

Contribution de l'Académie des Technologies à l'étude de l'OPECST sur les satellites et les services associés

Propos liminaires

Les activités de service terrestres se différencient des services spatiaux « traditionnels » comme les télécommunications par l'importance de leur segment purement terrestre qui concentre leur valeur ajoutée. C'est pour cette raison que nous proposons de modifier l'objet de la présente contribution en donnant l'indépendance aux services par rapport aux satellites.

Principaux messages

Dans le cadre d'une contribution récente aux activités de l'OPECST sur le thème de la réutilisation des lanceurs, l'Académie des technologies avait insisté sur **l'importance stratégique** qu'il y avait **à disposer et à maintenir en Europe un accès autonome à l'espace**. En effet cet **élément de souveraineté est aussi l'instrument de protection d'une activité industrielle importante, associée à de nombreux emplois et savoir-faire très qualifiés, qui va de la conception à la commercialisation de satellites commerciaux et qui comprend aussi d'autres activités de service** (contrôle des satellites en orbite, exploitation des infrastructures spatiales de télécommunication, de télédistribution, de géolocalisation et d'observation de la Terre), activités qui représentent 20 à 30 fois celle du service des lancements.

La multiplication des capacités et des activités spatiales a rendu possible l'apparition de nouvelles activités de services « terrestres » à usage militaire, et à usages civils variés de nature très commerciale, activités liées à l'observation de la Terre et de son environnement immédiat (terre, océans et atmosphère) ainsi qu'à la géolocalisation. **Ces activités tirent parti de la collecte massive des données issues des satellites et surtout de leur exploitation**, parfois originale et insoupçonnée (l'utilisation des signaux GPS en est aujourd'hui l'exemple « grand public » typique avec l'application Coyote ...), souvent associée à des informations acquises par d'autres voies (hybridation).

En vue de la conférence ministérielle de l'Agence spatiale européenne (ESA) qui se tiendra fin 2019 en Espagne, la réflexion du groupe de travail s'est focalisée principalement sur les services terrestres civils, bien qu'une analyse des services dans l'espace ait été aussi conduite.

En ce qui concerne l'activité des services terrestres civils associés à la **géolocalisation**, la mise en exploitation de Galileo a donné à l'Europe l'autonomie dans ce domaine. Il **convient désormais de s'assurer que le modèle économique attaché à ce système lui permettra d'assurer sa pérennité et son amélioration continue**, conditions nécessaires pour la conquête d'une part de marché significative face aux services concurrents basés sur le GPS américain.

Le **domaine des télécommunications** et celui de **l'observation de la Terre** et de son environnement immédiat **sont** aujourd'hui **les plus prometteurs pour le développement de nouvelles activités de services terrestres civils**.

Dans cette perspective, les capacités déjà démontrées de l'industrie française du spatial sont un **atout**. Le **développement de ces services est donc une opportunité stratégique pour maintenir, voire renforcer la place de cette industrie**.

/ Services terrestres civils de télécommunications

Déjà en place, ils devraient se développer davantage avec l'évolution des technologies et des besoins. La **diffusion de « l'internet haut débit »** par **des constellations de satellites** sera un **complément indispensable au déploiement de la « 5G »**. En effet, la solution satellitaire permettrait la couverture des zones blanches, complétant ainsi les moyens sol de la 5G plus adaptés à des zones à forte densité d'utilisateurs qu'à des zones accidentées ou à faible densité de population.

De nombreuses initiatives privées étrangères sont déjà à l'œuvre pour développer l'internet haut débit grâce à des solutions satellitaires. Face à cette menace pour l'autonomie de l'Europe, il **est important que l'Europe se mobilise et pour cela :**

- **Qu'elle se penche sur ce sujet et se détermine à la fois sur la nécessité de déployer un tel segment satellitaire purement européen ainsi que sur son cadre juridique et réglementaire,**
- **Qu'elle soutienne l'industrie du spatial en l'aidant à être très active et influente dans les instances de spécification de haut niveau de ce segment, de choix des fréquences** (allocation primordiale car une constellation sans fréquence n'a ni valeur, ni utilité) **et de standardisation / normalisation mondiale,**
- **Qu'elle s'assure de l'émergence d'initiatives privées européennes visant à la mise en place de telles constellations et les accompagne par un soutien public pour en favoriser la concrétisation ou se positionne pour une initiative à caractère public.**

/ Services terrestres civils associés à l'observation de la Terre et de son environnement immédiat

L'Europe, avec la mise en place du programme Galileo, a démarré tardivement dans le domaine de la géolocalisation, entraînant un handicap sur les thèmes associés à la géolocalisation. Le groupe de travail considère qu'il n'en n'est pas de même pour celui de l'observation de la Terre et de son environnement immédiat. Dans un contexte où la génération massive de données résultant de l'explosion de la mise en orbite des satellites d'observation de la Terre crée des opportunités à

saisir, **l'Europe a toutes ses chances** (capacités d'observation en place, capacités industrielles compétentes, compétence des équipes de R&D, sources de données à disposition...).

Mais **pour que ces opportunités se concrétisent au profit de l'Europe en priorité, qu'elles attirent les (futurs) entreprises françaises et européennes et qu'elles se développent sur notre territoire et en Europe, trois conditions doivent être remplies :**

- L'existence d'une **garantie crédible de la pérennité du système d'acquisition des données ainsi que de son amélioration continue** (ce système devant sans doute s'apparenter à un « service public »).
- Pouvoir fournir aux entrepreneurs intéressés, dans la mesure du possible et au-delà du simple soutien financier, un **avantage concurrentiel**, par exemple **grâce à des conditions de protection des technologies qu'ils développeront, ou encore grâce à un accès à des données réservées et de meilleure qualité.**
- Disposer d'un dispositif d'accompagnement des *start-up* (c'est souvent ce type de structure qui portent les idées nouvelles, parfois disruptives dans ce secteur d'activités) suffisamment attractif, au-delà de la phase d'amorçage, **pour les aider à croître en Europe et pour éviter la fuite des preuves de concept innovants en empêchant le rachat par des investisseurs étrangers** (comme les GAFAM).

Ceci implique :

- La mise en place d'une **gouvernance** et d'un **modèle économique bien définis, mis en œuvre par une agence étatique gérant un « service public » ou par un opérateur gérant un « service au public »** (ou le premier évoluant vers l'autre).
- Le suivi dans la durée du devenir de ces **opérateurs afin d'éviter que l'Europe n'en perde le contrôle sans l'avoir accepté.**
- **Des efforts de R&D**
 - **Pour faire progresser les performances des capteurs** (amélioration de façon continue de la fiabilité et de la qualité des informations recueillies pour devenir plus précises, pertinentes), **et pour améliorer la chaîne d'acquisition, de traitement des mesures et d'accès aux données, tout en garantissant la continuité du service d'acquisition en orbite.** Ces efforts et les progrès qui en découleront intéressent à la fois le civil et la défense.
 - **Intensifiés, pour comprendre les phénomènes physiques pouvant perturber la mesure utile.** Leurs résultats permettront de mieux définir les capteurs et d'enrichir l'interprétation des données obtenues.
- **La garantie de la disponibilité, dans la durée, des données utilisées par ces nouvelles activités ainsi que des infrastructures utilisées pour les générer.** A ce stade, il apparaît difficile

d'assurer une telle garantie autrement que par le **maintien d'un engagement étatique fort** comme c'est le cas aujourd'hui (**service public ou opérateur privé sous surveillance**).

- **L'établissement d'un cadre juridique et réglementaire adapté et couvrant la mise à disposition des données.** Décidé au niveau européen, il pourrait remettre en question la politique actuelle. L'Europe est en effet favorable à une grande ouverture et transparence des données recueillies par les satellites institutionnels vers tous les utilisateurs potentiels. **Il est possible que cette position évolue avec la mise en place d'une protection de l'accès aux données et/ou d'une priorité d'accès aux européens, priorité pouvant être modulée en fonction de la nature ou de la précision des informations considérées.**
- La prise en considération, dans le cadre d'une réflexion sur une **politique cohérente de protection des données**, de la question du **stockage de ces données sur le sol européen, stockage placé sous strict contrôle européen.**

Nouveaux services terrestres civils issus du Spatial

Courte synthèse

La **problématique des services terrestres civils issus du Spatial** peut se résumer ou se décrire en **3 volets** :

1^{er} volet : Des technologies de pointe en amont

2nd volet : Un système (satellites et sol) qu'il faut établir et gérer

3^e volet : Un écosystème qui concrétise au sol la valeur ajoutée

Si l'Europe veut pleinement profiter, ou au moins prendre sa part, de la valeur générée par ces services, elle doit être très présente sur ces 3 volets.

- L'Europe est globalement au niveau sur le 1^{er} volet.
- Elle doit et peut mieux faire sur le 2nd volet.
- Beaucoup reste à faire sur le dernier volet du triptyque.

La situation observée sur les 2 derniers volets est affectée par les politiques et la gouvernance très complexes de l'Europe spatiale.

Si cette situation n'évolue pas, il est à craindre que l'Europe ne profite pas pleinement des bénéfices économiques attendus de l'investissement consenti.

L'intérêt et l'importance « stratégiques » socio-économiques de ces secteurs doivent être pris en compte comme tels dans les processus d'élaboration des orientations et des décisions européennes.

Bien que le thème principal de cette contribution soit celui des services terrestres civils liés au spatial, il est important de **souligner l'aspect très dual des activités spatiales** en général et de celles liées à l'observation de la Terre en particulier ou à la géolocalisation. Du fait d'une part de la militarisation observée du monde spatial et d'autre part de la forte dualité de l'activité d'observation de la Terre et de ses progrès, le thème des relations entre programmes à caractère de défense et programmes civils mérite un examen approfondi, tout particulièrement dans le cadre européen du fait de sa complexité.

Contexte et cadrage de la contribution

L'OPECST a demandé à l'Académie des technologies son point de vue sur les satellites et les services associés. Ce thème étant très vaste, les experts du domaine au sein de l'Académie (voir composition du Groupe de Travail en annexe - 1) se sont focalisés sur :

- **L'activité commerciale en orbite** et l'analyse des potentialités qu'elle recèle (chapitre 1) ou qu'elle induit en matière de services terrestres civils, dans les **trois domaines principaux** que sont les télécommunications (1.2), l'observation de la Terre (1.3) et la géolocalisation (1.4) ;
- Les **nouveaux services envisageables** dans l'espace (chapitre 2) autour de l'assistance aux satellites en service (2.1) et de l'assistance au retrait du service (2.2).

Le Groupe de Travail a aussi considéré que, bien qu'officiellement démilitarisé, l'Espace est un domaine essentiellement dual. Ainsi, les priorités des domaines de la défense, de la sécurité et de la souveraineté sont aussi présentées (chapitre 3).

Le Groupe n'a pas abordé sur le fond les domaines de l'exploration de l'espace ou de la science dans l'espace. Il convient toutefois d'insister sur le fait que, bien que ne représentant qu'une très faible part du volume d'activité escompté grâce aux 3 domaines traités, la science et l'exploration associées aux priorités de la défense, jouent un rôle très important pour le développement et la maîtrise des capacités techniques et industrielles nécessaires à la mise en place des infrastructures utilisées, en particulier celles d'observation.

Que ce soit pour le développement de l'activité commerciale existante et à venir, ou pour répondre aux objectifs dans le domaine de la défense, de la sécurité et de la souveraineté, des pistes sont évoquées, en matière de R&D à mener, de capacités spécifiques en orbites à acquérir, et de technologies clés à développer.

Afin d'obtenir que la France et l'Europe confortent leur place dans l'activité de services terrestres associés à l'espace, il importe que les politiques publiques française et européenne s'y intéressent pour proposer aux entrepreneurs des conditions leur permettant de développer un avantage concurrentiel sur ces territoires. Le Groupe de Travail s'est interrogé sur ces conditions (chapitre 4).

Enfin, pour les différents aspects abordés, le Groupe de Travail propose aussi à l'OPECST un certain nombre de questions importantes pour lesquelles des réponses, ou compléments de réponses hors de ce cadre, présenteraient un intérêt certain grâce à une expertise plus large. Certaines de ces questions pourraient être posées par l'Office à d'autres experts du domaine mais aussi à des acteurs industriels du numérique et plus spécifiquement des spécialistes du traitement et de l'exploitation de données massives (sans se limiter à des spécialistes du « Big Data »), des opérateurs non télécom, ainsi que des spécialistes des tractations actionnariales dans le domaine des télécommunications, qui seraient auditionnés dans le cadre de cette étude. Ces questions sont regroupées en annexe - 5.

Introduction

En posant un robot d'exploration sur la face cachée de la lune, **la Chine a confirmé sa capacité à maîtriser toutes les composantes des activités spatiales** et s'affirme comme un acteur mondial majeur de ce domaine. A côté d'une Russie qui conserve des capacités certaines mais ne semble plus vouloir se placer en challenger des Etats-Unis, c'est désormais la Chine qui occupe cette place.

Cette démonstration est sans doute une des raisons qui ont poussé le Président Trump à relancer la course au retour à la Lune en affichant clairement sa **volonté de montrer que les USA restent les leaders incontestables**. Dans la même séquence, le ministre américain du Commerce, Wilbur Ross, remettait au Président Trump un rapport exhortant à la révision de la **politique actuelle en matière d'allocation de fréquences** face à la perspective de la démultiplication de satellites placés en orbite terrestre (aux USA et donc à l'échelle mondiale).

Il commentait ses conclusions en déclarant :

"Une industrie satellitaire saine, équipée d'un accès suffisant au spectre de fréquences, est vital pour la compétitivité mondiale (...) des Etats-Unis", soulignant en outre l'importance qu'il y aurait à protéger les réceptions et les émissions de données d'*"interférences dangereuses"*,

et en précisant :

"Les systèmes satellitaires tels que le GPS s'appuient sur la réception de signaux faibles provenant de l'espace. La réception de ces signaux peut être difficile en présence de signaux provenant d'autres services de communication (terrestres ou spatiaux) qui opèrent dans le même spectre ou dans un spectre voisin".

Il existe aujourd'hui deux pays, les USA et la Chine, qui maîtrisent toutes les composantes dans le domaine des activités et des infrastructures spatiales (lanceurs, vols humains, missions robotisées, géolocalisation, observation de la Terre...). Ils ont tous les deux la ferme intention d'exploiter ces capacités tant au plan politique (élément de *soft power*) qu'au plan commercial (lancements et autres services associés).

D'autres pays possèdent des capacités significatives dans les activités du Spatial (Russie, Europe, Japon, Inde, Israël ...) mais aucun ne semble aujourd'hui en situation de défier globalement les deux champions.

L'Europe, malgré des dépenses dans ce domaine 6 fois moins importantes que celles des USA, occupe aujourd'hui des positions très significatives sur certains postes (télétransmission, télédiffusion, observation de la Terre par exemple). Face aux deux « géants », l'Europe aura fort à faire si elle veut garder les positions acquises et profiter pleinement de la période qui s'annonce avec le développement de nouveaux services et marchés à conquérir, opportunités rendues possibles grâce à l'évolution des moyens satellitaires.

1. Espace et services commerciaux

Après la période des rêves avortés, envisageant par exemple l'installation d'usines en orbite pour profiter des avantages de l'absence de gravité, **l'activité commerciale en orbite s'est concentrée essentiellement sur 3 domaines : Télécommunications - Observation de la Terre - Géolocalisation.** Avant d'aborder ces domaines de services en détail, quelques éléments importants de l'environnement de ces activités sont rappelés. Ils concernent le socle industriel et organisationnel sur lequel elles reposent ainsi que les grands types d'orbites terrestres qu'elles utilisent.

1.1 Rappel : Industrie française et opérateurs européens

Avec un effectif d'environ 15 000 emplois directs, dont une forte majorité d'ingénieurs et cadres (2/3), et un chiffre d'affaires de 8 milliards d'euros, dont 2 milliards pour le spatial militaire (GIFAS¹ 2017), la **filière spatiale française** se présente en **leader européen** ayant la **capacité d'apporter aux entrepreneurs créateurs de nouveaux services le soutien en technologies et en infrastructures dont ils auront besoin.**

C'est grâce à la continuité et à la clairvoyance de la politique spatiale française au cours des 50 dernières années que la France a pu acquérir, avec des moyens « raisonnables », cette position de **leader européen**, crédible sur la scène mondiale. Rappelons que le budget consacré par la France aux activités spatiales est le 2^e budget le plus important au monde, de 35 € / an / habitant, après les USA (50 € / an / habitant). Seuls **deux maîtres d'œuvre européens** (Thales Alenia Space et ADS) sont **présents, avec des positions de leader sur le marché mondial des satellites commerciaux**, en télécommunications ou en observation optique, **grâce au marché export.**

Mais si l'activité et les services utilisant les possibilités offertes par l'espace se sont développés et se développent toujours d'une façon très importante, **le marché du « matériel » spatial est, lui, extrêmement réduit en comparaison avec les marchés grand public ou militaire.** Les satellites restent en effet très majoritairement développés à l'unité (prototypes), malgré une politique « produit » pour des plateformes et charges utiles, ainsi que des constellations qui restent aujourd'hui des cas spécifiques isolés.

Cette situation appelle plusieurs commentaires :

- Les décisions européennes prennent du temps ;
- Le secteur satellitaire a des exigences spécifiques très fortes :
 - Fiabilité demandée importante (durées de vie longues, 10 à 15 ans sans possibilité de réparation),
 - Environnements radiatif et thermique (absence d'air) difficiles.

¹ GIFAS : Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales, rapport annuel 2017/2018

qui conduisent à des durées de développement et de « qualification » longues avant utilisation (expliquant d'ailleurs un certain retard pour utiliser les données acquises par rapport aux autres systèmes de type terrestre),

- Le volume de production est limité.

Pour ces raisons, la rentabilité de ces investissements, par ailleurs indispensables au développement des services, est longue à se révéler et difficile à établir. Cette situation s'apparente à celle des infrastructures de service public, **ce qui explique que ce secteur doit rester sous la « protection » (a minima sous la vigilance) de la puissance publique.**

Dans un environnement mondial très concurrentiel, il est important que le processus de décision politique soit suffisamment rapide et que les orientations soient suffisamment précises.

En plus de 40 ans, l'Europe spatiale s'est investie sur un grand nombre de programmes (météo, télécommunications, surveillance des océans, observation de la Terre ...), **aboutissant de fait à la création, puis à l'exploitation de « systèmes »** (satellites, centres de contrôle, organismes de distribution...) traitant de thèmes variés (météo, géolocalisation...) et pouvant, **pour** la plupart, **rendre service au public**. Après la phase expérimentale, la solution adoptée a souvent consisté à charger une organisation spécifique de l'exploitation du dispositif complet préalablement mis en place par les Agences. Dans un certain nombre de cas, cette organisation a vu son statut évoluer, pouvant aller jusqu'à la forme d'une société de droit privé indépendante (cf. : **encart n°1**). D'autres schémas juridiques ont pu être utilisés : initiative privée dès le départ ou maintien d'un statut d'organisation étatique par exemple.

Encart n°1 : Du service public au service au public

L'aventure EUTELSAT – une illustration de la maturation et de l'évolution des structures de gestion des grands programmes européens.

EUTELSAT est une société anonyme de droit français.

Créée en 1977 en tant qu'**Organisation InterGouvernementale (OIG) dans le but d'améliorer le réseau téléphonique européen**, son activité principale consiste aujourd'hui à gérer la **télédiffusion par satellites de chaînes de télévision** et stations de radio.

En 2001, EUTELSAT a été privatisée et est devenue une société anonyme de plein droit qui doit toutefois respecter certains principes dont ceux définis dans la Convention amendée d'EUTELSAT.

EUTELSAT gère actuellement 39 satellites offrant une couverture sur toute l'Europe, le Moyen-Orient, l'Afrique, l'Inde, l'Asie et sur de larges zones du continent américain,

EUTELSAT est l'un des trois premiers opérateurs mondiaux de satellites en termes de chiffre d'affaires.

Une liste non exhaustive d'opérateurs est fournie en annexe 2. Elle permet de se rendre compte de la variété des historiques et des situations actuelles. L'analyse de ces exemples montre aussi que le **risque de voir des opérateurs, mis en place à la suite d'un programme européen, être rachetés par des investisseurs étrangers** n'ayant pas forcément les mêmes priorités que l'Europe, **existe** et doit être pris en compte afin de surveiller et éventuellement d'aider ces acteurs majeurs

de l'autonomie de l'Europe dans ces domaines à subsister et à accomplir correctement leur mission au **service prioritairement de l'Europe**.

1.2 Rappel : Orbites terrestres « utiles » et grands services

Deux types d'orbite sont bien connus du grand public, les orbites dites basses (domaine au voisinage de la Terre où se situe en particulier la station spatiale internationale et le télescope Hubble) et l'orbite géostationnaire car Ariane y dépose fréquemment des satellites. C'est aussi cette orbite que l'on vise avec les paraboles de réception de télévision.

En fait, hors missions spatiales scientifiques, il y a **4 grands types d'orbites** autour de la Terre :

- **L'orbite circulaire géosynchrone : altitude h à environ 36 000 km**
Elle est située au-dessus de l'équateur de la Terre (voir aussi **encart n°2**).

Encart n°2 : origine du nom de l'orbite circulaire géosynchrone

Si la vitesse nécessaire pour rester en orbite basse autour de la Terre est d'environ 8 km/s (soit environ 1 heure et demi pour faire son tour), cette vitesse diminue avec l'altitude et à environ 36 000 km d'altitude, il faut 24 heures pour effectuer un tour complet de la Terre ce qui permet, si l'on se place à l'équateur et en tournant en phase avec la rotation terrestre, de paraître immobile au-dessus d'un point de l'équateur, d'où le nom de « **géostationnaire** » ou plutôt « **géosynchrone** » car le satellite n'est pas stationnaire.

Différentes stratégies d'accès à cette orbite existent. Elles sont détaillées en annexe - 3. Certains satellites Sentinel du programme européen COPERNICUS y sont présents.

Cette orbite est celle qui a vu l'avènement puis le développement de l'utilisation de l'espace pour des services commerciaux avec essentiellement, après de grands espoirs placés dans les télétransmissions point à point, espoirs déçus, la **télédiffusion de la télévision**. Elle est **aussi utilisée pour l'observation météorologique et pour la détection d'événements graves** (tels que les explosions, les éruptions volcaniques ou les départs de missiles par certains pays).

- **L'orbite MEO (Medium Earth Orbit) : $14\ 000\ \text{km} < h < 20\ 000\ \text{km}$ (environ).**
C'est le **domaine des constellations de localisation** : GPS ($h = 20200\ \text{km}$, 12h de révolution, inclinaison de 55 degrés, constellation de 24 satellites répartis sur 6 plans orbitaux) ; Galileo ($h = 23222\ \text{km}$, inclinaison de 56 degrés, 24 satellites répartis sur 3 plans orbitaux).
- **L'orbite circulaire héliosynchrone SSO (Sun-Synchronous Orbit) : $600\ \text{km} < h < 1200\ \text{km}$ (environ) (voir aussi **encart n°3**).**
Cette orbite est massivement utilisée pour l'observation de la Terre.

L'Europe (et la France) est très présente, historiquement, avec de grosses plateformes² comme les SPOT, ENVISAT, METOP et désormais, au titre du programme européen COPERNICUS, avec les satellites Sentinel de masse plus réduite.

Encart n°3 : Quelques précisions sur l'orbite SSO

Son inclinaison³ est quasi polaire et le plan de son orbite tourne à chaque tour afin de rester dans l'axe du soleil et ainsi d'obtenir un éclairage des scènes terrestres assez stable qui favorise les prises de vue optiques dans des conditions peu variables à une latitude donnée. L'orbite choisie (temps de parcours d'environ 6h ou 12h) permet, en limitant fortement le passage à l'ombre de la Terre, de simplifier la conception des satellites. Par contre, la bande de terre observée étant de largeur limitée, le balayage global de la Terre nécessite que le plan de l'orbite se décale un peu à chaque tour par rapport à la Terre, selon les capacités de dépointage de l'instrument ou du satellite (une fois tous les 16 jours pour LANDSAT ou tous les 2.5 jours en moyenne pour SPOT).

▪ **L'orbite basse LEO (Low Earth Orbit) : $400 \text{ km} < h < 1500 \text{ km}$**

Dans la partie haute cette orbite répond aux exigences de bilan de liaisons des terminaux terrestres avec les **satellites de télécommunication directe** : **IridiumNext** qui remplace Iridium ($h = 780 \text{ km}$, inclinaison de 86.4 degrés, constellation de 81 satellites dont 66 en service répartis en 6 plans orbitaux de 11) ; **Globalstar** ($h = 1410 \text{ km}$, 1^{ère} et 2^e génération, inclinaison de 52 degrés, 6 satellites répartis sur 8 plans orbitaux) ; **Orbcomm** (1^{ère} génération de 36 satellites répartis sur 6 plans orbitaux, 2^e génération de 18 satellites) ; **Oneweb** en cours de mise en place en orbite ($h=1200 \text{ km}$) ou encore **Starlink** ($h = 450 \text{ km}$ pour les 60 1^{ers} satellites lancés, pour à terme gagner des orbites entre 550 km et 1200 km). On y accède par injection directe ou par transfert depuis une orbite intermédiaire (920 km pour Soyouz).

Dans la partie basse, c'est aussi **le domaine des vols humains et de l'observation rapprochée de la Terre**.

C'est dans cette zone que sont apparus les « petits satellites » (dont Oneweb et Starlink). Le concept de petit satellite a émergé récemment dans le monde du Spatial. Ce concept, rendu possible grâce à la miniaturisation de l'électronique, et qui faisait espérer des coûts réduits pour la mise en orbite d'expériences (en particulier pour le lancement), a été développé à l'origine par des centres de recherche universitaires et soutenu par les Agences. Ce même principe est désormais proposé comme base architecturale de vastes constellations (cf. **encart n° 4**).

² Les satellites sont constitués d'une plateforme sur laquelle il y a toutes les fonctions d'accueil (génération de l'électricité, contrôle de la température...) ainsi que des instruments particuliers.

³ Angle décrit par l'orbite par rapport à l'équateur de la Terre, sachant que la ligne équatoriale est à une inclinaison de 0 degré.

Encart n°4 : Les « petits » satellites

Derrière ce nom générique se cachent des objets très différents tant par leur conception que dans leurs applications. Cette appellation couvre en effet différentes catégories allant des petits satellites (de 100 à 500 kg), aux pico satellites (de masse inférieure à 1kg) en passant par les mini (10 à 100 kg) et les nano (1 à 10 kg).

Les applications envisagées vont des télécommunications pour la gamme la plus élevée jusqu'à de l'expérimentation de recherche pour les plus petits en passant par l'observation terrestre.

Leur abondance et leur rusticité pourraient devenir un sujet de préoccupation du fait de la « pollution » des orbites basses qu'elles pourraient induire (cf. **encart n°9**).

Pour être complet il ne faut pas oublier **les orbites très elliptiques**, de type Molnya (altitude min/max de l'ordre de 1000 et 35 000 km) qui, en jouant sur la différence des vitesses de défilement entre la haute et la basse altitude, permettent d'assurer une présence visible utile 8h par jour (3 satellites sont ainsi nécessaires pour assurer une couverture totale). Ces orbites ont été utilisées pour les télécommunications au-dessus de la Russie car elles fournissent une bonne couverture des latitudes élevées. Mais **leur utilisation est, à ce jour, très limitée**.

1.3 Les télécommunications

Imaginé à l'origine principalement autour des **transmissions intercontinentales téléphoniques**, ce marché « historique » des satellites s'est essentiellement développé autour de la **télédiffusion directe** (*Direct To Home* ou *Direct Broadcast Satellites*).

En effet, pour la **télétransmission, initialement envisagée** dans un rôle de relais point à point **visant à concurrencer les câbles téléphoniques intercontinentaux**, c'est essentiellement **l'orbite géostationnaire qui est utilisée**. Mais le **délai de latence** entre la Terre et l'orbite géosynchrone (environ **0,4s** aller-retour) s'est révélé **une limitation** dans le domaine des télécommunications rapides **du fait de l'inconfort** ressenti par les utilisateurs. **En raison de la concurrence des câbles** (dont les capacités de débit ont rapidement augmenté), le **rôle de l'espace dans la téléphonie est resté très limité**.

Sur la quarantaine d'années écoulée, ce **marché** a été **caractérisé par** :

- Une place très faible prise par les **télécommunications** par comparaison à celle prise par la **télédiffusion**.
- Une prépondérance écrasante de l'usage de l'orbite géosynchrone.
- Une augmentation progressive de la complexité de la masse (triplement de la charge utile) et de la puissance moyenne de ces satellites géostationnaires (charges utiles plus flexibles, puissance embarquée atteignant ou dépassant 20 kW).

- Un marché annuel d'environ une vingtaine de satellites placés en orbite géostationnaire (en moyenne), mais en forte diminution depuis 2015 pour atteindre moins de 10 satellites actuellement (chute provoquée par l'indécision d'investissement des opérateurs face à l'évolution de la demande (VOD), l'arrivée de nouvelles constellations et l'enchaînement des ruptures technologiques).
- L'émergence dans ce domaine d'acteurs clefs d'origine européenne (SES, EUTELSAT...). Publiques à l'origine, certaines de ces organisations ont évolué vers un statut d'opérateur privé d'envergure mondiale.
- Plusieurs systèmes de télécommunication exploitant des constellations de satellites de taille moyenne (quelques centaines de kilos) placées sur des orbites basses et moyennes ont été développés et sont aujourd'hui exploités commercialement. Le succès économique n'a pas été systématiquement au rendez-vous, les solutions sol (réseaux mobiles GSM, 3G, 4G, fibre optique...) ayant asséché le marché avec des solutions moins chères et moins complexes. Les acteurs restant (Globalstar, IridiumNext, O3B...), dont les constellations ont été développées par l'industrie franco-italienne Thales Alenia Space, répondent à des marchés très spécifiques (communications en zones isolées, confidentialité, couverture des besoins maritimes ...).

Aujourd'hui le **marché des satellites de télécommunications** commerciaux correspond à **environ 40% du marché** satellitaire **européen** et ne capte qu'une très petite part des télécommunications au niveau mondial.

Cette répartition des parts de marché pourrait être remise en question, d'une part par l'évolution de la consommation d'images banalisée et « à la demande » - concept « Over The Top », d'autre part par la demande croissante d'accès à Internet à haut débit, et enfin grâce à de nouvelles technologies (plus hautes fréquences, transmissions optiques ...).

De ce fait on assiste aujourd'hui à l'émergence de nouveaux projets de constellations pour répondre à ces nouveaux besoins globaux (**OneWeb** - projet de méga constellation de l'ordre de 648 satellites pour une couverture globale de la Terre qui serait opérationnelle à partir de 2020, sur orbite polaire ; **Starlink** - projet de constellation de 12 000 satellites, dont une 1ere partie a été mise en orbite terrestre basse le 23 mai dernier, qui serait également opérationnelle à partir de 2020. **Telesat** – orbites LEO polaires et inclinées, constellation de l'ordre de 300 satellites, diffusion *broadband* de plusieurs téraoctets, 2 satellites prototypes Leo Vantage déjà lancés entre novembre 2017 à 997-1002 km d'altitude et janvier 2018 à 494-506 km d'altitude).

En effet, dans cette situation, la **solution satellitaire par constellation en orbite basse met en avant** les **avantages** essentiels suivants :

- Une capacité à délivrer un service sur l'ensemble du globe dès la mise en opération de la constellation des satellites (pouvant nécessiter la présence d'un relais).
- Une capacité à fournir du haut débit, voire du très haut débit.

- Un faible impact environnemental sur Terre (absence de tranchés et de pylônes).
- Une approche incrémentale, avec un effet de seuil important, de la capacité qui peut être augmentée en fonction du besoin.
- En France, un coût de connexion jusqu'à 4 fois moindre par rapport à la fibre dans les zones peu denses (**1000 € pour le satellite par rapport à 4000 €** en moyenne pour la fibre pour connecter les 5 derniers pourcents de la population française ne l'ayant pas - c'est-à-dire 1,5 millions de foyers ; à noter que le coût d'accès à la fibre augmente de manière exponentielle pour les tous derniers foyers à raccorder).
- Un coût de service constant pour tout utilisateur indépendamment de sa localisation géographique (proche ou loin d'un bourg, en plaine ou en montagne).

Ces 2 derniers points en font une **solution à considérer très sérieusement afin de réduire, ou même d'éliminer, une fracture numérique qui aura tendance à augmenter avec la 5G terrestre** (du fait de la portée plus limitée des antenne relais).

Devant les probables réticences des opérateurs terrestres de télécommunications à investir les sommes très importantes nécessaires pour assurer la couverture totale des territoires où ils opèrent, **l'option satellitaire**, venant en complément des solutions terrestres utilisées pour la majeure partie des utilisateurs, est probablement **la bonne solution pour assurer la couverture des « zones blanches »** (connexion de 600 000 à plus de 1 million de foyers à partir de 2022). Mais, les opérateurs terrestres qui sont des sociétés à caractère « régional » pourront-ils s'entendre avec les opérateurs spatiaux, qui sont, du fait de l'usage et de la nature des constellations, des sociétés à caractère « mondial/global » ? Des tentatives d'accord sur un complément espace-sol existent (ex. accord signé en 2018 entre Eutelsat, Orange et Thales). Iront-elles au bout ? L'utilisateur / le client quant à lui souhaitera certainement une solution « sans couture ».

Pour des raisons évidentes de protection de la confidentialité des échanges réalisés par cette voie et de souveraineté, il n'est probablement pas envisageable qu'une telle fonction (la couverture des zones blanches) puisse être assurée par un opérateur étranger, américain ou chinois. Il est donc souhaitable qu'une telle solution soit bien totalement européenne (ou au moins sous contrôle européen). Dans ce cas le scénario « Eutelsat » pourrait être repris, investissement initial à caractère public, puis transition vers un opérateur privé en charge du maintien et de l'évolution du système sur la durée.

Sur le marché global des télétransmissions, deux difficultés pourraient limiter les ambitions des acteurs :

- La **viabilité économique de ces constellations n'est pas démontrée** à ce jour.
- Les **besoins additionnés des opérateurs terrestres et des constellations en grand nombre pourraient dépasser les disponibilités physiques en bandes de fréquences porteuses** ou

interférer fortement avec d'autres services (géolocalisation par exemple). Or une constellation sans fréquence a une valeur nulle et est sans utilité. Une forte présence et un soutien politique dans les instances qui répartissent / attribuent les fréquences sont donc importants.

Il convient aussi de rester prudent sur la validité des hypothèses de marché prises en compte dans les « *business plans* » affichés (cf. : faillite d'Iridium, de Globalstar...).

Ces constats amènent à se poser plusieurs questions :

- Les services de télécommunication point à point utilisant l'orbite géostationnaire ont été essentiellement écartés de tout marché (pour la raison exposée précédemment). Une évolution des besoins ou des technologies pourrait-elle induire un regain d'intérêt pour cette orbite ?
- Les opérateurs terrestres qui promeuvent la « 5G » vantent les possibilités de cette technologie, technologie qui permettrait de distribuer, outre l'Internet haut débit et la téléphonie (suivant le protocole), un nombre incalculable de chaînes de télévision HD. Est-ce la fin des paraboles et de la télédiffusion depuis l'orbite géostationnaire ou bien ce service pourrait-il se maintenir du fait des intérêts que pourraient présenter sa simplicité d'infrastructure terrestre (les paraboles) et son extraterritorialité ?
- Les opérateurs terrestres qui ne semblent pas prêts à faire les investissements nécessaires pour couvrir correctement les zones à faible densité de « clients » et qui sont des sociétés à caractère « régional » pourront-ils s'entendre avec les opérateurs spatiaux, qui sont des sociétés à caractère « global » ? La solution pourrait résider soit dans une politique de prix correcte de la part des opérateurs « spatiaux » soit dans la création de « consortiums » d'opérateurs terrestres couvrant ensemble une grande partie des terres et pouvant ainsi avoir besoin d'opérer un système satellitaire global.
- Compte tenu de l'usage actuel déjà important des fréquences, des intérêts souvent différents des opérateurs terrestres et spatiaux de télécommunications et de la volonté de certains pays de privilégier leur pays et leurs opérateurs, serait-il judicieux de prévoir que les projets de ces constellations intègrent, dès la phase d'avant-projet, la capacité de travailler dans plusieurs gammes de fréquences et celle de commuter en fonction de la zone géographique ?
- Le marché de masse étant limité à une proportion faible de la surface terrestre (< 20%), comment peut-on envisager d'obtenir une bonne rentabilité des investissements réalisés en orbite basse compte tenu de leur faible taux d'utilisation comparé à celui des investissements nécessaires à une solution terrestre (au moins dans les zones denses)?

En conclusion

Dans un environnement extrêmement mouvant, incluant l'avènement prévu de la 5G, qui ambitionne de couvrir une large majorité des besoins de télécommunication et de télédiffusion

terrestres, **la place des satellites commerciaux de télécommunications (y compris la télédiffusion directe) reste à définir et pourrait se limiter à des marchés de niche comme c'est le cas aujourd'hui.**

Au vu de l'importance du marché mondial des télécommunications, la présence dans **cette niche reste une cible intéressante** pour le maintien de l'industrie européenne dans son positionnement mondial.

C'est aussi **la solution la plus probable au problème des zones blanches**, sous la forme **d'une hybridation des solutions terrestres avec un segment complémentaire spatial.**

Pour ces raisons, comme cela a été le cas au début de l'ère des satellites de télécommunication, ou pour le programme Galileo, l'Europe doit avoir une attitude volontariste pour développer et mettre en opération un **système de télécommunication en orbite basse purement européen** car il n'est pas envisageable de se reposer, pour traiter le sujet des zones blanches, sur des solutions étrangères actuellement en développement hors Europe, qu'elles soient américaines ou chinoises.

Il est donc **urgent** qu'une **décision soit prise sur l'intérêt pour l'Europe** (où les technologies nécessaires existent)

- De **développer et d'opérer un tel segment satellitaire et de définir dans quel cadre juridique et réglementaire** il pourrait être opéré,
- **D'encourager l'émergence** en Europe **d'initiatives privées** de type « Skybridge » **et de les accompagner** par un soutien financier pour relever ce défi.

1.4 L'observation de la Terre

L'observation de la Terre depuis l'espace et l'aide à la prévision météorologique ont fait partie des toutes premières activités réalisées en orbite, d'abord avec de simples appareils photos, puis par des appareils permettant de sélectionner des longueurs d'ondes d'observation particulières. **La prévision météorologique** (à la différence de l'observation en général ou des besoins de la climatologie) **n'apparaissant pas comme un driver de l'évolution du domaine de l'observation, seuls quelques rappels** sur ce thème sont présentés **dans l'encart n°5.**

Les champs d'application de l'imagerie spatiale sont très variés (cartographie des jachères pour attribution des subventions européennes, surveillance maritime, environnement...) et concernent la plupart des secteurs d'activité depuis la ville intelligente jusqu'à l'environnement et l'agriculture (voir annexe - 4).

Encart n°5 : Le cas particulier de la météorologie

L'intérêt d'améliorer les prévisions météorologiques grâce au spatial a été perçu dès l'origine dans les années 60. Les simples photos fournies à l'origine ont rapidement fait place à des informations plus riches mais ont surtout abouti à une évolution majeure des techniques de prévision en apportant une vision systémique des phénomènes météorologiques. Malgré une utilisation désormais courante et une exploitation terrestre importante, ce domaine est toujours **l'apanage de satellites « institutionnels »**, sans doute du fait de leur faible nombre.

L'application des satellites au domaine de la météorologie a abouti à une solution partageant les opérations entre deux orbites (géostationnaire et basse) :

- Utilisation d'une série de satellites en **orbites géostationnaires** (MSG, MTG) formant une ceinture autour de la Terre et permettant des prises de vue en visible proche, Infra Rouge et Infra Rouge thermique avec une **couverture globale très fréquente** mais avec une résolution moyenne (de l'ordre du km),
- Complétée par des satellites (matin et soir) METOP et NOAA en **orbite basse** permettant d'obtenir des **images plus précises et des sondages atmosphériques**, complétant ainsi les mesures des constituants de l'atmosphère.

Les deux types d'orbites permettent d'obtenir des services différents :

- Grande répétitivité sur une large zone en imagerie pour l'orbite géosynchrone,
- Haute résolution mais répétitivité de passage plus faible pour l'orbite basse, sauf si l'on multipliait le nombre de satellites en mettant en place une constellation.

Ce domaine a fait au départ l'objet de compétitions entre les grands acteurs (Russie, Etats-Unis et Eumetsat) pour faire place désormais à un plus grand partage des données entre les différentes sources (y compris chinoises).

Des **évolutions sont encore possibles** dans le domaine de la météorologie grâce à de nouveaux capteurs spécifiques à cette application. Dans ce marché institutionnel limité, deux possibilités sont envisageables pour l'évolution du système : soit l'intégration des capteurs météo à bord des **grosses plateformes d'observation de la Terre** afin de réduire le coût de l'infrastructure et de bénéficier de la simultanéité de l'ensemble des mesures, soit une spécialisation à l'extrême des plateformes (une par capteur) afin de limiter les conséquences d'une panne élémentaire.

Pour ces utilisations variées, la simple « photographie » n'est plus suffisante car elle nécessiterait un gros travail d'interprétation. Aussi, de nouveaux capteurs ont été développés. Outre les caractéristiques des capteurs utilisés, deux propriétés des moyens de la « chaîne d'observation », du sujet observé à la donnée fournie, sont à la base de ce qui pourra être créé à partir des données recueillies. Il s'agit de la « résolution » du dispositif d'observation (cf. **encart n°6**) d'une part et de la « qualité » de la donnée obtenue (cf. **encart n°7**) d'autre part.

Encart n°6 : Résolution en observation spatiale

La résolution spatiale est une grandeur à la fois simple et complexe que beaucoup utilisent pour comparer les systèmes d'imagerie. C'est au premier ordre la taille du plus petit pixel de l'image. Dans les années 80, les satellites civils SPOT avaient une résolution de 10m puis 2,5m dans les années 90. Aujourd'hui Pléiades rééchantillonne ses images à 0,5m et les images civiles à 25cm sont autorisées de diffusion. Au-dessous de 10cm de résolution, une image obtenue depuis l'espace n'a plus de sens du fait de la distorsion atmosphérique.

Aujourd'hui, en parallèle des capteurs optiques couramment embarqués, on assiste au développement de **nouvelles voies d'observation de la Terre et de son atmosphère** depuis l'Espace, rendues possibles grâce à de nouveaux capteurs embarqués sur les satellites : radars, lidars, capteur Hyperspectral, Synthèse d'ouverture. L'objectif n'est plus l'image mais la mesure à distance des caractéristiques physiques intéressantes pour fournir des « données » (cf. : **encart n°7**) qui peuvent ensuite être utilisées pour, par exemple, faire des prévisions de récoltes.

Encart n°7 : De la réalité à la donnée, en passant par la mesure

L'intérêt et la quantité des données recueillies par les satellites sont des caractéristiques qui ont été souvent mises en avant pour le potentiel très positif qu'elles porteraient en elles. Révéler ce potentiel n'est cependant pas une tâche facile.

L'appellation d'une « donnée » fait souvent référence à une grandeur physique précise, comme la « température de surface de l'océan ». Sur cet exemple, même si la télédétection est très performante, elle ne permet pas de faire, à 700 km de distance, aussi bien qu'une mesure *in situ*. Elle se contente donc d'observer depuis l'espace un « effet » de la température de l'eau, par exemple la valeur du rayonnement de la surface dans une ou plusieurs gammes de fréquence (mesure passive). C'est ce « signal » qui va cheminer à travers l'atmosphère et l'espace pour être observé et **mesuré** par le capteur du satellite.

La conversion du résultat de cette mesure en valeur de température nécessite donc une bonne connaissance des conditions physiques (et chimiques) de la surface, qui pourraient en affecter l'émissivité, puis de celles de l'atmosphère qui pourraient affecter le signal durant sa traversée. De plus, la mesure s'opérant à 7 km/s, la **dynamique du capteur** a un effet sur la relation entre le signal capté et le « **signal brut** » obtenu à la sortie du **capteur** (la mesure brute) donc sur la résolution de cette mesure.

C'est ainsi que l'étude du CO₂ atmosphérique se heurte à la compréhension du phénomène « *d'air glow* » qui, s'il n'est pas corrigé, détériore la précision de mesure des concentrations (la précision visée étant de 1%).

Dans le cas où la mesure nécessiterait l'envoi d'un signal depuis le satellite (mesure active – ex. : radar ou lidar), il faudrait aussi tenir compte des effets de l'atmosphère sur le signal incident.

L'opération suivante consiste à échantillonner le signal et à le digitaliser avant de le mémoriser. Cette opération, réalisée à bord du satellite, permet de transmettre au sol, via la télémesure, ce que l'on peut nommer désormais une « **donnée** », sans déformation ou incertitude supplémentaire. Après extraction (niveau 0 du traitement des données) des bits utiles du train de bits transmis par la télémesure, on obtient le **premier niveau de qualité de la « donnée » (niveau 1)**.

Afin de poursuivre le traitement, le « segment sol » enrichira et/ou corrigera la mesure (par exemple en la datant, en la calibrant ou en la localisant) pour en faire une « **donnée** » de qualité améliorée de **niveau 2**.

Les niveaux de traitements 0-1-2 nécessitent une bonne connaissance de l'instrument de mesure et du système spatial qui a acquis et transmis les données, ils sont souvent réalisés dans un « segment sol utilisateur » commun à tous les usagers de ces données.

La bonne connaissance de l'atmosphère et de ses effets sur la mesure améliore encore la qualité de la donnée pour se rapprocher encore plus de la réalité physique (**niveau 3**).

Enfin un usager/utilisateur peut encore améliorer les traitements pour extraire des informations spécifiques à sa recherche en assimilant ces données dans des modèles et en les « corrigeant » grâce à des données exogènes (**niveau 4**).

Les niveaux 3 et 4 sont bien souvent proches de l'utilisateur « scientifique / industriel ». L'utilisateur final grand public ne s'intéresse pas à ces niveaux de traitement mais à la pertinence/fiabilité de l'information (demain pleuvra-t-il ? : oui ou non, où suis-je, etc...).

Ce domaine connaît un essor important, si l'on en juge par la multiplication des satellites d'observation mis en orbite depuis 2016, pour exploser en 2018 (voir tableau ci-après).

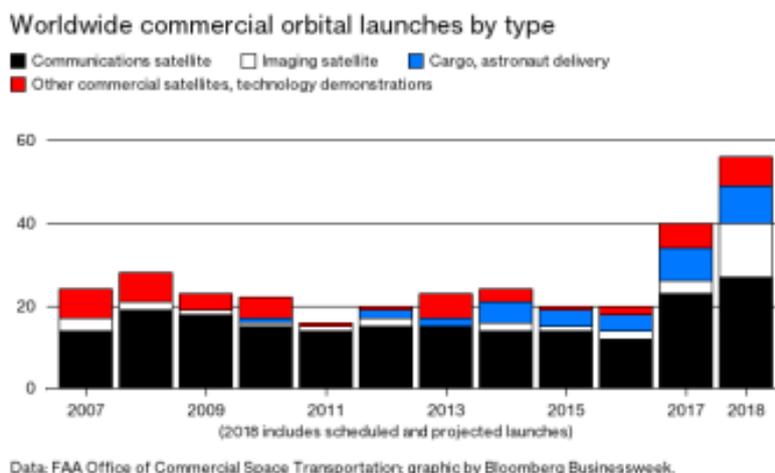


Tableau : lancements orbitaux dans le monde, d'après Bloomberg

De nombreux pays qui ne sont pas des puissances spatiales (pays du Golfe par exemple, Thaïlande, Egypte, Turquie...) commencent à constituer une capacité d'observation souveraine en faisant placer en orbite leurs propres satellites, souvent fournis par les industriels européens.

De nombreuses *start-up* voient le jour (Blacksky, Planet, Earthcube,...) sur différents modèles économiques, Blacksky (soutenu par les groupes européens Thales et Leonardo) et Planet possédant leur constellation d'observation, Earthcube (acteur français) créant sa valeur ajoutée d'une façon innovante par le seul traitement des données auxquelles il accède (librement ou en B to B). Certaines d'entre elles viennent enrichir les activités d'autres acteurs du spatial déjà établis (ex. DigitalGlobe et Space System Loral filiales du groupe Maxar).

D'autres secteurs d'activités ont des attentes qui viennent élargir le champ des observations satellitaires (météorologie, climatologie, pollution des zones urbaines, environnement en général ...) et le redéfinir comme étant l'observation et la caractérisation de tous les milieux de la planète Terre (terre, océans, atmosphère). Cette observation devra être faite à différentes échelles de résolution pour aboutir à une vision globale des phénomènes et fournir des zooms locaux pour les besoins spécifiques cités plus haut. En effet, tous ces phénomènes ont besoin d'être analysés et modélisés comme globaux dans leurs mécanismes d'évolution à moyen terme et comme locaux pour prévoir leur impact sur notre vie de tous les jours.

Ces évolutions laissent présager que la collecte et l'exploitation des flux massifs de données satellitaires ainsi créés seront très certainement l'une des grandes sources d'opportunités en matière de nouvelles applications et de nouveaux services au sol.

L'intérêt de ce domaine a d'ailleurs été reconnu par l'Etat et par l'Union européenne. Citons quelques exemples d'initiatives :

- Le « **Cospace** », comité de concertation Etat-Industrie sur l'Espace, mis en place en 2013 a, entre autres missions, celle de promouvoir le développement des applications valorisant les données spatiales. Les « boosters », initiatives en la matière du Cospace, sont des structures d'accompagnement de projets de services numériques innovants portées par un pôle de

compétitivité, et utilisant des données spatiales, seules ou combinées à d'autres types de données.

- L'initiative « **Connect by CNES** », lancée en février 2018 par le CNES, est un autre exemple de valorisation des technologies spatiales combinées au Big data et à l'Internet des Objets. L'objectif est d'accompagner les *start-up* et les entreprises pour comprendre leurs besoins et pour les aider à identifier des usages du spatial qui leur permettront de développer des produits et services innovants.
- Les solutions par exemple de géolocalisation offertes par Galileo, ouvrent des perspectives aux constructeurs automobiles pour le développement des véhicules autonomes.
- Des plateformes financées par la commission européenne pour faciliter et normaliser l'accès aux données des satellites Sentinel et favoriser ainsi leur exploitation (DIAS - Data Information Access Services du programme COPERNICUS) par les utilisateurs et fournisseurs de services.

Cependant, pour développer une application ou un service à forte valeur ajoutée, l'accès aux données ne suffit pas (cf. encart n°7), il faut aussi :

- **Maîtriser la compréhension des phénomènes physiques** rencontrés entre le point visé et le capteur (effet de l'atmosphère par exemple),
- **Connaître les conditions d'acquisition de la mesure, dont les caractéristiques du capteur utilisé** (et pas seulement sa précision théorique),
- **Connaître le traitement réalisé sur la mesure avant sa libération vers l'utilisateur,**

afin de **construire une base d'informations d'une bonne fiabilité répétitive, en laquelle on puisse avoir confiance.**

Les téraoctets d'informations générés par les capteurs embarqués dans les satellites d'observation, que l'on retrouve plus tard sous le terme générique de « données », chacune baptisée du nom d'une grandeur physique précise, appellent à la prudence. Entre la réalité de la grandeur physique et la donnée, en passant par la mesure, il y a un **long et complexe processus générateur d'incertitudes donc de différences** (cf. encart n°7).

La réduction attendue de ces incertitudes nécessite **d'étendre le champ des paramètres mesurés et d'améliorer la précision des mesures réalisées** et pour cela investir dans les domaines technologiques et de recherche suivants :

A bord des satellites

- **En priorité**, nouveaux capteurs pour l'observation *in situ* de l'atmosphère et l'amélioration des familles actuelles : lasers actifs, (type Merlin, Aeolus), sondeurs, altimètres (Jason), Scatéromètres, (METOP), interféromètres, (IASI) ...
- Détection (CMOS), Conversion Analogique Numérique (CAN) ultra rapide et de faible consommation.
- Collecte et transmission des informations acquises : mémoires de masse et compression bord pour diminuer les flots de télémessures vers le sol ; émetteurs à large bande passante, avec consommation minimale, (AsGa).
- Conception et réalisation d'instruments : spectromètres, télescopes à grand champ souvent *off axis*, optique active, associés aux technologies d'évacuation de la chaleur
- Structures de grande stabilité thermique et structurale pour le télescope (l'instrument de mesure) et le foyer de l'instrument.

Au sol

- Développement de la recherche
 - Sur les algorithmes de rectification, compression, rééchantillonnage, permettant la superposition Xspectrale et Xtemporelle des images ;
 - Et sur l'utilisation de l'IA pour le traitement et l'extraction de l'information utile des images afin de limiter l'intervention des photo-interpréteurs.
- Travail de recherche fondamentale sur la physique de la mesure (par exemple IASI n'est exploité que pour quelques bandes spectrales faute de modèles d'inversion), ainsi que sur la compréhension des phénomènes physiques qui peuvent perturber la mesure utile.
- Sur la base des résultats des recherches précédemment évoquées : **développement de modélisations décrivant l'atmosphère sur toute son épaisseur** ainsi que son comportement, sur le trajet du signal de « la mesure », en y intégrant un maximum de phénomènes physiques pouvant affecter le signal ainsi que les informations éventuellement recueillies *in situ*. Ces modèles permettront de corriger les données obtenues par les satellites en ajoutant la correction des erreurs générées lors de la traversé de l'atmosphère et ainsi générer des données se rapprochant plus de la réalité (**qualité de niveau 4**).

Il est important de souligner les deux points suivants :

- D'une part, le caractère plurisectoriel de ces recherches. Un effort de concertation et de coordination s'est déjà amorcé. Compte tenu de la difficulté du défi, il est très important

que cet effort soit amplifié afin d'aboutir à un véritable rapprochement **des modèles et des moyens de calculs**, et, éventuellement, d'aller jusqu'à une mutualisation des plates-formes satellitaires.

- D'autre part, maîtriser techniquement ces étapes, les contrôler et avoir accès aux données de niveau 3 pourraient constituer un avantage concurrentiel certain pour les développeurs nationaux (par opposition à une politique *d'open source* trop large) **si une politique de protection, différenciée suivant les niveaux de qualité des données utilisées, était mise en œuvre par les pays européens** (cf. 4. Politiques publiques).

En conclusion

Il est **important que la France et l'Europe**, qui furent des pionniers dans ce domaine, **conservernt un excellent niveau dans les technologies nécessaires au recueil des informations** (nature des paramètres observés et précision des capteurs, effets de l'atmosphère sur les mesures) **et en garantissent la pérennité**. Ce sont des **conditions indispensables pour attirer les entreprises** et leur fournir les meilleures bases en matière de paramètres observés, de précision de la mesure et de qualité des données pour qu'elles développent des applications en aval.

Afin d'améliorer les chances de réussite des entreprises qui s'y impliqueront, il est important de les accompagner par des efforts de **recherche amont**.

Ceci **pose cependant la question de la mise en place d'un cadre juridique et réglementaire adapté** qui protégerait et favoriserait les entreprises et les entrepreneurs français ou européens impliqués (cf. 4, politiques publiques). La réflexion sur un tel cadre protecteur mériterait d'être menée rapidement afin d'être en phase avec les progrès attendus en matière de qualité des données (atteinte du niveau 4).

1.5 La géolocalisation

Aujourd'hui, les applications au sol utilisant le positionnement par satellites se sont beaucoup développées et sont, à une écrasante majorité, basées sur l'usage des signaux du GPS américain.

Un exemple : Iphigénie, qui veille sur les randonneurs, est une application qui leur permet de disposer sur leur téléphone portable du fond cartographique de l'IGN et de pouvoir se repérer sur ces cartes très détaillées instantanément grâce au signal GPS.

Cet exemple d'application reste très proche de l'objectif initial du GPS (*Global Positioning System*) américain (la géolocalisation). Mais de fait, le GPS, développé à l'origine pour un usage militaire, peut, en étant exploité directement ou en synergie avec d'autres informations, déboucher sur des applications insoupçonnées à l'origine (gestion du trafic routier et embouteillage dans les villes en temps réel par exemple). Dans certains de ces développements, la connaissance fine du système a fourni un avantage concurrentiel certain.

Afin d'appliquer le principe de la triangulation, utilisée sur Terre pour réaliser les grandes opérations d'arpentage au 19^{ème} siècle, on a remplacé les points hauts terrestres (par ex. des sommets) par un ensemble de 24 satellites tournant à environ 20 000 km d'altitude. Ces satellites, placés dans des plans multiples afin que tout point de la Terre puisse en permanence être en vue d'au moins 4 satellites, occupent des positions qui sont connues à tout instant avec une très grande précision, positions qu'ils communiquent ainsi que l'heure d'envoi, à intervalles réguliers. La composition des signaux émis par ces satellites, et reçus par des récepteurs adaptés, permet au récepteur de calculer sa position (cf. aussi **encart n°8**)

Bien que la précision soit, en général, déjà remarquable, les principaux travaux de recherche viseront à améliorer ce niveau, soit pour corriger des déficiences locales, soit pour permettre des applications nouvelles, et devraient porter sur :

- Les algorithmes de traitement du signal utilisant les 3 fréquences de Galileo,
- L'amélioration des horloges (atomes froids, ...),
- Des antennes actives pour les terminaux sol,
- L'hybridation inertielle/Gnss,
- La continuité indoor-outdoor de la localisation,
- L'utilisation de la technique de SDR pour limiter la consommation des récepteurs,
- Les algorithmes de cybersécurité.

Concernant le système, infrastructure sol et satellites associés, des évolutions en termes de fonctionnalités peuvent être envisagées à l'horizon du renouvellement d'une ou des constellations en profitant des spécificités du système, par exemple de la couverture globale de la Terre obtenue grâce à la disposition des orbites mais aussi de sa moindre vulnérabilité (à des attaques hostiles) due à son orbite élevée. En effet, les plateformes seraient aptes à recevoir des capacités de télécommunications limitées mais qui pourraient, par exemple, recueillir en tout point du globe des signaux d'alerte ou des éléments techniques utiles au traitement des conséquences d'une catastrophe aérienne (information en quantité limitée) et les retransmettre vers le sol instantanément par l'intermédiaire des autres satellites ou bien en différé lors du passage à proximité des stations de contrôle. Une capacité de ce type a d'ailleurs déjà été implantée puisque la constellation Galileo peut relayer les signaux de détresse émis suivant le standard COSPAS – SARSAT (406 MHz).

Encart n°8 : Géolocalisation – principes de fonctionnement

La géolocalisation depuis l'espace fonctionne sur le principe d'une « triangulation géométrique » entre plusieurs points, un minimum de 4, celui dont on cherche la position et 3 points aux coordonnées connues (des satellites). Connaissant les distances entre les 3 des points de référence et les distances les séparant du 4^{ème}, on peut en déduire 2 positions possibles pour ce 4^{ème} point et éliminer celle qui se situe dans l'espace et pas à la surface terrestre.

Ne disposant cependant pas de la mesure physique des distances, ce sont les temps de parcours des ondes émises par les satellites et reçues au sol qui pourraient être exploités (chaque satellite du système émet à intervalles réguliers des signaux véhiculant sa position et l'heure de départ du signal). Mais ceci nécessiterait qu'une horloge avec un niveau extrême de précision et de synchronisation avec les autres soit installée dans le récepteur situé au 4^{ème} point. Cette solution n'étant pas réaliste, elle est remplacée par le recours à un 4^{ème} satellite.

La triangulation peut alors se faire sur la base des différences de temps de parcours des signaux émis par les 4 satellites.

La principale difficulté de l'application pratique de ce principe réside dans l'obtention d'une synchronisation « parfaite » entre les horloges des différents satellites (imposant la prise en compte des effets relativistes dus aux vitesses de défilement des satellites !). Cette synchronisation des horloges et leurs précisions sont les principaux facteurs déterminant la précision du positionnement calculé (1 milliardième de seconde d'écart, c'est 30 m d'erreur), même si d'autres paramètres (atmosphériques ou radioélectriques) peuvent aussi perturber la mesure.

Mais si le principe est simple, sa mise en application est beaucoup plus complexe, tout à la fois du fait des technologies spécifiques intégrées à bord des satellites et du fait des configurations adoptées afin d'obtenir un système opérationnel fiable et performant. C'est ainsi que :

- Chaque satellite embarque 4 à 6 horloges atomiques de types différents afin d'assurer une redondance durable, quelle que soit la cause d'une panne.
- Plusieurs fréquences peuvent exister pour envoyer les signaux de positionnement depuis chaque satellite (ceci permettant d'obtenir une meilleure précision, ou une plus grande robustesse dans certaines conditions).
- Certains signaux peuvent être codés (pour durcissement ou usage payant).
- Le traitement des signaux de plus de 4 satellites par le récepteur est aussi un moyen utilisé pour améliorer la précision.
- Les satellites font l'objet d'une surveillance permanente et très poussée de leur fonctionnement. Les informations ainsi recueillies par l'opérateur peuvent être partagées et permettent, grâce à la prise en compte des « imprécisions » particulières des différents satellites, d'améliorer la précision du système.
- Des balises terrestres peuvent aussi être utilisées pour obtenir une plus grande précision dans un environnement limité (aéroport par exemple).

Des aides par des satellites supplémentaires sont aussi possibles (ex. : programme et satellite EGNOS en Europe).

En conclusion

Avec la mise en œuvre opérationnelle récente du système Galileo, **l'Europe s'est dotée de l'autonomie dans le domaine stratégique** (à plus d'un terme) **de la géolocalisation**. Le plus dur semble fait. Mais **pour vraiment réussir, son modèle économique doit permettre de garantir sa pérennité et son amélioration** et, sur cette base, **de faire que son usage se généralise en Europe et ailleurs pour conquérir une part significative du marché des services basés sur la géolocalisation, en compétition avec le GPS américain**.

2. Nouveaux services dans l'espace

Les missions d'explorations robotisées tout comme les vols habités réalisés ces dernières décennies ont permis **l'émergence de capacités d'opérations dans l'espace** comme :

- Le rendez-vous ;
- L'assemblage en orbite ;
- Le ravitaillement en carburant (ergols) ;
- L'apport de charge utile ;
- Les manœuvres en orbite et de désorbitation.

Sur la base des capacités ainsi acquises, il est possible d'envisager de nouveaux services en orbite sur les thèmes de « **l'assistance en service** » et de « **l'assistance au retrait du service** ».

2.1 Assistance aux satellites en service

- **Extension de la durée de vie** des satellites (par ravitaillement en carburant ou le remorquage) ;
- **Evolution des capacités opérationnelles** des satellites déjà en orbite par l'ajout ou le remplacement de charge utile extérieure obsolète (augmentation de capacités (ex. : communication), changement de mission d'un module de service par une nouvelle charge utile),

sont les premiers pas que l'on envisage dans ce domaine.

Compte tenu de leur relative « facilité d'accès », ce sont les **orbites basses**, celles relativement proches de la Terre, qui **sont les premières candidates à l'expérimentation et à l'utilisation de ces nouveaux services**. Il sera toujours possible d'adapter plus tard ces pratiques aux orbites plus élevées pour un coût croissant qui en rendront rapidement l'intérêt de plus en plus faible.

Toutefois, à court terme et malgré cette proximité, la viabilité économique de services du type recharge en ergol (et désorbitation en fin de vie) est sujette à caution, bien que ce principe soit utilisé régulièrement pour remonter l'orbite de la station spatiale internationale, mais à quel coût ?

Il faut noter que la station spatiale a été placée (pour raison de capacité du lanceur) sur une orbite très basse (environ 300 km d'altitude à son point bas), et qui, du fait de sa proximité de la terre, s'abaisse relativement rapidement.

Le même type d'opération à altitude plus élevée n'a pas le même intérêt car la quantité de carburant nécessaire au maintien en orbite décroît très vite avec l'altitude de l'orbite. Seuls les satellites « manœuvrant », comme certains satellites d'observation qui peuvent se rapprocher le temps de faire des observations précises puis remonter afin de réduire le « freinage » de l'orbite.

A **contrario**, des missions d'inspection / surveillance et, dans un futur à définir, **l'échange ou l'adjonction de charges utiles** pourraient devenir attractives au même titre que des missions d'**assemblage** (robotisées) dans l'espace.

La plupart de ces applications nécessiteront que les satellites souhaitant pouvoir profiter des avantages procurés par ces opérations soient coopératifs, c'est-à-dire équipés d'interfaces simples (attache de charge utile, connecteur pour le transfert de carburant) : **ces satellites devront être « service ready »**.

Les investissements importants déjà réalisés dans l'exploration vont permettre le développement de briques technologiques clés plus économiques pour évoluer vers des services compétitifs avec une perspective de commercialisation. En particulier la digitalisation s'appuyant sur des électroniques spatiales plus performantes et plus intégrées est un vecteur important de cette compétitivité.

Les briques technologiques clés sont :

- Le **rendez-vous orbital** avec un satellite peu ou non coopératif ;
- Les capacités de **manipulation robotique**, dont les mécanismes (joints, retour d'effort) sont une composante clé, la partie contrôle permettant des *spin-in* des systèmes robotiques terrestres en très forte expansion ;
- Des **systèmes de connections** (de charge utile, de connexion fluide pour le ravitaillement en carburant).

Les **priorités à court terme** seraient donc de développer des interfaces de satellites permettant une **capacité « service ready »**, en la basant sur un **standard établi au niveau mondial** et de déployer ces solutions sur des systèmes institutionnels par exemple dans le cadre du programme européen COPERNICUS. Une telle approche permettrait de démontrer leur faisabilité et ainsi donner

confiance aux opérateurs privés pour pousser une croissance des applications commerciales des services en orbite.

A moyen terme, **le développement de services en orbite réguliers et fiables peut conduire à une évolution des architectures des systèmes spatiaux**. Ces opérations permettront des développements spatiaux plus durables avec une empreinte carbone diminuée tels que :

- La **réutilisation** d'infrastructure déjà en orbite.
- L'**extension de la durée de vie** permettant d'espacer les missions de renouvellement.
- Combiner le remplacement d'un satellite défaillant et sa désorbitation pour éviter la génération de débris. Ce la semble accessible car les deux, celui en panne et son remplaçant, sont sur la même orbite.

A plus long terme, un **service plus complexe pourrait se développer** tel que l'**assemblage dans l'espace**, avec une complexité croissante. Il pourra rendre possible la reconfiguration d'un satellite ou la réalisation de structures de plus grande taille que celles réalisées au sol, limitées par les dimensions des coiffes des lanceurs.

2.2 Assistance au retrait du service

A l'issue de son service deux possibilités sont envisageables pour un satellite : soit une **désorbitation pour une rentrée dans l'atmosphère terrestre**, soit un **transfert vers une orbite cimetière** afin de ne pas encombrer les orbites « utiles ».

A ce stade il convient de différencier les situations en fonction de l'altitude des orbites.

Atteindre l'**orbite géosynchrone** nécessite une dépense d'énergie très importante et cette orbite est par ailleurs peu « polluée » (les stratégies d'atteinte de cette orbite génèrent en effet peu de débris et tous les objets tournent dans le même sens). Ces caractéristiques ont amené la communauté à développer des principes spécifiques qui, s'ils sont correctement appliqués et sauf incident, doivent permettre d'assurer un bon niveau de « propreté » à cette orbite pour un coût raisonnable.

Les satellites de télédiffusion ont une durée de vie importante (supérieure à 10 ans) ce qui rend souvent leurs technologies « obsolètes » avant leur fin de vie. Il est ainsi demandé aux opérateurs de réserver une faible partie du carburant assurant le maintien en position et attitude du satellite pendant sa vie active pour écarter de manière pérenne un satellite de cette orbite en « remontant » son orbite. C'est la règle de la « réorbitation » qui impose de remonter l'orbite de 300 km en fin de vie.

A court et moyen terme, la priorité devrait être de s'assurer que ces règles sont appropriées et qu'elles sont bien appliquées dès la conception des satellites et vérifiées avant le lancement par

une autorité à définir. Ce n'est qu'en cas d'incident grave (perte de contrôle du satellite ou autre ...) que l'utilisation d'un véhicule remorqueur pourrait s'avérer nécessaire à un coût important qu'un seul opérateur pourrait ne pas vouloir assumer d'autant plus **qu'il faudrait préalablement en financer le développement**.

La question se pose alors de qui pourrait financer de telles opérations. L'ONU ? Par ailleurs, les opérateurs sont-ils prêts à payer ce service pour aller jusqu'à la perte de leur satellite plutôt que de le « réorbiter » alors qu'il fonctionne encore ? **La mise en place d'assurances obligatoires pourrait être envisagée** sur le modèle de ce qui se fait dans le transport maritime.

A l'inverse les **orbites basses** sont « proches » de la Terre mais aussi **très « polluées »** par les débris (voir **encart n°9**). La **désorbitation** pour obtenir la destruction du satellite lors de sa rentrée dans l'atmosphère **y coûte énergétiquement beaucoup moins cher** que pour une orbite haute car **l'incrément de vitesse à lui appliquer** (le coup de frein nécessaire pour venir frotter dans les très hautes couches de l'atmosphère) y est beaucoup **plus faible que pour les orbites géosynchrones ou intermédiaires**, devenant même naturelle dès que l'orbite est suffisamment basse (dans ce cas il faut tout de même prévoir un certain contrôle pour les objets lourds ou denses afin d'éviter que certains éléments n'atteignent la Terre dans une zone habitée).

L'idée de mettre en place des bonnes pratiques et des obligations visant à débarrasser l'Espace « utile » des objets que l'Homme y a placés lorsqu'ils sont devenus inutiles est séduisante car là encore il paraît nettement plus efficace d'obliger (sous peine de pénalité financière – type obligation d'assurance par exemple) les opérateurs de satellites à ne pas « polluer l'orbite » que de tenter d'aller le « nettoyer » plus tard.

Mais, même appliquées, ces mesures ne seront pas suffisantes pour traiter tous les soucis créés par l'encombrement de certaines orbites. En effet, au-delà des satellites « morts » bien identifiés, certaines orbites sont parcourues par de nombreux débris générés par les lancements eux-mêmes ou par des collisions entre objets en orbite (cf. **encart 9**). Ce dernier phénomène est préoccupant car à partir d'une certaine densité de débris sur une orbite, la situation ne pourrait plus être contrôlée et cette orbite devenir inutilisable.

Encart n°9 : Le problème des débris

Dans le monde du Spatial, un débris est un objet amené par, éventuellement pour, une activité humaine et qui n'a plus d'usage. Il peut s'agir d'étages supérieurs de lanceurs, de satellites hors service, d'éléments plus petits libérés à l'occasion des séparations d'étages ou de collisions entre débris. La taille de ces débris est très variable pouvant aller de plusieurs dizaines de mètres pour des étages à quelques millimètres (éclats de peinture par exemple). Mais les lois de la physique font que même un « petit objet » peut devenir très destructeur lorsqu'il est lancé à 16 km/s (choc de deux corps se déplaçant chacun à 8 km/s). C'est ainsi qu'un simple éclat de peinture aurait fissuré une des couches d'un hublot de la navette spatiale.

Des mesures de renforcement des parois des satellites ont été prises pour limiter les risques liés aux débris de petites tailles mais cela ne couvre pas tout.

Les principaux « débris » sont suivis grâce à des dispositifs terrestres permettant aux quelques pays possédant de tels moyens (comme la France) d'en connaître les trajectoires et ainsi de pouvoir commander, si nécessaire, des manœuvres d'évitement des satellites menacés par ces débris.

Ce travail d'identification et de connaissance de ces débris est lourd car on dénombre environ 20 000 objets de plus de 10 cm et des millions dans les tailles inférieures au cm qui circulent sur des orbites « basses » et leur nombre est en augmentation.

Lorsque ces débris circulent à une altitude « faible » (inférieure à 700 km), leur « désorbitation », ou rentrée dans l'atmosphère survient au bout d'un délai raisonnable (environ 25 ans, voir plus en cas d'activité solaire faible, comme actuellement). A une altitude plus élevée, la durée augmente très vite.

Afin de lutter contre l'augmentation du risque, des recommandations ont été émises, destinées à :

- Limiter le nombre de débris générés au moment du déploiement du satellite,
- Déclencher et maîtriser la rentrée atmosphérique du lanceur,
- Garantir aussi celle du satellite en fin de vie.

Mais il ne s'agit que de recommandations et il n'y a pas de mécanisme en place pour en imposer le respect.

Face à ce risque, on peut imaginer financer un service de « nettoyage » spécifique par les pénalités ou primes précédentes, ou, s'il existe des véhicules déjà développés pour d'autres applications, envisager de rajouter ce service à leur « offre ».

L'arrivée possible en masse de « petits satellites » vient toutefois compliquer le problème par l'augmentation associée du risque de collision entre objets pas toujours « pilotables » ou « maîtrisés » (cf. **encart n°10**).

Encart n°10 : Les débris – Le cas particulier des « petits » satellites

Si ce nom générique cache des objets très différents (voir chapitre 1.1) par leur conception, il est certain que leur implication dans le sujet des débris sera notable du fait de leur abondance potentielle et du fait que dans tous les cas ces objets sont suffisamment énergétiques pour créer des dégâts considérables en cas de collision (destruction des satellites impliqués et prolifération de débris). En particulier le nombre de satellites envisagé pour cette catégorie risque de compliquer considérablement la gestion des risques de collision et des manœuvres d'évitement nécessaires.

Si les satellites les plus lourds dans ces catégories seront certainement munis d'une capacité de manœuvre permettant d'envisager une désorbitation commandée, il n'en sera généralement pas le cas pour les satellites les plus petits qui devraient donc être limités à des orbites suffisamment basses pour aboutir à une désorbitation naturelle « rapide ».

De tels principes pourraient être adoptés, encore faut-il qu'ils soient respectés. S'ils ne l'étaient pas et si un grand nombre d'objets relativement lourds et totalement incontrôlables occupaient une orbite, le risque existe que cette situation génère une réaction en chaîne aboutissant à une multiplication des collisions et des débris interdisant alors l'utilisation opérationnelle de cette orbite.

3. Un domaine particulier : Défense, sécurité et souveraineté dans l'espace

3.1 La défense

Bien que les armements soient officiellement bannis de l'Espace, l'Espace n'est pas négligé par les militaires, et les technologies utilisées dans ce domaine sont soit celles déjà utilisées par les autres domaines d'activité spatiales, soit celles qui pourront être utilisées par les autres acteurs ultérieurement. Les différents domaines évoluant en forte symbiose, il convient de ne pas négliger les applications de défense et leurs perspectives.

L'Espace joue un rôle majeur dans **l'acquisition de la supériorité informationnelle et donc de la supériorité opérationnelle**. En effet, du point de vue de la doctrine militaire, dans le droit fil de l'histoire de la recherche des points hauts, l'Espace est une position unique pour observer et communiquer, fonctions dont la maîtrise est primordiale.

Par rapport aux autres moyens militaires, les systèmes spatiaux, par leur capacité à recueillir et à diffuser l'information sur une échelle planétaire, sont les seuls systèmes capables de répondre de manière permanente et avec une grande répétitivité au besoin de globalité du renseignement et de communication.

Leur statut juridique⁴ leur permettant de s'affranchir des frontières, confère à leurs détenteurs, dès le temps de paix et en toute légitimité, une capacité non intrusive et discrète d'accès à l'ensemble du globe, en particulier aux zones potentiellement hostiles ou inaccessibles à des aéronefs.

Du point de vue opérationnel, les systèmes spatiaux sont des multiplicateurs d'efficacité et des catalyseurs de forces. Durant la préparation des opérations, ils contribuent à l'élaboration du renseignement et à la planification. Lors de la conduite des opérations, ils permettent non seulement le commandement mais procurent aussi des capacités d'évaluation des effets produits. Comme appui à la manœuvre, par leur capacité d'élongation supérieure à toute autre solution, les satellites assurent la pérennité du lien entre le théâtre et le haut commandement national et les liaisons vitales de niveau inférieur. Ils donnent accès à des informations de positionnement, de météorologie, d'hydrographie, d'océanographie ou de synchronisation temporelle indispensables à l'efficacité de l'action militaire.

L'accélération du *tempo* des opérations et le besoin prégnant de combat collaboratif inter-milieux sont couverts par l'amélioration des performances des systèmes spatiaux : haut débit, protection des informations, meilleure couverture des zones d'intervention, liens inter-satellites, précision des informations géospatiales et temporelles. Par conséquent, l'efficacité du système de défense dépend étroitement de celle des moyens spatiaux utilisés. L'autonomie d'appréciation de la situation et d'action recherchée par la France nécessite un contrôle souverain de ces moyens.

Améliorer le partage de l'information, diminuer le temps d'accès à l'information et augmenter la réactivité de l'ensemble du dispositif spatial militaire, du niveau stratégique au niveau opératif, nécessitent de mettre en réseau l'ensemble des satellites souverains. D'ici la fin de la prochaine décennie, il s'agira de mettre en place un WAN (Wide Area Network) basé sur les satellites de télécommunication militaires français (prochaine génération de satellites SYRACUSE) auxquels viendront se brancher l'ensemble des satellites de renseignement « image » (post-CSO) et électromagnétique (post-CERES).

3.2 La sécurité

Disposer d'un « **instrument de défense** » exploitant les possibilités offertes par l'Espace et le maîtriser est une condition nécessaire à notre indépendance mais il faut aussi **en assurer la sécurité** en permanence afin d'en disposer librement en cas de besoin.

- Il y a 50 ans, trois pays disposaient de moyens spatiaux ; aujourd'hui, on en dénombre 50. Parmi ces pays, certains disposent de moyens d'action dans l'espace pour espionner d'autres satellites voire les détruire.
- 7000 satellites supplémentaires en orbite sont prévus dans les dix prochaines années.

⁴ Traité de l'ONU de 1967 sur l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique.

- La dépendance nécessaire de nos armées aux capacités spatiales est connue et constitue désormais un élément de vulnérabilité.

Ces trois faits sont des signaux d'alerte suffisants devant susciter des évolutions claires dans la stratégie spatiale française. A l'instar des dépendances aux espaces électromagnétique et cybernétique, des réponses devront être élaborées en termes d'organisation et de capacités. Des évolutions stratégiques devront être proposées dans les concepts et doctrines d'emploi, telles que la résilience des futurs systèmes ou la mise en place de moyens de surveillance, de contrôle et de régulation du trafic.

La maîtrise de l'espace « spatial » au même titre que l'espace aérien sera nécessaire :

- Des évènements récents, comme des satellites s'approchant d'autres systèmes spatiaux de manière potentiellement hostile, montrent la croissance de la menace ;
- Les projets américains et chinois de militarisation de l'espace imposent une réaction française et européenne.

A l'instar du contrôle aérien, des moyens devraient être déployés non seulement pour détecter et suivre les déplacements de l'ensemble des objets (satellites, débris ou autre) circulant dans l'espace, pour détecter des comportements anormaux voire hostiles et pour prendre les mesures nécessaires à la protection des infrastructures spatiales, mais aussi pour intervenir directement dans l'environnement spatial afin de mener des missions visant à contrer d'éventuelles menaces sur les satellites militaires nationaux.

Ce contexte conduit à envisager des **capacités en orbite** :

- **Surveillance** de l'espace et d'inspection de satellites considérés comme hostiles (caméra, écoute, radar) ;
- **Guerre électronique** (brouilleurs) visant à mettre hors capacité (transitoirement ou définitivement) un satellite estimé menaçant ;
- **Eblouissement** de satellites d'observation « trop curieux » ;
- **Inspection** voire de contre-force à base de nano ou de microsatsellites.

L'ajout ou le remplacement de charges utiles en orbite permettrait également de faire évoluer les capacités de détection et de protection embarquées sur les satellites militaires. Pour ces systèmes spatiaux conçus pour opérer 10 à 15 ans, cette possibilité permettrait de les adapter en continu à de nouvelles menaces, en :

- Faisant évoluer leurs systèmes de surveillances de proximité ;
- Ajoutant ou remplaçant leur système de contre-force.

Ce domaine est stratégique pour les Etats non seulement parce qu'il s'agit de protéger des capacités spatiales militaires mais aussi parce la résilience des satellites institutionnels civils et commerciaux nécessaires à la vie de nos sociétés est un enjeu économique majeur.

La protection des systèmes satellitaires (au sol et à bord des satellites), la surveillance de l'espace (par des moyens basés au sol et dans l'espace) et l'action dans l'espace (pour la surveillance de satellites jugés hostiles et le déploiement d'équipements de guerre électronique et d'éblouissement) sont des thématiques dans lesquelles certains pays agissent déjà et qu'il est important pour la France ou l'Europe de maîtriser de manière souveraine.

3.3 La souveraineté

Le secteur spatial européen, accès à l'espace et applications satellitaires, a démontré qu'il est strictement nécessaire à la souveraineté de l'Europe et de la France.

Si la garantie d'accès à l'espace est fondamentale (revoir l'histoire de Symphonie), elle n'est pas suffisante. Seul un nombre très restreint de pays disposent sur leur territoire d'une filière industrielle capable de développer en toute autonomie les capacités spatiales performantes dont leur système de défense a besoin. L'exportation de ces systèmes est très contrainte voire interdite (**réglementation ITAR aux Etats-Unis**).

A ce jour, les bases principales de souveraineté en sont :

Au niveau de l'Europe :

- Positionnement / navigation (Galileo) ;
- COPERNICUS / GMES (Global Monitoring for Environment & Security);
- Météorologie (EUMETSAT) ainsi que la coopération sur SAR lupe et cosmoskymed pour les aspects radar.

Au niveau de la France :

- Télécommunications ;
- Renseignement / observation optique ;
- Renseignement d'origine électromagnétique (SIGnal INTelligence).

L'autonomie nécessaire passe par :

- La connaissance du trafic des objets spatiaux et des phénomènes physiques intervenant dans le milieu spatial ;
- La conception des systèmes ;
- La connaissance fine des signaux transmis ;
- La connaissance des phénomènes physiques ;
- La connaissance fine des signaux transmis ;

- La captation des technos non spatiales utilisables dans le domaine spatial, ce dernier ne développant que le strict nécessaire à l'utilisation spatiale (effet de l'environnement, propulsion...);
- La maîtrise souveraine des savoir-faire et des technologies clés constitutives des systèmes spatiaux stratégiques (télescope de très haute résolution, agilité des satellites, résistance au brouillage et aux explosions nucléaires extra-atmosphériques, autres capteurs spécifiques...).

Ce sont les clés essentielles pour pouvoir disposer des capacités spatiales nécessaires de télécommunication, de renseignement, de positionnement...

L'inexistence structurelle d'une position ferme et protectrice de l'Europe sur ces sujets est malheureusement un fait durable. Le satellite SARah, successeur de SAR Lupe, lancé par SpaceX, est la démonstration de cette faiblesse.

La correction de cette faiblesse génétique européenne est l'une des conditions à remplir si l'on veut protéger le développement d'activités en aval du recueil des données.

Par ailleurs, du point de vue du rayonnement de la France et de sa capacité à nouer des relations diplomatiques stratégiques de manière souveraine, une capacité industrielle capable de concevoir et développer des systèmes spatiaux de défense en toute autonomie est un atout clé.

La souveraineté spatiale de la France passe par une maîtrise nationale ou au moins en Europe des technologies clés (ex. processeurs électroniques, antennes actives antibrouillées, détecteurs CMOS, optique active, miroir, sous ensemble de détection...) nécessaires au développement, en toute autonomie, des systèmes satellitaires de télécommunications et de renseignement.

4. Les politiques publiques européenne et française

La construction des politiques, de financement, comme de protection, au niveau européen est difficile et nécessite du temps en raison du nombre d'acteurs qu'il faut faire converger vers une position satisfaisante et ainsi partagée. Mais certaines des règles ou habitudes existantes sont appliquées depuis suffisamment longtemps pour qu'un « retour d'expérience » permette de les amender et ainsi d'améliorer certains fonctionnements.

4.1 La règle du « retour géographique » (règle ESA)

Créée en 1975 par quelques pays européens intéressés par l'exploration spatiale, l'ESA est une structure de coopération regroupant désormais 22 pays (dans un périmètre légèrement différent de celui de l'Europe communautaire, incluant la Suisse et la Norvège). Elle a permis de développer progressivement une implication européenne significative dans l'exploration et l'utilisation de l'Espace, mais certaines de ses règles de fonctionnement, acceptables au sein d'un

groupe réduit et homogène, se sont montrées « non optimales » dans un ensemble plus large. C'est le cas en particulier du principe du « **retour géographique** » appliqué dans le cadre du processus de génération des programmes. Ce principe permet aux pays participant au financement d'un programme d'obtenir que toute sa part du financement soit dépensée sur son sol et que sa part dans la production soit à hauteur semblable à celle occupée dans le développement, avec des règles de pondération des retours adaptés. De telles pratiques ont entraîné un morcellement des programmes associé à une inefficacité certaine du fait que certains pays négociaient leur accord au programme **en échange** d'activités nouvelles pour eux mais redondantes avec celles préexistant dans d'autres pays. Les motivations des pays financeurs ne sont pas toujours l'efficacité économique mais souvent l'espoir du développement d'une activité nouvelle (souvent limitée et incapable de survivre sans les financements étatiques). Cette règle a probablement profité à ces pays mais au prix de surcoûts, de retards et d'un morcellement des moyens industriels (cf. : note pour l'OPECST de novembre 2018 sur le transport spatial et la réutilisation).

4.2 La conviction de l'Union Européenne que l'ouverture et le libre échange sont sources de nouveaux développements, donc de nouvelles richesses

La doctrine « européenne », qui prône le partage pour favoriser l'émergence de nouvelles idées et nouvelles compétences partout en Europe, est sans doute positive pour une économie relativement « localisée » mais probablement pas idéale pour une activité aussi « globale » que l'exploitation des possibilités du spatial. En effet, elle prive les acteurs européens du bénéfice d'efforts et d'investissements qui ont abouti à un système plus évolué que ses prédécesseurs. **C'est la situation présente du système de géolocalisation Galileo.**

Reconnaissant le caractère de souveraineté et son importance, la Commission Européenne a commencé à participer au financement du programme Galileo dès l'année 2003 et, de ce fait, a sans doute sauvé ce programme. Mais la gouvernance « européenne » y a ajouté un élément supplémentaire de complexité dans les décisions et une vision politique particulière pour un tel programme (**caractère civil et données accessibles à tous les utilisateurs sans restriction**). Cette orientation n'a pas choqué la communauté spatiale européenne habituée et globalement favorable à la culture d'un partage gratuit des résultats bien qu'elle n'avantage pas le développement de nouveaux services en Europe (cf. 1).

4.3 Vers une protection publique plus efficace ?

Cependant, dans le contexte de compétition mondiale accrue (cf. affirmations récentes des USA), ne faudrait-il pas infléchir la politique de partage ?

Il est instructif de revenir à nouveau sur l'expérience du GPS. Développé à l'origine pour une application militaire, les compétences et, plus important, le développement des technologies nécessaires à l'utilisation de ce système, sont restés essentiellement limités aux Etats-Unis. Pour cette raison, lorsque le signal GPS a été libéré pour un usage international (à l'initiative d'Al Gore,

vice-président des USA), l'industrie américaine avait déjà une bonne expérience du système et des technologies adaptées prêtes. De plus, le signal libéré était bridé en termes de précision par rapport aux capacités intrinsèques connues dans le détail par les seuls opérateurs américains. **La France et l'Europe avec Galiléo, mais aussi avec les infrastructures d'observation de la Terre, de télécommunications et de surveillance de l'espace, ne devraient-elles pas s'en inspirer ? Ne pas ouvrir trop vite un accès trop libre à nos systèmes pourrait donner aux acteurs régionaux un avantage concurrentiel pour prendre leur place dans ces activités.**

La question de l'ouverture des données COPERNICUS nous semble une problématique à traiter avec soin :

D'une part, l'accès à ces données, aujourd'hui libre, doit être en mesure de générer un marché important de services aval indispensables aux acteurs de l'écosystème européen. Il faudrait donc que ces données soient effectivement disponibles.

D'autre part, le système COPERNICUS et les données qui en découlent ayant été financés par les Etats européens, il n'est pas logique qu'elles profitent aujourd'hui en grande majorité à des sociétés non-européennes, en particulier les GAFAM, qui réalisent une énorme partie du *business* des services basés sur ces données.

La réflexion doit être conduite à deux niveaux en parallèle dans le respect des accords commerciaux internationaux sur lesquels l'Europe s'est engagée :

- 1- **Travailler sur l'accès** à la donnée en examinant les mécanismes qui permettraient de faciliter l'accès aux données aux acteurs européens afin de favoriser l'investissement en Europe.
- 2- **Travailler sur l'aval**, c'est-à-dire **les services** COPERNICUS et les DIAS (Data and Information Access Services), pour développer une offre plus attractive que ce que pourrait proposer les autres acteurs, afin de drainer les fournisseurs de services de tous les pays vers ces plateformes. Un accès privilégié aux données COPERNICUS pourrait par exemple être proposé aux fournisseurs de services qui viendraient se connecter aux DIAS. Ou encore, un modèle économique de type « Freemium » pourrait être étudié, avec un accès gratuit pour un niveau de service standard puis payant pour une meilleure qualité (précision de la donnée, différenciation entre données brutes et données déjà traitées).

La protection peut prendre différentes formes allant de la simple confidentialité des informations (le silence) au dépôt de brevet. Dans tous les cas elle doit s'appuyer sur des règles strictes, comprises et défendues (des lois). Elle doit couvrir tout à la fois la partie matérielle (les technologies impliquées, au sol, à bord des satellites, en exploitation) et la partie immatérielle attachée aux données, à savoir les **algorithmes développés par la communauté scientifique** pour acquérir les mesures et les traiter afin d'en extraire des informations physiques valorisables (les données) (cf. **encart n°7**). Cette protection pourrait être modulée en fonction du niveau de qualité des données, en assurant un accès libre aux données de qualité de base (qualité de niveau 1 ou 2

suivant les cas) et en réservant les niveaux supérieurs (niveaux de qualité 3 ou 4 suivant les cas) à des entreprises en ayant l'usage et apte à garantir le niveau de protection nécessaire pour ces données.

En parallèle, la protection devra être ajustée afin de permettre aux entreprises (en particulier petites et moyennes parfois inutilement verrouillées par les donneurs d'ordre) de proposer certaines des technologies développées pour des projets étrangers (dans un cadre bien précisé respectant les contraintes de souveraineté).

L'ESA depuis de nombreuses années et l'UE récemment, donc les Etats européens, ont permis, grâce à leurs efforts en recherche et en développement, la mise en place d'outils et de systèmes de recueil d'informations et de données puissants. C'est sur cette base que de nouveaux services ont été et vont se développer. **Mais pour que plus d'investisseurs et de développeurs fassent le choix de les utiliser, il est très important que la disponibilité de ces informations soit protégée et garantie dans la durée.** Pour cela deux conditions doivent être remplies :

- Il faut d'abord que **les Etats impliqués**, conscients de ces enjeux, **entretiennent ces systèmes et les améliorent** au fil du temps (avec un accent tout particulier sur la géolocalisation et l'observation de la Terre, au sens large). **Ces systèmes doivent être considérés comme des infrastructures régaliennes** nécessaires au bon développement des activités de ces Etats.
- Il faut aussi que **ces systèmes d'acquisition soient adossés à des capacités de stockage « européennes »** permettant à l'Europe d'en rester réellement « propriétaire » et d'en maîtriser le « partage ». Le « cloud » mondial n'est pas une solution satisfaisante. **Toute réflexion sur une politique cohérente de protection des données doit donc prendre en considération la question du stockage associé de ces données dans un « cadre européen » et placé sous contrôle européen.**

Il faut **enfin penser à la protection des entreprises** cherchant à exploiter de façon originale ces données. Souvent de petite taille (*start-up*, mais pas seulement), elles sont naturellement fragiles au départ et peinent à atteindre une taille critique leur permettant d'équilibrer leur économie. Cette situation peut rendre leurs dirigeants actionnaires sensibles à des offres de rachat. L'aide pourrait prendre des formes diverses, en phase avec la vie de l'entreprise (aide à l'amorçage, participation au capital, contrats de recherche, contrats privilégiés de fourniture (à l'Etat) du service en développement visant à garantir un chiffre d'affaires dans la phase initiale de commercialisation.

4.4 Quelques considérations complémentaires sur la filière industrielle spatiale

Le secteur spatial commercial est davantage « utilisateur / adaptateur » de technologies développées d'abord pour d'autres marchés que « développeur propre ». **Il profite pleinement des développements réalisés au titre du « spatial scientifique »**, en particulier dans le domaine des capteurs.

Il convient aussi de souligner que le **flux technologique**

- **Amorcé par les applications scientifiques** (très demandeuses de progrès),
- **Exploité en priorité par la défense**,
- **Intégré dans les infrastructures institutionnelles** (observations variées),

aboutit à la **génération d'importants flux de données pouvant servir de base à des applications commerciales terrestres.**

Pour conserver, voire améliorer son positionnement, la France, l'Europe doivent sécuriser l'accès à des technologies clé. Cela concerne en particulier :

- Les composants et technologies électroniques résistant à l'environnement radiatif (lien avec les applications militaires). Cela inclut **les détecteurs de toutes sortes** (optique, ...),
- La génération et le stockage d'énergie,
- Les technologies thermiques,
- La propulsion – lanceurs et satellites.

Obligation doit aussi être faite de **protéger ces technologies** afin qu'elles puissent profiter en priorité aux entrepreneurs français et européens grâce à un environnement législatif et réglementaire adapté. Mais cette protection doit être adaptée, au cas par cas, afin de permettre aussi aux équipementiers sous-traitants de s'ouvrir à l'exportation.

Une question identique se pose pour **les données qu'elles génèrent**

Un problème majeur est celui du volume d'activité spatiale cumulé en Europe, défense et civile, comparé à la situation chez les deux grands du secteur. L'exportation, donc la compétitivité, est le seul moyen de développer l'activité et d'avoir des volumes de production suffisants. Il faut les marchés nationaux, européens et mondiaux pour atteindre les tailles critiques permettant de poursuivre la maîtrise des évolutions rendues nécessaires par les progrès technologiques.

Face à cette situation, les mécanismes européens (ESA ou CE) ont tendance à favoriser l'éclatement (par soutien des situations de concurrence) plutôt que la recherche de l'efficacité industrielle sur un marché mondial restreint et à forte concurrence extra-européenne.

Après avoir assuré une position de *leader* en matière d'orientation des activités (phase de lancement du programme Ariane par exemple) durant les années 70 au sein de l'ESA nouvellement créée, tout en maintenant une recherche active sur le spatial en national, la France a progressivement accru son implication dans cette structure et son corollaire de dépendance au détriment de décisions plus « nationales ».

Les financements français et ESA apparaissent clairs, mais il existe un risque élevé de dispersion et de sous-efficacité au niveau d'Horizon Europe...

La question se pose de mettre en place en France une réelle politique de « filière » afin de correctement orienter les recherches « précompétitives » en fonction des besoins prioritaires de la filière et de toutes les sources possibles de financement (il faut « chasser en meute »).

4.5 L'Espace – un milieu hautement dual

Dès le début de l'ère spatiale, l'intérêt militaire de l'espace a été identifié et rapidement utilisé. La reconnaissance photographique d'abord puis les communications sont des domaines qui ont rapidement vu éclore un « segment spatial ». La mise en place d'armes en orbite a aussi été envisagée, mais limitée par traité. La géolocalisation s'est imposée comme un service très important tout en ayant une place particulière car elle est de fait devenue un élément de beaucoup d'armement.

Une grande partie des armées du monde intègrent une dépendance de l'espace, certaines plus que d'autres, allant jusqu'à des capacités à tendance offensive (destruction de satellites par exemple).

Les instances européennes impliquées dans le spatial (ESA et Europe), de part statut, s'interdisent d'afficher un volet militaire dans leurs politiques. Mais certains pays européens ont effectivement un programme d'exploitation militaire des possibilités offertes par l'Espace.

L'Europe a pu développer le programme Galileo malgré les réticences des USA en lui donnant une forte coloration civile alors que le GPS affichait dès l'origine son caractère militaire stratégique.

Il n'est pas certain que la situation actuelle, qui présente une forte dichotomie entre programmes européens et programmes nationaux sur le thème de la défense, soit la plus favorable à un développement rapide des technologies dont nous avons besoin. Bien que s'écartant du thème principal des « services civils liés au spatial », ce sujet mérite un examen approfondi du fait d'une part de la militarisation observée du monde spatial et d'autre part de la forte dualité de l'activité d'observation de la terre et de ses progrès.

Annexe

1/ Les membres de l'Académie des technologies et instances consultés

Groupe de travail

Michel COURTOIS, ancien Directeur du centre technique de l'Agence Spatiale Européenne (ESTEC)

Jean-Jacques DORDAIN, conseiller auprès du président du CNES

Michel LAROCHE, ancien directeur général adjoint Recherche et Technologie, SAFRAN

Bruno LE STRADIC, directeur ingénierie systèmes spatiaux AIRBUS DEFENSE & SPACE

Marc PIRCHER, ancien directeur du CNES, centre spatial de Toulouse

Pascale SOURISSE, directrice générale, développement international THALES

Les autres membres et instances consultés

Comité des travaux de l'Académie des technologies

2/ Quelques opérateurs européens ou opérant en Europe identifiés

EUTELSAT

EUTELSAT est une société anonyme de droit français.

Créée en 1977 en tant qu'**Organisation Inter-Gouvernementale (OIG)** dans le but d'améliorer le réseau téléphonique européen, son activité principale consiste aujourd'hui à gérer la **télédiffusion par satellites de chaînes de télévision** et stations de radio.

En 2001, EUTELSAT a été privatisée et est devenue une société anonyme de plein droit qui doit toutefois respecter certains principes dont ceux définis dans la Convention amendée d'EUTELSAT.

EUTELSAT gère actuellement 39 satellites offrant une couverture sur toute l'Europe, le Moyen-Orient, l'Afrique, l'Inde, l'Asie et sur de larges zones du continent américain,

EUTELSAT est l'un des trois premiers opérateurs mondiaux de satellites en termes de chiffre d'affaires.

INMARSAT

Dès le début de l'ère spatiale, l'apport des satellites dans le domaine des communications entre les navires et le sol et dans la prévention et la gestion des sinistres en mer est identifié. **INTELSAT**, première organisation internationale créée pour mettre en place et gérer les communications spatiales n'est pas retenue pour assumer ce rôle car elle ne comprend pas parmi ses membres certaines nations maritimes comme l'Union soviétique et plus généralement les pays communistes. L'**Organisation Maritime Internationale** lance en 1966 une étude sur le sujet et crée finalement en 1976 l'*Organisation satellite maritime internationale* abrégée en anglais INMARSAT (pour *International maritime satellite organization*) destinée à prendre en charge ce service. Chaque pays membre de la nouvelle organisation verse une contribution destinée à créer l'infrastructure terrestre et spatiale et gérer l'ensemble du système. Les principaux contributeurs sont les États-Unis (17 %), le Royaume-Uni (12 %), l'Union soviétique (11 %). La France participe à hauteur de 3,5 %. La convention qui régit INMARSAT fixe comme objectif principal l'amélioration des communications maritimes avec comme finalité principale l'amélioration de la sûreté de la vie en mer et la gestion des situations de détresse. INMARSAT a le statut d'une organisation intergouvernementale exerçant des activités commerciales.

SES

Avec plus de 2 milliards d'euros de chiffre d'affaires, **SES** est le **premier fournisseur de services de télécommunications par satellites au monde**.

SES dispose d'une flotte de 54 satellites (février 2015) qui couvrent la totalité du globe. Ces satellites diffusent près de 6 000 chaînes TV et radio (janvier 2012) à plus de 245 millions de foyers dans le monde ; ils proposent par ailleurs des services de communication par satellites pour entreprises, opérateurs de télécommunication et agences gouvernementales.

En 2016 SES a finalisé l'acquisition de O3b Networks.

La société, basée à Betzdorf au Luxembourg a été créée en **1985 sous le nom de SES (Société Européenne des Satellites)**. Le premier satellite ASTRA 1A a été lancé en décembre 1988.

EUMETSAT

Le premier satellite, *Météosat 1*, a été lancé le 23 novembre 1977.

En 1995, EUMETSAT (organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques) a officiellement pris la responsabilité du financement et de l'exploitation des satellites Météosat et de la diffusion de leurs données.

INTELSAT

Le consortium intergouvernemental **International Telecommunications Satellite Consortium (INTELSAT)** a été créé le 20 août 1964, associant 11 pays. Il a pour but de fournir des services de télécommunications internationales sur une base non discriminative.

Le 18 juillet 2001, 37 ans après sa création, **INTELSAT devient une société privée.**

En août 2004, la **société est vendue aux fonds d'investissement** Madison Dearborn Partners, Apax Partners, Permira et Apollo Management.

COPERNICUS

Ce programme (**GMES à l'origine**) avait pour objectif de créer une capacité européenne autonome de surveillance à différentes échelles (locale, régionale, globale) pour l'environnement et la sécurité, qui serve d'appui aux politiques européennes (environnement, agriculture, etc.) et des engagements internationaux de l'Union.

Le domaine couvert par GMES était vaste (et évoluera en fonction des possibilités satellitaires). « GMES » peut notamment traiter les sujets suivants :

- Evolution des teneurs atmosphériques en aérosols et gaz à effet de serre,
- Surveillance de la couche d'ozone, taux d'ultraviolet,
- Climatologie, prévisions de l'état de la mer, sécurité maritime, suivi du trafic maritime et de certaines pollutions marines (marées noires, dégazages...),
- Mesure, contrôle et gestion du développement urbain (urbanisation, périurbanisation...),
- Montée du niveau des océans,
- L'alerte aux aléas climatiques et catastrophes naturelles (tempêtes, inondations, sécheresse, fortes pluies, tremblements de terre, tsunamis, connaissance et suivi des inondations et des feux de forêt pour leur meilleure gestion...),
- La surveillance de l'environnement, des forêts, de la déforestation et de leurs conséquences,
- Anticipation, alerte et gestion de catastrophes humanitaires (déplacements de population, migration humaine, camps de réfugiés, séquelles des guerres...),
- Sécurité civile, organisation des secours,
- Sécurité et surveillance des frontières,
- Lutte contre les trafics (par exemple de bois, de drogue...) et contre la piraterie en mer,
- Surveillance de zones (marines notamment) isolées ou provisoirement isolées,
- Disponibilité ou surexploitation de ressources naturelles.

Les « services thématiques » officialisés fin en 2008 permettent de perfectionner la construction, l'utilisation et l'entretien des infrastructures actuelles et futures, de développer la

mise en commun des moyens de collecte et de diffusion de données, et d'intégrer ces données dans des systèmes de suivi et de prévision de l'état de l'environnement et du climat.

Le projet prévoit également d'assurer la pérennité et l'évolution des moyens spatiaux nécessaires à l'acquisition de ces données (satellites d'observation de la Terre, ...) sans préciser à ce stade la forme juridique qui sera adoptée.

TELESPAZIO

Co-détenu par Leonardo et Thales, TELESPAZIO est l'un des *leaders* mondiaux dans les services par satellites. Basé à Rome, et présent dans 8 pays, le groupe emploie environ 2 500 personnes et a atteint un chiffre d'affaires de 632 millions d'euros en 2015.

SPOTIMAGE

Airbus DS Geo (anciennement **Spot Image**), société anonyme créée en 1982 par le Centre national d'études spatiales (CNES), l'IGN, et l'industrie spatiale (Matra, Alcatel, SSC, etc.), est une filiale d'Airbus Defence & Space (81 %) commercialement dénommée **Intelligence**. Sous mandat du CNES, la société est l'opérateur commercial des satellites d'observation de la Terre SPOT dont la réalisation (dès l'origine avec SPOT 1) est issue d'un partenariat technico-financier franco-belgo-suédois. Son siège est à Toulouse, à proximité immédiate du centre spatial.

3/ Les différentes stratégies pour rejoindre l'orbite géostationnaire

Pour rejoindre cette orbite les satellites peuvent emprunter différentes trajectoires (stratégies) :

La première solution consiste à ne pas mélanger les fonctions entre satellite et lanceur. Placé au sommet d'un lanceur multi étages le satellite est emmené jusqu'à son orbite définitif par le dernier étage du lanceur. Cette stratégie simple présente l'inconvénient d'augmenter la masse à emporter jusqu'à l'orbite définitive (donc la masse initiale du lanceur).

La seconde solution, très utilisée par le lanceur Ariane, consiste à demander au lanceur de placer le satellite sur une orbite très elliptique, avec une apogée à l'altitude de 36 000 km, et de laisser au satellite la fonction de circularisation de l'orbite. L'avantage de cette solution est double, elle réduit la masse du lanceur en réduisant la masse atteignant l'orbite géostationnaire et elle maintient le dernier étage du lanceur sur une orbite (l'orbite très elliptique) permettant une désorbitation naturelle de l'étage dans un délai raisonnable.

La troisième solution a été rendu possible par l'usage de la **propulsion « plasmique »** par les satellites. Cette propulsion, beaucoup plus performante que la propulsion principale des lanceurs, outre cet avantage présente l'autre intérêt d'utiliser la puissance électrique pour fonctionner (source d'énergie très présente à bord d'un satellite) mais l'inconvénient d'avoir une capacité de poussée très limitée, toutefois suffisante pour gérer un satellite en situation d'apesanteur (en orbite). Ces caractéristiques ont permis de développer une troisième stratégie de mise en orbite géostationnaire encore plus performante. Dans cette solution la mission du lanceur est limitée à la mise en orbite de la charge utile sur une orbite modérément elliptique et de laisser à la charge de la propulsion des satellites la mission de remonter, puis circulariser l'orbite à 36 000 km. Cette dernière stratégie peut aboutir un gain de charge utile en orbite conséquent (pouvant approcher 50% dans certaines conditions) mais au prix d'un délai de mise en opération pouvant atteindre plusieurs mois.

4/ Observation de la Terre (Hors scatéromètres, SAR et LIDARS)

Ce domaine est extrêmement varié selon les phénomènes et le milieu que l'on veut observer ou l'échelle spatiale de mesure à laquelle on souhaite travailler.

Par exemple si l'on s'intéresse à la **couleur de l'eau et au plancton** on cherchera à travailler dans le bleu / bleu-vert. Pour s'intéresser à la **végétation** il faudra utiliser les bandes visibles et proche IR jusqu'à l'IR moyen. La **géologie** utilisera des observations dans certaines bandes du visible complétées par de l'IR thermique jours donnant une idée de l'inertie thermique des sols. Il est évident que le choix de l'heure de passage sur zone est important pour différencier les différents sols.

Si l'on s'intéresse à l'**atmosphère et à ses constituants** les longueurs d'ondes d'observation seront dépendantes de la physique des phénomènes que l'on souhaite observer : vapeur d'eau,

nuages, glaces, panchromatique. L'humidité des sols, la salinité sera bien abordée par des mesures en micro-ondes passives, (SMOS 1.4 GHz). Mais si l'on s'intéresse à la concentration du CO₂ ou du méthane, on utilisera des bandes IR particulières, (microcarb) ou des techniques lasers (Aeolus, Merlin).

Les fenêtres de transmission de l'atmosphère, la connaissance et la modélisation des phénomènes physiques, l'échelle spatiale, la fréquence des observations, l'heure de la mesure, la fraîcheur de l'information sont des entrées essentielles pour définir les futurs systèmes. Il n'y a pas de système ni de technologie universelle.

Pour **l'occupation des sols, à la ville et aux infrastructures**, la résolution spatiale sera un facteur essentiel. Le travail à l'échelle du 1/10 000 correspond à une résolution meilleure que le mètre, encore faut-il mettre le tout sur une carte et donc avoir un modèle d'élévation de terrain, ce qui peut également s'acquérir à partir de données spatiales. Dans ce domaine on souhaite : une haute résolution, une fréquence de passage haute, cela ne peut se faire que par de multiples satellites, du fait de la limitation du champ à 20 000 pixels. Par exemple si on veut une fréquence de passage hebdomadaire il faudra, pour une résolution du mètre environ, un nombre de satellites de $2800 \text{ km} / (20 \text{ km}(\text{champ}) / 7(\text{fréquence de revisite})) = 20$ satellites. Noter que Skybox a un champ de 8 km et une résolution panchro de 1m environ, 2m en XS.

Une tentative pour résoudre ce problème de fréquence d'accès est d'assurer un dépointage en orbite des instruments, (Spot, Hélios, Pléiades, DEIMOS 2) cependant pendant ce dépointage la prise de vue est inutilisable, on perd en résolution spatiale, (distorsion de l'IFOV - voir paragraphe suivant) et on perd à la fois en efficacité et en complexité de programmation, (sans parler de la couverture nuageuse qui diminue sensiblement pour le visible la fréquence réelle de passage).

Quelques précisions, partielles, sur l'imagerie spatiale optique

Dans ce domaine il y a confusion entre différentes notions, en particulier concernant la résolution spatiale.

- IFOV : c'est la trace au sol d'un élément sensible des détecteurs à bord de la caméra embarquée. Souvent considéré comme la résolution.
- FOV ou champ de vue : largeur de la trace au sol de prise de vue de l'instrument.
- Pas d'échantillonnage au sol : intervalle entre deux IFOV dans le sens de la trace du satellite ou transverse à cette trace. Il peut être assez différent de l'IFOV et est généralement non identique dans les deux sens de l'image, (Météosat, Landsat 1, spot 5). S'il est plus petit que l'IFOV, Il constitue une amélioration de la résolution spatiale au prix d'une cadence d'acquisition d'images plus grande, selon le théorème de Shannon. Dans le cas où IFOV est égal au pas d'échantillonnage c'est une cause principale de perte de résolution spatiale.
- Au foyer de l'instrument est placé une série de capteurs : barrettes, matrices ou groupe de quelques détecteurs pour un scanneur, qui permettent de recueillir le signal venant de la surface du sol. Des filtres en amont de ces détecteurs, ou l'utilisation d'un réseau permet

de sélectionner les longueurs d'ondes de la mesure. La prise de vue est mono dimensionnelle, (scanneur ou barrette) ou bidimensionnelle, (matrice) Dans le cas de barrettes ou de matrices il est possible d'effectuer un ralenti de la vitesse de défilement ou d'intégrer le signal sur un même détecteur ou sur plusieurs lignes afin d'augmenter le rapport signal à bruit, (le temps de pause). On parle alors de ralenti ou de TDI.

- Le rapport signal sur bruit est un élément essentiel dans la résolution spatiale, (piqué de l'image). Il résulte de la capacité de l'optique de collecter les flux de lumière, de la sensibilité et des bruits intrinsèques des détecteurs, de l'électronique de lecture, du codage analogique numérique, (quantification) des mesures lors de la transformation du signal analogique détecté en valeur numérique correspondant à un point, (PIXEL) de l'image.
- Des traitements de compression, et de rééchantillonnage au sol sont nécessaires pour mettre l'image sur un format de type carte, calibrer et corriger des erreurs géométriques de l'instrument.
- La stabilité de la prise de vue est essentielle si on veut combiner les pixels entre eux, (multispectral ou multi temporel) ou durant la période d'intégration du signal à bord. Le contraste d'un objet a un grand rôle dans sa détection (cas d'une étoile de dimension nulle que l'on voit sur un ciel noir).
- La résolution spatiale dépend principalement de tous ces facteurs, en simplifiant du rapport signal sur bruit et de la fonction de transfert de modulation de l'instrument.
- Un télescope avec un trou dans le miroir principal introduit des pertes de rapport signal à bruit et fait chuter la résolution spatiale à diamètre équivalent.
- De même le champ de l'instrument est limité par les défauts de l'optique : aberration sphérique, coma, linéarité, astigmatisme, non planéité au foyer, délocalisation selon la longueur, courbure du champ. C'est pourquoi on ne peut réaliser des champs de plus de 10 000/20 000 points sur un large spectre de longueur d'ondes.
- Dernier point, les fréquences visibles et proche IR 0,5 à 1.1 microns sont les plus utilisés dans l'imagerie XSpectrale. L'IR moyen 1,5-1,7 microns et 2.1-2.35 microns permettent de mieux distinguer la végétation, les glaces et la neige. L'IR thermique se situe dans les longueurs d'ondes 6 à 12 microns.
- Dans le premier cas, (0.5- 2.35 microns on reçoit une lumière rétro diffusée, dans l'IR thermique le flux de lumière correspond au rayonnement émis par la cible. Les longueurs d'ondes que l'on peut mesurer correspondent aux trous de visibilité de l'atmosphère. Notons le facteur 10 entre ces longueurs d'ondes.
- En pratique les détecteurs pour le visible et le proche IR, ceux de l'IR moyen et ceux de l'IR thermique sont de nature et de technologies différentes pour optimiser leur sensibilité et leur température de fonctionnement.

5/ Questions que pourrait poser l'Office aux acteurs industriels et agences spatiaux

Espace et services commerciaux

Les télécommunications

- Quels sont les avantages des constellations en orbite basse vs Satellites géostationnaires en termes de coûts de déploiement, de maintien en conditions opérationnelles, de temps de transit etc. quand on prend en compte le système complet bord et sol (lancement, satellites, centre de contrôle, gateway, terminaux...) ?

L'observation de la Terre

- Les acteurs traditionnels du spatial (industriels, agences) sont-ils bien placés pour l'aval et les valeurs ajoutées aux données spatiales ?
- Les algorithmes développés par la communauté scientifique pour extraire des informations physiques des données spatiales sont des pépites : quelles sont les actions prises pour les valorisées ?
- Pour les applications en Observation de la Terre, quels sont les services qui nécessitent une constellation de microsattellites ?
- L'amélioration des connaissances de l'Univers et de l'état de la Terre avec les données spatiales est-elle un enjeu suffisamment partagé par le contribuable pour maintenir voire augmenter les budgets qui y sont alloués ?
- Les données issues du spatial doivent-elles être en accès libre pour ensuite fournir une plus-value de service ou payantes pour l'utilisateur ?
- La maîtrise des technologies et des systèmes nécessaires à la garantie de l'intégrité des informations fournies par et via le spatial est-elle bien entre les mains des acteurs français ?

Nouveaux services dans l'espace

Assistance au retrait du service

- Quel est la viabilité économique d'un service de « réorbitation » (+ 300 km) en fin de vie pour les satellites géostationnaires « morts » ?
- Les opérateurs sont-ils prêts à payer ce service pour aller jusqu'à la perte de leur satellite plutôt que le « réorbiter » alors qu'il marche encore ?

- Le nettoyage des débris en orbite basse n'est-il pas bien plus risqué en termes de génération de débris que de bienfaits ? Sans parler du coût

Les politiques publiques françaises et européennes

- Le renforcement des compétences de la commission européenne sur le spatial avec notamment Galileo et Copernicus sans « georeturn » imposé ainsi que le « Brexit » sont-ils en mesure de modifier le tissu industriel européen ? Comment et avec quels impacts en France ?
- Dans quelles mesures les maîtres d'œuvre et les agences sont-ils prêts à laisser, voire aider leurs fournisseurs PME à s'ouvrir au marché spatial mondial ?
- Serait-il pertinent de structurer un champion français des segments sol utilisateur de données spatiales (*big data*, ...)

Autres points

R&D et innovation

- Quelles actions sont prises pour que le spatial tire profit rapidement des innovations des autres secteurs (nano-électronique, impression 3D, matériaux composites, IA...) malgré les constantes de temps des qualifications spatiales des technologies ?
- Les politiques de Propriété Intellectuelles et de brevets des acteurs du spatial sont-elles adaptées au secteur pour favoriser les innovations système ?
- Quels types de missions spatiales (sciences de la Terre, exploration, télécommunications, observation, ROEM, lanceurs...) nécessitent le plus de R&D spécifiquement spatiales et dans quels domaines (électronique, thermique, environnement spatial, propulsion, énergie...) ?
- Quelles actions sont prises pour faire émerger des missions spatiales innovantes ?

Les ruptures technologiques en cours et à venir

- Réduire le coût d'accès à l'Espace n'entraînerait-il pas une rupture technologique, y compris au niveau des systèmes et des missions accessibles ?
- Au niveau système, la prochaine rupture ne serait-elle pas les vols en formation (ex Symbol X, Darwin, instrument virtuel...) pour gagner plusieurs ordres de grandeur en résolution ?
- Les acteurs du spatial voient-ils une rupture dans l'usage des données spatiales grâce à l'interopérabilité, au « big data », à l'IA...