilité économique à long terme. Les nouveaux acteurs font appel à du capital-risque et lèvent des fonds en perspective de leur positionnement sur les marchés.

## DES CHANGEMENTS DE SERVICES INDUISANT DES CHANGEMENTS PROFONDS DE TECHNOLOGIES

En se projetant un demi-siècle en arrière, on observe que depuis les premiers satellites expérimentaux, les services offerts par les satellites ont beaucoup évolué : les connexions intercontinentales, avant que les fibres optiques se déploient massivement, puis la diffusion de bouquets télévisuels sur des continents entiers, avant l'arrivée des plateformes de *streaming*, les connexions vers des mobiles (navires, avions, drones), et aujourd'hui l'interconnexion de réseaux et l'accès large bande à Internet.

Les satellites sont parfois le seul moyen de communication possible pour interconnecter des plateformes mobiles ou des sites isolés. Ils sont parfois un moyen parmi d'autres et doivent alors montrer une proposition de valeur déterminante – afin de prendre leur part de marché de la connectivité. Le satellite est une technologie sans fil, sans fibre et sans pylône. Un de ses atouts est d'éviter les grosses infrastructures terrestres, une fois en orbite il peut déployer très rapidement un réseau presque n'importe où sur la planète. Un autre atout considérable est sa capacité de diffusion (*broadcast / multicast*) sur de très larges régions : le même signal (la même ressource spectrale et énergétique) permet de partager un contenu simultanément (par exemple une vidéo, un film, un logiciel ou le contenu d'un site *web*) à des milliers voire à des millions d'abonnés.

Cependant, les usages des réseaux sont en constante évolution : la consommation de télévision est passée en quelques années du mode linéaire (le JT à 20 h, le film à 20 h 45...) au mode « à la demande » et à une consommation « ATAWAD » (Any Time, Any Where, Any Device). La diffusion par satellite est moins idéalement adaptée à ces usages, elle doit être adaptée.

Or, un gros satellite géostationnaire nécessite plusieurs années pour être fabriqué, et sa durée de vie dépasse souvent 15 ans. Comme il est difficile de prédire ce que seront les besoins de la société dans 15 à 20 ans, les opérateurs majeurs ont incité l'industrie à développer des satellites de plus en plus flexibles, capables d'adapter la connectivité qu'ils proposent aux évolutions des besoins. Ainsi, Thales Alenia Space a introduit en 2017 une technologie totalement digitale pour les répéteurs de ses satellites afin de modifier la connectivité et la bande passante de chaque région. Cette technologie a permis d'équiper les satellites SES 17, K VHTS et E 10 B d'Eutelsat, Amazonas Nexus de Hispasat, et Satria de l'opérateur indonésien PSN.

Plus récemment, les opérateurs ont souhaité aller encore plus loin dans la flexibilité en permettant à leurs satellites de modifier au cours de leur vie :

- la couverture visée des satellites (les zones géographiques adressées) ;
- les types de services (diffusion TV *versus* accès large bande, ou encore interconnexion de réseaux).

Cela conduit l'industrie à développer un nouveau type de satellites dit *software defined*, capable de modifier en orbite sa couverture géographique et les types de services proposables.

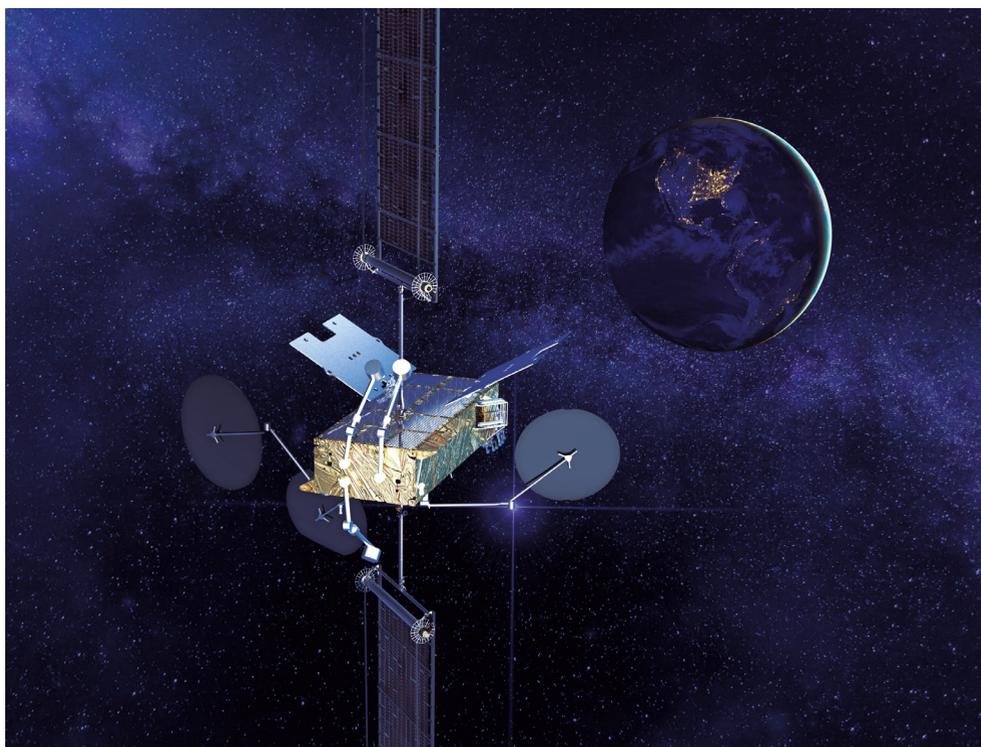


Figure 1 : Vue du satellite Space Inspire (Source : Thales Alenia Space).

Ces satellites s'appuient sur des antennes actives et des processeurs numériques totalement reconfigurables.

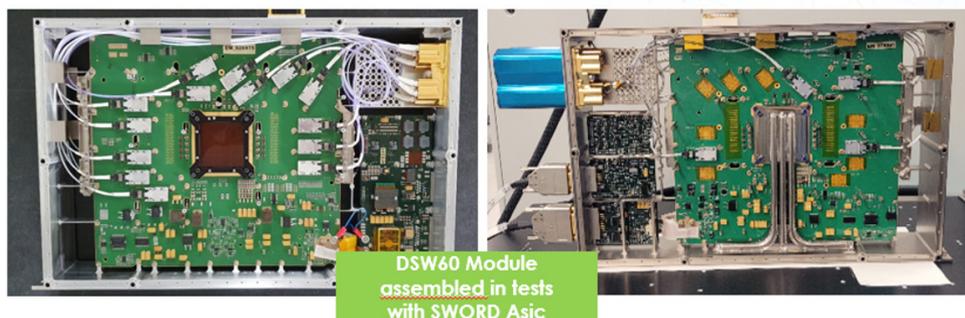


Figure 2 : Processeur DBFN (Source : Thales Alenia Space).

Ces satellites quasiment standards et produits en petite série représentent déjà plus de la moitié du marché des satellites géostationnaires alors que les premiers modèles ne seront pas lancés avant 2025.

Cette digitalisation massive touche aussi naturellement le segment sol des satellites qui tendent à se virtualiser et à se rapprocher du *cloud*.

## CHANGEMENT D'ÉCOSYSTÈME : L'ALLER-RETOUR DES OPÉRATEURS TÉLÉCOM

En 1964 pour Intelsat, en 1976 pour Inmarsat et en 1977 pour Eutelsat, les opérateurs de satellites de télécommunications ont été créés sous le statut d'organisation internationale regroupant plusieurs pays. Les infrastructures spatiales étaient jugées stratégiques par les pays développés et leurs grands opérateurs de télécommunications, les acteurs comme Orange (anciennement France Télécom) siégeaient au conseil de ces opérateurs historiques.

Au début des années 2000, la privatisation du secteur des télécom a transformé ces organisations intergouvernementales en sociétés privées. Les satellites de télécommunications ne constituaient (et ne constituent toujours) qu'une niche dans le monde des télécommunications, assurant un pourcentage faible des communications mondiales (< 5 %). La focalisation des opérateurs sur leur cœur de métier (les réseaux terrestres) les a conduits à désinvestir le secteur spatial dans les années 2000 à 2020.

Depuis 2020, on assiste à un regain d'intérêt des opérateurs terrestres vers le spatial. Ainsi, Patrick Drahi, propriétaire de SFR s'est intéressé au rachat d'Eutelsat en 2021. Christel Heydemann (directrice générale d'Orange) a communiqué récemment sur l'intégration des satellites à son offre de services de connectivité.

En effet, les opérateurs terrestres sont soumis à des exigences contraignantes de taux de couverture des territoires, or si le déploiement de réseaux terrestres y compris en FTTH (fibre optique jusqu'à l'abonné) a du sens dans les zones denses, l'équation économique est beaucoup moins favorable dans les zones à faible densité de population. C'est là que le satellite, en mutualisant sa ressource sur tout un pays voire un continent peut contribuer au désenclavement numérique, sans générer des coûts importants (économiques et écologiques) de déploiement d'infrastructures terrestres.

Enfin, l'arrivée de méga constellations comme Starlink ou Kuiper est susceptible, non pas de remplacer les réseaux terrestres, mais de modifier le rapport de force entre fournisseurs de services (comme Amazon Prime) et les opérateurs de télécom.

## CHANGEMENT DE STANDARDS : LA MIGRATION VERS LA 5G EST AMORCÉE

Les satellites s'étant positionnés historiquement sur une niche isolée des réseaux terrestres, l'écosystème spatial a développé des standards de transmission spécifiques, idéalement adaptés aux transmissions sur le canal satellitaire, comme le DVB S2 – qui diffuse des milliers de chaînes de télévision à travers le monde. Depuis quelques années, le regain d'intérêt des acteurs terrestres pour le satellite conduit à harmoniser les standards de transmission radiofréquences entre le monde spatial et le monde terrestre (protocoles 3GPP 3G, 4G puis 5G, utilisés par nos réseaux cellulaires de téléphonie mobiles et nos smartphones). Thales Alenia Space a coordonné depuis 2016 un effort visant à introduire dans le standard 5G la capacité à opérer efficacement sur les satellites tant géostationnaires que défilants. Ceux-ci génèrent respectivement une latence et un doppler importants qui doivent pouvoir être compensés. Depuis mars 2022, la version 17 du standard 5G permet aux satellites de transmettre exactement les mêmes signaux que les réseaux mobiles terrestres en 5G, tout en étant bien plus loin de la terre.

Cette unicité de standard entre les réseaux 5G et les réseaux satellitaires futurs permettra la croissance du marché en assurant une continuité parfaite des protocoles et de la qualité de service à travers le satellite. Les opérateurs terrestres se retrouveront à nouveau « chez eux » sur le segment satellitaire...

Le projet de constellation européenne IRIS2, comme le projet One WEB gen 2 ont ainsi spécifié un système totalement compatible avec la 5G.

## VERS UN CHANGEMENT DE PARADIGME ÉCOLOGIQUE ?

Aujourd'hui nul ne peut ignorer le risque écologique engendré par les activités industrielles et humaines. Alors que la consommation des réseaux de communication poursuit sa croissance annuelle régulière à deux chiffres, il semble essentiel de s'interroger sur l'impact environnemental des satellites de communication.

Bien que l'exercice soit encore assez peu référencé donc empreint d'une incertitude, les premières analyses montrent que sur l'ensemble de sa durée de vie, l'évaluation de l'empreinte écologique est favorable aux réseaux satellitaires géostationnaires par rapport aux réseaux terrestres. En particulier en raison de leur capacité de diffusion et de leur empreinte énergétique très faible durant leur phase opérationnelle (alimentation purement solaire et hors atmosphère). Néanmoins, le principal contributeur en termes d'impact écologique des réseaux satellitaires demeure, comme souvent, le terminal utilisateur. Ce sera d'autant plus impactant que ces terminaux concerneront un marché d'utilisateurs finaux composé de plusieurs millions d'abonnés. Ce point doit être travaillé, l'orientation vers la 5G peut d'ailleurs y contribuer, ce standard ayant pris en compte des contraintes fortes de faible consommation (visant l'autonomie des téléphones portables) ; mais dès aujourd'hui, il semble que l'hybridation intelligente des réseaux satellitaires et terrestres offrent un excellent résultat tant économique qu'écologique.

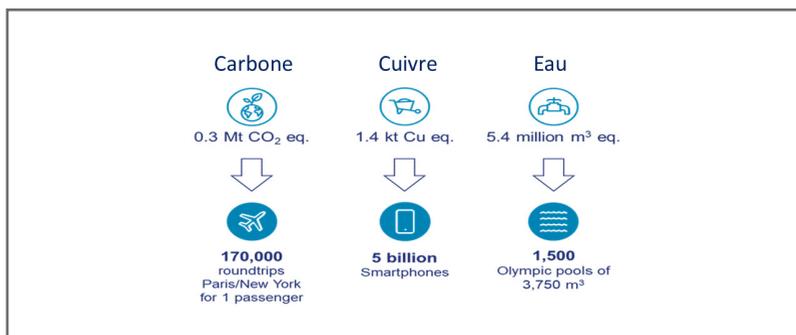


Figure 3 : Du gain écologique typique d'une infrastructure hybride dans un pays africain représentatif (Source : Thales Alenia Space).

Nos générations sont de plus en plus concernées par leur impact sur la planète, l'utilisation d'architectures de diffusion, combinées à du *caching* (mise en mémoire de contenus) afin de conserver un usage « à la demande » peuvent ainsi redonner au satellite de diffusion géostationnaire ses lettres de noblesse... actuellement affectées par les plateformes de *streaming* très populaires mais très gourmandes en énergie.

# L'utilisation des systèmes Satcom pour les usages civils et gouvernementaux

Par Hervé POSTEC

Directeur de la Line of Business Satcom en charge des activités de télécommunications de Telespazio France

Les systèmes de communications par satellite sont essentiels tant pour les usages civils que gouvernementaux. Ils reposent sur des satellites en orbite géostationnaire, moyenne et basse, offrant une connectivité mondiale. Les applications civiles incluent les télécommunications mondiales, la télévision par satellite, et la réduction de la fracture numérique. Les gouvernements utilisent les Satcom pour des besoins stratégiques, profitant de leur portée mondiale.

La résilience des Satcom est cruciale en cas de crises majeures. Les satellites offrent une connectivité robuste, même en cas de destruction des infrastructures terrestres.

L'évolution technologique, notamment les constellations en orbite basse et les satellites flexibles, façonne l'avenir des Satcom. En conclusion, ces systèmes jouent un rôle clé dans notre paysage technologique, nécessitant une vigilance constante face aux évolutions.

Les Systèmes de communications par satellite (Satcom) sont aujourd'hui une pierre angulaire des technologies de communication modernes. Leur rôle est double, touchant à la fois les domaines civils et gouvernementaux et leur utilisation varie de manière significative en fonction des besoins spécifiques de chaque secteur.

Les bases des systèmes Satcom reposent sur la mise en orbite de satellites dédiés qui transmettent et reçoivent des signaux de communication ainsi que sur un segment sol pour recevoir ces signaux et opérer les satellites et des terminaux utilisateurs. Cette infrastructure complexe utilise des fréquences spécifiques pour assurer des communications fiables sur de longues distances et en tout point du globe voire bientôt, autour de la Lune.

Les systèmes Satcom utilisent des satellites de télécommunications publics et privés positionnés sur différentes orbites. L'orbite terrestre géostationnaire (GEO), à 36 000 km d'altitude, est celle historiquement utilisée dans ces systèmes notamment pour la diffusion des chaînes de télévision. L'orbite terrestre moyenne (MEO), entre 2 000 et 35 786 km d'altitude, est également utilisée par certaines constellations de satellites. Enfin, l'orbite terrestre basse (LEO), allant jusqu'à 2 000 km d'altitude, utilisée historiquement pour des applications de téléphonie (systèmes IRIDIUM et GLOBALSTAR) connaît aujourd'hui un fort développement avec le développement de « méga-constellations » (Starlink et OneWeb aujourd'hui ; Kuiper, IRIS2... demain).

Dans le contexte civil, les applications des systèmes Satcom sont omniprésentes. Les télécommunications mondiales reposent largement sur cette technologie, permettant des connexions rapides et stables sur l'ensemble du globe. Les services de télévision par satel-

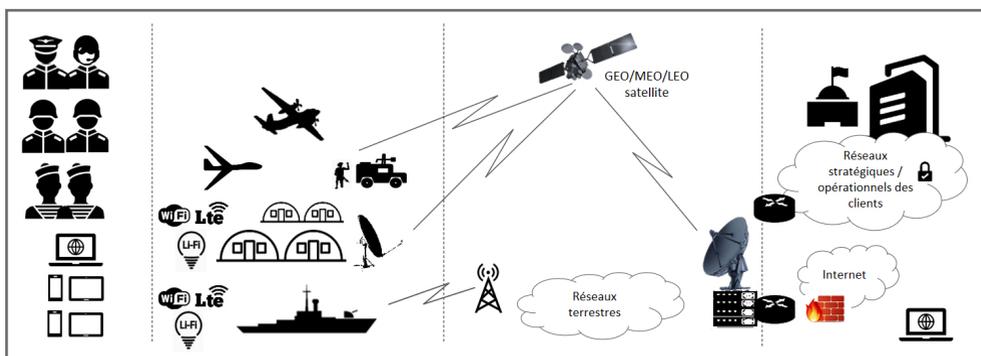


Figure1 : Satcom (©Telespazio).

lite, les communications aéronautiques et maritimes ainsi que les réseaux de données fixes et mobiles sont autant d'exemples illustrant l'impact quotidien de ces systèmes sur nos vies. De par leur couverture mondiale, les systèmes Satcom jouent également un rôle essentiel dans la réduction de la fracture numérique en apportant de la connectivité dans les zones blanches non couvertes par des réseaux terrestres que ce soit dans les pays développés ou en développement.

Pour les utilisations civiles et gouvernementales, la résilience des télécommunications par satellite constitue un pilier essentiel dans la garantie de la continuité des communications, surtout en période de crises majeures. Un exemple illustratif de cette résilience est l'incident survenu à Toulouse en septembre 2001, lorsqu'une explosion massive dans l'usine AZF a engendré des dégâts considérables touchant sévèrement les infrastructures terrestres de communication.

Dans un tel scénario de crise, les réseaux terrestres peuvent être gravement endommagés, entraînant une perturbation étendue des services de communication. C'est dans ces moments cruciaux que les systèmes de communication par satellite démontrent leur valeur en tant que solution de secours fiable et résiliente.

Les satellites de communication permettent une connectivité robuste dans ces zones touchées par des catastrophes naturelles ou des incidents majeurs. En cas de destruction des infrastructures terrestres, les réseaux satellitaires restent opérationnels, assurant ainsi la continuité des communications essentielles pour les services d'urgence, les autorités publiques et la population en général.

La flexibilité des communications par satellite offre également la possibilité d'établir des liaisons temporaires dans des zones spécifiques, renforçant ainsi la capacité des équipes d'intervention sur le terrain.

Cependant, l'exploitation des systèmes Satcom s'étend bien au-delà du domaine civil. Les gouvernements du monde entier tirent parti de cette technologie pour répondre à des besoins stratégiques, militaires et sécuritaires. Les communications gouvernementales, souvent sensibles, bénéficient de la portée mondiale des systèmes Satcom, offrant une connectivité fiable même dans des environnements difficiles.

Les télécommunications satellitaires ont révolutionné les opérations militaires en fournissant une connectivité stratégique et vitale dans des environnements souvent difficiles et éloignés. Ces systèmes jouent un rôle essentiel dans la modernisation des forces armées, offrant une communication fiable, sécurisée et mondiale.

Les télécommunications satellitaires militaires reposent sur des satellites spécialement conçus pour répondre aux besoins des forces armées. Ces satellites offrent une couverture globale, permettant des communications efficaces sur des théâtres d'opérations étendus et utilisent des fréquences souvent dédiées et sécurisées, minimisant les risques d'interception.

En plus des applications d'imagerie satellitaire, de navigation et de géolocalisation, les systèmes satellitaires de télécommunications facilitent les communications voix et données entre les troupes sur le terrain, les véhicules, les navires et les avions. Cette connectivité instantanée est cruciale pour la coordination des opérations et la prise de décisions rapides.

Les enjeux de sécurité liés à l'utilisation des systèmes Satcom dans des contextes gouvernementaux sont notables. La protection des communications contre les cybermenaces et les tentatives d'interception est une priorité cruciale. Les efforts visant à renforcer la sécurité des réseaux Satcom gouvernementaux sont constants, compte tenu de l'importance stratégique de ces communications.

L'évolution constante et rapide de la technologie contribue également à façonner l'avenir des systèmes Satcom. Les constellations de satellites en orbite basse, avec leur capacité à offrir une couverture globale, de hauts débits et une faible latence représentent une avancée majeure. Les nouveaux satellites dits flexibles et reconfigurables une fois



Figure 2 : Instar-OneWeb (© Instar/OneWeb).



Figure 3 : Starlink (© Starlink).

en orbite sont également en plein essor. De plus, les progrès dans les stations utilisateurs avec l'émergence d'antennes plates actives compactes, efficaces et économiques améliorent grandement la flexibilité de ces systèmes. Pour démocratiser encore plus l'utilisation des solutions Satcom, il sera essentiel de développer une offre plus large, à faible coût et si possible européenne de terminaux utilisateurs compatibles de plusieurs capacités (fréquences, orbites...). Enfin, la multiplication de ces satellites en orbite, en particulier des méga-constellations en orbite basse, engendre de nouveaux enjeux liés à la surveillance et la gestion du trafic spatial afin de garantir une utilisation sûre et durable de l'espace.

En conclusion, les systèmes Satcom sont un élément clé et ont une importance stratégique dans notre paysage technologique contemporain. Que ce soit pour faciliter les communications civiles mondiales ou pour répondre aux exigences sécuritaires des gouvernements, ces systèmes jouent un rôle crucial. À mesure que la technologie évolue, il est impératif de rester attentif à ces changements pour comprendre pleinement l'impact continu des systèmes Satcom sur notre monde interconnecté.

# Convergence of the Telecommunication systems with 5G and 6G

By Flavien RONTEIX, Mohamed EL JAAFARI,  
Dorin PANAITOPOL and Nicolas CHUBERRE  
Thales Alenia Space

One observe a profound evolution in the communication networks towards the convergence of access technologies. The integration of satellite access with terrestrial mobile networks is enabled by the 3GPP Non-Terrestrial Network (NTN). The satellite network component can contribute to the global service continuity and resiliency of mobile systems. Leveraging the terrestrial 5G access technology, a number of solutions mitigating the issues inherent from satellite communications specifics (e.g. Doppler, delay...) have been standardized in Rel-17 of 3GPP under the so called NTN (Non-Terrestrial Network) standard. In the 5G-Advanced (starting from Rel-18), further NTN added value will be unleashed by the usage of regenerative payload architecture and performance optimization enablers. In the ITU IMT-2030's vision, the 6G will bring new network capabilities to support the interactions between the human and its physical environment leveraging real time digital modelling. In particular 6G will see the unification of the TN and NTN into a multi-dimensional architecture enabled by a set of innovative technologies and concept at both radio and network levels.

## INTRODUCTION

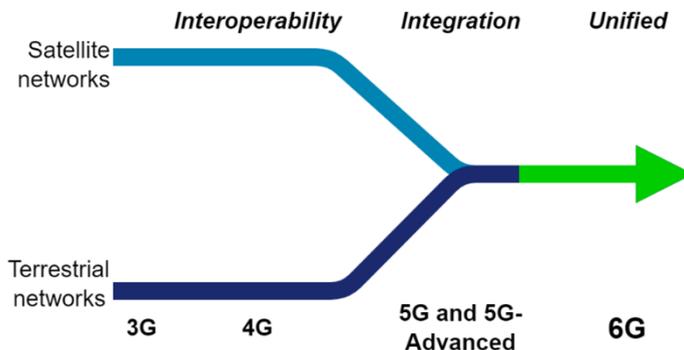


Figure 1: TN and NTN convergence towards a unified access network.

For decades, the mobile communications technologies for terrestrial and non-terrestrial (Satcom) evolved apart from each other. Satellite backhauling was used in first 2G

networks e.g. to connect the BTS and BSC via A-bis interface over satellite and network interoperability in 4G. There are mainly two categories of use cases for NTN: 1) Service Ubiquity: This is related to global connectivity and reducing digital divide by providing direct access connectivity for Handset and IoT devices in remote unserved or under-served geographical areas. With such use cases, NTN in 5G offers a complementing role to Terrestrial Network (TN) access. 2) Global service continuity and resiliency: Use cases where 5G services cannot be offered by terrestrial networks alone.

A combination of TN & NTN provides service continuity for such use scenario, higher reliability/availability: as example of such use case you can think about moving platform mounted devices, and aircraft mounted devices.

The 5G technology going forward with a seamless integration of Terrestrial Network (TN) and Non-Terrestrial Network (NTN) segment, including satellites and High Altitude Platform Station (HAPS). In order to support such hybrid terrestrial-satellite systems enabling New Radio (NR) and Internet of Things (IoT) through satellites, the 3GPP starts in Rel-15<sup>1</sup> (2018) and Rel-16<sup>2</sup> (2020) studying issues posed by NTN for an integration to the existing terrestrial-based 3GPP mobile technology. The necessary features for the support of this NTN component have been specified as part of the 3GPP Rel-17<sup>3</sup>. The Rel-17 normative works on NTN in 3GPP Technical Specification Group (TSG) on Radio Access Networks (RAN) and Service & Systems Aspects (SA) have been completed in June 2022 while the ASN.1 freeze was completed in September 2022. The resulting 5G NR NTN solution eventually re-use as much as possible protocols, procedures and architecture already defined for terrestrial 5G NR to minimize the impacts at User Equipment (UE), Radio Access Network (RAN), 5G Core (5GC) level. Thus, NTN has been integrated as a part of the 5G NR technology by adapting some part of the RAN protocols and architecture specific to the satellite access. In Rel-17, the NR based satellite access aims at serving handheld devices through a transparent satellite that relay the 5G signals between the UE and an on-ground base station (gNB).

5G-Advanced marks another major evolution in 5G technology. Started at Rel-18, currently at the end of the normative phase, this new evolution set to evolve 5G to its full potential by strengthening the network performance and by providing connectivity to all devices. The NR NTN enhancements is defined on this way to support new scenarios covering deployments in frequency bands above 10GHz and several enhancements for the mobility and the coverage. The upcoming Rel-19 should bring a new step for a better integration of the 5G with the regenerative payload architecture where the gNB is on-boarded inside the satellite, enabling a more efficient and more flexible non-terrestrial network. The regenerative payload architecture also provide a better complementarity between TN and NTN by enabling a better service continuity and new space-based services. Such enhancements will prepare the way towards the next generation of mobile communications, 6G. 3GPP NR NTN system so far is described in the section entitled “NTN Integration in 5G Ecosystem”.

In 2021, ITU-R WP 5D initiated the development of the vision for IMT-2030 and beyond. In this vision, nine 5G capabilities are enhanced, i.e. peak data rate, user experienced data rate, spectrum efficiency, area traffic capacity, connection density, mobility speed, minimal latency, data reliability and security (including privacy and resilience). Six new capabilities appear with 1/ coverage, 2/ network sensing, 3/ Artificial Intelligence (AI) and

---

<sup>1</sup> TR 21.915, “Summary of Rel-15 Work items”.

<sup>2</sup> TR 21.916, “Summary of Rel-16 Work items”.

<sup>3</sup> TR 21.917, “Summary of Rel-17 Work items”.

Machine Learning (ML), 4/ sustainability, 5/ fine-grain positioning and 6/ interoperability. The ITU-T Focus Group technologies for network 2030 (FG-NET-2030) defined in 2020 a set of preliminary target services for 6G. In this vision, 6G systems are expected to create a fully connected world, with the convergence of the physical, human, and digital domains. 5G-PPP defined three new classes of interactions that will be possible with 6G, 1) Digital twinning of systems e.g. digital twin of a factory; 2) Connected intelligence where the network serves as a key infrastructure with trusted AI functions; 3) Immersive communications where high-resolution visual/spatial, tactile/haptic and other sensor data can be carried at an extremely high throughput and low latency. It is agreed that the full integration between terrestrial and non-terrestrial network will be essential in 6G. Among enhanced and new capabilities from the IMT-2030 vision, NTN are necessary at least for coverage, interoperability, sustainability and security capabilities. In this vision, NTN is not only a complement of the terrestrial network but also a solution, pushing towards a unified communication system as illustrated in the Figure 1.

The 3GPP effort of standardization for 6G should begin at the Rel-19 with 6G requirements and continues in Rel-20 for studies and Rel-21, by 2027, for the 6G specification. In the 6G systems, TN and NTN will be unified and fully integrated into a multi-dimensional, multi-layered, multi-band infrastructure to provide a comprehensive connectivity solution aligned with the IMT-2030 vision. The architecture is presented in the section entitled “6G as a Multi-Dimensional System for a Comprehensive Connectivity Solution”.

Finally in the section entitled “Technologies enabling 6G NTN”, we review a number of promising technologies for 6G including waveforms, AI/ML models and satellites architecture.

## NTN INTEGRATION IN 5G ECOSYSTEM

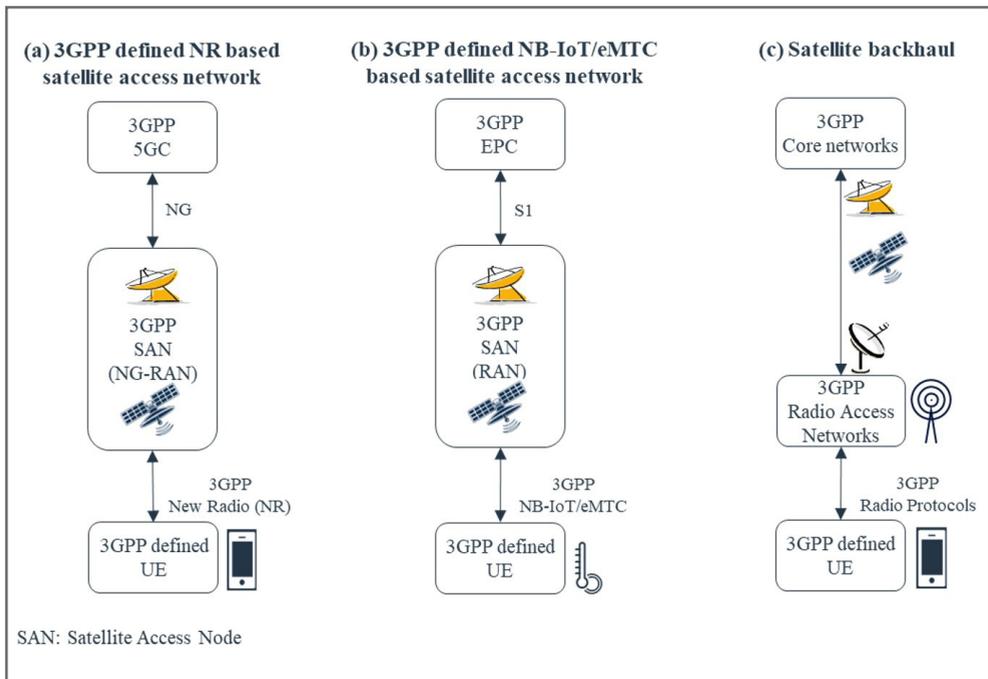


Figure 2: 3GPP Satellite network solutions.

The following satellite network solutions have been integrated within 5G System (5GS) starting from 3GPP Rel-17 as illustrated on the Figure 2 above, with the following components:

- (a) 3GPP defined NR based satellite access network: NG-RAN based on satellite access nodes, connected to a 5GC, providing eMBB-s (enhanced Mobile Broadband for satellite) and HRC-s (High Reliability Communications for satellite) services to 3GPP defined UE. It supports the 3GPP defined NR access technology and may also provide connectivity to IAB nodes. It belongs to the 3GPP defined “NR NTN solutions”.
- (b) 3GPP defined LTE based satellite access network: E-UTRA Radio Access network based on satellite access nodes, connected to an EPC, and provides mMTC-s services to 3GPP defined user equipment. It supports the 3GPP defined NB-IoT or eMTC access technology. It belongs to the 3GPP defined “IoT NTN solutions”.
- (c) Satellite backhaul: A transport network over satellite that provides connectivity between 5GC and gNB. This transport network may be based on 3GPP or non 3GPP defined radio protocols.

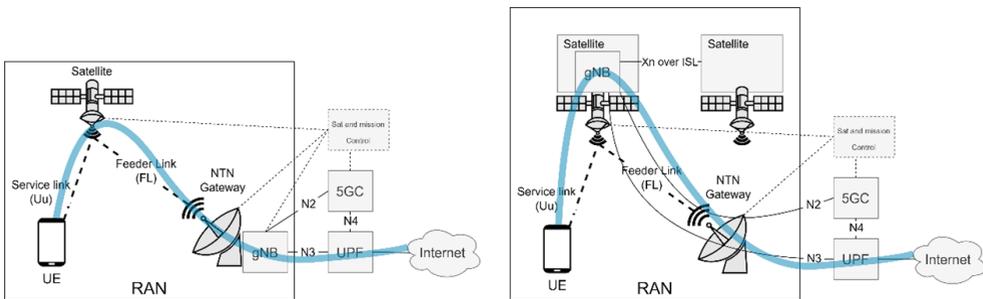


Figure 3: 5G NTN RAN architectures.

In this paper, we focus on 3GPP work related to satellite-based NR NTN since Rel-15. We will not detail airborne-based architecture (e.g. HAPS, HIBS, UAV) and we will not consider specificities related to the Internet-of-Things (IoT) NTN.

The Recommendation ITU-R M.2083 on the IMT-2020 vision, identifies three usage scenarios for IMT-2020 and beyond: Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Massive machine type communications (mMTC) and Ultra-reliable and low latency communications (uRLLC). Satellite networks are considered to provide variants of eMBB, mMTC and uRLLC: eMBB-s, mMTC-s and HRC-s usages scenarios. NTN in 5G offers a complementing role to TN access. Combine the NTN & TN for service continuity and reinforced reliability and availability. Due to their wide coverage, resiliency, multicast and broadcast capabilities, satellite systems provide scalable and efficient network solutions. Therefore, both geostationary and non-geostationary mobile satellite systems have a role to play in this context.

A list of technical performance requirements for the satellite component of IMT-2020 have been elaborated and defined for the satellite radio interface, including for instance a user experienced data rate of 1Mbit/s in the DownLink (DL) and 100kbit/s in the UpLink (UL). An important part of the 3GPP work was thus related to the self-evaluation of ITU-R defined requirements for 5G satellite (NTN) radio interface while re-using the existing terrestrial 5GS. The main challenges were related to: 1) a technical challenge related to the specific characteristics of a wide range of satellite network deployment scenarios compared to existing terrestrial mobile network; 2) an architectural challenge

related to the specific network architecture and movement of the satellite constellation; 3) a spectrum challenge for NTN satellite frequency bands related to co-existence studies, RF and RRM requirements.

## The technical challenge

The integration of 5G satellite-based components in the 5GS is a technical challenge, particularly due to specific characteristics of the satellite radio interface and the wide range of satellite network deployment scenarios compared to the Earth cellular networks. Especially, the long propagation delays, large Doppler effects and moving cells characteristics did not exist in terrestrial, or at a small scale.

The propagation delays is inherent to the altitude and the position of the satellite regarding to the UE and the gateway. The round-time latency of an order of one millisecond in terrestrial is above 10ms for a LEO satellite and 500ms for a GEO. Timers related to the different procedures has been adapted for the NTN in Rel-17. The latency poses also a question for the synchronization of the command and offset has been introduced. Inside a cell of an hundred kilometers wide, the differential delay between a UE at the nadir and at the edge is quiet important and need a synchronization at the base station. Synchronization also between the uplink and downlink frames that need to arrive at the correct sub-frame at the gNB.

The satellite motions (i.e. in LEO) have an impact of the delay variation up to  $\pm 4 \mu\text{s}/\text{sec}$ . The motion causes a Doppler shift as well as a Doppler variation proportional to the cell size and the speed of the satellite as seen by the UE. The time and frequency synchronization of the UE is very dependent to the Doppler and Timing estimation of the service and the feeder links. To perform this estimation and derive the satellite movement, the UE relies on the broadcasted ephemeris data by the network via the SIB19 NTN-specific system information (or equivalent SIB31/SIB32 NTN-specific system information for IoT-type of devices).

The consequence of the satellite movement that required an important work at the 3GPP was for instance the dynamic cell pattern on the ground. Steerable beams are generated by the satellite to provide quasi-Earth fixed beam foot print on the ground or satellite-fixed beams are generated by the satellite and hence the beam footprint on the ground with the satellite motion. In one case or the other, it implies a great mobility due to satellite in addition to the UE mobility that exists in the terrestrial. The 3GPP introduced in Rel-17 and more in Rel-18 mechanisms to make the transition from one beam to another (inter-beam mobility), to one cell to another (inter-cell mobility), to one satellite to another (inter-satellite mobility) or to one gNB to another (inter-gNB mobility) as continuous as possible to avoid disruption and quality of service degradation. The inter-gNB handover (HO) procedure is re-used as a baseline but NTN introduced also time-based and location-based Conditional Handover (CHO) where the network indicates to the UE to move to a candidate cell (of another satellite or another gNB) when a time or location based event is fulfilled. Time-based or location-based CHO is particularly adapted to the satellite system where the trajectories and transition time are highly predictable. The frequent change of the satellite and the serving cell justified also to reduce the signaling and the interruption time for the UE. For that, the satellite switch with re-ync<sup>4</sup> offers a procedure that avoid L3 mobility (i.e. handover). Finally, in the legacy handover procedure, the UE re-synchronize with the new gNB with a Random Access (RACH) procedure that introduces an interruption time and a congestion at the gNB when lot of UE move from one cell to another at the same time. RACH-less procedure solves this issue by allowing the UE to synchronize to the target cell without performing a RACH. It is possible thanks

---

<sup>4</sup> Called unchanged PCI during the Rel-18 normative phase.

to the satellite ephemerides and NTN information provided by the SIB19, allowing UE to detect the target satellite and synchronize in time and frequency to it. However, the mobility management implementation remains a challenge in the current 5G NTN and some path remains open in Rel-19 and Rel-20 to ensure a service continuity to the UE.

### The satellite RAN architecture challenge

Rel-17 and Rel-18 satellite RAN uses a satellite transparent payload architecture where the payload relays the 5G signals between UE and gNB and maps beams. The regenerative payload architecture will be introduced in Rel-19 and Rel-20 where the gNB is fully or partially on-boarded on the satellite, enabling space-based connectivity potentials. Coupled with the inter-satellite links (ISL) and mega-constellations technologies, 5G NTN will unleash throughputs and flexibility. A necessary step towards the 6G unified global connectivity service.

From Rel-17, the satellite based RAN is by default connected to a 5GC. A satellite RAN can be shared between more than one core networks. Therefore, the same UE can be connected to a satellite or a terrestrial access network transparently thanks to the 5G NTN architecture solutions based on common access technologies and interoperable networks.

### The NTN frequency bands and related requirements challenge

For the first time, 3GPP considered in Rel-17 the introduction of Mobile Satellite Service (MSS) frequency bands for 3GPP User Equipment (UE) direct connectivity with satellites and had to consider the coexistence in adjacent bands with Terrestrial Networks (TNs). 5G NR NTN (Non-TN) used for satellite communications is therefore representing a major breakthrough in the history of telecommunication for the capability of reuniting two different types of services, i.e. terrestrial and non-terrestrial, by reusing the same waveform and potentially the same type of terminal, opening new market opportunities for both terrestrial and non-terrestrial stakeholders.

A challenge related to the NTN spectrum lies on the waveform to be used for satellite access and the related NTN-TN co-existence studies in adjacent bands, starting with the introduction of n256 and n255 S- and L-bands operating in FDD duplexing mode. Rel-18 introduced the satellite Ka-band (above 10GHz frequency spectrum) with n512, n511 and n510, and Rel-19 will follow with discussion for introduction of Ku satellite band for 5G NR NTN.

The frequency bands currently defined as part of Rel-17 and Rel-18 3GPP work (where FR1-NTN refers to 410 MHz – 7,125 MHz frequency range, and FR2-NTN currently refers to 17,300 MHz – 30,000 MHz frequency range) are described in the tables below:

Table 1: NTN operating bands in FR1 for satellite networks (FR1-NTN).

NTN satellite operating band	UpLink (UL) operating band SAN receive / UE transmit FUL,low – FUL,high	DownLink (DL) operating band SAN transmit / UE receive FDL,low – FDL,high	Duplex mode
n256	1,980 MHz – 2,010 MHz	2,170 MHz – 2,200 MHz	FDD
n255	1,626.5 MHz – 1,660.5 MHz	1,525 MHz – 1,559 MHz	FDD

NOTE: NTN satellite bands are numbered in descending order from n256.

Table 2: NTN operating bands in above 10 GHz for satellite networks (FR2-NTN)

NTN satellite operating band	UpLink (UL) operating band SAN receive / UE transmit FUL,low – FUL,high	DownLink (DL) operating band SAN transmit / UE receive FDL,low – FDL,high	Duplex mode
n5121	27.5 – 30.0 GHz	17.3 – 20.2 GHz	FDD
n5112	28.35 – 30.0 GHz	17.3 – 20.2 GHz	FDD
n5103	27.5 – 28.35 GHz	17.3 – 20.2 GHz	FDD

NOTE 1: This band is applicable in the countries subject to CEPT ECC Decision(05)01 and ECC Decision (13)01.  
NOTE 2: This band is applicable in the USA subject to FCC 47 CFR part 25.  
NOTE 3: This band is applicable for Earth Station operations in the USA subject to FCC 47 CFR part 25. FCC rules currently do not include ESIM operations in this band (47 CFR 25.202).

Table 3: Other NTN band introductions (through Release-independent Work Items).

NTN satellite operating band	UpLink (UL) operating band SAN receive / UE transmit FUL,low – FUL,high	DownLink (DL) operating band SAN transmit / UE receive FDL,low – FDL,high	Duplex mode
n254	1,610 – 1,626.5 MHz	2,483.5 – 2,500 MHz	FDD

NOTE: NTN satellite bands are numbered in descending order from n256.

Moreover, study and normalization phase simulation work showed that satellite connectivity does not require a dedicated satellite waveform since 5G New Radio technology based on CP-OFDM (for Downlink) and DFT-s-OFDM (for uplink) can be sufficient for satellite communications. The TN-NTN co-existence issue was also extensively studied in Rel-17 and Rel-18 and concluded that TN can co-exist with NTN on adjacent channels with relaxed Adjacent Channel Interference Ratio (ACIR).

As a matter of fact, one of the major conclusion of the 5G NTN 3GPP work in Rel-17 for FR1-NTN was that NTN UE could reuse the current Radio Resource Management (RRM) and Radio Frequency (RF) requirements of the TN UE. For this reason, at least in FR1-NTN, the same terminal (and not only dedicated satellite terminal) can connect to both TN and NTN.

## 6G AS A MULTI-DIMENSIONAL SYSTEM FOR A COMPREHENSIVE CONNECTIVITY SOLUTION

In an order to meet the IMT-2030 vision and performance requirements and to foster the connection among the physical, digital and human domains, a new comprehensive system should be defined for 6G such as the multi-dimensional, multi-band, multi-layer architecture presented in Figure 4.

In addition to the terrestrial networks that provide a horizontal connectivity, the system is augmented by a vertical connectivity constituting a third dimension. 5G already support the non-terrestrial segment but the novelty of the 6G system is the native integration of this segment in the same unified 6G network for increased resiliency. For that, the space

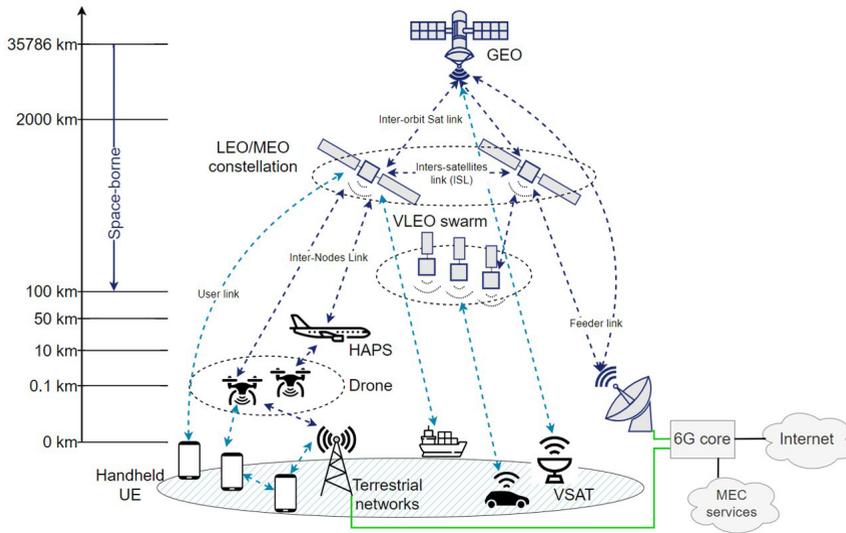


Figure 4: Multi-dimensional architecture.

segment will not be only a relay of the terrestrial signal but an active component of the network. The space segment not only composed of LEO/GEO satellites is constituted of nodes. They constitute a multi-layer architecture where nodes can communicate with each other by means of Inter-Node Links (INL), e.g. Inter-Satellite Links (ISL) intra/inter-orbits and with the ground through service and feeder links. Such links use different technologies, radio at different frequencies, laser, optical constituting a multi-band infrastructure. Each nodes provides a service adapted to its capacities and orbits. For instance, 1) GEO satellites provide continental fixed coverage ground interesting for multicast/broadcast services, has a large view field on lower layers, large computational capacities and important transmission power; while 2) LEO satellites constellation offer lower latency along with better coverage but with a reduced payload capacities. GEO, LEO, UAV, HAPS are therefore complementary to provide connectivity to heterogeneous services and constitutes the different layers of the system.

Finally, the proposed architecture and the 6G technology perspectives implies an important thought on the evolution of the packet mobile core, the RAN-core convergence, the support of non-3GPP access, and the decentralization of the network functions. Based on the proposed architecture and the above observations, below we thoroughly review the most relevant technologies for 6G communications.

## TECHNOLOGIES ENABLING 6G NTN

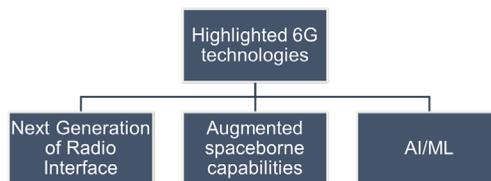


Figure 5: Highlighted 6G technologies.

In this part, we highlight some probable 6G building block technologies for the multi-dimensional architecture. Summarized in Figure 5, it implies new generation of radio interface technologies, augmented spaceborne capabilities and Artificial Intelligence for network. It shall to be noticed that some of these technologies are already discussed for 5G advanced, therefore, there is not an abrupt separation between 5G Advanced and 6G.

For the next generation of Radio interface, alternatives waveforms are discussed to improve PAPR, spectral efficiency, RRM, out-of-band emission and co-existence. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) and different variants of OFDM are considered. Co-ordinated Multipoint (CoMP) transmissions enable seamless, efficient transmission. NTN asynchronous Multi-connectivity (MC) and Carrier-Aggregation (CA) improves the throughput and the spatial diversity for hardened radio interface. Bandwidth part (BWP) for NTN is promising for a flexible bandwidth optimization and management. In-Band Full Duplex (IBFD) is an interesting evolution of the FDD-only duplexing scheme for NTN. Together, these enhancements will allow a new set of NTN-compatible devices such as Reduced Capabilities devices (RedCap UEs). Reflecting Intelligent Surfaces (RIS) will be able to provide indoor connectivity to NTN, which is not possible today. Sensing-based cognitive radio will allow a dynamic reconfiguration of the radio interface to the user service and the radio channel environment for a better efficiency of the RRM. Software-defined Network (SDN) are necessary to allow robust, seamless inter-layer mobility and reconfiguration. Finally, trust and the security of the radio interface will benefit from homomorphic encryption and block chain technologies.

The spaceborne-related technology evolved quickly since a decade thanks to new actors taking part to the New Space revolution. These technologies, hardware and software developed are essential enablers for the 6G. Next generation of regenerative payload includes new design of active antenna (e.g. reconfigurable phased antennas, meta-surface antennas...) for advanced beam management, advanced On-board Processing, software-defined payload, on-board network functions. Satellite constellations will be more heterogeneous with multi-orbit architectures, different satellite size (e.g. nano/pico satellites) and more reconfigurable enabled by Inter-Satellite Links (e.g. using optical wireless communication) and network and service orchestration and management (e.g. SDN for space). Relay-based architecture could be considered in the constellation using Integrated Access and Backhaul (IAB) for resilient networks. Thanks to the augmented payload capacities, the constellation will offer a new set of services such as space-based edge computing for low latency services or Positioning Navigation Time (PNT) services in complement to GNSS and therefore allowing GNSS-independent UE connectivity (e.g. for RedCap UE).

Finally, AI and ML techniques are widely recognized as a necessary solution for 6G dynamic and information-rich contexts 6G communications. Among these, RRM algorithms including beamforming and beam hopping are one of the most promising application. AI-based channel estimation and scheduling are very promising since NTN systems are not obvious, since the UE performance can only be known after the beamforming matrix has been computed. The legacy algorithms have difficulties to optimize in real-time the radio interface. Some references propose also to use AI for channel modeling, handover and interference management.

## CONCLUSION

For a long time, the terrestrial and satellite network technologies were considered as addressing disjoint markets. Non-Terrestrial access solutions have been added in the 5G system as a complementary access for service continuity. NTN solutions standardized since Rel-17 solve important key issues to mitigate the satellite network specifics (e.g. Doppler, latency, etc.) in order for 5G system to support satellites. 6G as envisioned by

the ITU-R IMT-2030 will be a further step towards the unification of the communication technologies to provide new sustainable, resilient and trustable network capabilities able to support the interactions between the human and its physical environment leveraging real time digital modelling. The proposed architecture based on multi-dimensional, multi-layer, multi-band is a solution to meet 6G vision of a comprehensive communication system and unleash new network potentials. The possible enabling technologies for such architecture has been discussed. These technologies should be subject of a possible standardization roadmap in the context of 3GPP.

## BIBLIOGRAPHY

- ARANITI G. *et al.* (2021), “Towards 6G Non-Terrestrial Networks”, IEEE Network.
- AZARI M. *et al.* (2022), “Evolution of Non-Terrestrial Network from 5G to 6G: A Survey”, arXiv:2107.06881v2.
- GIORDANI M. & ZORZI M. (2021), “Non-Terrestrial Networks in the 6G Era: Challenges and Opportunities”, IEEE Network, vol. 35, no.2, pp. 244-251.
- GUIDOTTI A. *et al.* (2022), “The path to 5G-Advanced and 6G Non-Terrestrial Network systems”, Arxiv:2209.11535.
- PANAITOPOL D. *et al.* (2022), “3GPP Advancements on 5G NR NTN Satellite Access Node and UE RF and RRM Aspects in Release-17”, *IJSCN Wiley Journal paper (International Journal of Satellite Communications and Networking)*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sat.1459>.
- 3GPP (2020), “Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release-15)”, TR 38.811.
- 3GPP (2021), “Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release-16)”, TR 38.821.
- 3GPP (2023), “NR; Satellite Access Node radio transmission and reception (Release-18)”, TS 38.108.
- 3GPP (2023), “NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 5: Satellite access Radio Frequency (RF) and performance requirements (Release-18)”, TS 38.101-5.

# La normalisation de la réseautique atteint l'espace

Par Marc BLANCHET

Président de Viagénie

Et Vinton G. CERF

Vice-président et évangéliste en chef de l'Internet chez Google

Jusqu'à maintenant, les communications sont directes entre les infrastructures terrestres et les dispositifs dans l'espace. En parallèle à la conquête de l'espace, l'Internet a conquis la Terre et les réseaux mobiles se sont déployés. Chacun de ces domaines possède un organisme de normalisation. Avec les avancements technologiques et la baisse significative des coûts, la conquête de l'espace amène des nouveaux acteurs offrant différents services dans l'espace, dont le premier jalon est la Lune. Ainsi, un réseau est planifié par les agences spatiales pour assurer une utilisation optimale des communications. La normalisation de ces technologies réseaux est la clé de voûte pour assurer une interopérabilité entre tous les services offerts. Cet article traite des normes et fait un survol des technologies de réseau prévues autant pour les communications vers et autour de la Lune mais aussi pour Mars et plus loin.

Jusqu'à récemment, l'espace était uniquement conquis par des agences gouvernementales telles que le Cnes ou la Nasa, notamment à cause des coûts très importants des missions spatiales. Les communications sont directes entre les infrastructures terrestres et les dispositifs dans l'espace. Dans le jargon de la réseautique, ce sont des communications point à point. La seule exception est l'utilisation de relais souvent en orbite autour d'une planète comme Mars permettant de transmettre les communications à des dispositifs moins puissants sur la surface de la planète, tels que les robots d'exploration sur Mars. Ces relais sont relativement sans intelligence dans le sens qu'ils ne créent pas de véritable réseau, parce que, par exemple, il n'y a pas de considération de chemins alternatifs et aucune décision de routage n'est prise en compte.

Les acteurs étant limités en nombre, ils se sont coordonnés techniquement sur des normes de communications *via* un organisme appelé Consultative Committee for Space Data Systems [CCSDS] dont les membres principaux sont la plupart des agences spatiales.

En parallèle à la conquête de l'espace, l'Internet a conquis la Terre. Internet a initialement été financé par les gouvernements et a ensuite été commercialisé. Dès ses débuts, la coordination technique sur des normes était un élément clé de son futur succès et fut rapidement chapeauté par l'Internet Engineering Task Force [IETF] où il n'y a pas de *membership* formel et où chacun peut contribuer. Plus tard, le World Wide Web Consortium [W3C] a aussi pris en charge la normalisation des protocoles du Web.

La venue des réseaux mobiles a commencé avec plusieurs organismes de normalisation pour finalement converger vers une seule suite de normes, gérées par le Third Generation Partnership Project [3GPP] dont les principaux membres sont des organisations régionales.

Chaque organisme de normalisation a son propre champ de compétence : CCSDS, pour l'espace, 3GPP, pour le mobile et l'IETF, pour la réseautique (filaire et sans fil). La convergence des technologies sans fil sur la Terre a amené une dépendance et une coordination entre le 3GPP et l'IETF pour assurer la normalisation de la réseautique mobile. Plus récemment, le 3GPP a augmenté son champ en développant des normes pour l'utilisation de satellites sur orbite basse (Low Earth Orbit, LEO) pour les communications mobiles, souvent appelées Non-Terrestrial Networks (NTN) [3GPPNTN].

La normalisation est la clé pour assurer l'interopérabilité et ainsi permettre aux usagers et clients de pouvoir utiliser n'importe quel fournisseur de service sans changer les logiciels et les matériels. En assurant un marché homogène des technologies, la normalisation crée un marché innovant et compétitif, assurant aux usagers et clients le coût le plus bas et une efficacité globale du marché.

Récemment, la conquête de l'espace a subi des transformations importantes. En effet, l'industrialisation permet maintenant de diminuer les coûts de construction des dispositifs spatiaux. Un bel exemple est le Cubesat [Cubesat] qui consiste en un format simple et relativement petit de satellites permettant aux acteurs et projets moins fortunés de pouvoir envoyer des dispositifs dans l'espace à moindre coût. De plus, l'industrie spatiale utilise maintenant des composantes électroniques de niveau moins exigeant [COTSESA] [COTSNASA] permettant des baisses de coûts significatives mais demandant plus de tests de vérification, dont ceux de radiation. Enfin, l'innovation des lanceurs menée par SpaceX a permis une diminution importante des coûts de lancement. Ces changements combinés créent une nouvelle ère où beaucoup de petites et grandes entreprises et organisations, deviennent des acteurs dans cette conquête de l'espace. Les agences spatiales qui avaient l'habitude de définir elles-mêmes et souvent faire exécuter par des sous-contractants, sont maintenant dans un mode d'appel d'offres de services commerciaux qu'elles pourront louer selon leurs besoins.

Pour les usagers et clients, incluant les agences spatiales, la normalisation devient donc une clé de voûte pour assurer l'interopérabilité entre tous les services de ces acteurs de l'espace, présentement et dans le futur.

Le déploiement de satellites de communications sur l'orbite basse a pris une ampleur significative dans les dernières années avec le lancement de plusieurs milliers de satellites par SpaceX Starlink. Des projets similaires tels que OneWeb et Kuiper sont aussi en cours de déploiement. Cependant, malgré l'utilisation de la couche Internet Protocol (IP) telle qu'utilisée sur Internet par les utilisateurs, chaque réseau de fournisseur utilise une technologie propriétaire ne permettant pas pour le moment de pouvoir utiliser des terminaux normalisés ou des portions de réseaux de satellites de plusieurs fournisseurs. Des discussions ont lieu sur ce sujet mais aucune norme ne semble émerger pour être utilisée par les fournisseurs de services.

La destination actuellement convoitée dans l'espace lointain est la Lune. La normalisation est critique considérant les multiples acteurs qui vont se partager les services. Elle inclut entre autres les services de position, de temps, de navigation, de communication et de réseautique. La Nasa et l'Agence spatiale européenne (ESA) ont conjointement proposé une normalisation des communications appelée LunaNet Interoperability Specification (LNIS), présentement à la version 5 [LNISv5]. Cette spécification est basée sur un modèle de fournisseur de services, appelé LunaNet Service Provide (LNSP). Détaillée sur le plan des communications, elle demeure incomplète sur le sujet de la réseautique, en mentionnant de façon haut niveau l'utilisation du protocole Internet (IP) et le protocole Bundle (Bundle Protocol, BP) [RFC9171].

Le Bundle Protocol (BP) est une norme plus récente d'un protocole qui permet de créer un réseau similaire mais différent du protocole Internet (IP). BP a été fondé sur la conclusion que la suite du protocole IP ne peut être utilisée [RFC4838] dans l'espace lointain, consi-

dérant les caractéristiques propres de l'espace lointain, telles que les délais très grands et variables et les longues interruptions de communications. Par exemple, le délai pour une transmission aller-retour de la Terre vers Mars peut se situer entre quelques minutes jusqu'à 40 minutes, à cause des délais de propagation des ondes radios dans l'espace et de la position des planètes l'une par rapport à l'autre. Les longues interruptions peuvent être de quelques secondes à plusieurs jours ou semaines. Par exemple, la planète Mars peut être de l'autre côté du Soleil par rapport à la Terre, créant une période où les communications directes ne sont pas possibles, une situation qui arrive tous les 2 ans. La dernière conjonction solaire de Mars a eu lieu en novembre 2023 où pendant deux semaines, aucune communication directe n'était possible entre les deux planètes. Un protocole qui gère les longs délais et longues interruptions est appelé Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN).

Le protocole BP est basé sur un modèle de stockage de trames dans les nœuds intermédiaires du réseau pour pallier les longs délais de transmission et les interruptions. Une toute nouvelle suite de protocoles applicatifs et de services réseaux tels que les protocoles de routage, de sécurité, de nommage des nœuds et de transmission du temps doivent être conçus pour être utilisés avec ce nouveau protocole BP. Ces travaux d'ingénierie et de normalisation sont accomplis par l'IETF et le CCSDS et une coordination est en place entre les deux organismes.

Il est aussi prévu qu'on utilise le protocole IP dans l'espace, tel que stipulé dans la norme LNIS autant pour la Lune que pour Mars [IOAGMARS], surtout pour les communications sur la surface et autour du corps céleste. Dans ce contexte, les délais sont courts, les interruptions relativement minimales ou bien planifiées et les technologies sous-jacentes prévues sont les réseaux mobiles 4-5G et le *wifi*, qui utilisent déjà naturellement le protocole IP.

Le protocole BP a été déployé de façon limitée dans l'espace dans des projets de vérification technologique [ESABPISS] *via* l'utilisation de la station spatiale internationale sur l'orbite basse. Jusqu'à maintenant, dans l'espace lointain, par exemple pour Mars, les délais et des interruptions des communications étaient gérés par un logiciel de courtage [MAROS] où les missions tels que le Deep Space Network et les relais autour de Mars offraient les fenêtres de communications aux autres missions telles que celles des robots explorateurs sur la surface de Mars. Tout était spécifié et planifié à l'avance. Si une communication planifiée ne peut être utilisée pour une raison ou une autre, la fenêtre est perdue. L'arrivée de protocoles de réseau permettra l'utilisation optimale de ces fenêtres en proposant des chemins alternatifs et en partageant les fenêtres de communications entre plusieurs missions, projets ou fournisseurs de services. En fait, il n'existe pas de réseau proprement dit dans l'espace actuellement.

Une initiative récente [DEEPSpaceIP] tente de réévaluer si le protocole Internet ne pourrait pas être aussi utilisé dans les communications de l'espace lointain de type DTN, en modifiant les paramètres par défaut des protocoles Internet qui sont typiquement faits pour des délais et des interruptions de l'ordre de millisecondes.

Jusqu'à maintenant, les communications dans l'espace utilisaient les ondes radio, où on assigne une fréquence spécifique pour chaque direction de communication. Ces fréquences spécifiques ainsi que les identifiants des vaisseaux sont consignés dans un registre [SANASCID], assurant aucune collision dans les communications. Récemment, des tests sont en cours [LCRD] [PSYCHE] pour utiliser la lumière avec des lasers permettant non seulement une bande passante beaucoup plus élevée, particulièrement importante pour les quantités importantes de données scientifiques transmises à partir de dispositifs dans l'espace vers la Terre, mais aussi une utilisation beaucoup plus minime d'énergie pour la transmission. Cependant, ces communications exigent une précision dans l'alignement des

dispositifs et aucune obstruction de la lumière dans le chemin. Cette dernière contrainte amène à utiliser des sites sur la Terre où les nuages sont les plus rares possibles.

Le groupe de travail sur la réseautique interplanétaire [IPNSIG], un chapitre de la société Internet (Internet Society) [ISOC], a publié un rapport [IPNSIGSSIARCH] exhaustif sur ces sujets en proposant une gouvernance où les différents acteurs sont invités à contribuer et à développer les normes et la gouvernance de façon consensuelle similaire à celle de l'Internet. Ce rapport est aussi un excellent état des lieux sur l'Internet dans le système solaire (SSI : Solar System Internet).

La normalisation de la réseautique dans l'espace est un travail qui ne fait que commencer. Elle est vitale pour assurer l'interopérabilité et l'utilisation efficace des communications. De plus, la gouvernance des communications et de la réseautique sera aussi critique. La collaboration et la coordination de l'ensemble des organisations et des acteurs est la clé du succès du réseau Internet dans l'espace.

## BIBLIOGRAPHIE

[3GPP] 3GPP, A Global Initiative, <https://3gpp.org>

[3GPPNTN] Release 17, <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-1>

[CCSDS] Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), <https://ccsds.org>

[COTSESA] From custom-made to commercial: how ESA is changing the way that spacecraft are built, [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Discovery\\_and\\_Preparation/From\\_custom-made\\_to\\_commercial\\_how\\_ESA\\_is\\_changing\\_the\\_way\\_that\\_spacecraft\\_are\\_built](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/From_custom-made_to_commercial_how_ESA_is_changing_the_way_that_spacecraft_are_built)

[COTSNASA] NASA Efforts In Utilizing Commercial-Off-The-Shelf (COTS), Electronics In Mission Systems, Peter Majewicz, 2022, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220015267/downloads/20220015267-Majewicz-ACCEDE-2022-Presentation-v3.pdf>

[CUBESAT] CubeSat, Origin of the New Space Revolution, <https://www.cubesat.org>

[DEEPSPACEIP] IP Protocol Stack for Deep Space, <https://deepspaceip.github.io/>

[ESAISSBP] Extending the Internet into space, <https://esoc.esa.int/extending-internet-space>

[IETF] Internet Engineering Task Force, <https://ietf.org>

[IOAGMARS] The Future Mars Communications Architecture, Volume 1, Report of the Interagency Operations Advisory Group Mars and Beyond Communications Architecture Working Group, 2022, <https://www.ioag.org/Public%20Documents/MBC%20architecture%20report%20final%20version%20PDF.pdf>

[IPNSIG] Internet Society Interplanetary Chapter, <https://ipnsig.org>

[IPNSIGSSIARCH] Solar System Internet Architecture and Governance - from the Moon to Mars and beyond -, Internet Society Interplanetary Chapter, September, 2023, [https://drive.google.com/file/d/1anMcVEqXjNtk5gdo\\_qce28SowusXKkfi/view](https://drive.google.com/file/d/1anMcVEqXjNtk5gdo_qce28SowusXKkfi/view)

[ISOC] Internet Society, <https://isoc.org>

[LCRD] Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) Overview, NASA, <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/tech-demo-missions-program/laser-communications-relay-demonstration-lcrd-overview/>

[LNISv5] LunaNet Interoperability Specification, <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/lunanet-interoperability-specification/>

[MAROS] Gladden, Roy E., “Mars Relay Operations Service (MaROS): a present service preparing for the future”, <https://hdl.handle.net/2014/45530>, SpaceOps 2014 13<sup>th</sup> International Conference on Space Operations, Pasadena, California, May 5-9, 2014.

[MARCONJUNCTION] NASA’s Mars Fleet Will Still Conduct Science While Lying Low, <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-mars-fleet-will-still-conduct-science-while-lying-low>

[PSYCHE] Deep Space Optical Communications (DSOC), NASA Jet Propulsion Laboratory, <https://www.jpl.nasa.gov/press-kits/psyche/dsoc>

[RFC4838] CERF V., BURLEIGH S., HOOKE A., TORGERSON, L. DURST, R., SCOTT K., FALL K., & WEISS H., “Delay-Tolerant Networking Architecture”, RFC 4838, DOI 10.17487/RFC4838, April 2007, <https://www.rfc-editor.org/info/rfc4838>.

[RFC9171] BURLEIGH S., FALL K., BIRrane E. & III (2022), “Bundle Protocol Version”, RFC 9171, DOI 10.17487/RFC9171, January 2022, <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9171>

[SANASCID] Spacecraft Identifier, Space Assigned Numbers Authority (SANA), <https://sanaregistry.org/r/spacecraftid/>

[W3C] World Wide Web Consortium, <https://w3c.org>

# The Earth seen from above

- 05 **Preface**  
Grégoire POSTEL-VINAY

- 06 **Introduction - When the wise man shows the Earth**  
Laurent TOUTAIN & Nicolas KUHN

## **THE ACTORS, THE EARTH SEEN FROM GREATER OR LESSER HEIGHTS**

- 08 **Satellites**  
Valérie FOIX & Jean-Philippe TAISANT

Artificial satellites history starts at the end of the 1960s, in the context of the Cold War. They have gradually covered several civil and military application sectors, such as telecommunications, Earth observation and navigation, to reach around 2,000 objects in orbit at the end of the 2010s. Over the past ten years, technological breakthroughs such as the digitization of payloads, the miniaturization of equipment and satellites as well as the use of commercial components, have accelerated the democratization of Space and the deployment of constellations, modifying the existing eco system and traditional economic models. The increase of Space occupation, following the multiplication of uses and services, in a context of increased commercialization of the orbit, as well as the strengthening of the militarization of the sector, raises the question of the sustainability of its use.

- 18 **HAPS (High Altitude Permanent System)**  
Michel MASSELIN

Recent technological progress makes it possible to envisage a new capacity based on airborne drones: HAPS (High Altitude Permanent System) such as the Stratobus. Stratobus is a stratospheric airship capable of operating during one year, at an altitude of 19 km, and carrying a payload of 250 kg with a power of 5 kW.

Earth observation applications are complementary to satellite applications, and allow to deploy independent and sovereign means of observation, offering permanent observation and unrivaled optical resolution. In addition, they can be moved above inaccessible areas, or ecologically fragile areas, or following a natural disaster.

The Stratobus project was selected in 2016 as part of the “Nouvelle France Industrielle”, which launched the design phase, then selected as part of the European Defense Fund to produce demonstrators which will fly from 2025 in the stratoport of Canarias.

- 22 **Space Launchers' international market**  
Hervé GILIBERT

In the last decade, the space transportation domain has been subject to a dramatic transformation, in all its dimensions: launch techniques, launchers technologies, industrial organizations, economic model, association and respective contribu-

tions of public and private sectors... Is this domain on the way toward a classical commercial economy?

This question may have no definitive answer at this stage.

Looking at the fundamentals that have led to the emergence of space transportation 60 years ago, analyzing these 60 years of progress and of successive transformations until the current acceleration, one assesses related stakes: considering together the outstanding perspectives for the 2 next decades, the “capital intensive” aspect of the activity, and its strategic and dual nature, one modestly tries to bring light on this question.

## CONTEXT, CROSS-CUTTING ISSUES

### 28 **Legal aspects: frequencies**

Alexandre MARQUET & Thomas WELTER

Satellite-related needs are tightly linked to their communication needs, that are wireless in nature. In this context, and given the global aspect of these deployments, an important part of the legal matters surrounding spatial services is related to the regulatory aspects of radiocommunications. These are handled by the Radiocommunication sector of the International Telecommunication Union (ITU-R) both on the technical and regulatory levels. ANFR is the unique French point of contact to the ITU-R. In this regard, it is in charge of helping the industries and government agencies to fulfil the necessary space-related processes with the Radiocommunication Bureau of the ITU-R, and also with relevant foreign administrations in the framework of coordination. ANFR is also in charge of the technical studies, as well as of the consolidation and defense of French interests related to spectrum/orbit resources.

### 34 **Regulation of flying objects: a century-old story at the dawn of the digital revolution**

Louis TEODORO, Pascale ROBERT & Orian DHEU

From the origins of prescriptive international air navigation regulations to innovative aviation, the regulatory foundations of international civil aviation seem to have reached their limits. With the major technical developments that digital technology has been bringing to civil aviation for several years now, profound changes to the various certification and approval processes and, more generally, to aviation law will have to be achieved to ensure that passenger and third-party safety levels are maintained.

### 40 **The myth of disappearing borders**

Jacques ARNOULD

Seeing the Earth from space: the power of astronautics never ceases to fascinate us. Astronauts, who are probably in the best position among us, repeat that, from up there, almost all terrestrial frontiers disappear: a claim that is no doubt exaggerated. Not only do we need to diversify the way we look at reality and ourselves, but we also need to recognise the existence of necessary boundaries, the need to leave and respect our own place and that of our alter egos.

**43 The legal challenges of Earth observation from space in the context of the new space economy**

Philippe CLERC

This article puts into perspective the public, private and legal issues that have shaped the construction of Earth observation from space, from its origins in the 1960s to the present day in the era of Big Data. It details the most salient features of its legal framework in order to clarify under what conditions such observation is lawful, how investors or operators can protect the results of their efforts, and how their data should be made available on a competitive market or to the general public.

This reflection takes into account the technical and political upheavals that have affected this activity, on a national, European and international scale, following the rise of the conquest of space, the development of computing, the Internet, mobile applications, the globalized digital economy, and then the advent of New Space. All of this has coincided with the emergence of legislation that, on the one hand, ensures intellectual protection, reservation, control and even exclusivity for the use of space-based data, and on the other, imposes free and unrestricted access (open data), while at the same time preserving certain restrictions.

**51 Nanosat: a small-scale revolution**

Imane EL KHANTOUTI & Didier DONSEZ

The advent of nanosatellites has transformed and democratized the access to space by offering a more economical and modular option compared to traditional satellites. These compact and standardized satellites are used in various fields, from Earth observation to telecommunications, thereby fueling the dynamics of New Space. The deployment of nanosatellites is carried out by private companies and academic institutions. This approach is characterized by lightweight technologies, short development cycles, project management agility, and increased tolerance for failure, distinguishing it from the more conventional approach of Old Space. The New Space ecosystem encompasses a variety of actors, from equipment manufacturers to carriers, launch providers, government agencies, and universities. Despite the opportunities presented by nanosatellites, challenges persist, including the management of space debris, radio interference in communications, and the threat of cyberattacks.

**59 A breakthrough technology for detecting and geolocating ships at sea**

Rachid NEDJAR & Maël TORCA

As human activities impact more and more our planet every year, our seas and oceans are more than ever at the center of critical challenges regarding biodiversity protection, global warming, disputes between nations or the multiplication of illegal activities that are difficult to contain.

Despite regulations, quotas and controls, legacy maritime safety systems are showing their limitations, and do not provide an exhaustive view of human activities at sea, and their harmful consequences.

Indeed, the maritime areas to be protected are vast, often far from coasts, and cooperative safety systems (AIS, VMS) can be deactivated or manipulated.

Unseenlabs has developed a space-based radiofrequency detection technology to detect, geolocate and track any vessel at sea, cooperative or not, anytime (night and day), anywhere around the globe, regardless weather conditions.

This capacity, fully operational for 5 years now, provides an innovative solution for oceans protection and global security, and opens new horizons for maritime surveillance from space. The aim of this article is to present the key benefits of space-based RF detection for maritime surveillance by illustrating them through multiple concrete use cases.

## APPLICATIONS OF EARTH OBSERVATION

### 68 **Cards to heal the world**

Sébastien SORIANO

At a time of major environmental change, maps must become compasses for navigating the Anthropocene and correcting our excesses. A whole area of public policy on data needs to be structured. Providing decision-makers with good maps can help them to be ambitious and even courageous. This mapping revolution is both democratic and technological. Democratic, because we must not just open up the data, we must co-construct it and make it a shared resource with those working on the ground. There is a huge challenge here, which is to “de-silo” the initiatives of players who are often fragmented. Technological, because only AI and digital twins will make it possible to drive the necessary changes in time.

### 73 **High altitude technologies to map the territory**

Valérie DERÉGNAUCOURT

Spatial imagery, artificial intelligence, LiDAR technology... To map the territory and make aerial and spatial observations speak for themselves, the IGN is constantly deploying a range of cutting-edge technologies. Here are some explanations.

### 78 **Measuring CO<sub>2</sub> emissions from space and understanding their evolution**

Philippe LANDIECH & François Marie BRÉON

CO<sub>2</sub> is the main greenhouse gas whose increasing concentration in the atmosphere is responsible for climate change. The “background” concentration, which is increasing annually by around 2.5 ppm, is measured on the ground with very high precision at around a hundred sites around the world. This concentration shows significant seasonal variations, particularly in the northern hemisphere. These variations are due to natural carbon flows: absorption by plants through the process of photosynthesis, emissions during plant respiration, exchanges with ocean water masses, etc. The principle of these exchanges is well understood, but they are still poorly quantified. In addition to the need to know anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions and how they change over time, this better quantification of natural flows requires dense measurement of concentrations both spatially and temporally. Space observation is well suited to this objective.

### 90 **Observing the Earth and its atmosphere to improve weather forecasts**

Philippe CHAMBON, Quentin LIBOIS & Bruno PIGUET

Météo-France uses weather forecasts to carry out its missions to protect people and goods. These forecasts are based on numerical models, fed by a variety of observations, most of which come from Earth observation satellites. These satellites are constantly being renewed, thanks to the efforts of space agencies. The EUMETSAT

agency, which operates Europe's operational meteorological satellites, is preparing to launch a new generation of space instruments that will enhance forecasting capabilities. At the same time, Météo-France is carrying out research to improve its models using in situ and space observations. Future advances in weather forecasting will rely on more frequent observations at higher spatial resolution with new generations of satellites, as well as the emergence of technologies such as AI.

**100 Using altimetry satellites to measure sea level**

Cyril GERMINEAUD, Claire DUFAU & Pierre PRANDI

Since the 1990s, satellite altimetry has revolutionized our understanding of ocean dynamics, providing over 30 years of continuous measurements. Altimeter satellites such as TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3, and Sentinel-6 MF have accurately monitored the evolution of the global mean sea level. The SWOT mission, launched in 2022, introduces innovative technology with a KaRIn interferometric radar, allowing spatial resolution ten times higher than classical altimeter satellites. This advance provides an unprecedented view of fine-scale structures in ocean circulation. An increase of about 10 cm has been observed since 1993, with a significant acceleration since the late 2000s. Two main factors contribute to this increase: the thermal expansion of the oceans, which absorb the excess energy (in the form of heat) generated by human activities in the Earth system, and the contribution of melting ice sheets and mountain glaciers. However, this elevation masks very significant regional variations, which can be observed using satellite altimetry. The risk of coastal flooding due to sea level rise is a major economic challenge. Coastal communities around the world face threats that require adaptive solutions. Initiatives such as LITTOSCOPE in France are using satellite data to assess flood risks, anticipate impacts and propose solutions to reduce the vulnerability of coastal areas. In summary, satellite altimetry has been instrumental in understanding ocean dynamics at different spatial and temporal scales, measuring sea level rise, and anticipating flood risks. Technological advances, such as SWOT's KaRIn radar, are opening new perspectives for even more detailed ocean observations, providing critical information to address the challenges posed by climate change.

**108 Using satellite data to monitor improvements in farming practices**

Antoine LEFEBVRE

Considered an imperative if we are to meet the challenges of the environment and climate change, the transition in agriculture is now being driven by ambitious political objectives and funding programmes. These require the use of measurement solutions that combine objectivity, geographical scope and responsiveness. The satellite analysis products developed by Kermap meet these challenges. They help to consolidate the environmental value chain in the agricultural sector by delivering reliable, enforceable indicators on sustainable agricultural practices: crop diversification, soil cover, grassland management, agro-ecological infrastructure and irrigation. This is a practical way of putting satellite imagery data to work, and echoes the objectives of the France 2030 plan, which aims to create innovative players to harness spatial data for the benefit of the ecological transition.

## DEFENCE AND SECURITY

### 117 **Space, a strategic challenge**

Commander Alexandre ARKWRIGHT

Today, space has become the nerve centre for an exponential number of services that are vital to our societies, from GPS and telecommunications to imaging and weather forecasting. This increase in space activity is leading to an increase in risks and the emergence of threats in this environment. The description of this major development, its tangible visible effects and the consequences for the armed forces deserve to be detailed in order to have a realistic vision of space, which is often perceived as remote, inaccessible and peaceful, whereas everything points to the contrary. The Space Command (CDE) embodies France's military space ambitions. It contributes to the definition of military space policy and implements it. It also conducts military space operations. The French Air Force, through the CDE, plays a key role in the development of defence space, so that France can maintain its freedom of action in space in the interests of our strategic autonomy. The challenges ahead are significant but exciting.

### 122 **Harnessing the potential of New Space for foreign intelligence**

Nicolas LERNER

The advent of New Space represents a major opportunity for intelligence services. Indeed, constellations of nanosatellites offer unprecedented possibilities for monitoring global telecommunications. However, to fully exploit the potential of this new sensor for intelligence, several significant challenges remain to be addressed:

- we must build close and mutually beneficial partnerships with innovative French companies in the New Space sector, with a dual approach;
- we must prepare to integrate this sensor into a “multi-sensor” strategy, considering it not as a capability merely added alongside historical capabilities, but as a new cog in a multi-faceted intelligence apparatus;
- finally, and this is probably the most significant aspect, we must immediately increase our capacity to process, exploit, and analyze the ever-growing volumes of data we collect on international networks, leveraging artificial intelligence.

### 127 **How hybrid propulsion can help restore French and European sovereignty over access to space**

Sylvain BATAILLARD

Since the beginning of the space race, we have been using the same propulsion technology: liquid propulsion. The majority of space industry players are racing on the same track... While some have decided to pave a new path: hybrid propulsion. The promise is simple, a 75% reduction in launch costs, which could even allow us to catch up with the biggest players. However, there is a technological barrier preventing this technology from being used on large vehicles. HyPrSpace, a Bordeaux-based startup, believes they have found a way to bypass this barrier and achieve the holy grail of propulsion.

- 132 Military satellite communications (MilSatCom):  
a necessity for the connected soldier**  
Vincent SATGE & Grégoire CHAUCHAT

The growing need for connectivity for the armed forces is an ever-increasing reality. In addition to simply increasing connectivity, the SatCom offers incomparable advantages in terms of elongation, making it indispensable in certain use cases. Faced with the development of commercial constellations in low-Earth orbit, the military SatCom must now coexist with its civilian counterpart for the benefit of the military forces. The latter who will benefit from the advantages of the SatCom's diversity (civilian/military duality; geostationary/medium or low-Earth orbit complementarity).

## **TELECOMS AND SETELLITE POSITIONING**

- 138 A tsunami in satellite telecommunications**  
Didier LE BOULC'H

The field of communication satellites does not escape from a tsunami of change. The successful arrival of new verticalized actors such as Starlink constellation from Space X, the evolutions in usage through the success of streaming platforms, the fast progress of digitization and virtualization, the convergence with terrestrial standards coming from Mobile World (3GPP standards), the increased interest from terrestrial telecom operators to expand their network through satellite, the change of financing scheme, and finally an increased sensitivity to sustainability and (Life Cycle Assessment reduction) are key factors that are deeply changing the satcom ecosystem. Ongoing heavy developments enable to face those challenges. The commercial space sector used to be somewhat conservative (no easy repair in orbit...) it is now heading a "never seen before" pace of innovation.

- 143 The use of Satcom systems for civil  
and government applications**  
Hervé POSTEC

Satellite communications systems are essential for both civil and government uses. They rely on satellites in geostationary, medium and low orbit, providing global connectivity. Civilian applications include global telecommunications, satellite television, and bridging the digital divide. Governments use Satcoms for strategic needs, taking advantage of their global reach.

The resilience of Satcoms is crucial in the event of major crises. Satellites provide robust connectivity, even if terrestrial infrastructure is destroyed.

Technological developments, including low-orbit constellations and flexible satellites, are shaping the future of Satcom. In conclusion, these systems play a key role in our technological landscape, requiring constant vigilance in the face of developments.

- 147 Convergence of the Telecommunication systems  
with 5G and 6G**  
Flavien RONTEIX, Mohamed EL JAAFARI,  
Dorin PANAITOPOL & Nicolas CHUBERRE

One observe a profound evolution in the communication networks towards the convergence of access technologies. The integration of satellite access with

terrestrial mobile networks is enabled by the 3GPP Non-Terrestrial Network (NTN). The satellite network component can contribute to the global service continuity and resiliency of mobile systems. Leveraging the terrestrial 5G access technology, a number of solutions mitigating the issues inherent from satellite communications specifics (e.g. Doppler, delay...) have been standardized in Rel-17 of 3GPP under the so called NTN (Non-Terrestrial Network) standard. In the 5G-Advanced (starting from Rel-18), further NTN added value will be unleashed by the usage of regenerative payload architecture and performance optimization enablers. In the ITU IMT-2030's vision, the 6G will bring new network capabilities to support the interactions between the human and its physical environment leveraging real time digital modelling. In particular 6G will see the unification of the TN and NTN into a multi-dimensional architecture enabled by a set of innovative technologies and concept at both radio and network levels.

**157 The standardization of networking reaches space**

Marc BLANCHET & Vinton G. CERF

Up to now, communications are largely direct between terrestrial infrastructures and devices in space. Parallel to space conquest, the Internet has conquered the Earth and the mobile networks have been deployed. Each of these domains have a standards body. With the major technology innovations and the significant cost reductions, the space conquest brings new providers offering various services in space, starting with Moon and around. A network is currently planned to be deployed insuring optimal utilisation of communications. The standardization of the network technologies is the key to provide interoperability between all future services. This article discusses the standards and provides an overview of the network technologies that will be used not only on Moon and around, but also for Mars and beyond.

*Issue editors*

*Nicolas KUHN and Laurent TOUTAIN*

## Ont contribué à ce numéro

**Alexandre ARKWRIGHT** est capitaine de frégate. Il intègre l'École navale en 2003. Il est affecté sur les E-2C Hawkeye de la flottille 4F où il participe à la plupart des missions du porte-avions Charles de Gaulle. Il devient commandant de la flottille 4F jusqu'à l'été 2023 avant de rejoindre le Commandement de l'Espace.

→ *L'espace, un enjeu stratégique*

**Jacques ARNOULD**, né l'année où Gagarine s'est élancé vers les étoiles, s'est d'abord tourné vers la terre pour cultiver l'art du forestier. Rattrapé par le virus spatial, il est devenu le premier « cosméthicien » de l'histoire : depuis 20 ans, il est l'expert éthique du Centre national d'études spatiales (Cnes), l'agence spatiale française. À défaut d'ailes pour voltiger avec les aigles ou accompagner les astronautes dans l'espace, il manie la plume et écrit des livres. Ses derniers ? *L'espace n'est pas un dépotoir !* (2023) et *Camille Flammarion, le pèlerin des étoiles* (2024).

→ *Le mythe des frontières disparues*

**Sylvain BATAILLARD** est un ingénieur en aérospatial, ambassadeur de France Export, il fait également partie de la sélection Forbes 30 under 30 pour avoir co-fondé HyPrSpace, jeune *start-up* bordelaise qui développe une nouvelle technologie de propulsion pour le secteur de l'aéronautique, et dont il est le directeur opérationnel.

→ *Comment la propulsion hybride peut participer à retrouver une souveraineté française et européenne pour l'accès à l'espace*

**Marc BLANCHET** est président de Viagénie, une firme de consultants en réseautique. Il a participé depuis 35 ans à l'ingénierie et au déploiement d'Internet en aidant les fournisseurs Internet, les entreprises et les gouvernements. Il a été très actif dans la normalisation des protocoles Internet à l'IETF, en étant auteur de près de 20 RFC dont plusieurs sur le nouveau protocole IPv6, il a été co-président de plusieurs groupes de travail, dont le groupe sur les réseaux tolérants aux longs délais et aux interruptions, comme ceux des communications dans l'espace. Il fait partie d'un comité définissant l'architecture, l'ingénierie et la gouvernance de l'Internet dans l'espace (SSI : Solar System Internet) du chapitre interplanétaire de la société Internet (ISOC IPNSIG) dont les membres incluent des ingénieurs de la Nasa, de l'agence spatiale européenne et japonaise et Vint Cerf, le père de l'Internet.

Marc Blanchet a initié plus récemment des travaux pour reconsidérer l'utilisation de la suite du protocole IP dans l'espace. Il est récipiendaire du Leadership Award de ICANN pour son implication dans la nouvelle gouvernance de l'IANA. Il n'a pas arrêté de développer des applications, mobiles autant que serveurs, dont plus récemment sur la traçabilité alimentaire et l'intelligence artificielle. Il donne aussi de son temps aux moins nantis en étant bénévole à la banque alimentaire Moisson Québec et au refuge pour sans-abris Lauberivière, les deux dans la ville de Québec.

→ *La normalisation de la réseautique atteint l'espace*

**François-Marie BRÉON** est physicien-climatologue au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement. Ancien élève de l'École Normale Supérieure de la rue d'Ulm, il a soutenu une thèse en 1989 et une HDR en 1996. Il a été auteur du cinquième rapport du Giec paru en 2013. Il est l'auteur de plus de 130 publications dans des revues à comité de lecture. Au cours de sa carrière, il a participé au développement et l'exploitation

de plusieurs missions spatiales, en particulier POLDER (sur ADEOS-1 et 2), Parasol, Calipso et maintenant MicroCarb.

→ *La mesure des émissions de CO<sub>2</sub> depuis l'espace et la compréhension de leurs évolutions*

**Vinton G. CERF** is vice president and Chief Internet Evangelist for Google. He is the co-designer of the TCP/IP protocols and the architecture of the Internet. He has served in executive positions at ICANN, the Internet Society, MCI, the Corporation for National Research Initiatives and the Defense Advanced Research Projects Agency. A former Stanford Professor and former member of the US National Science Board, he is also the past President of the Association for Computing Machinery and serves in advisory capacities at NIST, DOE, NSF, and NRO. He has a B.S. in mathematics from Stanford and M.S. and Ph.D. degrees in computer science from UCLA. He is a member of both the US National Academies of Science and Engineering, the Worshipful Company of Information Technologists and the Worshipful Company of Stationers.

He has received numerous awards, including the US Presidential Medal of Freedom, US National Medal of Technology, the Queen Elizabeth Prize for Engineering, the Prince of Asturias Award, the Japan Prize, the Charles Stark Draper award, the ACM Turing Award, the Marconi Prize and Marconi Lifetime Achievement Award, the IEEE Medal of Honor, the Legion d'Honneur, the VinFutures Grand Prize and the Franklin Medal. He is a Foreign Member of the British Royal Society and Swedish Academy of Engineering and holds 29 honorary degrees.

Since 1998, Vint Cerf has been a distinguished visiting scientist at the Jet Propulsion Laboratory working on the design and implementation of a Solar System Internet. New protocols have been designed specifically for space networking, called the Bundle Protocol Suite. Cerf is also a Board member of the Internet Society's Interplanetary Chapter. He works with the Architecture and Policy working group to anticipate challenges as a multistakeholder Solar System Internet serves future missions.

→ *La normalisation de la réseautique atteint l'espace*

**Philippe CHAMBON** est ancien élève de l'École Normale Supérieure de Lyon et ingénieur du Corps des Ponts, des Eaux et des Forêts. Il a réalisé une thèse de doctorat de 2008 à 2011 au Laboratoire de Météorologie Dynamique à l'École Polytechnique sur le thème de la télédétection spatiale des précipitations. Après un post-doctorat au Nasa Goddard Space Flight Center dans le Maryland, il mène ensuite 10 ans de recherches au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) sur l'utilisation des observations spatiales dans le domaine des micro-ondes pour la Prévision Numérique du Temps. Depuis 2022, il est responsable de l'équipe de recherche du CNRM en charge de l'exploitation des observations (depuis le sol et depuis l'espace) pour les modèles opérationnels de prévision du temps à Météo-France.

→ *Observer la Terre et son atmosphère pour améliorer les prévisions météorologiques*

**Grégoire CHAUCHAT** est *marketing project manager junior*. Actuellement alternant au sein de Thales et en Master 2 à HEIP Paris en relation et coopérations Internationales, il a auparavant réalisé un Bachelor et un Master 1 en commerce international à HEC Montréal.

→ *Les communications militaires par satellite (MilSatCom) : une nécessité pour le soldat connecté*

**Nicolas CHUBERRE**, graduated in 1988 from "Ecole Supérieure d'Ingénieur en Electronique et Electrotechnique" in Paris. Previously with Nokia & Alcatel Mobile phones to design signal processing algorithms, Medium Access Control protocols and test tools for 2G cellular handsets & systems assembly, he joined Thales Alenia Space

to manage the development of satellite payload equipment and the design of advanced Satellite Communication Systems (GEO and Non GEO). He has successfully initiated and led several European collaborative research projects in FP6, FP7, H2020 as well as ESA ARTES context. He has been chairing the SatCom Working Group of Networld2020 technology platforms (<https://www.networld2020.eu/>) during 9 years and as such was member of the partnership board of the 5G Infrastructure Association (<http://5g-ppp.eu/>). Nicolas has published several papers on innovative Satellite System concepts. Currently he is defining and developing Satellite Solutions for 5G and 6G systems. In addition, he is the lead representative of Thales in 3GPP TSG RAN where he is the rapporteur of the standardisation on the integration of satellite in 5G since 2017 ([https://www.3gpp.org/news-events/partners-news/2254-ntn\\_rel17](https://www.3gpp.org/news-events/partners-news/2254-ntn_rel17)). He also chairs since 2006 the Satellite Communication and Navigation working group at ETSI ([www.etsi.org](http://www.etsi.org)). Last, he is the technical manager of the Horizon Europe research project "6G-NTN" (<https://www.6g-ntn.eu/>).

→ *Convergence of the Telecommunication systems with 5G and 6G*

**Philippe CLERC** est responsable de la conformité et de l'éthique d'entreprise à l'inspection générale du Centre national d'études spatiales (Cnes). Il a occupé plusieurs postes d'expertise et de management dans le domaine juridique au sein de cet établissement, à Arianespace, au ministère chargé de l'espace où il a coordonné les réflexions interministérielles avec l'industrie et les opérateurs spatiaux préparatoire à la loi du 3 juillet 2008. Il a été secrétaire du premier rapport interministériel français sur la politique civile de diffusion des données spatiales d'observation de la Terre publié en avril 1995 par le MIPTCE, ministère chargé de la politique spatiale. Il est ancien auditeur de la 53<sup>e</sup> session nationale de l'Institut des hautes études de la défense nationale, membre de l'académie internationale de l'astronautique, correspondant de l'académie de l'air et de l'espace, membre émérite de l'association aéronautique et astronautique de France.

→ *Les enjeux juridiques de l'observation de la Terre depuis l'espace dans le contexte de la nouvelle économie spatiale*

**Valérie DERÉGNAUCOURT**, titulaire d'une maîtrise de géographie de l'Université Paris Panthéon-Sorbonne et diplômée du Celsa en communication publique, est rédactrice en chef du site IGN.fr et du webzine Repères (Repères, le média qui décrypte l'information géographique et forestière - Portail IGN - IGN) au sein de la direction de la communication de l'IGN. Après un début de carrière dans le milieu associatif, un premier poste de chef de projets communication au sein de l'institut, puis un passage par le département veille d'opinion et médias sociaux à la délégation à la communication du ministère chargé de l'éducation nationale, elle pilote aujourd'hui les contenus digitaux proposés sur ign.fr et notamment Repères, le journal en ligne de l'IGN. En parallèle, elle coordonne la communication relative au programme LiDAR HD, un chantier cartographique inédit qui prévoit la réalisation d'un modèle 3D France entière et préfigure le socle géométrique du futur jumeau numérique de la France.

→ *Pour cartographier le territoire, des technologies en haute altitude*

**Orian DHEU** est titulaire d'un doctorat en droit portant sur les enjeux juridiques relatifs aux systèmes autonomes et chef de programme au Pôle Aéronefs et Opérations Aériennes de la direction coopération européenne et réglementation de sécurité à la Direction de la sécurité de l'aviation civile (DSAC) de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC). Il est chargé de suivre les dossiers drones et mobilités émergentes au sein de sa direction.

→ *Régulation des objets volants : une histoire centenaire à l'aube de la révolution digitale*

**Didier DONSEZ** est professeur des universités en informatique à l'Université Grenoble Alpes (Grenoble, France) depuis 2007. Il est actuellement en délégation au CNRS. Il a été

maître de conférences en informatique à l'Université de Valenciennes (France) de 1996 à 2001, puis à l'Université Joseph Fourier (Grenoble, France) de 2001 à 2007. Il a obtenu un doctorat en informatique (1994) à l'Université Paris VI : Pierre et Marie Curie et une HDR (Habilitation à Diriger des Recherches) en informatique (2006) à l'Université Joseph Fourier. Son laboratoire de recherche est le LIG (Laboratoire d'Informatique de Grenoble) [<https://www.liglab.fr>], au sein de l'équipe ERODS [<http://erods.liglab.fr>]. Il enseigne au département d'informatique de l'école d'ingénieurs Polytech Grenoble. Ses domaines de recherche portent sur les systèmes distribués, les intergiciels et le génie logiciel pour l'internet des objets (IoT) depuis 20 ans. Ses sujets actuels incluent les réseaux frugaux pour l'IoT (LPWAN), les LPGAN, le SatIoT et l'intelligence artificielle à la périphérie des réseaux (*extreme edge*). Il est le promoteur du projet Thingsat, au Centre Spatial Universitaire de Grenoble (CSUG), un véhicule de recherche en orbite pour l'évaluation de la modulation LoRa<sup>®</sup> dans la réalisation des nouveaux services SatIoT. Il s'intéresse à l'usage de l'IoT dans les sujets environnementaux et sociétaux. Il participe à plusieurs projets logiciels open-source. Pages web : <http://www.linkedin.com/in/didierdonsez>, <http://membres-liglab.imag.fr/donsez/>, <https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/thingsat/public/>

→ ***Nanosat : une révolution de petite taille***

**Claire DUFAU** est une ingénieure-docteure en océanographie physique (Centrale Marseille, Université de la Méditerranée). Elle possède une expertise scientifique reconnue dans le domaine de la surveillance du niveau de la mer par altimétrie satellitaire. Elle a participé à de nombreux projets européens, nationaux et internationaux. Elle a lancé et animé l'initiative « Altimétrie pour les modèles régionaux et côtiers » (Arcom) au sein du groupe côtier de GODAE Ocean View. Elle dirige actuellement l'équipe « Applications et projets océaniques et côtiers » au sein de la BU « Environnement et Climat » de CLS, une société française filiale du CNP et du Cnes. Son équipe concentre son travail sur le développement de services satellitaires de surveillance, d'alerte et d'aide à la décision dédiés aux territoires côtiers, tels que la surveillance des sargasses aux Antilles, les risques de submersion côtière et la dérive de pollution plastique.

→ ***Les satellites altimétriques au service de la mesure du niveau de la mer***

**Mohamed EL JAAFARI** is a radio access network specialist engineer with 22+ years of experience in cellular communications including 5G NR, eUTRAN, GERAN, and Cellular IoT. He received the Engineer degree in telecommunications from EMI in 1999. He is an expert in radio access network design, RF Planning, Radio Network Optimization, and Radio Access Network System dimensioning with large multi-vendor experience. He currently conducts extensive research work on 5G NR NTN and IoT NTN. He joined the R&D department of the Telecommunication Business Line of Thales Alenia Space in 2020. He is the lead representative of Thales in 3GPP RAN1 working group where he is a feature lead for the 3GPP work item on satellite integration in 5G. Currently, he is defining and developing solutions for 5G NR and B5G to support non-terrestrial networks.

→ ***Convergence of the Telecommunication systems with 5G and 6G***

**Imane EL KHANTOUTI**, cheffe de projet spatiale axée sur les applications spatiales pour le développement durable à Toulouse, France, est diplômée en ingénierie aérospatiale de l'Université Internationale de Rabat (2020), au Maroc. Elle a contribué à plusieurs missions spatiales nanosatellites, notamment ThingSat, ATISE et WFAI au sein du Centre Spatial Universitaire de Grenoble (CSUG) ainsi qu'une constellation d'observation de la Terre pour la détection des gaz à effet de serre (Absolute Sensing). Impliquée au sein de l'Initiative marocaine pour l'industrie spatiale (MISI), son engagement vise à promouvoir et à soutenir le secteur spatial au Maroc et en Afrique. Reconnue parmi les 10 meilleurs africain.e.s de moins de 30 ans dans le domaine spatial en 2020, Imane

s'investit dans la recherche de solutions aux problèmes socio-économiques en Afrique grâce aux applications spatiales et à l'entrepreneuriat. Son objectif est de positionner le marché africain en tant qu'acteur majeur dans le domaine spatial.

→ ***Nanosat : une révolution de petite taille***

**Valérie FOIX** est chef de projet au Centre national d'études spatiales (Cnes). Elle encadre des développements de technologies pour les systèmes de Télécommunications par satellite depuis le début des années 2000.

Elle a occupé précédemment la fonction de chef de projet de satellites de renseignement d'origine électromagnétique au sein du groupe Thales.

Valérie Foix est diplômée de l'École Supérieure d'Électricité.

→ ***Les satellites***

**Cyril GERMINEAUD**, après avoir fait un master européen en océanographie partagé entre la France, l'Espagne et l'Angleterre (oui, avant le Brexit !), a obtenu un doctorat en océanographie physique (c'est essentiellement l'étude des courants, de la température et de la salinité à différentes échelles spatio-temporelles) à l'Université Toulouse III - Paul Sabatier. Il a ensuite poursuivi sa carrière en tant que jeune chercheur en France et aux États-Unis pendant 6 ans avant de rejoindre l'agence spatiale française, le Cnes en tant qu'expert sur l'usage des données en océanographie. En effet, on peut aussi (voire même surtout) observer les océans et les mers depuis l'espace grâce aux satellites, pas uniquement depuis la côte ou en bateau ! Son travail porte donc sur l'apport des données satellites en complément des données collectées en mer pour mieux comprendre la dynamique océanique en collaboration avec les instituts de recherche en France et en Europe, mais aussi partout ailleurs dans le monde. Il est actuellement responsable du centre de données et services Aviso, le centre du Cnes qui assure l'archivage pérenne et la distribution des données satellites sur les océans.

→ ***Les satellites altimétriques au service de la mesure du niveau de la mer***

**Hervé GILIBERT**, après un début de carrière chez Aérospatiale Espace et Défense, comme ingénieur d'études dans le domaine du contrôle du vol des missiles stratégiques et des lanceurs spatiaux, puis un rôle de chef de programme pour un programme d'armement Français, a été nommé chef de programme pour les développements du lanceur Ariane 5 et a assumé cette fonction de 2002 à 2010 au sein d'Astrium Space Transportation.

En 2011, il a pris le rôle de *chief technical officer* (CTO), avant de devenir directeur de l'Ingénierie pour les activités satellites et lanceurs, lorsqu'elles ont été rapprochées, au sein d'Airbus Defense & Space.

De 2015 à 2020, au sein de la société ArianeGroup qui a fusionné les activités lanceurs des groupes Airbus et Safran, il a assuré la fonction de *chief technical officer & quality*.

À l'heure actuelle, depuis 2021, son rôle de *chief technical officer* intègre le management de l'ingénierie et des bureaux d'études qui conçoivent et opèrent les systèmes de lancement civils et militaires (Ariane et M51) au sein d'ArianeGroup.

→ ***Le marché international des lanceurs***

**Nicolas KUHN** a obtenu son Master de l'ISAE - ENSICA en ingénierie aéronautique en 2010. En 2013, il obtient un doctorat de l'ISAE (Toulouse, FR) et du NICTA (Sydney, AUS). Il a reçu le diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches en Avril 2023, délivré par l'Université de Toulouse III. De janvier 2014 à septembre 2015, il a été post-doctorant à l'Institut Mines-Télécom (Télécom Bretagne) et particulièrement impliqué dans le projet européen RITE. De septembre 2015 à décembre 2021, il a travaillé au Centre national d'études spatiales (Cnes) en tant qu'ingénieur de recherche. Ses recherches se sont concentrées sur les problèmes de couche de transport dans les télécommunications spatiales et sur la manière dont un service de bout en bout peut être réalisé dans cet environnement difficile. Ainsi, il travaille également sur la qualité de l'expérience, la qualité

de service, les modalités d'accès et des conceptions multicouches. Il est impliqué dans la standardisation du protocole QUIC à l'IETF et à la nécessité d'adapter le protocole pour les communications par satellite. Il a rejoint Thales Alenia Space en janvier 2022 où il participe aux activités de constellation de satellites en orbite basse, aux activités 5G NTN et aux programmes de segments sol utilisateurs.

→ *Quand le sage montre la Terre*

**Philippe LANDIECH** est ingénieur au Centre national d'études spatiales (Cnes). Ancien élève de Sup'Aéro (promotion 1984), il a mené toute sa carrière à l'ONERA puis au Cnes. Il a été notamment chef de projet de la filière de mini-satellites PROTEUS qui ont permis la réalisation des missions Jason d'altimétrie, mais aussi d'astronomie COROT ou encore d'étude de l'environnement CALIPSO et SMOS. Après avoir tenu des postes de management dans l'ingénierie et les technologies des véhicules spatiaux, il a repris le poste de chef de projet MicroCarb en 2020 pour assurer la finalisation de son développement et la préparation de l'exploitation des données de la mission.

→ *La mesure des émissions de CO<sub>2</sub> depuis l'espace et la compréhension de leurs évolutions*

**Didier LE BOULC'H** est VP strategy and telecom solution à Thales Fellow at Thales Alenia Space.

Diplômé de Sup Aero (ISAé) en 1989, il a travaillé au service des Armées (DGA) pendant 10 ans, sur les systèmes de guerre électronique, de furtivité et de communications militaires. Il a rejoint le Cnes (Centre national d'études spatiales) en 1999, où il a coordonné les programmes de télécommunications spatiales. En 2005, il rejoint Thales Alenia Space, où il a occupé diverses fonctions : responsabilité de l'ingénierie système, directeur R&D à la direction technique, responsable de la politique produit Télécom, avant d'être nommé à sa position actuelle.

Il a contribué à accélérer le développement de l'électrification des satellites, à lancer la digitalisation des charges utiles, à développer la compétence système télécom, à amorcer le virage vers la 5G, à lancer le programme de satellite "software defined SPI", Il travaille aujourd'hui, entre autres, sur les projets de constellation en orbite basse et moyenne.

Son moteur personnel est de faire le lien entre des tendances émergente de marché, les solutions d'architecture pérennes et les technologies avancées permettant de développer et mettre sur le marché des solutions différenciantes et compétitives.

→ *Un tsunami en télécommunications par satellite*

**Antoine LEFEBVRE** est président directeur général et co-fondateur de Kermap. Titulaire d'une thèse en Géographie - Traitement du signal en 2011, il est spécialiste d'analyse d'image et de systèmes d'information géographique. Il dispose de plusieurs années d'expérience dans la recherche publique, en tant que chercheur associé au Centre national de recherche scientifique (CNRS) et à l'Institut of Automation de l'Université de Shanghai, puis chercheur associé au sein du Centre national d'études spatiales (Cnes). Ce parcours académique se conjugue à une expérience du secteur privé dans la Recherche & Développement. Parallèlement à ses fonctions de dirigeant de Kermap, il est en charge de la R&D et de l'innovation au sein de la société.

→ *Opérationnaliser la donnée satellite pour suivre l'amélioration des pratiques agricoles*

**Nicolas LERNER**, diplômé de l'Institut d'études politiques de Paris et ancien élève de l'École nationale d'Administration (ENA), rejoint d'abord le secrétariat général du ministère de l'Intérieur, avant de devenir directeur de cabinet du préfet de l'Hérault, de 2006 à 2008. Il assume ensuite successivement les fonctions de chef puis de directeur de cabinet du Préfet de police de Paris. Après un passage dans la ville de Béziers, en qualité de sous-préfet, il occupe le poste de coordinateur pour la sécurité en Corse du Sud, de 2015

à 2017. En 2018, il est directeur adjoint du cabinet du ministère de l'Intérieur lorsqu'il est nommé directeur général de la Sécurité intérieure. Nicolas Lerner est directeur général de la Sécurité extérieure depuis le 9 janvier 2024.

→ ***Exploiter le potentiel du New Space au profit du renseignement extérieur***

**Quentin LIBOIS** est ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts, chercheur au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et responsable du Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale. Ayant rejoint le CNRM après un doctorat réalisé à l'Institut des Géosciences de l'Environnement à Grenoble puis un post-doctorat à l'Université du Québec à Montréal, il est spécialiste du transfert radiatif atmosphérique et s'intéresse autant à l'observation de la Terre par satellite qu'aux observations *in situ* permettant de comprendre les processus physiques en jeu dans l'atmosphère et d'évaluer les modèles atmosphériques. Il contribue également au développement des paramétrisations physiques des modèles de Météo-France, en particulier pour ce qui concerne la modélisation des interactions entre nuages et rayonnement.

→ ***Observer la Terre et son atmosphère pour améliorer les prévisions météorologiques***

**Alexandre MARQUET**, docteur de l'Université Grenoble-Alpes en traitement du signal pour les télécommunications (2017), ingénieur de Télécom Bretagne (2014), est ingénieur du spectre à l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR), l'établissement public français en charge de la gestion du spectre. À ce titre, il mène des études de partage et de compatibilité entre services radioélectriques, notamment ayant trait aux technologies mobiles non-cellulaires, mobiles aéronautiques et RADAR. Il participe à l'élaboration et à la défense des positions française sur les enjeux liés au spectre auprès des instances internationales concernées (UIT, CEPT). Avant de rejoindre l'ANFR, il a exercé des activités d'ingénierie (2011-2014) et de recherche (2014-2020) sur divers aspects des télécommunications : courants porteurs en ligne, modulations multiporteuses, radios logicielles, Internet des Objets.

→ ***Aspects juridiques : les fréquences***

**Michel MASSELIN** est vice-président des ventes Stratobus.

Diplômé de Sup'Aéro et de l'University of Southern California, il a occupé de nombreux postes dans l'industrie de la défense, de l'aéronautique et des télécommunications. Il a débuté sa carrière chez Thales en concevant les logiciels des réseaux radio tactiques et après une quinzaine d'année est devenu directeur commercial, pour la France et la coopération européenne, pour tous les systèmes et services de Thales Communications qui comprennent les radios tactiques, les réseaux stratégiques et tactiques, les systèmes de renseignement, les systèmes d'information et la cyber-sécurité.

En 2003, il rejoint Thales Training & Simulation (TT&S), où il est responsable des grandes offres de Partenariat Public Privé pour l'Europe, notamment les offres globales comprenant les développements, les opérations et les financements associés pour les centres de formation sur simulateurs d'entraînement au vol des NH90 allemands et pour l'A400M. En outre, il a également géré d'importants appels d'offres pour l'exploitation de plates-formes aéroportées, tels que les programmes d'hélicoptères de recherche et de sauvetage du ministère de la Défense britannique.

En 2009, il rejoint la division spatiale de Thales, pour prendre en charge l'offre de *sale and lease-back* de Syracuse 3 (constellation française de milsatcom) et, par la suite, de l'offre du satellite Syracuse 4 au ministère de la Défense français.

Depuis 2014, il est principalement responsable du développement commercial et des offres de Stratobus, une nouvelle plateforme à haute altitude, actuellement en développement en Europe.

→ ***Les HAPS (High Altitude Permanent System)***

**Rachid NEDJAR**, inspiré par l'innovation, la *deep tech* et l'international, a démarré sa carrière dans les investissements directs étrangers avant de s'investir dans le conseil à la création et au développement d'entreprises innovantes. Depuis 2021, il officie chez Unseenlabs en tant que directeur marketing pour informer et démontrer toute la valeur des données radiofréquence d'origine spatiale à tous les acteurs de la sécurité maritime.

→ ***Une technologie de rupture pour la détection et la géolocalisation de navires en mer***

**Dorin PANAITOPOL** holds a Joint-PhD Degree in Telecommunications and Signal Processing from both Ecole Supérieure d'Electricité (SUPELEC) and National University of Singapore (NUS). Previously with NEC (from 2010 to 2014), he joined THALES in 2014 as R&D engineer. Since 2010 he has been involved in several European projects such as QoS MOS, SACRA, OneFIT, Concerto, EMPhAtiC (FP7), SHARING (CELTIC-Plus), CORRIDOR (ANR), COHERENT (H2020), ARTES (HELENA) and SNS (6G-NTN). Dorin Panaitopol is currently following 3GPP standard meetings as a standard delegate for THALES, and he is actively involved in RAN4 as moderator and rapporteur of the Technical Specification TS 38.108 for 5G NR Satellite Access Node (5G NR Non-Terrestrial Network).

Since 2020, he submitted more than 350 official technical contributions at 3GPP. His research interests are covering different domains from PHY to MAC and network layers, in the fields of Mobile Communications (e.g. Professional Mobile Radio, LTE Advanced Pro, 5G NR for both Terrestrial and Non-Terrestrial Networks), Cognitive Radio and UWB ad-hoc Sensor Networks, including system architecture, protocol, algorithms and signal processing.

→ ***Convergence of the Telecommunication systems with 5G and 6G***

**Bruno PIGUET** est responsable du département d'observation en altitude de Météo-France. Il est membre du Scientific and Technical Advisory Group (STAC) d'EUMETNET. Ses activités portent sur un large éventail de techniques de mesures, et il est notamment en charge des mesures météorologiques par avions de ligne : point focal national, coordinateur du groupe d'expert sur ce sujet au sein d'EUMETNET, et membre du groupe similaire au sein de l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

Il a précédemment travaillé au Centre de recherche de Météo-France, où il a dirigé l'équipe de traitement des données du Groupe Instrumental et Expérimental (GMED), dont le champ d'action incluait le traitement des données des avions du Service Aéroporté de Recherche en Environnement (SAFIRE).

Il est diplômé de l'École nationale de la météorologie.

→ ***Observer la Terre et son atmosphère pour améliorer les prévisions météorologiques***

**Hervé POSTEC** est, depuis 2013, directeur de la Line of Business Satcom en charge des activités de télécommunications de Telespazio France sur les marchés commerciaux et gouvernementaux.

Diplômé de CentraleSupélec, il a commencé sa carrière en 1994 chez Philips TRT, devenu ensuite CS Télécom, comme ingénieur d'étude dans le cadre du développement des premiers routeurs IP construits en France.

Après 2 années passées au CCETT (centre de recherche commun de TDF et de France Télécom) dans l'industrialisation de logiciels du centre de recherche, Hervé Postec a rejoint en 2000 le secteur des télécommunications spatiales en intégrant Polycom. Dans cette société, filiale de France Télécom et de l'Agence France Presse en charge de la diffusion par satellite de l'ensemble des contenus de l'AFP, il était le chef du service Études et Ingénierie.

À la suite du rachat par le groupe Telespazio de la société Polycom, devenue entre-temps Fileas, Hervé Postec a intégré Telespazio France en 2012 en tant que directeur des Opérations de la Line of Business Satcom.

→ *L'utilisation des systèmes Satcom pour les usages civils et gouvernementaux*

**Pierre PRANDI**, après une formation d'ingénieur et un doctorat à l'université de Toulouse, a rejoint CLS en 2012 comme ingénieur d'études en charge de la validation des données de la mission franco-indienne SARAL.

Après 2017, il travaille sur des problématiques d'inter-calibration et sur le prototypage d'un produit régional de niveau de la mer dans les régions polaires pour le programme Copernicus de l'Union européenne.

Depuis 2022, il occupe le poste de responsable de l'équipe Performance Topographie Océan à CLS. L'équipe est en charge du suivi de la performance et de la stabilité du système d'observation de la topographie océanique par altimétrie radar.

→ *Les satellites altimétriques au service de la mesure du niveau de la mer*

**Pascale ROBERT**, juriste de formation, exerce son expertise technique au sein de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) depuis plus de 30 ans au travers des responsabilités qui lui ont été confiées et qui l'ont amenée à participer à l'élaboration de référentiels de nature réglementaire ou conventionnelle relevant du droit national, européen ou international dans des matières aussi différentes que la gestion de la sécurité, la navigation aérienne, l'exploitation des compagnies aériennes ou les drones.

→ *Régulation des objets volants : une histoire centenaire à l'aube de la révolution digitale*

**Flavien RONTEIX** is graduated of an engineer degree of cybersecurity at the INSA Centre Val de Loire (Bourges, France) in 2019. His master degree subject was the security of the Quic transport protocol. During his cursus, he also studied Artificial Intelligence methods applied to cybersecurity and robotic domains. He holds a master equivalence at the TalTech university (Tallinn, Estonia) in 2019 after studying computer science and IoT. He obtained a PhD degree from IMT Atlantique (Rennes, France) in 2022 with the thesis title "Reducing latency and jitter in the 5G Radio Access Network" and scientific publications at WCNC'21, ITC-33 and VTC'22 conferences. Since 2023, he works at Thales Alenia Space (Toulouse, France) as satcom architect and as 3GPP delegate in radio access network working group for NR NTN and IoT NTN.

→ *Convergence of the Telecommunication systems with 5G and 6G*

**Sébastien SORIANO** est directeur général de l'IGN. L'IGN, Institut national de l'information géographique et forestière, est un établissement public administratif d'environ 1 500 agents, sous la double tutelle des ministères chargés de l'Écologie et de l'Agriculture. Il a auparavant présidé l'Arcep (2015-2020), Autorité de Régulation des Communications Électroniques, des Postes et de la distribution de la presse. Il a été directeur de cabinet de la ministre Fleur Pellerin à Bercy (2012-2014) et œuvré au lancement de la French Tech et du plan France Très Haut Débit.

Son ouvrage « Un avenir pour le service public » (Odile Jacob, 2020) est un appel à réinventer l'État pour répondre aux défis écologique, numérique et démocratique. Sébastien Soriano est ingénieur des mines (2001).

→ *Des cartes pour panser le monde*

**Vincent SATGE** est responsable *marketing* sur les communications par satellite pour les forces armées. Actuellement employé au sein de Thales, il a auparavant exercé en cabinet de conseil de stratégie pour des industries stratégiques (Défense, Aéronautique, Énergie).

→ *Les communications militaires par satellite (MilSatCom) : une nécessité pour le soldat connecté*

**Jean-Philippe TAISANT**, après avoir été diplômé de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier en 1990, rejoint le Centre National d'Études des Télécommunications (CNET) de France Telecom à Issy-les-Moulineaux pour travailler sur les premières constellations de satellites en orbite basse pour les services mobiles. Il participe au groupe de travail sur les constellations de l'opérateur public Inmarsat et représente la France à l'UIT dans le cadre des travaux de normalisation des standards IMT-2000 (3G).

En 1997, il intègre le Centre national d'études spatiales (Cnes) à Toulouse pour lequel il conduit pendant une vingtaine d'années plusieurs projets de R&D dans le secteur des satellites de télécommunications et en particulier le projet FLIP sur les charges utiles numériques et flexibles.

En 2015 il est nommé chef du projet Neosat qui porte le développement des filières européennes de satellites géostationnaires Eurostar Neo et Spacebus Neo. Il est également impliqué dans le développement des segments sols de connectivité Internet par satellite.

En 2019, il est nommé responsable des programmes de télécommunication au sein du Cnes. Il contribue au montage des projets de filières SDS (Software Defined Satellite) OneSat et Space Inspire et devient délégué pour la France au JCB (Joint Communication Board) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

En 2022, il est nommé sous-directeur télécommunication, navigation et infrastructures au sein de la direction de la stratégie du Cnes.

→ *Les satellites*

**Louis TEODORO**, ingénieur de formation, travaille au sein de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) depuis plus de 28 ans.

Il a exercé dans la direction, opérationnelle, des services de la navigation aérienne, la direction du transport aérien, en tant que chef du bureau au sein des sous-directions du développement durable puis de l'Europe et de l'international.

Il est actuellement adjoint au directeur technique de la Coopération européenne et réglementation de sécurité.

→ *Régulation des objets volants : une histoire centenaire à l'aube de la révolution digitale*

**Maël TORCA** a rejoint Unseenlabs en février 2022 en tant que chargé de communication, spécialiste en rédaction et traduction en langue anglaise. Il a suivi des études de lettres en classes préparatoires littéraires (Hypokhâgne et Khâgne Ulm option anglais) à Brest, et est diplômé d'une licence 3 LLCER. Il a ensuite poursuivi ses études en master communication à l'Université Rennes 2.

→ *Une technologie de rupture pour la détection et la géolocalisation de navires en mer*

**Laurent TOUTAIN** est titulaire d'un doctorat en informatique de l'Université du Havre qu'il a obtenu en 1991. Il est professeur à l'école d'ingénieurs IMT Atlantique. Il a travaillé plusieurs années sur IPv6 et a participé à la création du groupe G6 qui rassemble depuis 1995 chercheurs et industriels autour d'IPv6. Ses recherches actuelles portent sur les protocoles et les architectures spécifiques aux besoins de l'IoT.

Il est l'auteur de plusieurs ouvrages sur les réseaux et les RFC. Il est également co-fondateur et conseiller scientifique d'Acklio Company.

→ *Quand le sage montre la Terre*

**Thomas WELTER** est ingénieur diplômé de l'Universität Karlsruhe en Allemagne (1996) et de Télécom SudParis (1996). Il a complété sa formation d'ingénieur en télécommunications par un master en économie numérique et industries de réseaux, délivré par Télécom Paris en partenariat avec l'École Polytechnique, et les Universités Paris-Dauphine et Paris-Saclay (master IREN 2009-2010), ainsi qu'un master en droit

des activités spatiales et des télécommunications, délivré par l'Université Paris-Saclay (master DAST 2017-2018).

Il a débuté sa carrière à la Société Européenne des Satellites (SES) au Luxembourg (1996-1998), puis a travaillé chez Bouygues Telecom (1998-2005) et SFR (2005-2017) en France dans le domaine de la réglementation fréquences.

Depuis 2017, il est le chef du département réglementation et ressources orbite/spectre à l'Agence Nationale des Fréquences, en France.

→ ***Aspects juridiques : les fréquences***