

FEUILLET DE POLITIQUE TECHNIQUE DU CNES

LOGICIEL DE VOL

L'INTELLIGENCE DES MISSIONS SPATIALES



NOVEMBRE
'25

Objectif des feuillets de politique technique

→ Les Feuilles de Politique Technique visent à éclairer l'écosystème spatial sur les orientations techniques du CNES et sur les actions qu'il entend mener à court et moyen terme, conformément à ses priorités stratégiques et techniques. Fruit d'une réflexion collective, ils s'appuient sur une concertation étroite avec les acteurs industriels et académiques nationaux, tout en s'inscrivant dans le cadre des programmes technologiques européens.

Conçus dans un esprit partenarial, ces Feuilles invitent l'écosystème à contribuer activement à leur enrichissement à travers un dialogue stratégique ouvert avec le CNES. Ils embrassent l'ensemble des technologies et des techniques spatiales, dans le respect strict des règles de diffusion de l'information.

Porté par une dynamique d'amélioration continue au service de l'écosystème spatial français, le CNES, à travers cette initiative, affiche une ambition claire : affirmer la place de la France parmi les leaders mondiaux, en s'appuyant sur la force et la cohésion du collectif national.

ORIENTATIONS
TECHNIQUES

AFFIRMER
LA PLACE DE
LA FRANCE PARMI
LES LEADERS
MONDIAUX

ESPRIT
PARTENARIAL

Retrouvez les Feuilles de Politique Technique du CNES

<https://cnes.fr/entreprises/orientations-techniques>



Le contexte

Faire fonctionner un satellite, c'est parvenir à faire coexister harmonieusement une multitude de fonctions pour mener à bien une mission. Des panneaux solaires aux instruments charge utile (caméras, spectromètres...), des antennes de communication aux traitements informatiques bord, la diversité et la complexité des technologies pouvant être embarquées à bord ne cesse de croître.

Au cœur de cet environnement, le (ou les) processeur(s) constitue(nt) le « cerveau » du satellite, reliant les différents composants mécaniques ou électroniques et hébergeant le Logiciel de Vol (LV), chef d'orchestre et « intelligence » de l'engin spatial.

Un Logiciel de Vol a de multiples objectifs :

➤ Certains sont spécifiques à une mission :

algorithmes scientifiques complexes permettant de détecter des phénomènes astronomiques, ou capacité à faire se mouvoir un rover à la surface d'une planète par exemple.

➤ D'autres en revanche sont récurrents peu importe la mission : assurer la communication avec le Sol et les différents équipements,

détecter d'éventuelles anomalies, etc.

Le tout se doit d'être orchestré en respectant des contraintes temps réel souvent strictes et un niveau de qualité exigeant, garantissant le niveau de criticité souhaité par la mission.

Pour répondre à ce cahier des charges de plus en plus ambitieux, cette feuille de route articule les choix techniques, technologiques mais aussi organisationnels qui s'imposeront pour les logiciels de vol de demain.

Ces choix répondent à des objectifs aussi divers que l'est l'écosystème avec lequel s'interface le CNES, dont la carte ci-après illustre la variété (sans être pour autant exhaustive) : maîtres d'œuvre industriels, équipementiers, startups, laboratoires scientifiques, organismes académiques, agences... au niveau national, européen et international.

Tous ont des ambitions différentes, des contraintes qui leur sont propres et des patrimoines technologiques distincts : le CNES cherche à fédérer cette communauté, au premier ordre au niveau national, autour de propositions techniques pertinentes.

C'est notamment à ce titre qu'a été développé le produit KOSMOS, qui a rencontré un écho favorable dans l'écosystème spatial (auprès des utilisateurs nationaux et européens l'ayant adopté ou plus largement nos partenaires qui font des choix technologiques comparables), et qui sert de socle à l'innovation du CNES dans le domaine.

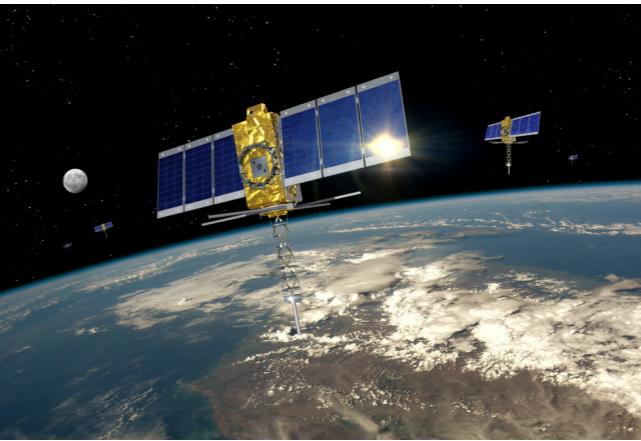


Illustration Kinéis
© CNES/Ill/SATTLER Oliver, 2022

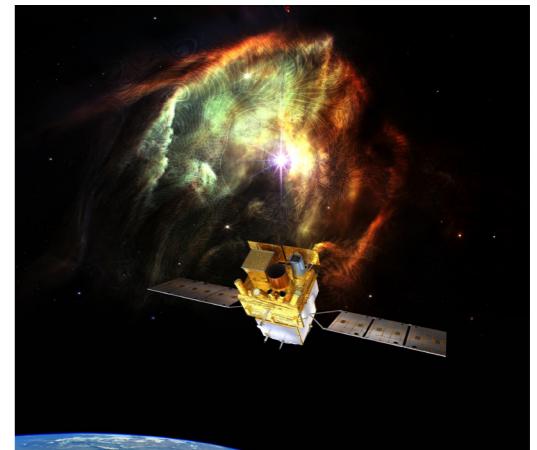
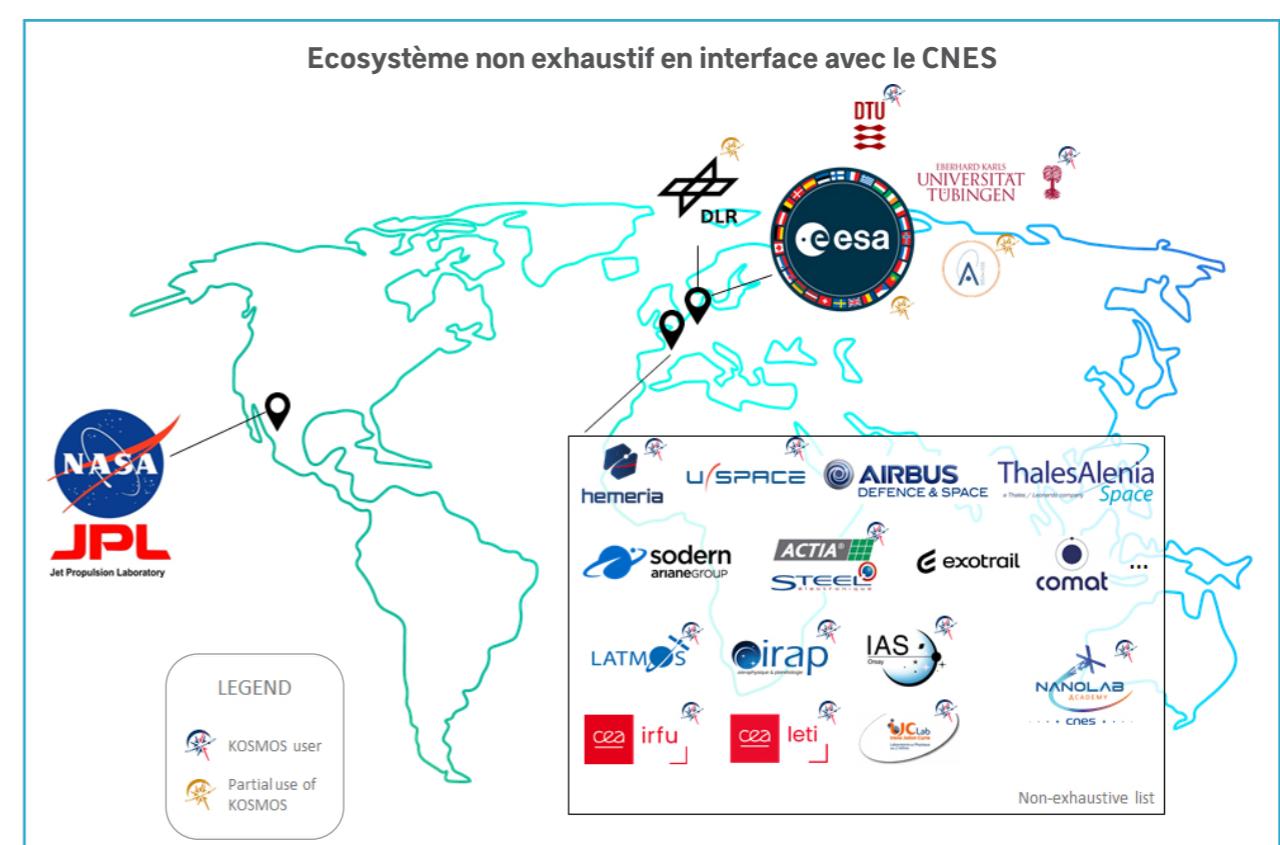


Illustration du satellite S vom
© CNES/Ill/SATTLER Oliver, 2024



Vue d'artiste du rover IDEFIX® de la mission MMX sur Phobos
© DLR (CC BY-NC-ND 3.0)



Focus sur le framework KOSMOS



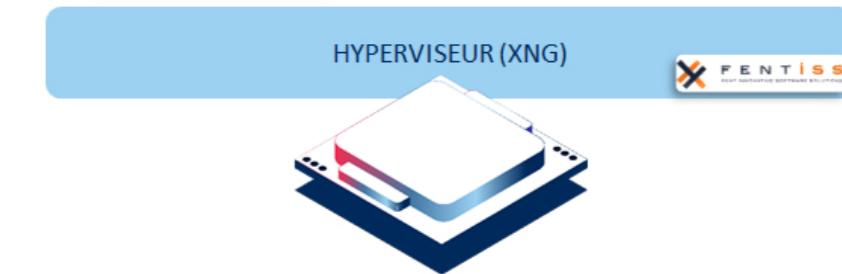
Un focus est fait sur le produit KOSMOS car la plupart des développements et innovations réalisés par le CNES sont capitalisés au sein de ce dernier. KOSMOS est une infrastructure logicielle générique favorisant la réutilisation entre les projets et offrant des caractéristiques sécurisant les missions spatiales.

Page internet du projet KOSMOS : <https://cnes.fr/projets/kosmos>

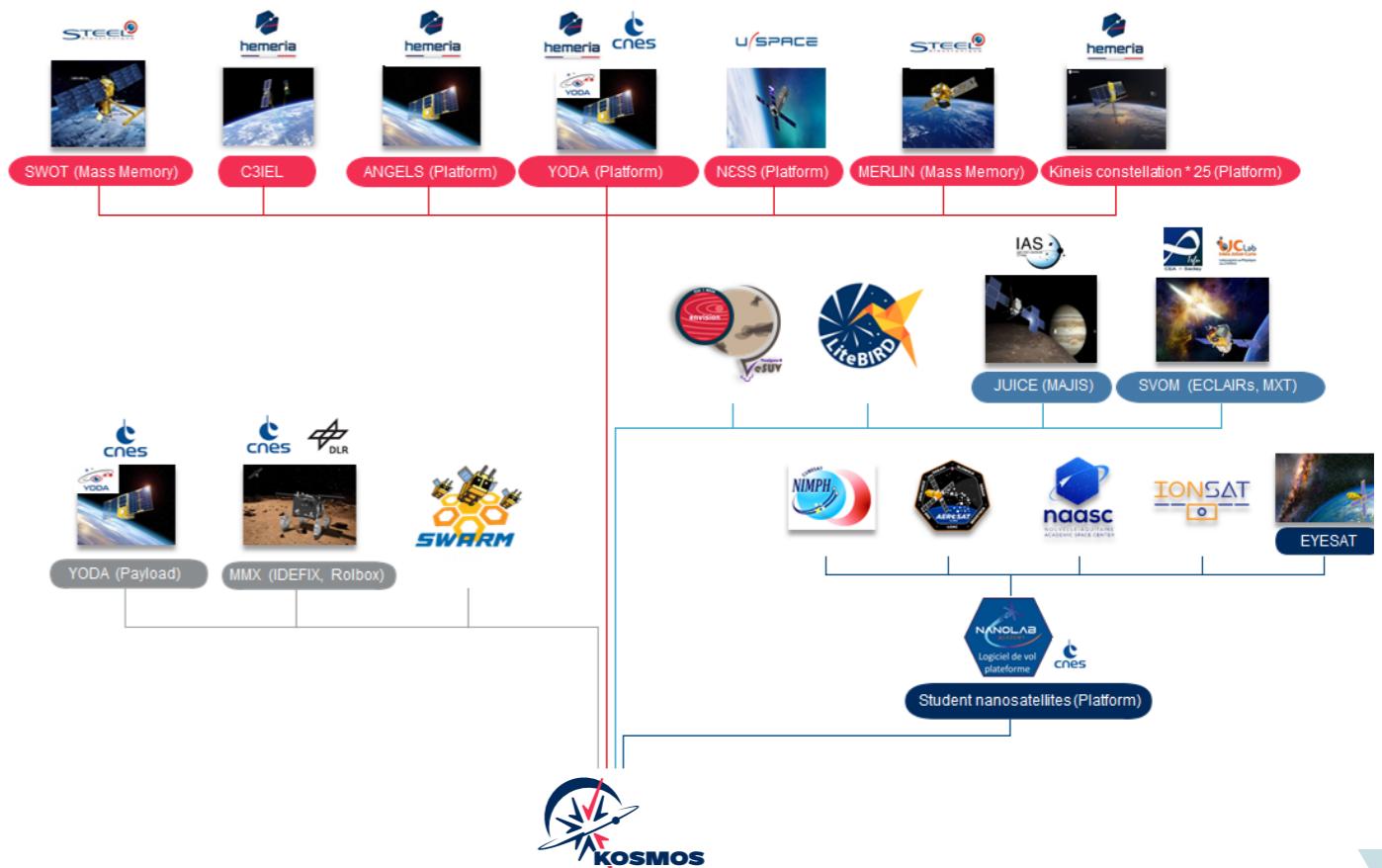
- » KOSMOS intègre et **standardise les fonctions essentielles** dont doit disposer un Logiciel de Vol (gestion des interfaces, gestion de la mémoire, gestion des anomalies, gestion du lien de communication entre le satellite et le Sol), permettant de ne pas repartir de zéro lors de la préparation d'une nouvelle mission.
- » KOSMOS met à disposition des composants pré-qualifiés (standards européens **ECSS niveau B**), garantissant un niveau de qualité compatible de missions exigeantes.



© istock



KOSMOS est aujourd'hui largement « **flight-proven** » et distribué au sein de l'écosystème national et européen. En vol depuis 2019, il est embarqué dans des missions de tous ordres : de l'observation de la Terre jusqu'à l'exploration spatiale en passant par la Défense, du nanosatellite (N3SS ou ANGELS) au grand satellite institutionnel (instrument MAJIS sur JUICE) en passant par le rover (IDEFIX), de la plateforme (Nanolab Academy) à la charge utile (MXT sur SVOM) en passant par les équipements spécialisés (mémoire de masse SWOT).



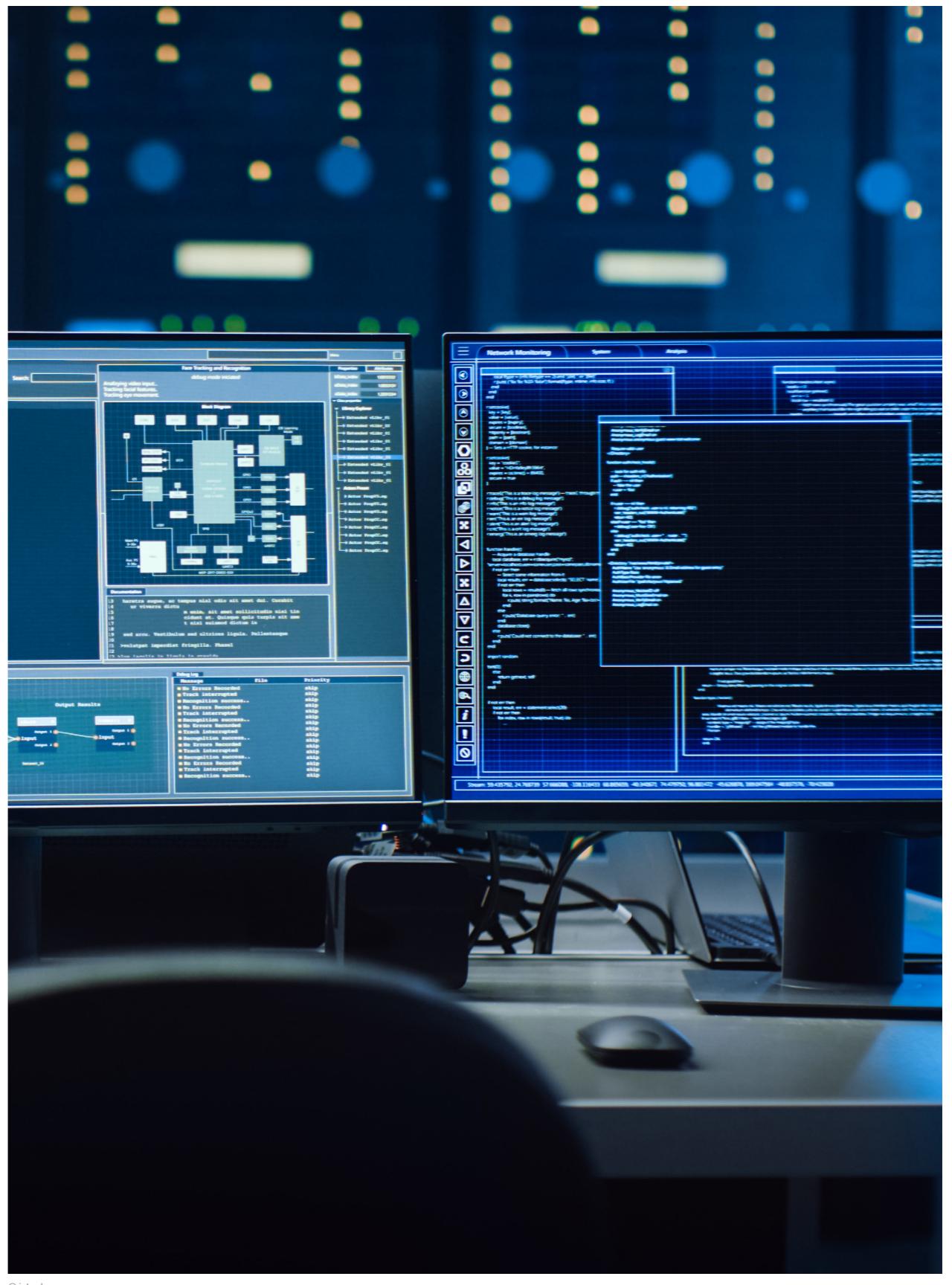
Les enjeux

Aujourd’hui, confronté à l’évolution majeure des puissances de calcul embarquées et la diversification de l’écosystème spatial, le logiciel de vol devient un enjeu capital et un « enabler » pour des missions complexes et des systèmes innovants (IA, autonomie bord, systèmes multi-satellitaires, etc.).

Il doit ainsi répondre, que ce soit d’un point de vue organisationnel ou d’un point de vue technique/technologique, à de nombreux challenges :

- » Un « **time to market** » de plus en plus constraint : les enjeux de coût/planning deviennent une condition à la compétitivité industrielle et une contrainte dimensionnante des projets spatiaux. Cette variable n’implique pas nécessairement une réduction sur les exigences qualité des missions.
- » Des **utilisateurs de plus en plus variés** et souhaitant embarquer du logiciel à bord des engins spatiaux sans avoir à en connaître les spécificités et la complexité.
- » Des **processus de développement** logiciel en pleine évolution, s’appuyant sur des outils et méthodes de plus en plus répandues (agilité, DEVSECOPS, MBSE, autocodage, IA générative...).
- » Des **hardware** à la fois plus puissants mais aussi plus complexes et hétérogènes.
- » Des besoins d'**autonomie bord** plus importants, dont le logiciel de vol est le garant.
- » Des **fonctions couvertes par le segment spatial** de plus en plus complexes et ambitieuses (dynamique du vol avancée, réseaux inter et intra-satellite, processing IA, traitements distribués, edge computing, cybersécurité, ...).

En résumé, le monde du spatial et par extension le domaine du logiciel de vol vit aujourd’hui un « **virage numérique** » analogue à celui vécu par l’informatique grand public ces dernières années. Afin de garantir la compétitivité et l’expertise de l’écosystème national, sa capacité à adresser des missions innovantes et de rupture, le logiciel de vol doit être au rendez-vous de ce challenge.



© istock

1- Spatialisation du numérique

Objectif : Ouvrir les engins spatiaux à des capacités numériques aujourd’hui disponibles au sol.

- Simplifier l’emport d’applications, notamment d’applications tierces, à la manière d’un Android/IOS et l’app-store associé sur un smartphone.
- Cloud computing : exploiter de manière transparente les ressources matérielles dans des systèmes interconnectés.
- Garantir la cybersécurité.

Technologies :

- Déploiement de Linux à bord.
- Mise en place des applicatifs réseaux intra et inter-satellites.
- Développement des capacités de cloud/distributed computing.
- Emport d’algorithmes concourant à l’autonomie bord (programmation autonome, COA...).
- File system.
- Usine logicielle en orbite.

2- Nouvelles capacités

Objectif : Adresser les évolutions technologiques du secteur.

- Exploiter les nouvelles capacités matérielles et rendre leur complexité transparente aux utilisateurs.
- Faciliter le codesign HW/SW pour optimiser l’utilisation des ressources matérielles et logicielles.
- Disposer de moyens de validation adaptés à ces nouvelles puissances embarquées (émulateurs CPU, émulateurs kernel...).
- Adresser les spécificités de domaines nouveaux et leurs retombées sur le logiciel de vol.

Technologies :

- Architecture multicoeurs (hétérogènes ou non), coprocesseurs matériels (IA, accélérateurs divers...), RISC-V...
- Emulateurs CPU (Armony...), Emulateurs kernel (SKE)...
- Technologies liées à des domaines nouveaux ou émergents tels que les essaims de satellites (protocoles réseaux, autonomie, vol en formation...), la robotique (patrimoine ROS2, environnement linux...).

Technologies clés

3- Outils et processus

Objectif : Faciliter et accélérer le travail de développement des logiciels de vol autant dans les process que les outils.

- Mutualiser les moyens de développement, logiciels et matériels
- Disposer d’un workflow outillé, automatisé et procéduré
- Offrir des solutions accessibles, répondant à la fois aux besoins des architectes logiciels et des utilisateurs finaux.
- Garantir les contraintes qualité tout au long du développement, y compris dans des processus de développements agiles très itératifs

Technologies :

- Automatisation des processus de développement (DEVSECOPS, MBSE, autocodage).
- Intégration de l’IA générative dans les outils de développement.
- Codesign HW/SW pour optimiser les performances.

Le CNES concentre son action sur 4 axes de travail principaux qui regroupent chacun des technologies clés en lien avec les challenges précédemment cités

« en un coup d’œil »

4- Framework KOSMOS



Objectif : Disposer d’une fondation technologique, ouverte à l’écosystème, permettant de se concentrer sur l’innovation et la valeur ajoutée des missions spatiales.

- Développement d’un catalogue de nouveaux composants logiciels.
- Portage et qualification sur les nouveaux hardware.
- Certification et renforcement des aspects cybersécurité.
- Faciliter l’utilisation par l’écosystème français et européen.
- S’inscrire dans le standard européen OSRA.

Technologies :

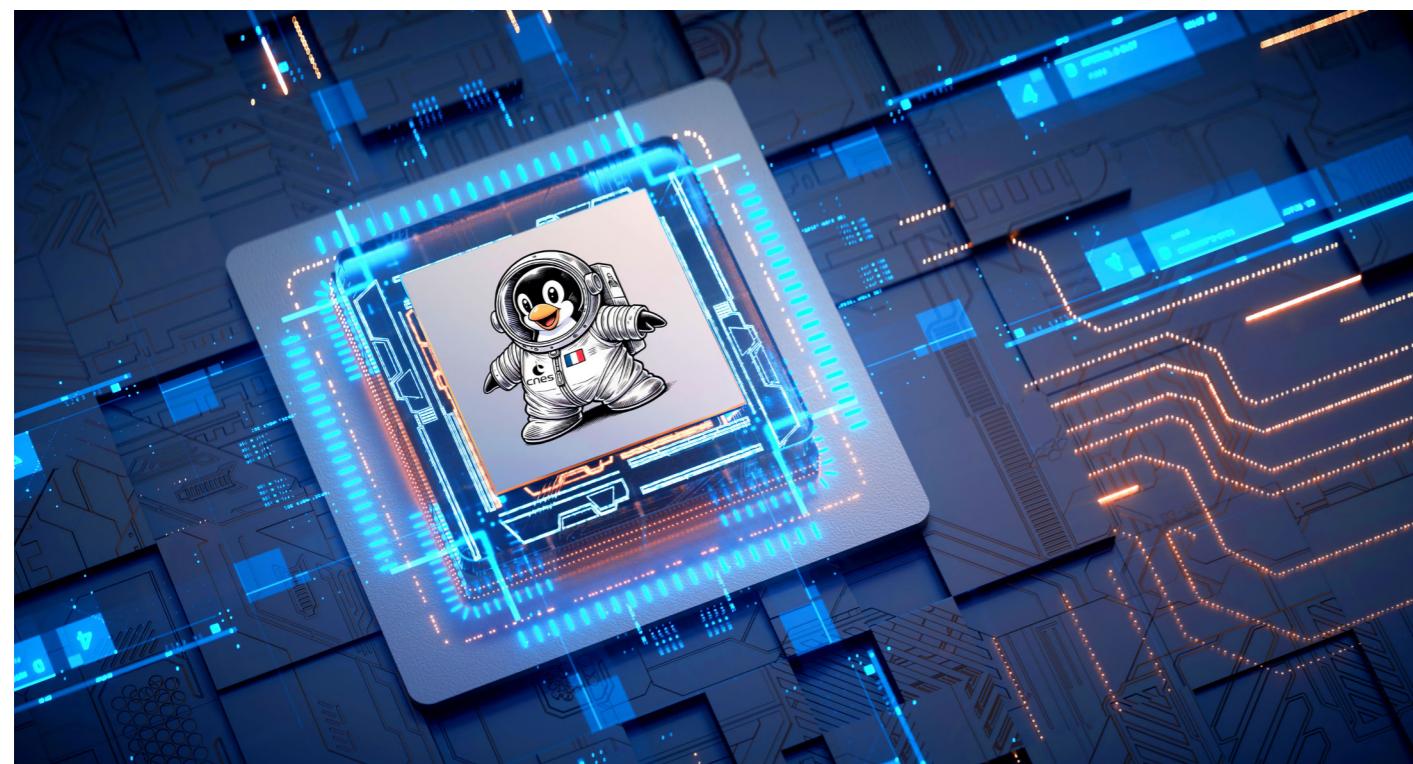
- Nouveaux composants KOSMOS : devkits linux et « app store », fonction routeur réseaux ISL, composant navigation, mémoire de masse, PUS-C...
- Version allégée de KOSMOS pour les microcontrôleurs (μ KOSMOS).
- Standard SDLS-EP, chiffrement TM, hacking challenge, certification EAL3+.
- Emport sur NG-ULTRA, VERSAL, GR740, GR765, RISC-V...

AXE TECHNOLOGIQUE N°1

Spatialisation du numérique

Le CNES et son écosystème s'inscrivent aujourd'hui dans une démarche de « spatialisation du numérique ». Par ce terme on identifie un changement de paradigme entre :

- un monde de l'embarqué spatial historiquement fermé et technologiquement très spécialisé, nécessitant une compréhension forte du domaine,
- et le virage actuel visant la mise en place d'environnements bord et sol sûrs et ouverts, favorisant l'embarquabilité de composants logiciels très variés et développés par des utilisateurs parfois très extérieurs à ce champ d'activités.



© Itock

Stimulée par l'évolution des technologies bord et des besoins (puissance de calcul en expansion, mise en réseaux des segments spatiaux, diversification de l'écosystème utilisateurs...), cette tendance est déjà engagée par de nombreux acteurs du spatial (le groupe d'intérêts Space Grade Linux, l'ESA avec l'expérience OPSSAT, les maîtres d'œuvre industriels comme TAS avec le projet européen ORCHIDE, des industriels spécialisés comme PARISIMONI avec leur solution SpaceOS, de nombreuses startups du domaine comme Loft Orbital ou Infinite orbits cherchant l'efficacité et les écosystèmes connus tel Linux).

Plan d'activités

En cours

- Etudes Linux en embarqué spatial dans un environnement partitionné (démonstrateur « LinuxDK » dans KOSMOS) ou non (thèse ONERA-CNES). Evaluation des risques/ contraintes associés à ce nouvel usage (R&T avec ADS et TAS).
- Mise en œuvre LINUX (distribution YOCTO POKY) pour des applications de dynamique du vol (contrôle d'orbite autonome ASTERIA) ou de monitoring satellite IA (expérience SESAM), en cours de déploiement sur différentes missions.
- Les développements autour des thématiques de connectivité intersatellite, protocoles routage, cloud computing, ... engagés au travers de la thématique essaim de satellites (PEX SWARM, R&T, thèse avec l'ENAC, projet TRISKEL...).
- Aspects cybersécurité : partition AUTHSW du produit KOSMOS, développement d'un banc cyber représentatif satellite pour mise à disposition d'équipes de hacking.

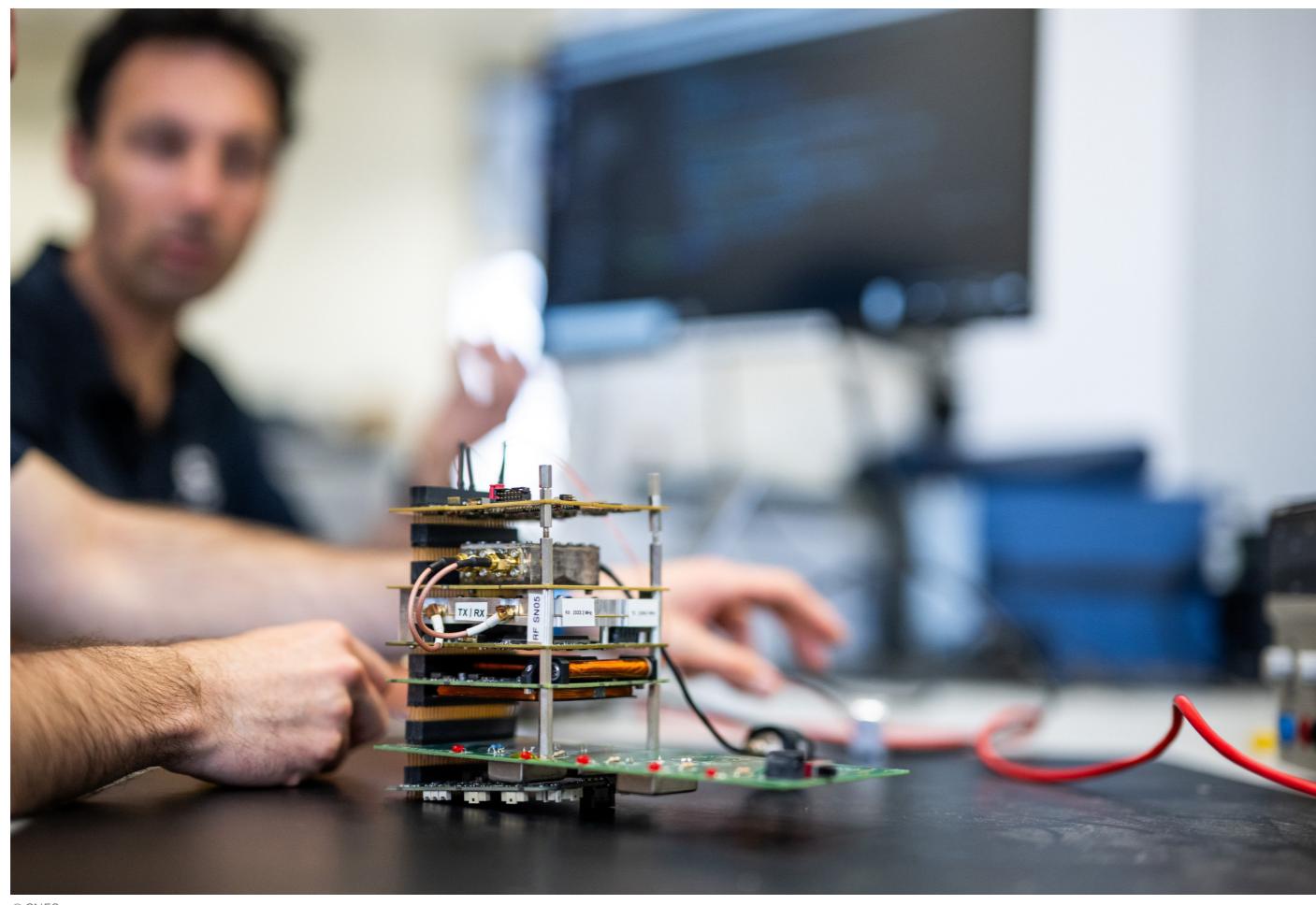
Période 2026-2029

- Devkit Linux : développement d'un démonstrateur d'hébergeur d'applications à horizon fin 2026 suivi d'une industrialisation (partition LinuxDK et app-store) à horizon 2027-28 suivie d'une démonstration en vol.
- Cloud computing : développement de briques technologiques (réseaux, routage, traitements distribués), étude de technologies pertinentes (Kubernetes, WebAssembly...), thèse... sur les 3 prochaines années.
- File system : démonstrateur à horizon 2026-27 servant de base à des démonstrations orientées « usine logicielle en orbite » (Artifactory/Gitlab bord...).
- Autonomie bord : travaux d'embarquabilité des algorithmes métier (contrôle d'orbite autonome, programmation mission autonome...).

AXE TECHNOLOGIQUE N°2

Nouvelles capacités

Le CNES, comme nombre de ses partenaires, suit de près l'émergence de nouvelles capacités et domaines d'application impactant directement le logiciel de vol. Que ce soit sur les capacités matérielles, qui se rapprochent de plus en plus des cibles grand public, ou les systèmes dans lesquelles elles sont mises en œuvre (robotique, systèmes multi-satellitaires...), le logiciel de vol doit s'adapter à ce nouvel environnement.



© CNES

Plan d'activités

En cours

- Portage et qualification des briques KOSMOS sur les nouvelles cibles matérielles NG-ULTRA, VERSAL... avec ATOS.
- Etude des capacités des cibles RISC-V avec CS.
- Etude avec ADS et TAS des contraintes liées à l'utilisation des architectures multicoeurs (interférences typiquement) et outillage associé.
- Mise en œuvre des solutions de simulation/validation Armony (émulateur ARM - Spacebel) ou SKE (Software Kernel emulator - Fentiss) sur des développements opérationnels.
- Nouveaux domaines engagés au travers d'études internes (robotique) ou avec des partenaires externes (thématique essaim avec CS via le PEX SWARM).

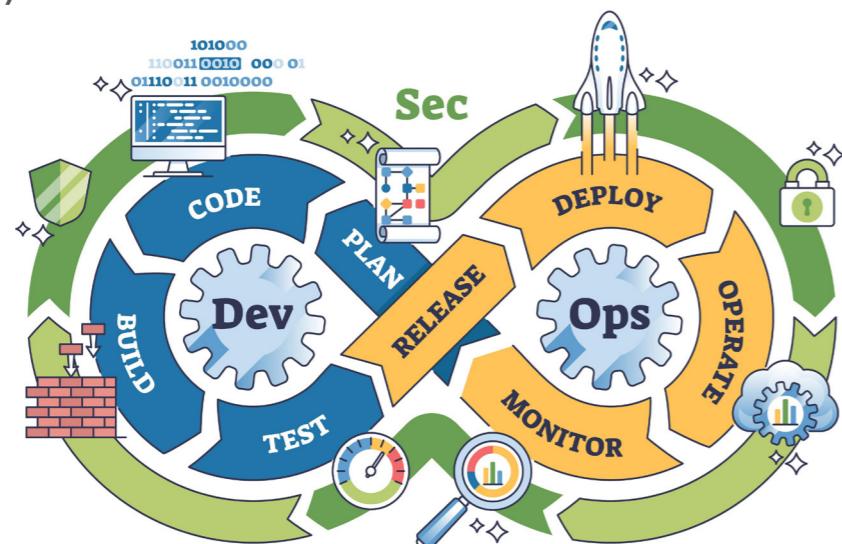
Période 2026-2029

- Etudes autour de l'exploitation de ressources matérielles d'intérêt (coprocesseur NEON, Trace Coresight, architecture multicoeurs, ...) en 2026-27.
- Poursuite des développements sur la thématique codesign HW/SW dans la continuité des travaux autour du produit LOCOD et technologies associées.
- Robotique : mise en place des briques technologiques pertinentes (autour du patrimoine ROS par exemple), en commençant en 2026-27 par une étude sur les technologies existantes dans le spatial et au-delà.
- Essaim : développements des briques technologiques (réseaux, autonomie bord...) dans le cadre des projets associés (PEX SWARM, TRISKEL, R&T, ...).
- Moyens de validation : poursuite des activités autour des technologies d'émulation.

AXE TECHNOLOGIQUE N°3

Outils et processus

Le CNES s'appuie, comme de nombreux acteurs du secteur spatial à différents niveaux, sur un outillage DEVSECOPS adapté aux contraintes de développements actuels (usine logicielle CNES + suite IDEO : Gitlab, Gitlab-CI, Artifactory, Jira, Confluence, ...).



A cela le CNES ajoute une composante propre à l'embarqué afin de pouvoir exploiter ces moyens d'intégration continue jusqu'à la cible matérielle considérée (Target Manager, cf. photo).

Déployés sur de nombreux projets, ces moyens sont désormais nécessaires aux processus de développements itératifs (méthodologie Agile) afin de garantir la tenue des contraintes planning sans perdre la maîtrise des enjeux qualité.

Demain, ce workflow s'enrichira d'outillage MBSE ou de l'IA générative afin de compléter la palette du développeur autant que de l'utilisateur final du logiciel de vol, permettant d'automatiser autant que possible les efforts de développement et la lisibilité de l'ensemble pour tous les intervenants.

Logiciel de vol - Target Manager
© CNES

Plan d'activités

En cours

- » **Développement du plugin « bord » de l'usine logicielle.** En particulier, industrialisation du produit « Target Manager » (industrialisation avec la société ATOS – disponible sous licence en externe) permettant la mise en réseaux et la mutualisation de matériels de développement ou de vol et l'intégration de ces derniers dans le processus DEVOPS.
- » **MBSE :** prototypage du produit KOSMOS Studio (avec GMV), permettant la mise en œuvre du framework KOSMOS dans un environnement outillé graphique offrant des capacités de génération de code/ configuration.
- » **Codesign HW/SW :** développements autour de l'outil « LOCOD » et ses constituantes « PAAIPA » et « PADIA », objet de plusieurs brevets, permettant l'optimisation d'algorithmes embarqués dans l'utilisation des différentes ressources bord (CPU, FPGA, GPU...).

Période 2026-2029

- » **IA générative :** exploration, au travers d'études R&T, des capacités de l'IA pour l'assistance au développement logiciel (2026-27) et, si concluant, industrialisation de ces moyens pour intégration dans les processus et outils opérationnels.
- » **MBSE :** après l'étude en cours sur KOSMOS Studio, industrialisation d'une solution pour le développement LV (2027-28).
- » **Autocode :** étude (2026-27) sur les processus d'utilisation de l'autocodage dans les LV, notamment sous l'angle de la qualité logicielle. Mise en place de ces processus et intégration avec les outils MBSE voire intégration avec les aspects matériels (notions codesign).

AXE TECHNOLOGIQUE N°4

Framework KOSMOS

Le produit KOSMOS se veut au service de sa communauté d'utilisateurs et est un catalyseur pour l'innovation et les besoins futurs de l'écosystème spatial national et européen.



D'ores et déjà, un certains nombres de composants sur étagère et process associés permettent de répondre aux besoins des logiciels de vol plateforme, charge utile et équipements spécialisés des engins spatiaux d'aujourd'hui et contribuent aux précédents axes techniques mentionnés. Cet élan se poursuit pour les années à venir, en co-construction avec l'écosystème.

Plan d'activités

En cours

- Etude en cours de développement d'un outil MBSE : « KOSMOS Studio ».
- Maintenance du produit KOSMOS et de ses composants (commande-contrôle, gestion mémoire, I/O, OBCP, cybersécurité...) avec ATOS.
- Maintenance et industrialisation de l'environnement DEVOPS dans lequel est intégré KOSMOS, garantissant les process d'intégration continue adaptés aux développements très itératifs et agiles des projets spatiaux actuels (notamment l'outil Target Manager).
- Evolutions de la partition AUTHSW (authentification/chiffrement) implémentant le standard CCSDS SLDS-EP concourant à la cybersécurité des systèmes spatiaux.
- Portage de KOSMOS sur les cibles nouvelles générations NG-ULTRA et VERSAL (en plus des cibles historiques ZYNQ et LEON).

Période 2026-2029

- Développement de nouveaux composants génériques : mémoire de masse (2026-27), LinuxDK (2027), navigation (2027), RUST (2028-29)...
- Développement d'un nouveau produit µKOSMOS pour les cibles µcontrôleur (2026-27).
- Cybersécurité : développements de nouvelles briques (OTAR, chiffrement TM, détection d'intrusion, secure boot...), certifications des briques logicielles (2026-27), hacking challenges (2026)...

ACRONYMES

- CCSDS : Consultative Committee for Space Data Systems
- COA : Contrôle d'Orbite Autonome
- CPU : Central Processing Unit
- DEV(SEC)OPS : DEVeloppeMent(SECurité) et OPérationS
- DK : DevKit
- EAL : Evaluation Assurance Level
- ECSS : European Cooperation for Space Standardization
- ESA : European Space Agency
- ESN : Entreprise de services du numérique
- FPGA : Field Programmable Gate Array
- GPU : Graphics Processing Unit
- HW : Hardware
- IA : Intelligence Artificielle
- I/O : Input/Output
- ISL : Inter-Satellite Link
- KOSMOS (anciennement LVCUGEN) : Kit for Onboard Software in Modular Oriented Systems
- LV : Logiciel de Vol
- MBSE : Model Based System/Software Engineering
- OBCP : On-Board Control Procedure
- OSRA : Onboard Software Reference Architecture
- OTAR : Over-The-Air Rekeying
- PEX : Projet Exploratoire
- PUS : Packet Utilization Standard
- R&T : Etude de Recherche & Technologies
- ROS : Robot Operating System
- SDLS-EP : Space Data Link Security Protocol - Extended Procedures
- SW : Software
- TM/TC : Télémétrie / Télécommande

En savoir plus sur le produit KOSMOS

<https://cnes.fr/projets/kosmos>



VOUS SOUHAITEZ APPORTER VOTRE CONTRIBUTION ?

orientations-techniques@cnes.fr



Retrouvez les Feuillets de Politique Technique du CNES

<https://cnes.fr/entreprises/orientations-techniques>



Avec Connect by CNES, le CNES met le spatial à votre service !

<https://www.connectbycnes.fr>

CNES
www.cnes.fr

