

Conception et réalisation de nanosatellites pour l'étude du climat

Retour d'expérience d'une aventure technique et humaine



Emmanuel BERTRAN
17/09/2024
Rencontres MAPI 2024 - Fréjus



UVSQSAT



inspire.sat 7
MONITORING THE EARTH

Emmanuel BERTRAN

Ingénieur de recherche CNRS

emmanuel.bertran@latmos.ipsl.fr



Parcours :

- Ingénieur CNRS depuis 2005
- Depuis 2017 :
 - Centre de Contrôle-Commande satellites
 - Nanosatellites UVSQ-SAT, INSPIRE-Sat7, UVSQsat-NG, ...



Sommaire

- 1) Introduction
- 2) Contexte projets et filière nanosat
- 3) Conception et réalisation des nanosat UVSQ-Sat et INSPIRE-Sat7
- 4) Retour d'expérience technique et humain
- 5) Conclusion

Sommaire

1) Introduction

2) Contexte projets et filière nanosat

3) Conception et réalisation des nanosat UVSQ-Sat et INSPIRE-Sat7

4) Retour d'expérience technique et humain

5) Conclusion



Phase 1 - L'étincelle

Naissance de la filière nanosat du LATMOS (Guyancourt, Yvelines) suite à une conférence du réseau INSPIRE au LASP (Boulder, Colorado).

→ *INSPIRE = International Satellite Program in Research & Education*

Phase 2 - Lobbying

Mise en place d'une station sol pour pilotage de nanosatellites en LEO.

Phase 3 - Objectif 500

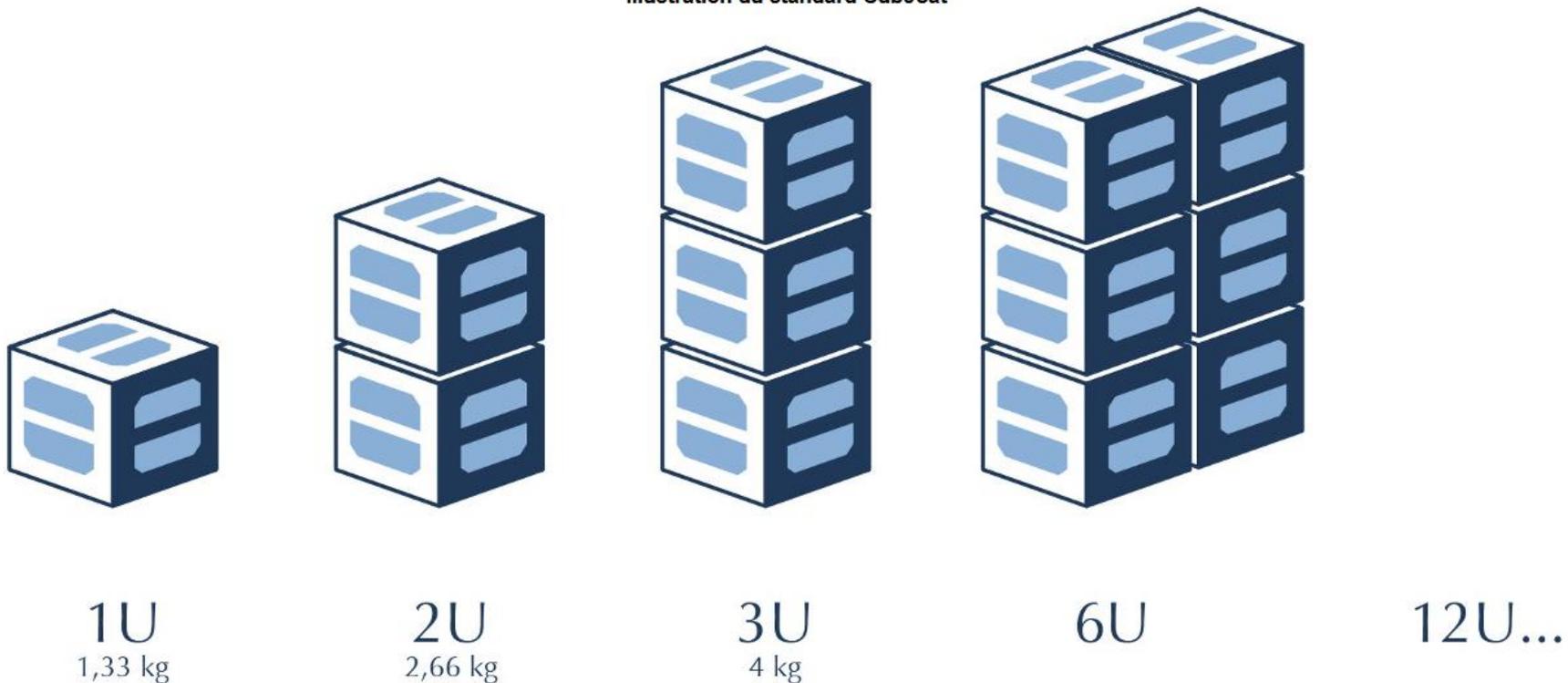
De la feuille blanche aux opérations en vol : Conception, réalisation, et lancement d'un CubeSat au format 1U.

Phase 4 - Pérennisation

Saut de haie vers le 2U, puis saut à la perche vers le 6U.

Contexte projets et filière nanosat

Illustration du standard CubeSat



Chaque unité ("U) est un cube de 10 cm d'arête pour une masse d'environ 1,3 kg. Il est possible d'assembler plusieurs unités.

Sommaire

- 1) Introduction
- 2) Contexte projets et filière nanosat
- 3) Conception et réalisation des nanosat UVSQ-Sat et INSPIRE-Sat7
- 4) Retour d'expérience technique et humain
- 5) Conclusion

Contexte projets et filière nanosat

Idée

2016

Station sol

2017

Centre de Contrôle Commande

2024

UVSQ-Sat

2019

Opérations en vol

2021

INSPIRE-Sat7

2020

Opérations en vol

2023

UVSQsat-NG

2023

Charges utiles sur AEROSAT, CROCUS, COSPAR-Sat



Filière nanosat LATMOS → Mise en place d'une stratégie d'autonomie.

Contexte de mise en place peu favorable à ses débuts...

- Pas de financement technique CNES (hors périmètre Janus), nouveaux guichets pas habitués aux missions spatiales.
- Ressources humaines très peu disponibles lors du montage projet, agrégation au fur et à mesure des disponibilités.
- Nouvel écosystème industriel à trouver, tester, garder/changer.
- Covid19...

Mais :

- Des ressources humaines motivées.
- Des ressources humaines compétentes dans les métiers clefs.
- Un objectif concret (lancement T0 + 2 ans)
- Un soutien de confiance.

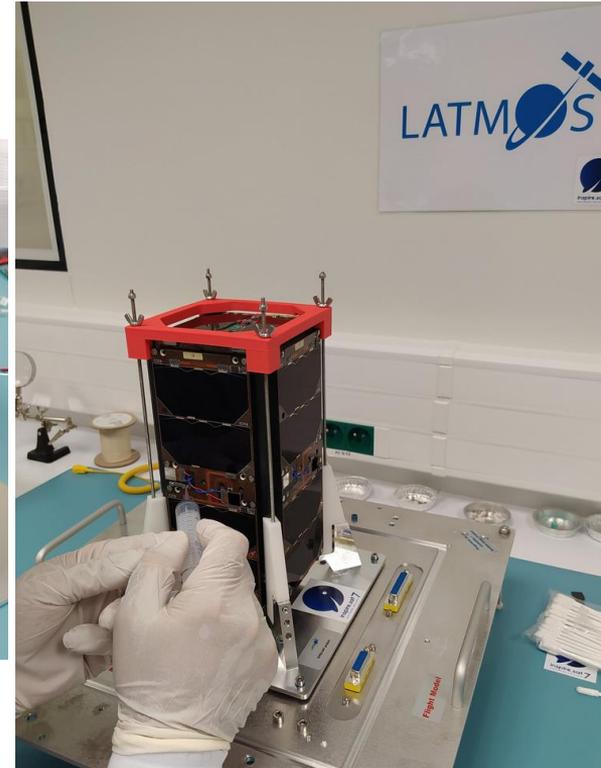
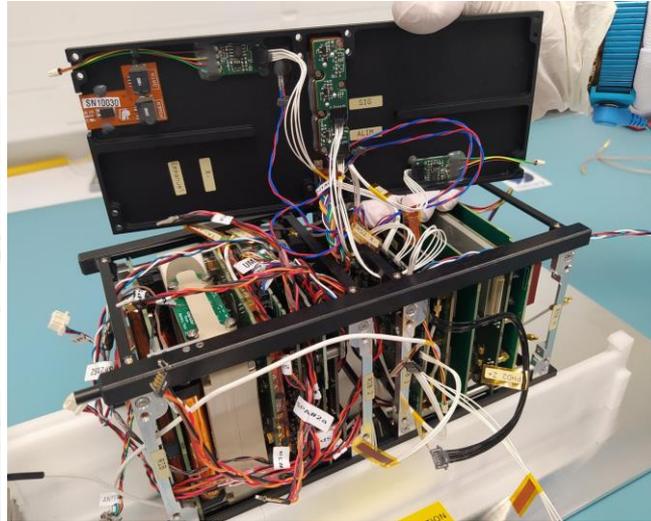
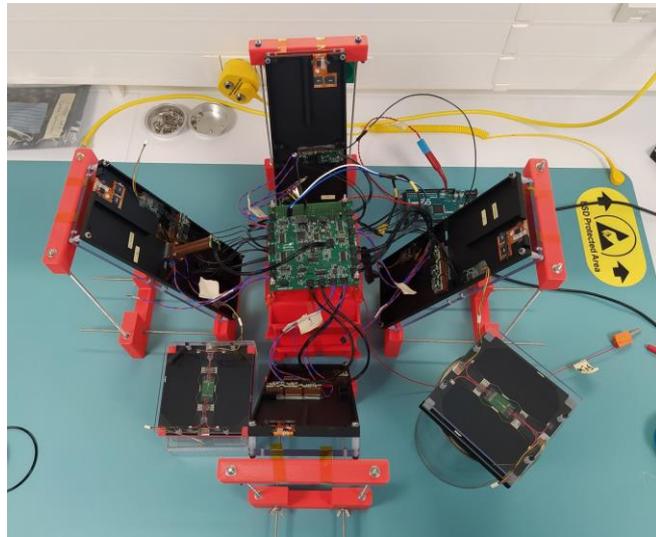
Sommaire

- 1) Introduction
- 2) Contexte projets et filière nanosat
- 3) Conception et réalisation des nanosat UVSQ-Sat et INSPIRE-Sat7
- 4) Retour d'expérience technique et humain
- 5) Conclusion

Intégration des satellites en salles blanches au LATMOS (PIT - OVSQ).

Challenge → Routage des harnais entre les sous-systèmes.

Risques avérés → Maintenir la vigilance des opérateurs (capteurs fragiles, protections ESD, ...).



Utilisation de témoins de contamination moléculaire et particulaire, pendant les intégrations et les essais environnementaux.

Témoins uniques utilisés pendant toutes les activités au sol.

Analyse de contamination :

- Moléculaire: Bon, mesure non détectable (trop petite).
- Particulaire: Bon, niveau dans les normes.

REX : Mettre en place une mesure temps réel (avec log) pour identifier les activités contaminantes en cas de besoin.



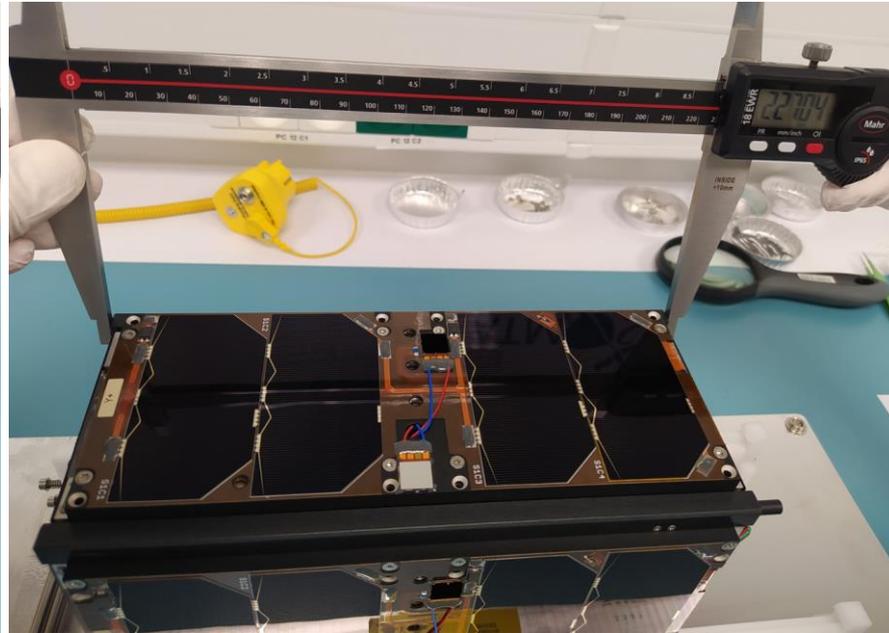
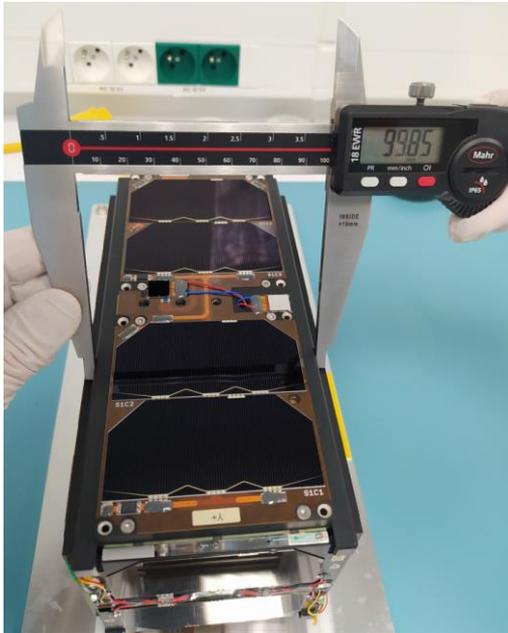
Conception et réalisation

Caractérisation dimensionnelle

Mesures dimensionnelles de toutes les faces.

→ Activité obligatoire pour garantir l'intégration du satellite dans le PodSat.

Pas d'anomalie seulement si procédure de montage respectée. Bien faire prend du temps !

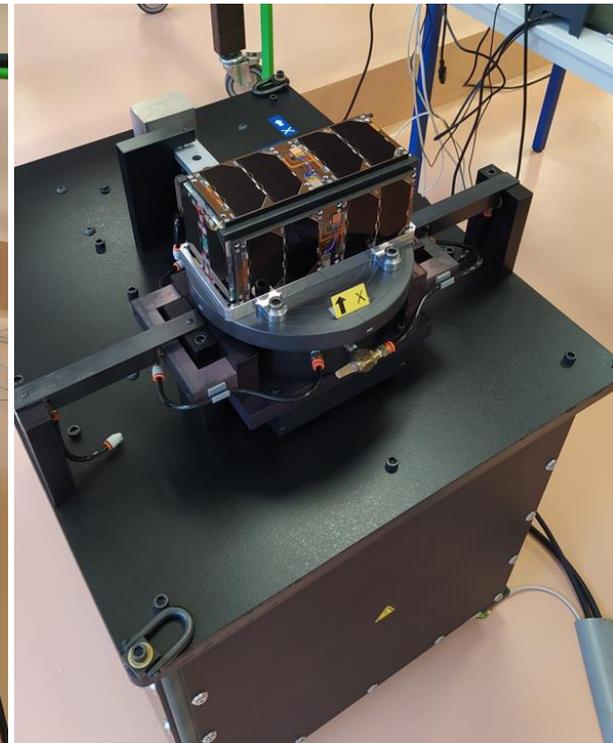
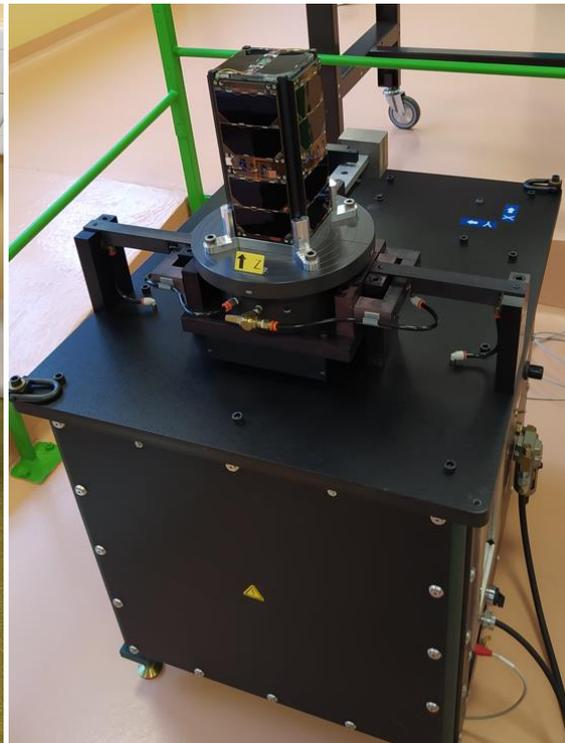


Conception et réalisation

Caractérisation Mol & CoG

Mesures Mol & CoG réalisées au laboratoire IAS.

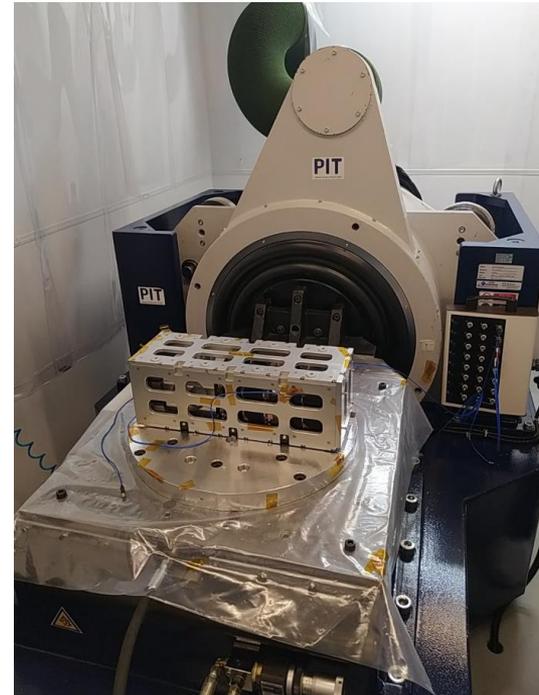
→ Anticiper les MGSE et les tester ! Une vis M1,5 oubliée dans la CAO et ca passe pas...



Tests de vibration réalisés au LATMOS (PIT - OVSQ).

→ Bien identifier la représentativité du lancement, tests réalisés dans un PodSat 3U avec des gueuses 1U/2U.

REX : Limite de représentativité observée, ressort plus dur constaté dans le PodSat de vol (surbooking = changement de PodSat...).



Conception et réalisation

Démagnétisation

Mesure du champ magnétique interne au satellite réalisée au CNES.

UVSQ-Sat et INSPIRE-Sat7 magnétiquement propres après les essais de vibration, donc pas besoin de démagnétiser.

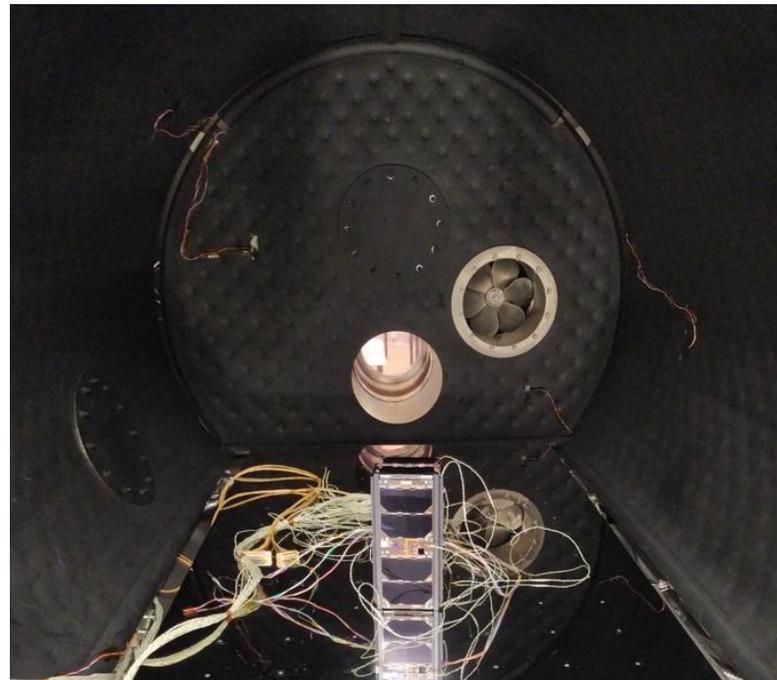
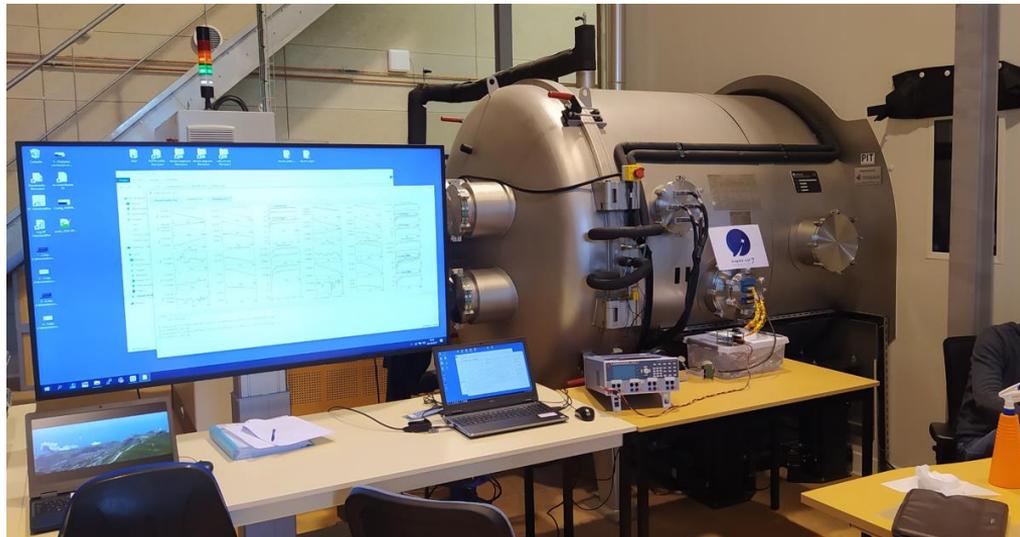


Conception et réalisation

Vide thermique

Vide thermique réalisé avec les moyens du LATMOS (PIT – OVSQ).

- Anticiper les harnais et les vérifier ! Une rallonge en plus et ça peut ne plus fonctionner...
- Anticiper les GSE logiciels !



Conception et réalisation

Stabilité Logiciel de Vol

Test réalisé au LATMOS.

Objectif :

Utiliser toutes les fonctionnalités du LV,
attention à l'impact sur le banc de test
(ie. communication par fréquences
radio VHF/UHF).



Conception et réalisation

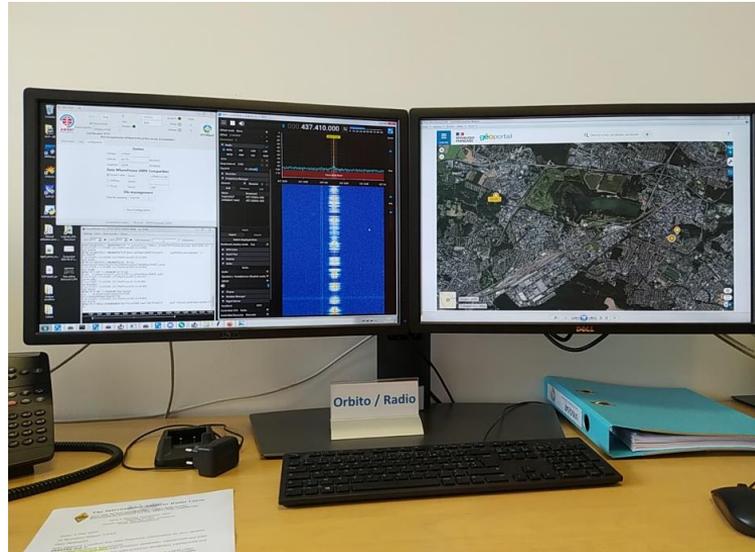
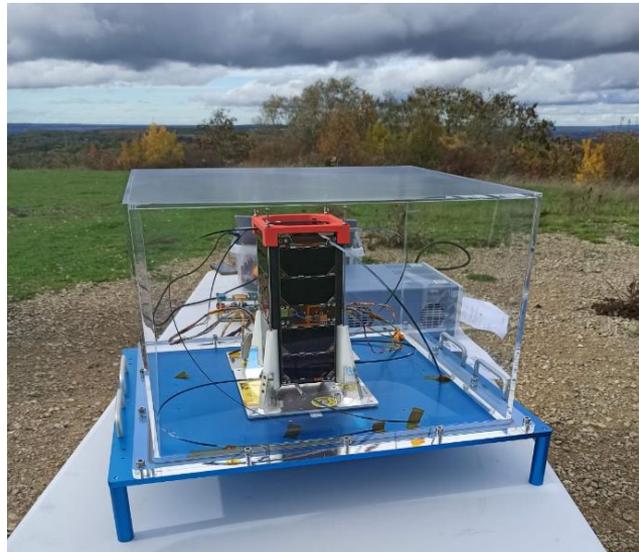
Test « End-to-End » avec la station sol

Test réalisé sur la colline d'Elancourt, à quelques kilomètres de la station sol.

→ Attention à la représentativité ! Idéalement montagne à 500km...

Le satellite et la station sol ne doivent utiliser que la télécommunication radio.

Le centre de mission doit coder les TC et décoder les TM (idéalement).



Conception et réalisation

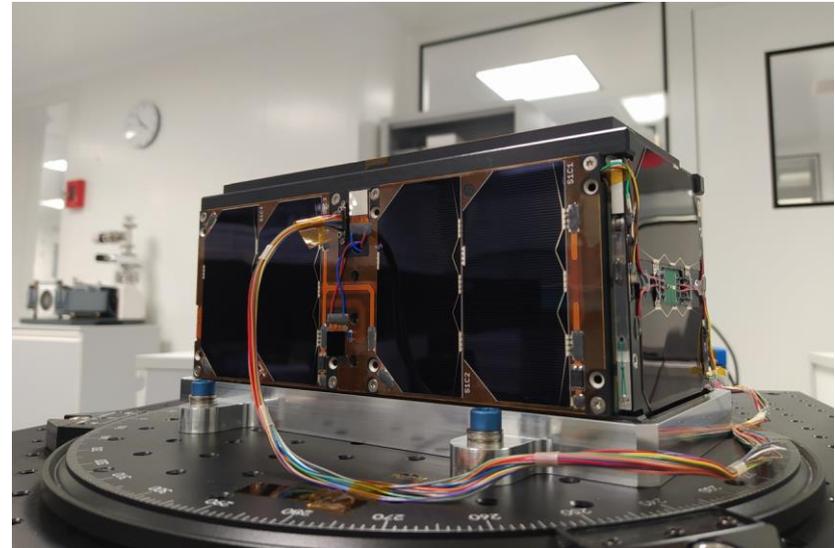
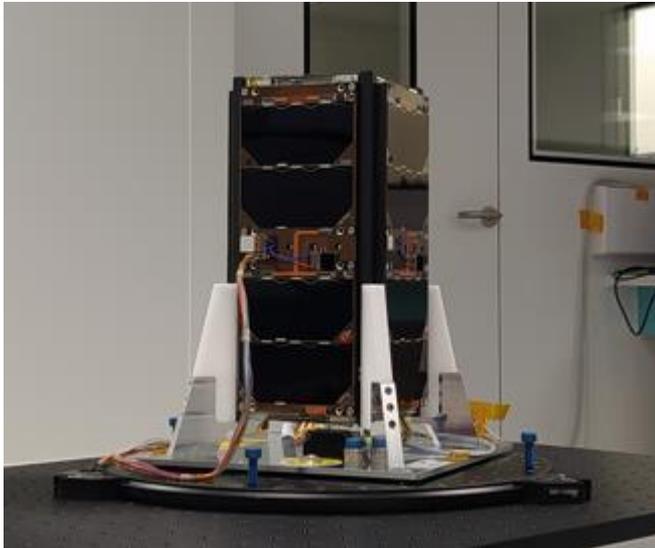
Caractérisation IMU

Test de l'IMU réalisé au LATMOS.

Deux capteurs à caractériser :

- Capteur MTM sur carte iMTQ.
- Capteur TW sur carte charge utile.

Meilleur résultat avec la charge utile TW, caractérisation à renouveler en vol.



3M™ Electrically Conductive Adhesive Transfer Tape 9703

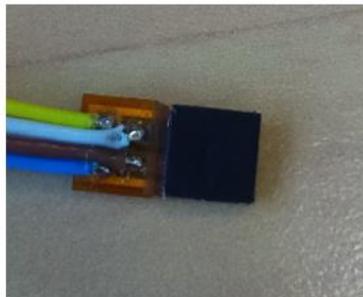
Temperature Performance¹

Application Use Temperatures:

-40 to +85°C in a properly designed end use application. See Note 1.

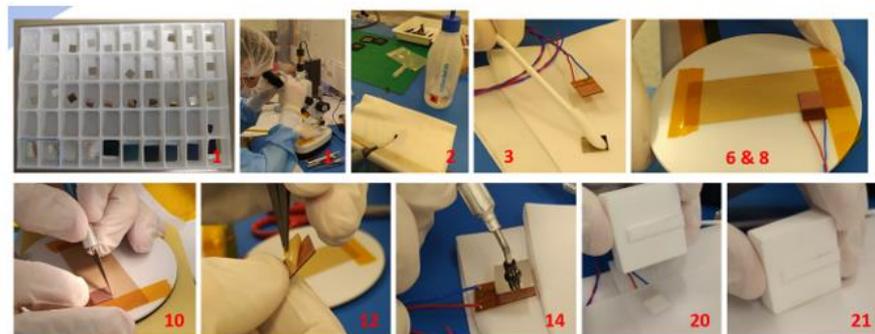
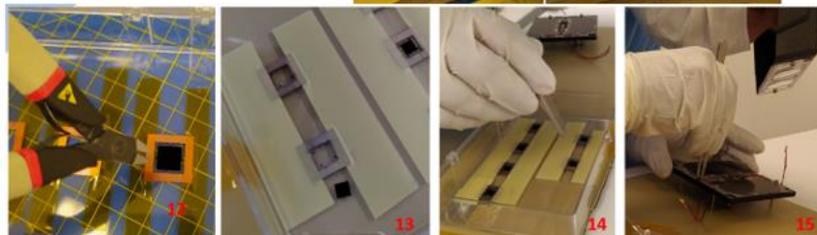
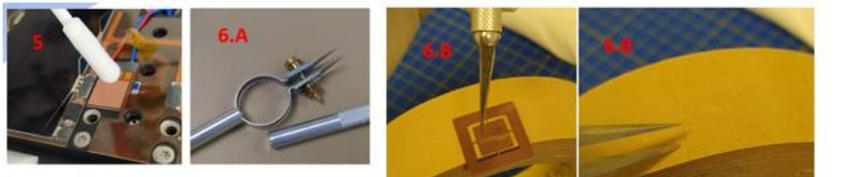
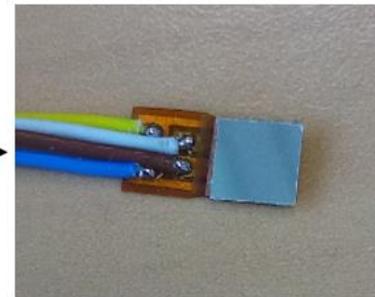
Assemblage :

- Semelle cuivre avec nanotubes de carbone
- Scotch double face ECATT 9703
- Thermopile
- Scotch double face ECATT 9703
- Panneau solaire



Assemblage :

- OSR
- Scotch double face ECATT 9703
- Thermopile
- Scotch double face ECATT 9703
- Panneau solaire

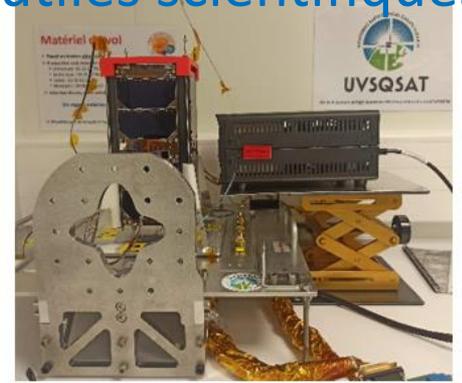


Conception et réalisation

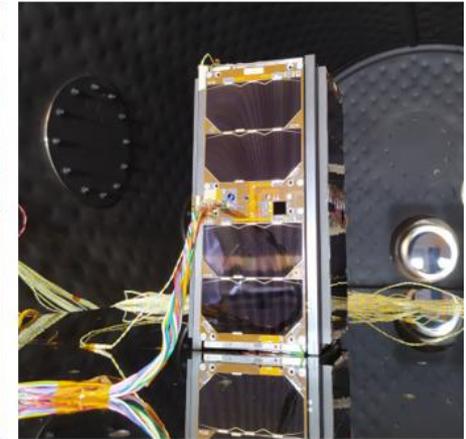
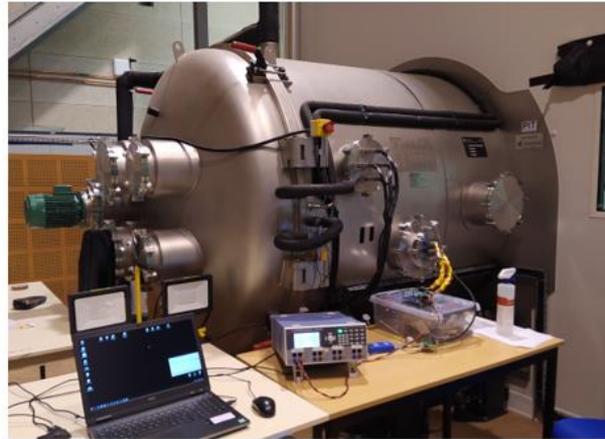
Charges utiles scientifiques



Amecal BX-500 Infrared
Temperature Calibrator



Example of inside test at LATMOS :



Example of outside
test at LATMOS

TSIS (x12) – Total Solar Irradiance Sensors

Conception et réalisation Charges utiles scientifiques

Assemblage pour collage :



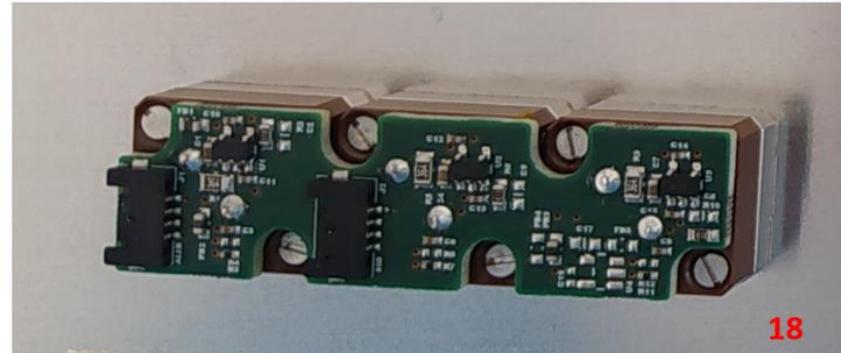
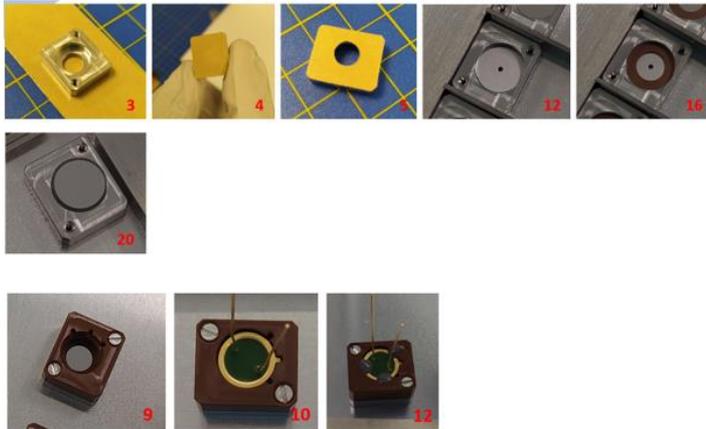
3M™ Electrically Conductive Adhesive Transfer Tape 9703

Temperature Performance¹

Application Use Temperatures:

-40 to +85°C in a properly designed end use application. See Note 1.

The TSIS are integrated **inside solar panels with electrical/radiative tape**.
Same process as done on UVSQ-SAT.



TSIS (x12) – Total Solar Irradiance Sensors

LI-200R pyranometer to
measure total solar radiation.



Example of outside test at LATMOS :



Conception et réalisation

Charges utiles scientifiques

Kipp&Zonen SMP6 pyranometer to
measure total solar radiation.



Example of inside test at LATMOS :



Conception et réalisation

Station sol « Catherine »

La **station CATHERINE** regroupe tous les services de communication satellites du LATMOS.

HERMES

→ 2019 ; HAM ; Tx VHF ; Rx UHF

ELSA

→ 2022 ; HAM ; Tx VHF ; Rx UHF

PRUNE

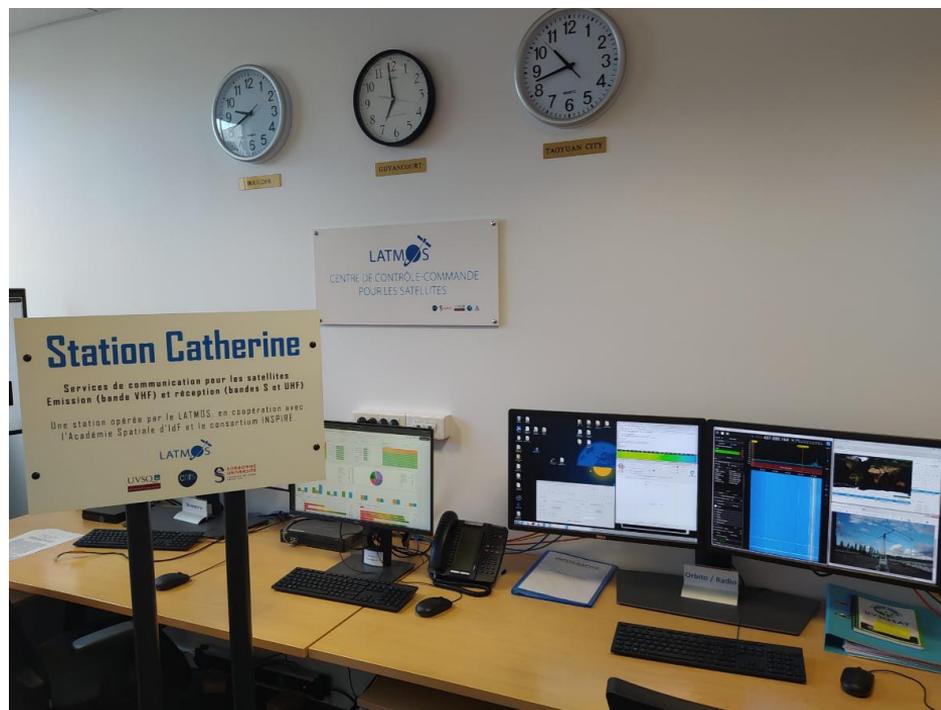
→ 2024 ; HAM & COM ; Rx UHF

MAEVA

→ 2024 ; HAM & COM ; Rx UHF

SARAH

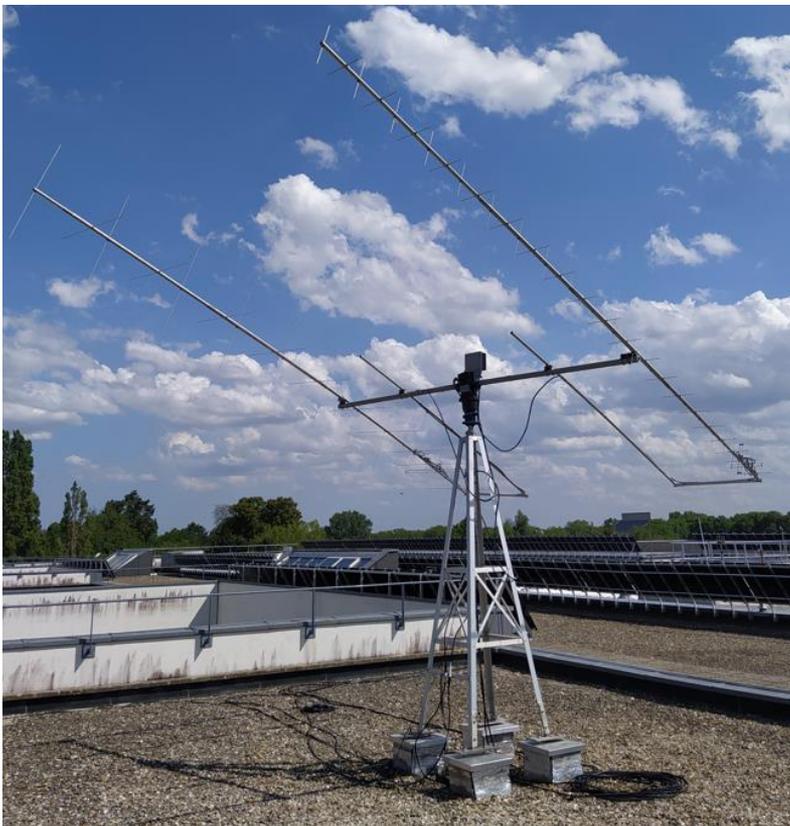
→ 2024 ; COM ; Tx VHF ; Rx UHF & bande S



Conception et réalisation

Station sol « Catherine »

HERMES



ELSA

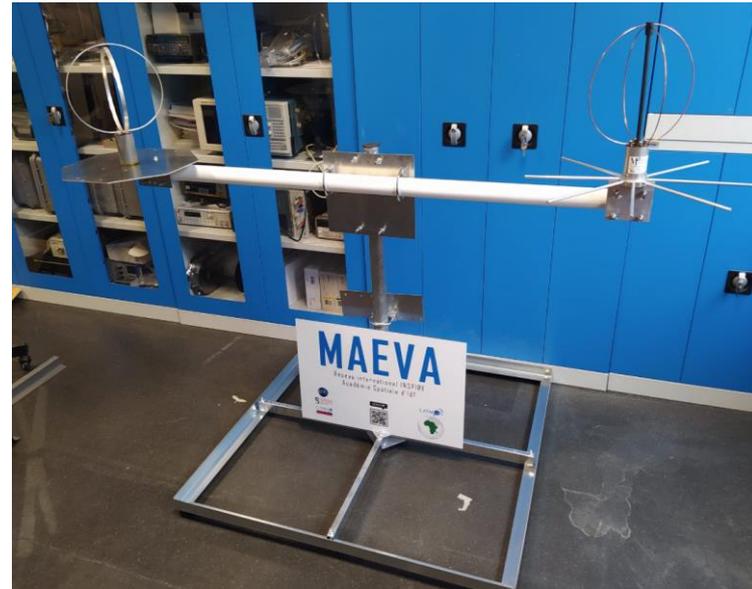


Conception et réalisation

Station sol « Catherine »



Des stations omnidirectionnelles réalisées au LATMOS pour un déploiement à l'étranger.



Conception et réalisation

Station sol « Catherine »



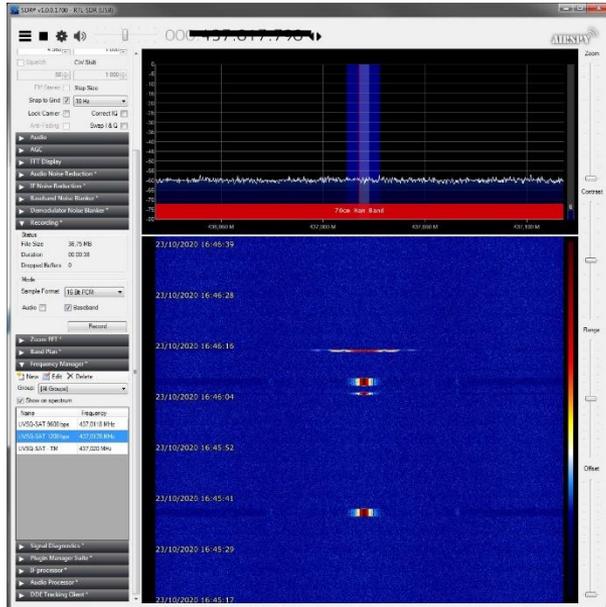
SARAH

Station en cours de test pour les futures opérations de UVSQsat-NG.

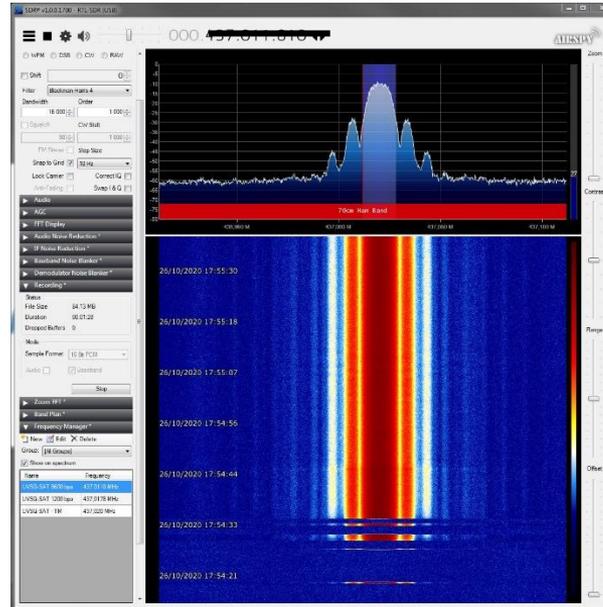
Conception et réalisation

Station sol « Catherine »

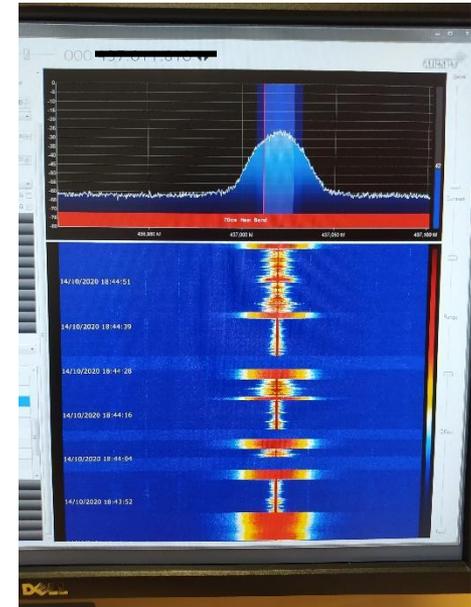
Exemple de signaux radio transmis depuis UVSQ-Sat et INSPIRE-Sat7 et captés par le réseau d'antennes CATHERINE.



Beacon



Science



Transpondeur

Conception et réalisation

Analyse de risque sur la qualification

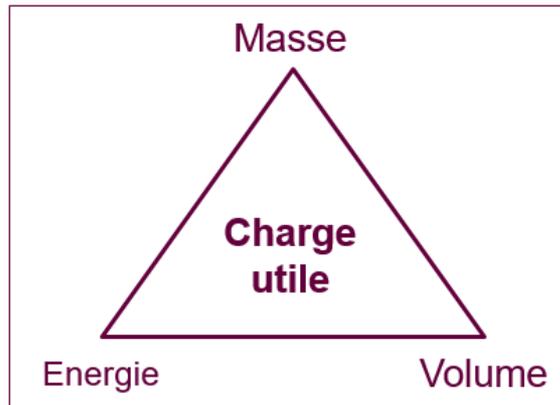
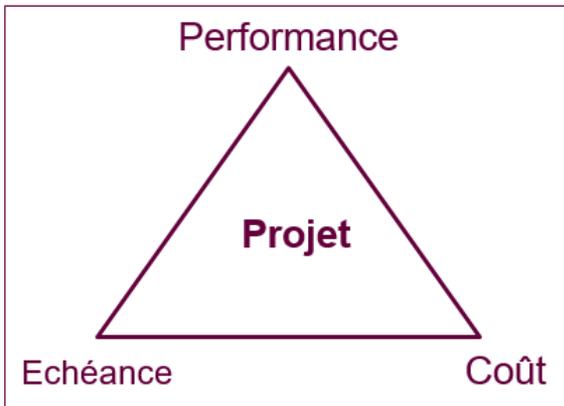
Risks	Analysis	Actions
EMC tests not done	On UVSQ-Sat, a sensibility of the electronic acquisition chain has been observed during beacon and memory downlink. It has an impact on science data. A workaround has been identified to unsynchronize sensor acquisition and beacon transmission. The behaviour on INSPIRE-Sat7 is not known.	To be checked in flight.
Attitude control with iMTQ	The attitude control with the iMTQ board has not been tested on ground. LATMOS Helmholtz cage is under construction.	iMTQ test has to be done on UVSQ-Sat (with known limitation). Then attitude control test has to be done during flight with INSPIRE-Sat7. But science data could be used without.

Sommaire

- 1) Introduction
- 2) Contexte projets et filière nanosat
- 3) Conception et réalisation des nanosat UVSQ-Sat et INSPIRE-Sat7
- 4) Retour d'expérience technique et humain
- 5) Conclusion

Retour d'expérience technique et humain

Pas de recette miracle...



Quelques conseils...

- Une fois le concept établi, il faut arriver très vite à un **prototype fonctionnel**. Cela afin de démontrer à vos financeurs qu'ils peuvent continuer à vous faire confiance. La maquette doit être fonctionnelle pour prouver que le concept est bon.
- Nanosatellite = Courte durée de développement. Donc il faut **anticiper les approvisionnements**. La plateforme doit être dimensionnée au plus tôt et lancée en fabrication dès le début du projet.
- Dès réception de la plateforme, il faut **apprendre à se servir** de tous les sous-systèmes. Pour cela tous les MGSE/EGSE/SGSE/OGSE/... devront être anticipés.
- Votre charge utile est terminée, faite encore un test, puis un autre, ... Par défaut, **ce qui n'est pas testé ne marche pas !**

Retour d'expérience technique et humain

- Miser sur une **démarche itérative** permettra de résoudre les problèmes au fur et à mesure. Un cycle en « V » traditionnel risque d'allonger le planning.
- **Ne pas faire d'impasse** sur la qualification du satellite. Vibration, vide thermique, démagnétisation, (choc), End-To-End, calibration charge utile, Mol/CoG, cage Helmholtz, ...
- Un nanosatellite seul ne sert à rien... Il faut un **centre de commande** pour le piloter. Il faut un **centre de mission** pour traiter les données.
- Il faut **anticiper les dossiers administratifs**. Loi des Opérations Spatiales (LOS), attribution des fréquences de communication, autorisation ministérielle de lancement, réservation du lanceur, assurance pour le lancement et le vol, immatriculation NORAD, passivation de fin de vie.
- Favoriser la **proximité** des fournisseurs.

Erreurs de planning à éviter...

- 1) **Acheter une place sur le lanceur avant d'avoir trouvé un fournisseur de satellite approprié à votre mission** : Engendre une compression du planning de réalisation du satellite et une augmentation des coûts. Sélection fournisseur plateforme = Processus itératif (beaucoup d'échanges, sur tous les corps de métiers, sont nécessaires pour que la plateforme réponde à tous vos besoins).
- 2) **Ne pas tenir compte de la date de livraison satellite sur le site du lancement** : En fonction du lanceur, il peut être demandé de livrer le satellite 2 à 3 mois en avance. Temps nécessaire pour intégrer le lanceur avec tous les passagers (exemple des rideshare avec plus de 100 satellites !).
- 3) **Prendre pour acquis les données présentes sur le site internet du fournisseur de mission** : Il faut toujours vérifier les chiffres avec le fournisseur (votre concept des opérations en orbite peut avoir un impact sur les paramètres vitaux).
- 4) **Ne pas tenir compte des licences d'utilisation des fréquences, ou sous-estimer le temps nécessaire à l'obtention** : Il faut définir quelle entité sera (pénalement) responsable de l'usage des fréquences. En fonction de la bande de fréquence, compter 1 à 2 ans pour obtenir une licence.

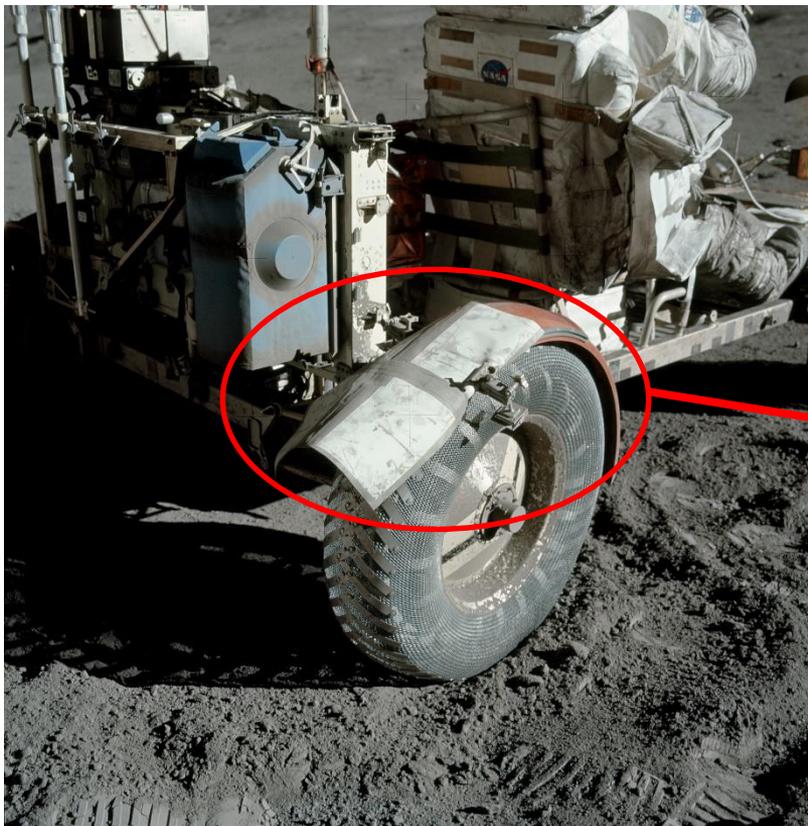
Retour d'expérience technique et humain

- 5) **Planning sans marges** : Un planning avec marges vous garantira de meilleures nuits de sommeil ;-)
Appliquez des marges au fournisseur du satellite, appliquez des marges sur le développement de votre charge utile. Prévoyez quelques semaines de réserves en cas d'imprévu. Mieux vaut être prêt un peu en avance plutôt que de rater le lancement !
- 6) **Livrer la charge utile trop tard** : Si vous passez par un fournisseur de mission complète, votre charge utile sera inspectée et testée avant intégration. Et à nouveau testée après intégration sur la plateforme. En fonction de la complexité de la charge utile, le processus peut durer de quelques semaines à quelques mois !
- 7) **Non vérification de ce que le fournisseur satellite peut offrir avant de développer votre charge utile** : Cela peut conduire à des NRE (ingénierie non récurrente) supplémentaires lors de la phase de conception du satellite. Exemple : Certaines charges utiles appliquent la norme CubeSat 10x10x10 cm aux dimensions extérieures de la charge utile. Cela ne correspond pas aux points d'interface internes des cadres de nanosatellites, ce qui nécessite des conceptions de cadres personnalisées... Il faut impérativement vérifier auprès du fournisseur satellite les interfaces mécaniques, les bus d'alimentation et de données.

Retour d'expérience technique et humain

- 8) **Ne pas tenir compte de la durée du processus d'enregistrement du satellite :** La durée de ce processus diffère fortement d'un pays à l'autre. Différents pays ont également des exigences différentes auxquelles un satellite enregistré doit répondre. Le processus d'enregistrement doit commencer au plus tôt.
- 9) **Ne pas tenir compte des manœuvres orbitales qui interrompent les opérations de charge utile :** Certaines missions, comme l'observation de la Terre, seront limitées dans les opérations de la charge utile lors de l'exécution des maintenances orbitales, lors de l'élévation ou de l'abaissement de l'orbite, ou dans les vol en formation. En fonction du système de propulsion choisi et de la complexité des manœuvres, cela peut signifier jusqu'à plusieurs semaines d'opérations en moins pour la charge utile.

Retour d'expérience technique et humain



Faire simple et efficace quand
il le faut...

Le plus important est de
répondre au besoin, pas plus !

Sommaire

- 1) Introduction
- 2) Contexte projets et filière nanosat
- 3) Conception et réalisation des nanosat UVSQ-Sat et INSPIRE-Sat7
- 4) Retour d'expérience technique et humain
- 5) Conclusion

Deux satellites mis en orbite, un troisième en cours d'intégration.



Une station sol fonctionnelle 24h/24 → 30 millions de télémessures reçues !



Une philosophie incrémentale : commencer simple et accroître la complexité quand les briques technologiques précédentes sont maîtrisées.



Contact filière nanosat → mustapha.meftah@latmos.ipsl.fr

Web :

- Twitter → <https://x.com/uvsqsat>
- UVSQ-Sat → <https://uvsq-sat.projet.latmos.ipsl.fr/>
- INSPIRE-Sat7 → <https://inspiresat7.projet.latmos.ipsl.fr/>

Publications :

- UVSQ-SAT, a Pathfinder CubeSat Mission for Observing Essential Climate Variables: www.mdpi.com/2072-4292/12/1/92
- INSPIRE-SAT 7, a Second CubeSat to Measure the Earth's Energy Budget and to Probe the Ionosphere: www.mdpi.com/2072-4292/14/1/186
- The UVSQ-SAT/INSPIRESat-5 CubeSat Mission: First In-Orbit Measurements of the Earth's Outgoing Radiation: www.mdpi.com/2072-4292/13/8/1449

Annexes

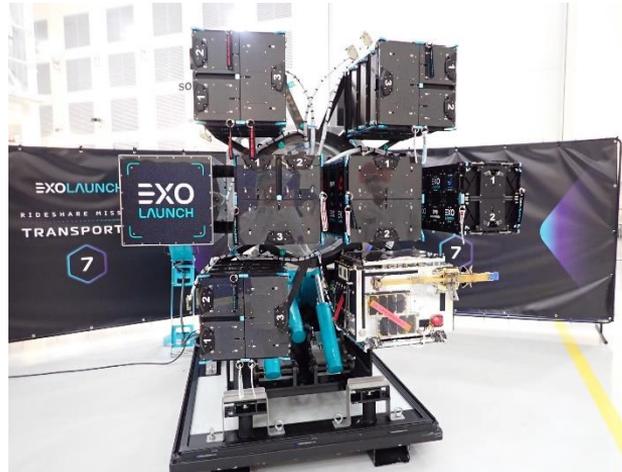
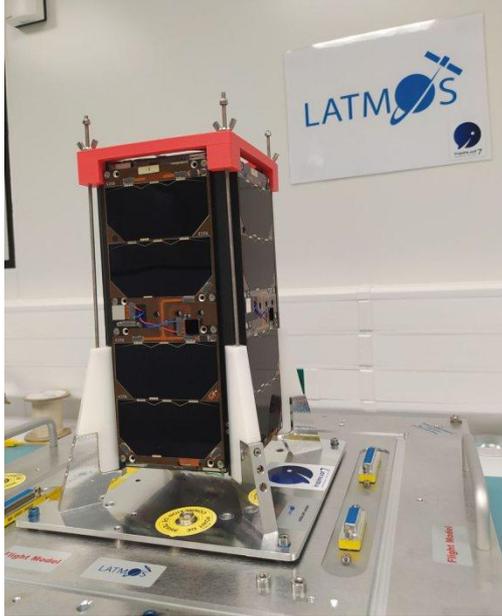
REX nanosat

[43]

MAPI 2024

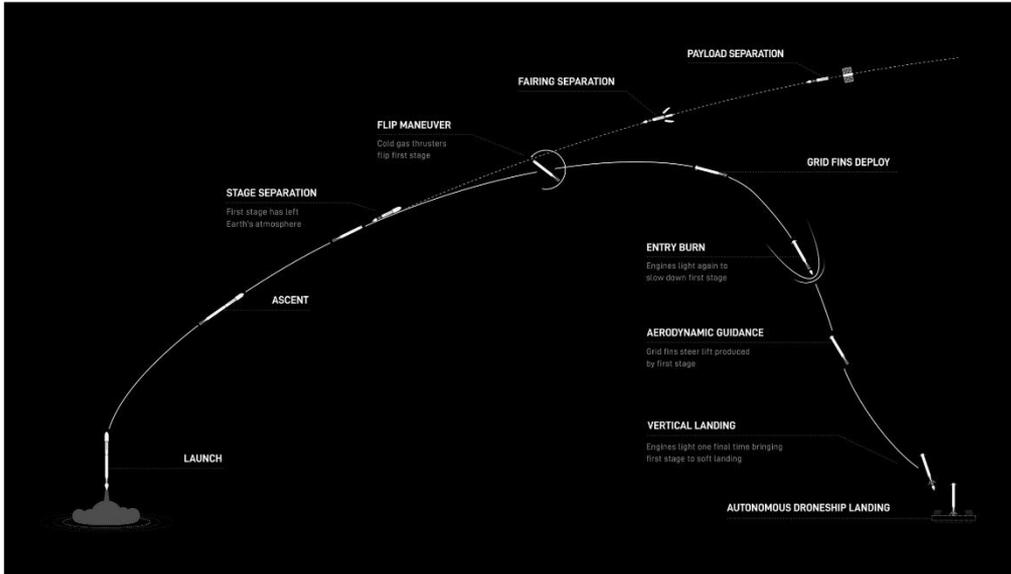
E. Bertran

Mise sous coiffe





Mise en orbite

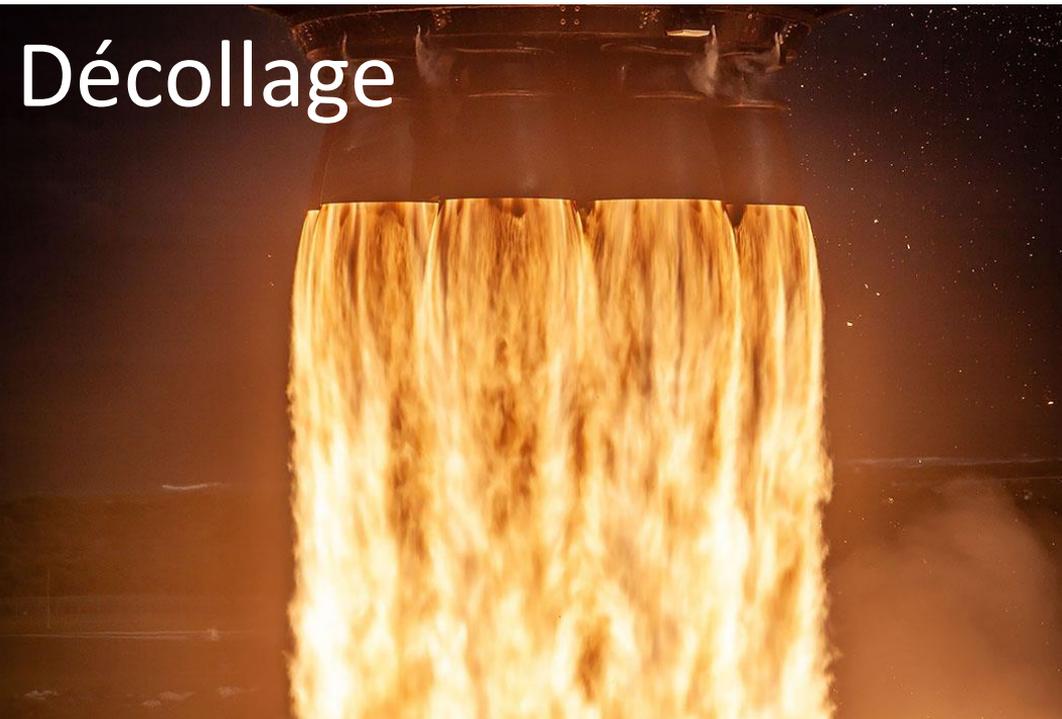


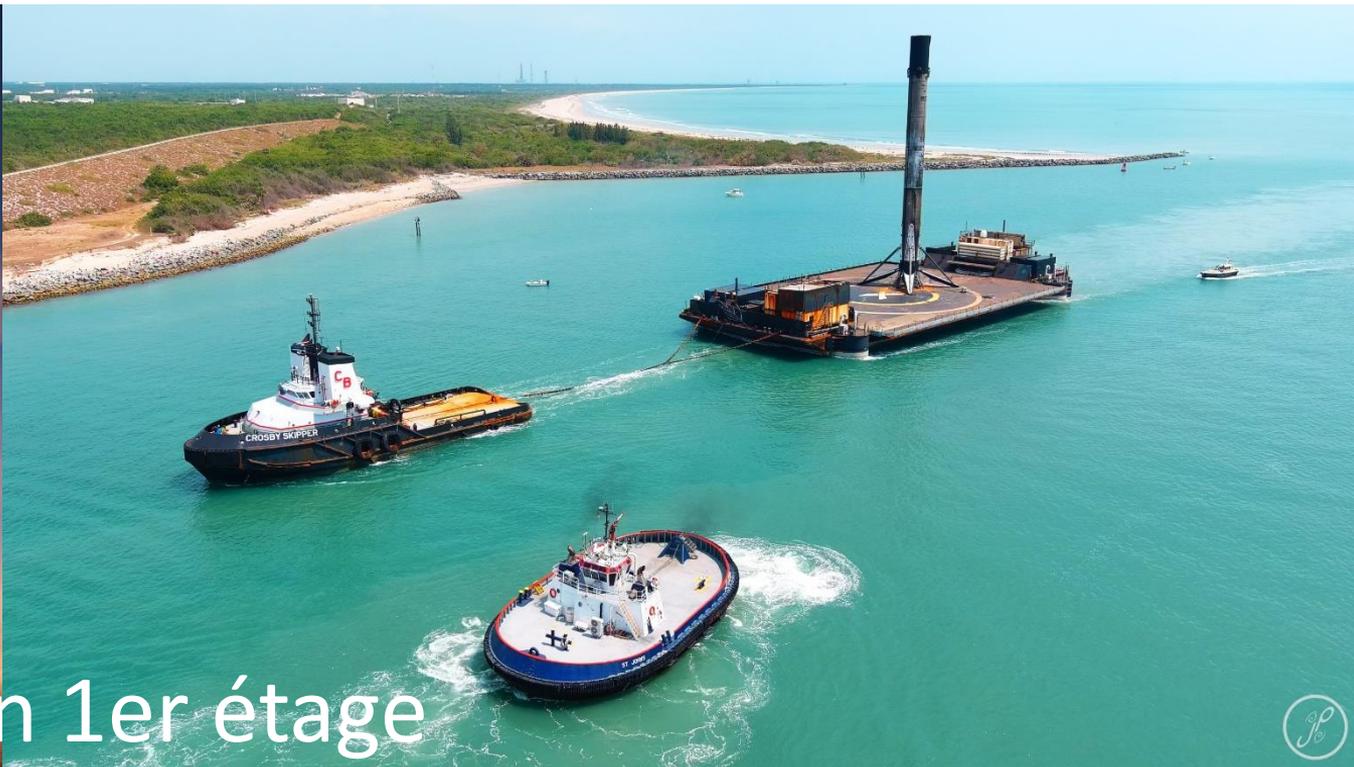
Séquence automatique

- T0 : Décollage
 - T0+10min : Récupération 1^{er} étage
 - T0+60min : Déploiement satellites
- (Temps approximatifs)



T0 : Décollage







T0+60min : Déploiement satellites



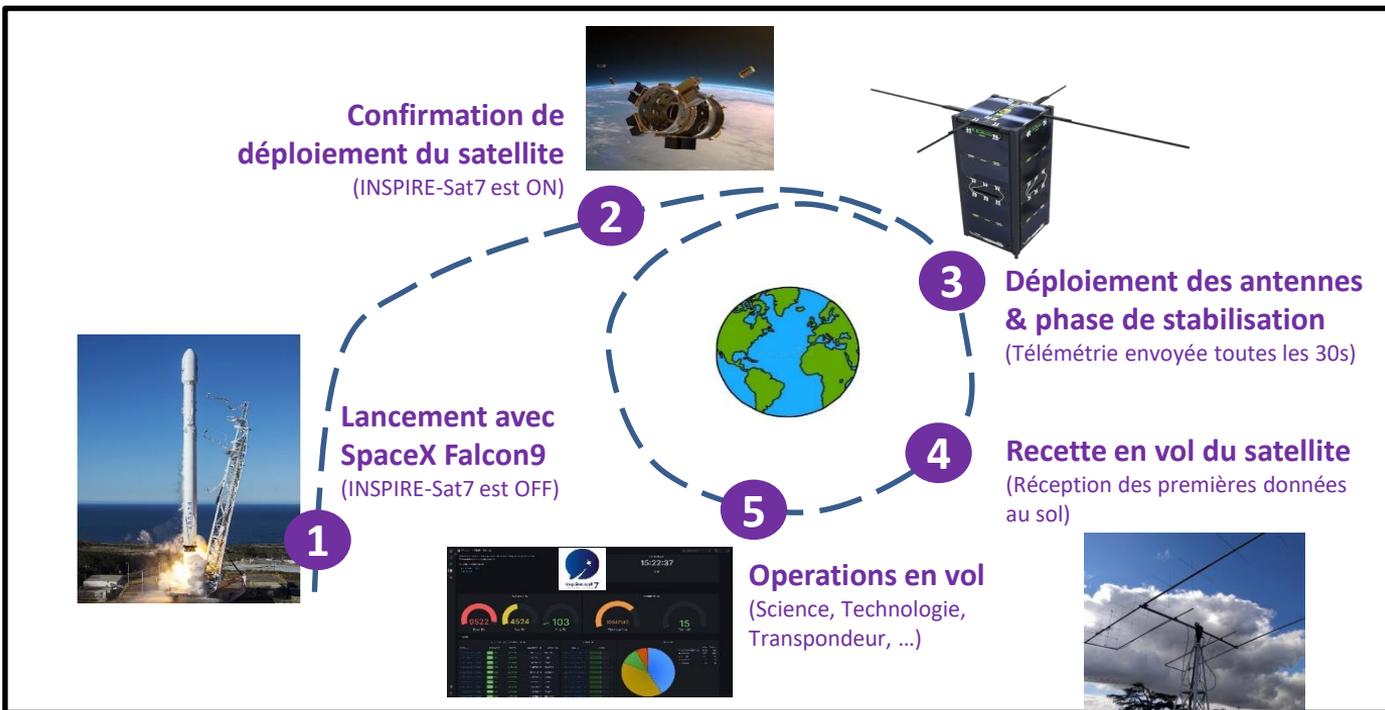
SPEED
27627
KM/H

ALTITUDE
536
KM

STAGE 2 TELEMETRY

Recette en vol

- Démarre dès la réception des premières données.
- A pour but de vérifier la bonne santé du satellite et des équipements scientifiques.



Opérations en vol

- Démarrent après la recette en vol.
- Ont pour but de piloter le satellite pour répondre à ses objectifs.

Opérations en orbite

