

FEUILLES DE ROUTE TECHNIQUES DU CNES

LES TECHNOLOGIES DES SERVICES EN ORBITE

CAPACITÉS ET BRIQUES NÉCESSAIRES



JUIN '24

Le contexte

La nouvelle économie du spatial cherche à se développer autour de services aux infrastructures spatiales avec de nouveaux acteurs industriels qui se positionnent en complément des acteurs traditionnels.

Des marchés pourraient se développer dans la prochaine décennie autour de ces nouveaux services comme : la mise à poste de satellites ou de constellations, la mobilité orbitale, l'inspection, le retrait de débris, la gestion de fin de vie des satellites, la réparation, l'extension de la durée de vie, la desserte de laboratoires spatiaux ou l'assemblage et la fabrication de modules en orbite...

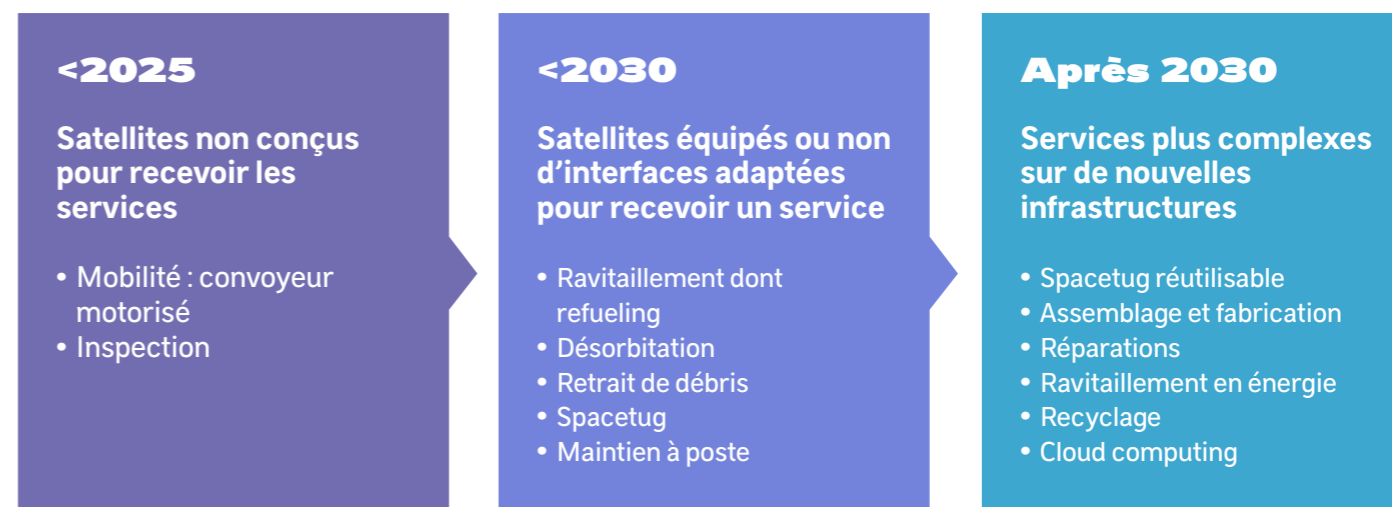
Ces services auront besoin de nouvelles avancées technologiques que le CNES souhaite accompagner afin de contribuer au développement du futur écosystème et de répondre aux besoins de ses futurs projets.



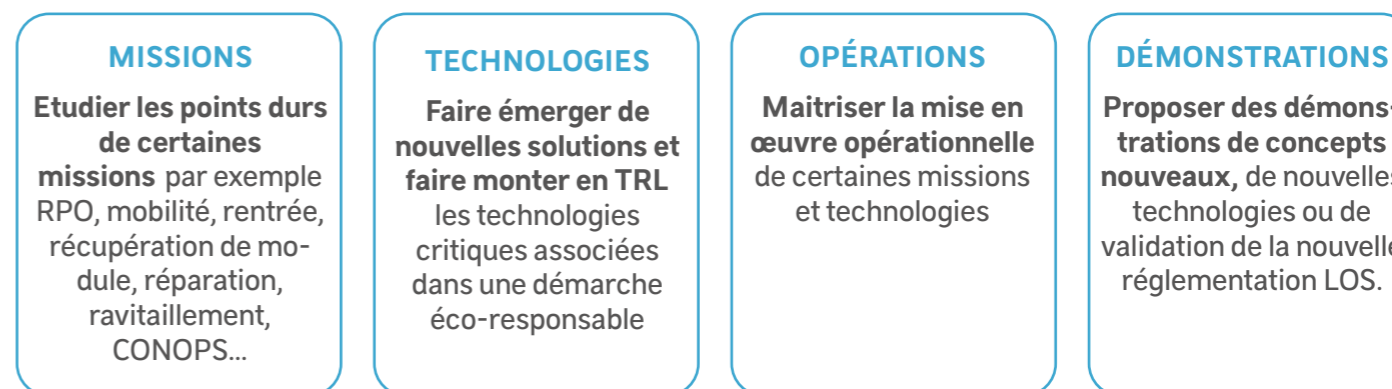
Des missions de démonstration récentes, américaines ou japonaises notamment, ont démontré la faisabilité de missions complexes d'extension de la durée de vie d'infrastructures spatiales, ouvrant la voie à de nouveaux services dans l'espace. Plusieurs autres missions opérationnelles ou de démonstration sont en préparation, notamment au niveau Français dans le cadre du volet spatial de France 2030 ou de projets de défense.

Les actions portées par le CNES seront complémentaires des sujets sélectionnés dans le cadre des AAP et AO F2030 ou dans le cadre des initiatives de l'ESA ou de la Commission européenne.

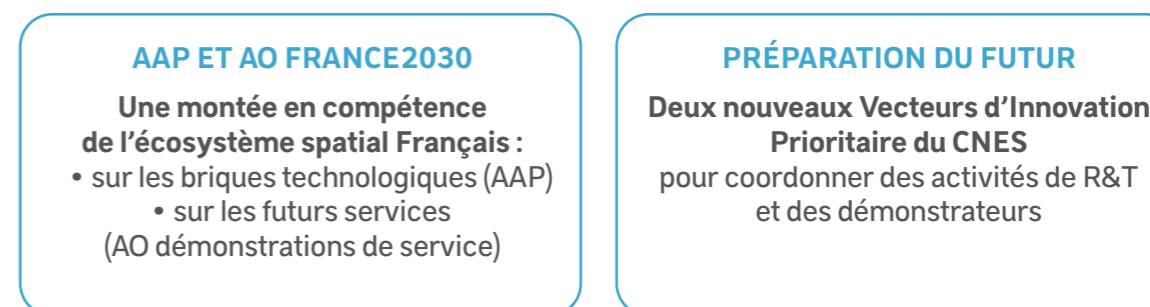
En un coup d'œil



Les 4 piliers de la feuille de route technique du CNES sur les services en orbite



Deux principaux cadres de réalisation complémentaires



Les enjeux

Diversité des services considérés

Services fournis par un module de service à un objet spatial déjà en orbite (satellites ou plateformes ou débris ou astéroïdes), sans intervention humaine, en mode autonome.

Services de mobilité dans l'espace (transport)	
Support à la Mise à poste finale après lancement	Service de convoyage de satellites sur leurs orbites finales après lancement sur une orbite intermédiaire par un lanceur : docking en vol sur des satellites déposés sur une orbite intermédiaire et amenés ensuite à leur destination finale.
Services de relocalisation	Services qui repositionnent un satellite, déjà en orbite et en opération, sur une autre position orbitale (changement plan, altitude, inclinaison...). Le module de service et le satellite sont mis en orbite par des lancements indépendants, le module de service vient s'amarrer au satellite client pour le déplacer.
Services de correction d'orbite	Ce service consiste à ramener un satellite, qui aurait dérivé, sur son orbite nominale. L'opération est réalisée par un module de service qui vient s'amarrer au satellite client pour le déplacer.
Services de désorbitation ou gestion fin de vie	Ce service consiste en la capture d'un satellite en fin de vie (actif et coopératif) afin de le transporter soit sur une orbite cimetièrre soit sur une orbite qui va accélérer sa rentrée dans l'atmosphère.
Service d'enlèvement de débris (ADR)	Ce service consiste à capturer un débris (cible non coopérative et en rotation instable) et le déplacer vers un orbite cimetièrre ou accélérer sa rentrée dans l'atmosphère.
Services de station service/dépôt de carburant en orbite	Ce service consiste à permettre à des modules de services « ravitailleurs de satellites » de se recharger en carburants dans une station positionnée dans l'espace pour une certaine durée. Note : il faudra aussi pouvoir ravitailler cette station-service qui permet le stockage d'ergols.

Services de maintenance /réparations et extension de durée de vie	
Service de maintien à poste (AOCS keeping)	Après amarrage au satellite cible, le module de service effectue le maintien à poste du satellite (qui probablement a son système AOCS en panne) ce qui permet de prolonger la durée de vie.
Service de réparation / maintenance	Ce service consiste à ajouter, remplacer ou réparer des éléments sur un satellite opérationnel en orbite de façon à étendre sa durée de vie ou bien maintenir le système en configuration opérationnelle. Dans ce dernier cas, les opérations de maintenance sont définies et prévues dès la conception du satellite. Le satellite est coopératif mais potentiellement a des sous-systèmes en panne.
Service de reconfiguration	Ce service permet de modifier la configuration du satellite ou de la plateforme pour étendre la mission ou permettre la mise en place d'une nouvelle mission (changement ou ajout de payload, ajout de modules ..).
Service de ravitaillement en Ergols (Refueling)	Le module de service, après amarrage au satellite ou à la plateforme, transfère du carburant au satellite cible pour lui permettre d'augmenter sa durée de vie.
Service de recharge électrique	Le module de service, après amarrage au satellite ou à la plateforme, réalise une recharge en énergie – (autre solution possible : recharge par rayonnement).

Services d'inspection	
Inspection en orbite	Services qui consistent à se rapprocher d'un objet spatial (coopératif ou non) soit pour examen de l'état d'un satellite ou d'un objet en orbite et diffusion « d'observables », soit pour préparer d'autres opérations sur la cible.

Services assemblage/fabrication d'un objet en orbite pour des besoins spatiaux ou terrestres	
Fabrication en orbite	Services de fabrication dans l'espace d'éléments (composants, matériaux, produits..) pour des besoins terrestres ou spatiaux.
Assemblage en orbite	Services proposant l'assemblage de pièces ou la combinaison de modules pour en faire un nouvel objet spatial. Ce service peut aussi faire l'intégration d'éléments au titre de la maintenance ou de la réparation d'un objet spatial.
Recyclage en orbite	Services qui consistent à récupérer les matériaux de certains objets spatiaux dans l'espace et les transformer pour en faire de nouvelles pièces ou produits pour des engins spatiaux.

En revanche, à ce stade, nous n'avons pas décliné dans cette feuille de route technique les services suivants : archivage en orbite, service de satellite relais de communications, hébergement de charge utile.

Les services recyclage en orbite et recharge en énergie (dont la définition reste à préciser) sont listés dans ce tableau pour des raisons de complétude, mais les technologies associées n'étant pas encore assez matures, ils ne sont pas pris en compte dans les autres sections de cette feuille de route. C'est le cas également des fermes solaires.

D'autres activités spatiales peuvent être considérées comme des services en orbite, par exemple la localisation d'objet dans le cadre de la SSA pour sa composante spatiale, mais sont traitées dans d'autres cadres bien établis et donc non considérées en tant que telles dans cette feuille de route, même si les technologies et logiques d'acteurs peuvent être communes.

Ruptures techniques

Parmi les principales **ruptures techniques** qui accompagneront ce nouvel essor des activités spatiales, on peut citer les aspects suivants :

- Développement de **nouvelles capacités d'intervention** dans l'espace (ex mobilité, agilité, réactivité, autonomie, robotique, rendez-vous et docking)
- **Exploitation plus durable** de l'espace (réutilisation de tout ou partie des véhicules, réparation, retrait de débris, meilleure gestion de la fin de vie des satellites)
- **Nouvelle conception des infrastructures spatiales** (logistique, infrastructures distribuées ou modulaires ou assemblées en orbite, infrastructures maintenables en orbite ...)
- Amélioration de la **résilience** des systèmes satellitaires
- Baisse du coût des missions et **revisite du compromis cout/performance/durée de vie.**

Freins techniques

Plusieurs freins limitent actuellement le développement de ces nouveaux services et leur adoption par les opérateurs de satellites :

- **La maturité et la complexité de certaines technologies** : robotique, ravitaillement fluide, opérations de rendez-vous de proximité, exigences fortes de mobilité des véhicules (propulsion et énergie), autonomie pendant les opérations critiques, gestion de fin de vie des véhicules OTV etc.
- **La capacité des véhicules OTV** à disposer de modules de propulsion à la fois réactifs, efficaces et durables et d'un contrôle d'attitude performant, à se ravitailler en ergols en orbite pour enchaîner des opérations de « servicing » sur plusieurs années (typiquement 10 ans).
- **La démonstration de conformité à la réglementation** : pour la France, la loi sur les opérations spatiales évolue pour intégrer les opérations nécessaires aux services en orbite. L'absence de cadre réglementaire international figé et/ou harmonisé est certainement perçue comme un frein majeur.
- Le manque de **standardisation** et le besoin de développer de **nouvelles méthodologies** adaptées au développement de ces services
- Les **satellites en orbite actuellement**, qui ne sont pas conçus pour recevoir des services et en particulier ne disposent pas d'interfaces adaptés.
- Les **difficultés liées à l'environnement spatial** LEO, GEO, voire cislunaire ou interplanétaire, comme pour toute mission spatiale.

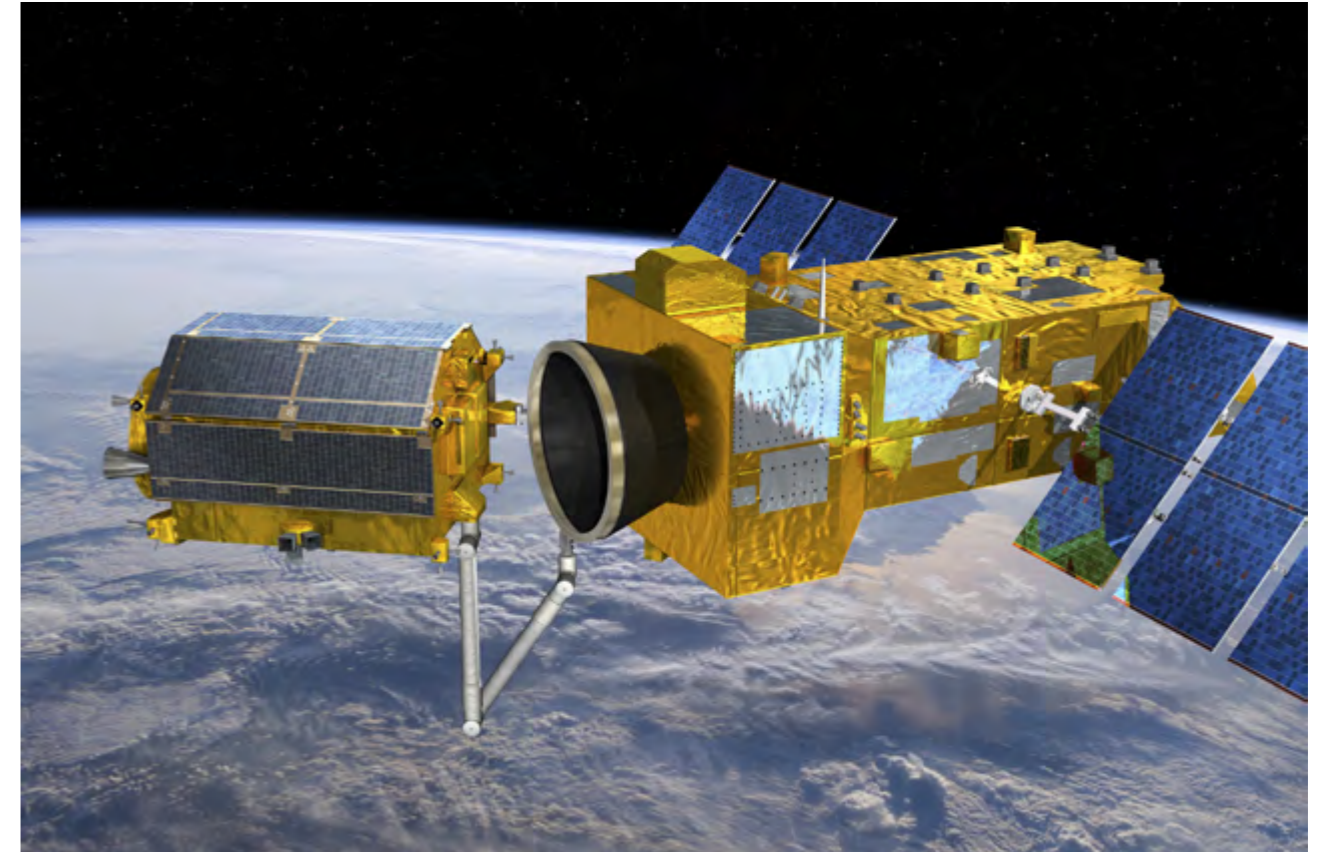
Compte tenu des enjeux de sécurité et de la complexité des opérations et des technologies à maîtriser, de nombreuses démonstrations seront nécessaires, d'une part pour que les concepts, les technologies et les standards arrivent à maturité et d'autre part pour maîtriser la sécurité des opérations via une qualification sur des cibles dédiées.

Enjeux environnementaux

Par l'étendue de leur périmètre, par la transformation profonde qu'ils induisent, les services en orbite exigent une **attention particulière** pour garantir une utilisation durable et sûre de l'espace. Au-delà de chercher à avoir une **empreinte environnementale** la plus faible possible, le service en lui-même peut avoir pour objectif de **contribuer à un espace durable** en rationalisant la logistique orbitale et en proposant par exemple du retrait de débris, des services d'extension de durée de vie, de production d'énergie à partir de ressources spatiales... Il peut aussi contribuer à **rendre l'espace plus sûr** au travers de la surveillance de l'espace, de la gestion du trafic spatial ou de la proposition de service de contrôle ou de certification en vol. Enfin, le service en orbite peut contribuer à la **gestion durable des ressources terrestres** (recyclage en orbite).

Les démarches d'éco-conception ont tout leur sens pour ce secteur naissant. Le service en orbite **bouscule cependant quelques notions** :

- Le besoin de prendre en compte l'impact terrestre mais aussi l'impact sur les ressources spatiales
- L'extension de la notion à des services, eux-mêmes basés sur des concepts modulaires
- Les possibilités de recyclage ou d'économie circulaire via la remise en cause de la notion de fin de vie au travers du « cannibalisme », de la récupération de matériaux ou d'équipements et leur réutilisation (par exemple capteurs solaires).



In-Orbit Servicing Target Capture pillars
© ESA-David-Ducros

Réglementation Loi sur les Opérations Spatiales (LOS)

Une mise à jour de la Réglementation Technique de la LOS a été réalisée en concertation avec les acteurs concernés. Elle sera applicable prochainement (prévue en Juin 2024) et introduit un ensemble de définitions et d'exigences relatives aux opérations de services en orbite, certaines s'appliquant à toutes les phases de la mission, d'autres s'appliquant spécifiquement à la phase de vol à proximité, à la phase d'approche et de contact, à la phase attachée, ou à la phase de séparation et d'éloignement. Ces exigences, qui sont mises en place pour encadrer le nouveau marché du Service en Orbite, visent à **limiter le risque de collision** entre l'objet cible et le serviteur. Ainsi, elles peuvent être **particulièrement dimensionnantes pour le système, le véhicule de service et les opérations**.

On peut citer en particulier pour les phases d'approche et de RDV :

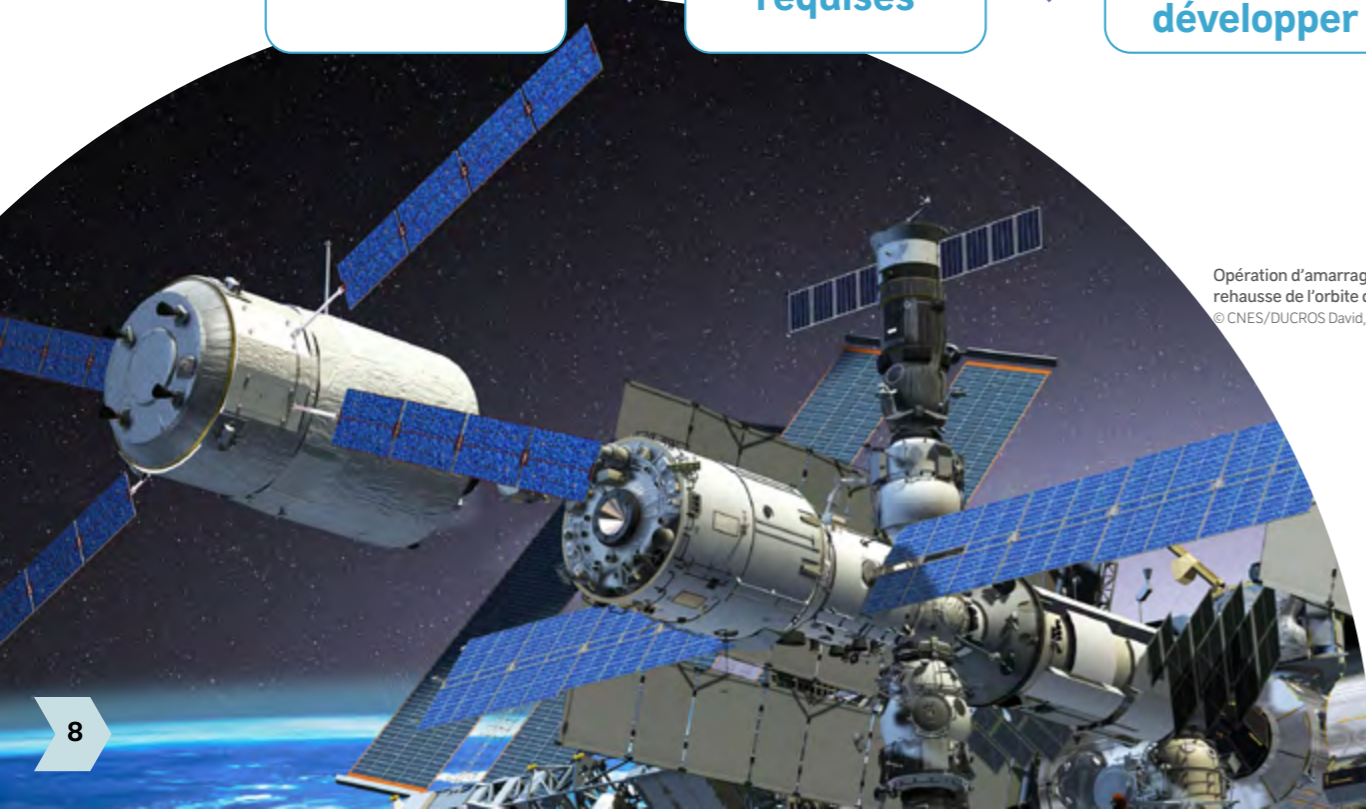
- La mise en place de surveillances GNC et de modes de replis sûrs potentiellement autonomes, au niveau du véhicule de service en cas de risque de collision avec la cible,
- Des concepts opérationnels bord et sol assurant la sécurité pendant les phases critiques (observabilité/commandabilité Go-NoGo avec une forte réactivité...).
- Des démonstrations/qualification en vol des phases de rendez-vous sur des orbites non/moins « critiques » en terme d'environnement spatial.

Les axes techniques

Fort de l'expérience acquise de précédentes missions ou études (ATV, YODA...), les services techniques du CNES proposent à travers cette feuille de route de :

- Accompagner la **levée de risques technologiques** et la montée en maturité des solutions technologiques sachant que la complexité intrinsèque des technologies demande des investissements importants
- Maîtriser la **sécurité de ce type d'opérations** pour être en capacité notamment de définir et de faire appliquer une réglementation.
- Maîtriser les **capacités nécessaires aux missions duales** en anticipant les développements technologiques clés et complexes
- Développer et maintenir des **compétences dans l'écosystème** français et accompagner les industriels qui souhaiteraient développer des services ou des produits nécessaires aux services en orbite.
- Soutenir, en coordination avec l'industrie, la définition des **standards** et les méthodologies de validation/qualification
- Veiller à la **compétitivité** des solutions techniques développées pour permettre le développement des services associés.

Des besoins des SERVICES découlent des CAPACITES nécessaires à la réalisation desdits services puis une identification des TECHNOLOGIES clé à développer.



Opération d'amarrage et rehausse de l'orbite de l'ISS
© CNES/DUCROS David, 2014

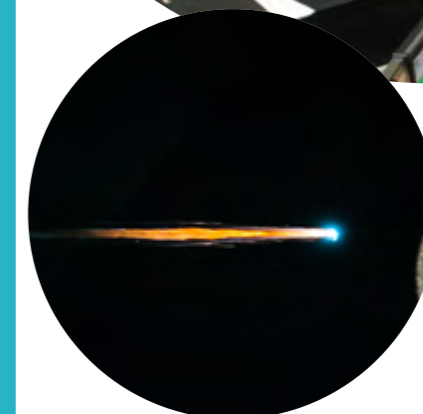
Notre analyse nous a permis d'établir la liste des capacités suivantes comme étant nécessaires aux services identifiés plus haut. Un service donné requiert souvent plusieurs capacités (par exemple, le service d'inspection requiert des capacités de déplacer un satellite, réaliser des opérations d'approche, une capacité de métrologie, voire une capacité à actionner un bras robotique dans certains cas). Réciproquement, développer une capacité donnée permet souvent de préparer l'émergence de plusieurs services.

Capacités requises par les principaux services en orbite

- ✓ Mettre à poste des satellites sur leur position finale (convoyage)
- ✓ Détecter un objet dans l'espace
- ✓ Localiser avec précision un objet dans l'espace
- ✓ Réaliser un lien de communication RF ou optique avec un objet collaboratif
- ✓ Réaliser les opérations d'approche et de rendez-vous
- ✓ Effectuer une inspection ou une métrologie
- ✓ Capturer et accrocher la cible
- ✓ Se séparer et s'éloigner d'une cible
- ✓ Opérer un bras robotique pour des opérations complexes
- ✓ Déplacer un ou plusieurs satellites dans l'espace
- ✓ Réaliser un ravitaillement fluide
- ✓ Recharger en Energie un satellite
- ✓ Mener des opérations de maintenance
- ✓ Assembler des pièces ou modules en orbite
- ✓ Fabriquer des pièces en orbite
- ✓ Maîtriser la sécurité et la sûreté des opérations



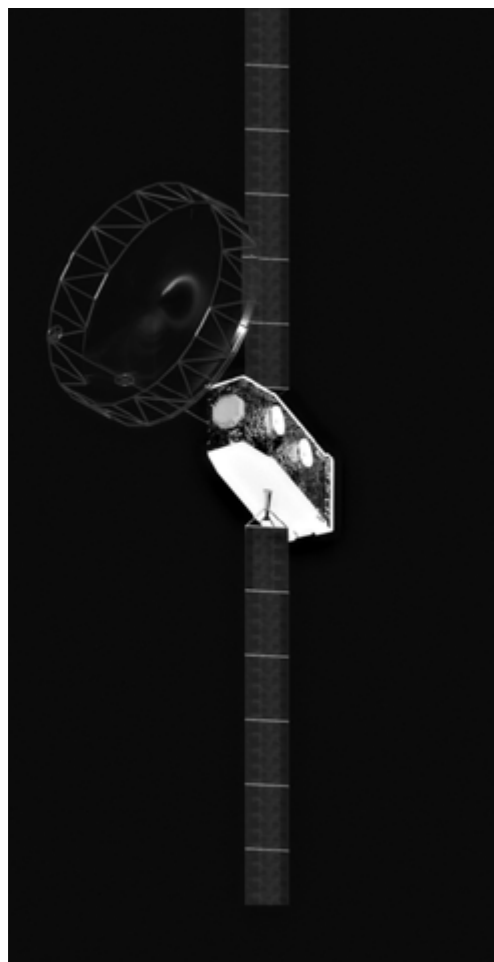
Entraînement undocking ATV 4
© CNES/GIRARD Sébastien, 2013



Rentrée atmosphérique de l'ATV 4
© NASA/ESA, 2013



© Exotrail_1920-1080-max



© Inmarsat_simulationBlender

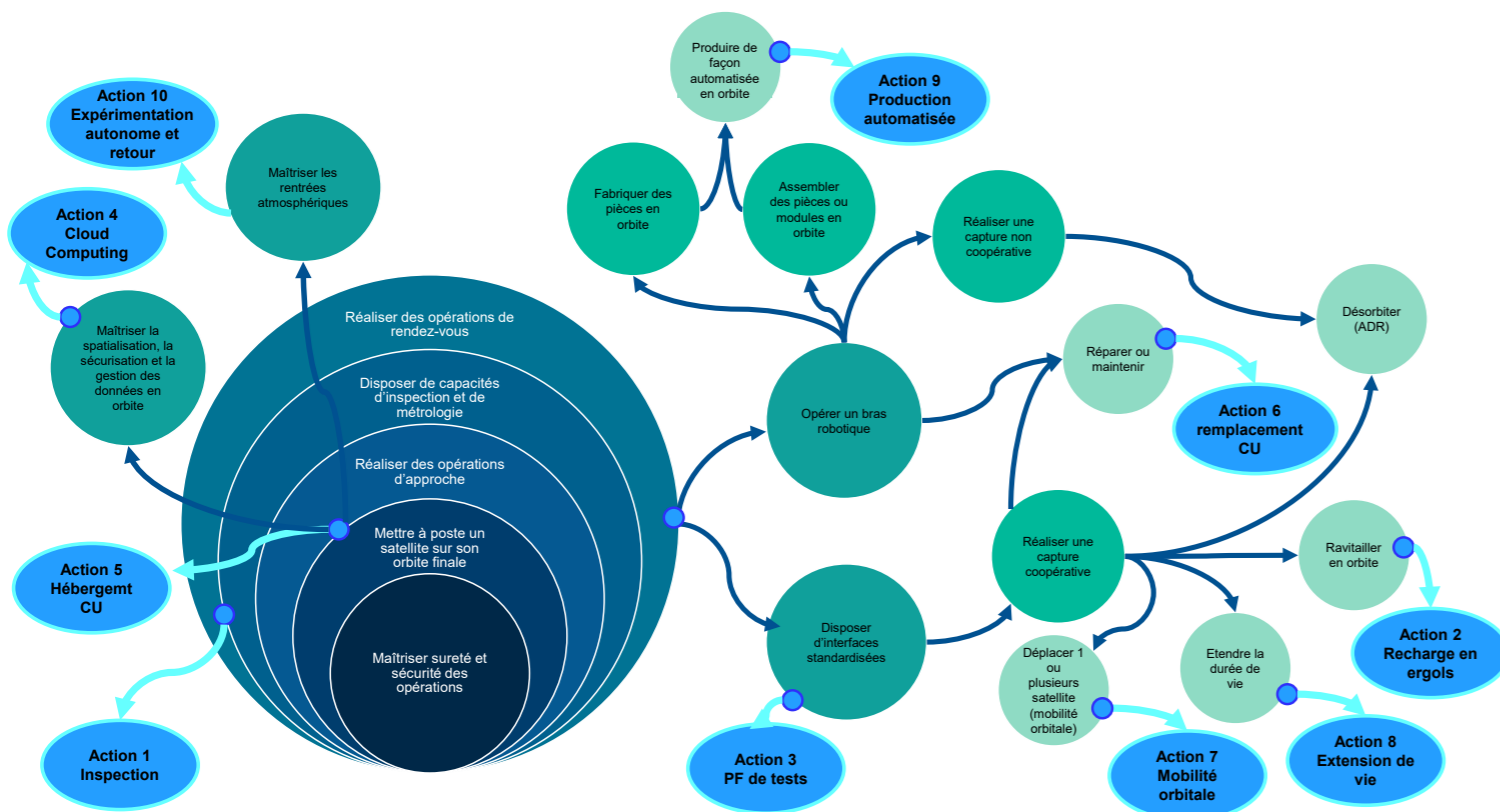


© OledComm_LIFI

Fonctions technologiques	Spécifique aux SEO	Observations	Priorité
Robotique et bras robotique et automatisation	Oui	Maitrise de cette technologie est stratégique et transverse à presque tous les types de services mais avec des solutions de complexité différentes	1
Autonomie des véhicules de services en Vol	Non	A coupler avec les aspects sécurité. Un système GNC robuste est requis.	1
Identification précise de la cible	Non	Pour localiser et identifier précisément l'attitude de la cible, nécessite une instrumentation embarquée (caméra) et des algorithmes associés	1
Navigation basée vision	Non	Indispensable pour la plupart des opérations, requiert l'identification précise de la cible mentionnée plus haut	1
Forte capacité de décision à bord	Oui	Besoins justifiés pour la navigation, la sécurité, les services (ex assemblage) et la réactivité en cas d'aléas	1
Automatisation	Oui	Nécessaires pour tous les services	1
Opérations	Oui	Besoin de maitriser des opérations complexes et les situations d'aléas en respectant la LOS Besoin de conduire des opérations coordonnées	1
Propulsion	Non	Besoin de développer des systèmes propulsifs réactifs et efficaces	1
Interface de transfert d'ergols y compris cryogéniques et gaz de servitude	Oui	Besoin pour les services de refueling et véhicules multimitations de transport / service	1
Interfaces pour le docking	Oui	C'est une des technologies clés pour les SEO	1
Fabrication additive en orbite pour différents matériaux (métal, polymères, composite)	Oui	Technologie clés pour l'assemblage en orbite	1
Contrôle du satellite ou composite lors des opérations du bras robotique - contrôle du bras	Oui	Points très critiques et des études système seront nécessaires afin de définir les interfaces et les spécifications des sous systèmes	1
Communications	Non	Sécurisations des liens et développement de liens entre un véhicule et une cible coopérative	2
Transmissions sans contact	Non	Important pour la simplification des interfaces	2
Modularité	Non	Une approche de conception modulaire des nouvelles infrastructures et des nouveaux systèmes est nécessaire pour garantir la capacité à remplacer les modules	2
Jumeaux hardware et numériques	Non	Indispensables pour la compréhension au sol des pannes, la répétition d'opérations de maintenance, d'assemblage, de contrôle, d'opérations en orbite...	2

En cours...

La dépendance entre les capacités clé et les services conduit à développer un certain nombre de capacités en pré-requis aux services visés et définit donc naturellement une séquence pour les activités à mener.



Les actions technologiques requises sont d'ores et déjà en cours de réalisation dans différents cadres de la préparation du futur, notamment la R&T et les démonstrateurs (cf liste ci-contre).

Répétition générale de mise à poste du satellite SWOT
© CNES/LANCELOT Frédéric, 2022



Liste des R&T et démonstrateurs en lien avec SEO

Systèmes propulsifs

- Poursuite des développements de propulseurs électriques
- Développement de solutions de propulsion chimique (applications duales)
- Développement des technologies résistojet
- Développement de composants fluidiques servant à la fois la propulsion électrique et le refueling
- Travaux sur les interactions entre plume et satellite pour rendez-vous et navigation de proximité

Charge utile caméra

- Développements dont tourelle/périscope pour caméra
- Cartes calculatrices/électronique de traitement et mémoire intelligente
- Traitements bords en général
- Développements de cubes de détection pour microcaméra

Dynamique de vol

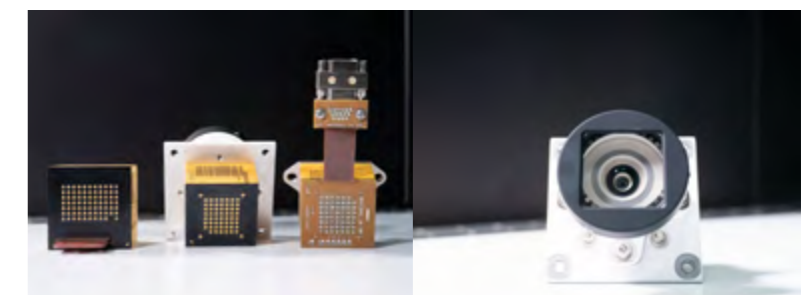
- Faisabilité d'un rendez-vous à propulsion électrique en orbite GEO
- Pilotage de systèmes orbitaux redondants - Application aux grappes d'actionneurs gyroscopiques et systèmes robotiques
- GNC pour approches spéciales
- Navigation basée vision dont utilisation des mesures d'un gyromètre au niveau du traitement des images

Des développements très spécifiques aux SEO

- Développement d'une maquette fonctionnelle de transfert multi-ergols pour le ravitaillement en vol
- Technologies d'assemblage en orbite d'un réflecteur :
 - Caractérisation RF d'un réflecteur assemblé en orbite avec une source adaptative
 - Démonstration de l'assemblage en orbite d'un réflecteur
 - Interfaces pour kit d'antenne assemblé en orbite
- Interface de docking
- Algorithmes de détection pour satellites guetteurs

Et d'autres plus transverses mais d'intérêt pour les services en orbite

- Concept de batterie intelligente, modulaire et autonome permettant au niveau système une meilleure observabilité et commandabilité de la fonction stockage d'énergie.
- Spatialisation de la technologie Li-Fi



Caméra CASPEX
© CNES/DE PRADA Thierry, 2022

Prochaines étapes



© Illustration CNES / Studio graphique

Un Vecteur d'Innovation Prioritaire a été construit pour les Services en orbite. Il permettra de travailler sur un horizon de 5 ans les sujets suivants à travers des activités de préparation du futur (R&T, thèses, projets exploratoires...):

> Missions et concepts d'exploitation

- Etudes systèmes d'identification d'applications économiquement viables
- Etudes des modes d'intégration des systèmes en interface dans ces missions (relai télécom, support SSA, segment sol, CONOPS)

> Standardisation

- Identification des standards existants ou en cours d'émergence et de leur pertinence
- Contribution à l'élaboration de ces standards et éventuellement développement d'équipements y répondant

> Technologies de Rendez Vous et d'Amarrage

- Senseurs de navigation ou d'inspection optiques ou RF
- Autonomie et sécurité en RPO
- Contrôle d'orbite et d'attitude pendant les phases de RPO
- Technologies pour les interfaces mécanique (mécanismes de capture), fluide, puissance, données (LiFi...)

> Robotique, assemblage, réparation et fabrication en orbite

- Capteurs et actuateurs après amarrage (bras hyper agile)
- Assemblage de structure de grandes tailles (réflecteurs, panneaux solaire, etc.)
- Impression en orbite

> Méthodologies, logiques de développement et de qualification des missions SEO

- Adaptations des méthodologies actuelles au SEO (qualification pour la fabrication en orbite, etc.)

Ce VIP couvre la thématique des services en orbite avec **le VIP « Solutions de transport dans l'espace »** qui porte les activités de préparation du futur sur les points suivants :

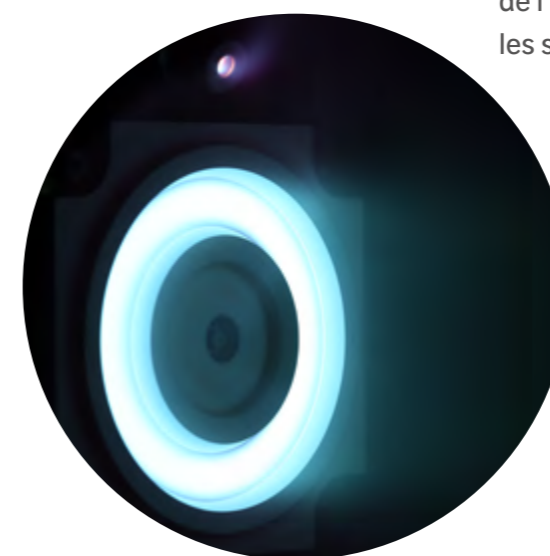
- Technologies associées aux moyens de transport spécifiques (dispenser motorisé, remorqueur spatial, kit de mobilité...) comme la propulsion, le contrôle de vol, l'énergie, le stockage d'ergol longue durée, le refuelling, les communications montantes et descendantes entre le véhicule et le sol, les infrastructures sol nécessaires au suivi de la mission
- Standardisation des interfaces pour opérer et interagir avec n'importe quelle plateforme
- Études technico-économiques de concepts de véhicule de transport en orbite

Le VIP «Tech 4 Space Care», qui vise à développer des solutions concourant à un usage durable de l'espace, contribue également à la thématique via son axe sur le retrait actif de débris.

Pour les services en orbite, **le volet spatial du plan de relance France 2030** soutient les développements des technologies dans l'écosystème national via :

- **Les Appels A Projets** pilotés par la BPI. Parmi les projets déjà retenus, on peut noter des développements technologiques pour des services d'inspection, d'extension de durée de vie, d'assemblage en orbite, l'expérimentation en micro-gravité, les communications optiques sans fil, une propulsion adaptée au rendez-vous et à l'amarrage.
- **Les Appels d'offres de démonstration de services** portés par le CNES :
 - Dispenseur motorisé (orbite géo et orbite LEO)
 - Inspection
 - Mobilité orbitale

Les travaux techniques de la préparation du futur du CNES combinés à ces appels d'offres ont pour objectif d'appréhender au mieux ces futurs systèmes, complexes, duaux et structurants pour le spatial de demain et ainsi de contribuer à l'ambition stratégique de faire de l'industrie Française un leader sur les services en orbite à horizon 2030.



© Safran_PPS5000

ACRONYMES

AAP : Appel A projets

ADR : Active Debris Removal (retrait de débris actif)

AO : Appel d'Offre

AOCS : Attitude and Orbit Control System (système de contrôle d'attitude et d'orbite)

ATV : Automated Transfer Vehicle

BPI : Banque Publique d'Investissement

GEO : Orbite géostationnaire

GNC : Guidance, Navigation, Contrôle

LEO : Low Earth Orbit (orbite basse)

LOS : Loi sur les Opérations Spatiales

OTV : Orbit Transfer Vehicle (véhicule de transfert d'orbite)

RF : Radio-Fréquences

RPO : Rendez-Vous and Proximity Operations

SEO : Services en Orbite

SSA : Space Situational Awareness

YODA : Yeux en Orbite pour un Démonstrateur Agile

LIENS

CNES

www.cnes.fr

ConnectByCNES

<https://www.connectbycnes.fr>

Comet

<https://www.comet-cnes.fr>

France 2030

<https://www.economie.gouv.fr/france-2030>

<https://www.economie.gouv.fr/premiers-resultats-volet-spatial-france-2030-devoiles>

BPI

<https://www.bpifrance.fr>

Appel à idées préparation du futur du CNES

https://rd-cnes.wiin.io_

DES QUESTIONS, DES COMMENTAIRES ? VOTRE AVIS NOUS INTERESSE

courriel : fdr-techniques@cnes.fr

