

Évaluation de la Fiabilité des Technologies Photoniques Micro-ondes en Orbite : Le Projet NIMPH
Par le Commandant Fabien CAZIN, stagiaire EMSST 2024-2025, Advanced Master Embedded Systems SUPAERO

La crise traversée actuellement par ADS (Airbus Défense & Space) et TAS (Thales Alenia Space)¹ s'explique en partie par la baisse de demandes de satellites de communication géostationnaires. Et aussi parce que le lanceur Ariane 5, malgré un niveau de performance et de fiabilité parmi les meilleurs au monde, s'est vu poussé vers la retraite par la concurrence du lanceur New Space. Ainsi, toute la filière aérospatiale européenne en général et française en particulier se retrouve en difficulté et doit repenser son avenir pour retrouver sa compétitivité. Cela entraîne des répercussions sur les applications militaires, tant dans ce domaine les applications sont duales. Si la solution concernant les lanceurs semble être Ariane 6 et ceux réutilisables en cours de développement comme Maia, la filière satellitaire, elle, se trouve face à un problème non encore résolu. Les constellations de satellites en orbite basse se multiplient tandis que la solution européenne One Web n'est pas encore le succès espéré. La compétitivité du secteur passera par une miniaturisation des satellites, réduisant drastiquement le coup de lancement. L'une des pistes envisagées est l'emploi systématique de la fibre optique pour remplacer les câbles en cuivre. Le projet NIMPH (Nanosatellite to Investigate Microwave Photonics Hardware), initiative conjointe du CNRS avec son LAAS (Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes) et du CSUT (Centre Spatial Universitaire de Toulouse) va y contribuer.



Après avoir vu les avantages promis par les fibres optiques, nous analyserons le projet NIMPH destiné à évaluer leur robustesse.

➤ **Les promesses de la fibre optique dans l'architecture des satellites**

Le 4 novembre 2024, le gouvernement Australien a annoncé l'annulation d'un contrat d'un milliard de dollars, attribué à Lockheed Martin, portant sur la fourniture d'un satellite de télécommunication militaire qui aurait dû se trouver sur une orbite géostationnaire. Le motif invoqué est une obsolescence du satellite avant même son lancement. Canberra n'annule pas le besoin intrinsèque à la commande initiale mais pense que l'avenir se trouve dans une autre architecture dans laquelle la fibre optique pourrait jouer un rôle.

• **L'importance du poids dans la réalisation des satellites**

L'emploi de la fibre optique dans les satellites permettra la miniaturisation des équipements, la résistance à de nouvelles menaces et le renforcement de la robustesse du dispositif satellitaire.

Particulièrement employée dans le monde des systèmes embarqués, la fibre optique est une nouvelle piste d'exploration pour les satellites. Le secteur de l'automobile emploie déjà de manière systématique la fibre optique. En effet, nos voitures emportent de plus en plus de calculateurs, de capteurs, nécessitant entre eux des transferts d'informations plus nombreux et plus rapides. Ce besoin est exacerbé par l'arrivée de la voiture électrique.

L'utilisation du cuivre a un débit de transmission de données relativement faible alors que la fibre optique dispose d'un potentiel de bande passante bien plus élevé. Cette dernière permet donc d'augmenter les capacités de connexions internes dans le volume restreint et même réduit des satellites, grâce à ses faibles dimensions en diamètre et poids.

Enfin, la fibre optique est moins énergivore, de l'ordre d'un facteur 2, ce qui permet d'envisager des alimentations en énergie électrique plus réduites. À titre d'illustration, le coût de lancement d'un kilo d'équipement par Ariane 6 dans sa version G2 est estimé à 14.000€² et le dernier satellite de communication militaire français, Syracuse 4B, pèse 3500 Kg³.

• **Perturbations électromagnétiques**

À l'image de l'ensemble des systèmes embarqués, les satellites, notamment ceux de communication, sont remplis de systèmes de hautes technologies dans un volume réduit ce qui provoquent des perturbations électromagnétiques contre lesquelles il faut se protéger dès la phase de conception.

Ces perturbations peuvent être :

- d'origine naturelle, comme les éruptions solaires peuvent provoquer des dommages importants sur les satellites allant jusqu'à la destruction de composants électroniques

- d'origine humaine, intentionnelles ou non. Les perturbations non intentionnelles sont présentes dès la conception, dues à la densité de composants électroniques dans un très faible volume et à leur puissance électrique consommée (jusqu'à 20 kW pour les composants les plus gourmands).

Intrinsèquement les équipements de communication radio engendrent un phénomène de couplage c'est à dire une perturbation électromagnétique réciproque où l'un des composants est qualifié d'agresseur et l'autre de victime. Par exemple, le phénomène de diaphonie est une perturbation causée par les champs électriques ou magnétiques d'un signal dans un câble sur le signal passant dans un câble adjacent.

Ce phénomène se produit aussi dans les circuits téléphoniques ; alors les interlocuteurs peuvent entendre une partie d'une autre conversation vocale provenant d'un circuit adjacent.

La résolution de ces problèmes est toujours partielle et représente un compromis notamment sur les puissances et fréquences d'émissions utilisées ou sur la densité de composants, représentant ainsi une limite aux performances de l'équipement.

Enfin ces perturbations peuvent être parfaitement intentionnelles ; les cas de brouillages des signaux GPS en provenance des satellites se multiplient et la guerre en Ukraine fournit de nombreux exemples.

¹ AFP, 2024

² Barensky, 2017

³ Wikipedia, 2024

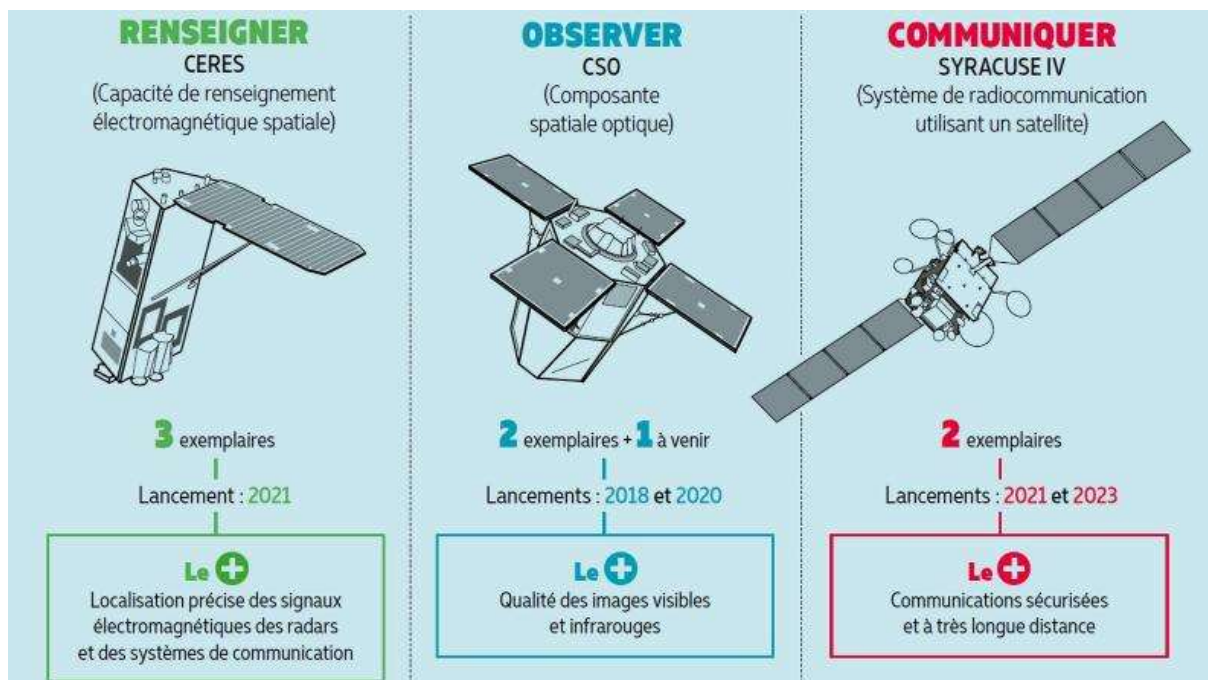
Les fibres optiques sont, elles, constituées de verre ou plastique et transportent de la lumière en lieu et place d'impulsions électrométriques ce qui les rend quasiment insensibles à toute interférence électromagnétique et bien que cela ne soit pas la caractéristique la plus importante, le signal s'atténue beaucoup moins vite que le signal électrique transporté sur cuivre.

• **Résilience des systèmes satellitaires**

Longtemps à l'abri des menaces par sa présence dans l'espace, le satellite, qu'il soit d'observation ou de communication, est devenu un élément incontournable pour obtenir la suprématie sur le champ de bataille. Cependant, l'éternel combat entre la lance et le bouclier voit son extension à ce milieu et les missiles antisatellite se multiplient ainsi que les manœuvres de satellites hostiles (cf. l'abordage du satellite franco-italien Athena-Fidus par un satellite militaire russe en 2017).

Dans le cadre de la phase de développement de son système de défense antimissile balistique lors des préparatifs d'invasion de l'Ukraine, la Russie a détruit un de ses vieux satellites, le 15 novembre 2022⁴ au moyen d'un missile intercepteur *Nudol*. Ce succès confirme l'extension à l'espace du champ de bataille et le potentiel tactique et stratégique des opérations antisatellites. La Chine dispose de cette capacité depuis 2007, année au cours de laquelle elle réalise un essai d'interception. Les USA et la Russie l'ont quant à eux réalisé-depuis les années 60. Au total, La Secure World Foundation recense plus de 70 tests antisatellites depuis 1959, dont plus de 20 tirs depuis 2005.

Si la France ne dispose pas de ce type de missile, elle envisage d'autres solutions comme l'aveuglement par laser. Des recherches sont menées conjointement par la DGA et l'ONERA et ont abouti à des tests concluants sur des satellites en fin de vie. De plus, un démonstrateur Yoda est en cours de développement et devrait être lancé en 2025. Il préfigure le programme Egide qui dotera la France de véritables patrouilleurs orbitaux protégeant les satellites nationaux ou alliés.



Les satellites militaires français - © Ministère des Armées

Cependant, les gros satellites sont des équipements de haute valeur (3,6 Md€ pour le programme SYRACUSE IV et ses deux satellites) et leur destruction par un missile valant quelques millions d'euros (12 M€ pour le SM-3 américain) pose d'impérieuses questions. C'est l'une des raisons évoquées dans l'annulation du contrat australien. La Défense australienne souhaite explorer le champ des flottes de microsatsellites à l'image de Starlink de SpaceX qui, bien que d'origine civile, a trouvé une application militaire en Ukraine. Le coût de revient d'un tel satellite est estimé à moins d'un million d'euros, renversant le rapport gain/perte, mais surtout la flotte atteint désormais 7.000 unités placées en LEO (orbite terrestre basse) et donc une redondance des moyens complètement ahurissante, ce qui rend absurde l'idée d'un missile par satellite à détruire. La miniaturisation des satellites est aussi utile pour atteindre un tel niveau de résilience pour des équipements habituellement placés en orbite GEO (orbite géostationnaire).

➤ **Le projet NIMPH**

Le projet NIMPH (Nanosatellite to Investigate Microwave Photonics Hardware) est un projet universitaire de nanosatellite au format CubeSat 3U conçu pour évaluer la robustesse de la technologie opto-microonde en orbite terrestre basse. Ces systèmes combinent des technologies photoniques et micro-ondes pour améliorer les performances des télécommunications spatiales en augmentant la capacité de transmission de données tout en réduisant la masse et la sensibilité aux interférences électromagnétiques.

⁴ Héniquet, 2022

Les fibres optiques dopées par des ions d'erbium jouent un rôle central dans les réseaux de télécommunication terrestres et font maintenant l'objet d'étude sur leur potentiel dans les satellites. Elles permettent d'augmenter la puissance du signal transmis tout en minimisant les interférences. Cependant, l'impact des radiations dans l'espace sur ces composants reste méconnu. Le projet NIMPH vise à combler cette lacune. Il prévoit de réaliser, pendant deux ans, des tests en environnement spatial, environnement impossible à reproduire en laboratoire. Il s'agit donc d'une innovation dans l'industrie des télécommunications spatiales.

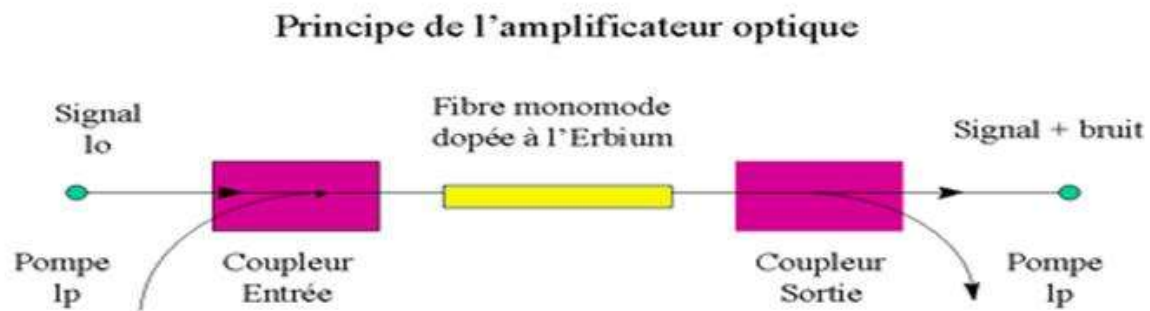
Voyons les technologies embarquées à bord de cette mission et comment elles seront exploitées.

• **Photoniques Micro-ondes et Fibre Optique Dopée**

La technologie photonique microonde permet la transmission de signaux haute fréquence à travers une fibre optique tout en maintenant une grande efficacité de transmission et en résistant mieux aux interférences électromagnétiques que les systèmes traditionnels basés uniquement sur des composants électroniques. Dans ce projet, les fibres dopées en ions d'erbium (Erbium-Doped Fiber Amplifier, ou EDFA) sont particulièrement importantes. Les EDFA sont couramment utilisés dans les réseaux de communication optique pour amplifier les signaux lumineux, rendant possible la transmission de données sur de longues distances sans nécessiter de relais électriques.

Le principe de l'amplification repose sur une réaction chimique entre les ions Erbium et le signal lumineux. L'Erbium (Er, numéro atomique 68) est un élément chimique qui peut être excité au contact d'une source lumineuse d'une longueur d'onde de 800, 980, 1480 nm permettant de dégager l'énergie nécessaire à l'amplification du signal lumineux. Cette qualité offre la possibilité de transmettre plusieurs signaux de "couleurs" différentes (ou canaux) en même temps et de réaliser ainsi un multiplexage.

Dans le principe, la fibre optique est « dopée »⁵ en ion Erbium sur une distance donnée. Un signal pompe d'une des longueurs spécifiques à l'excitation des ions d'erbium va être introduit dans la fibre à l'aide d'un coupleur. Lorsque ce signal est en contact avec les ions, de l'énergie photonique va être dégagée. L'énergie dégagée par cette réaction chimique va amplifier tous les canaux constituant la fibre. Afin de ne pas polluer la transmission d'information dans la fibre, le signal pompe est retiré à la sortie.



La fibre optique est dopée en ion Erbium

L'emploi de la fibre optique dans les satellites de communication, outre ses qualités intrinsèques, permet de transmettre des signaux à très haute fréquence (jusqu'à 100 GHz), ce qui est essentiel pour la communication spatiale et contrairement aux systèmes micro-ondes purement électroniques.

• **Le nanosatellite NIMPH**

NIMPH est dérivé du programme éducatif JANUS du CNES visant à permettre aux étudiants d'acquérir une expérience unique dans le domaine spatial en travaillant sur un projet de recherche appliqué et innovant, développé par le LAAS avec la contribution du CSUT.

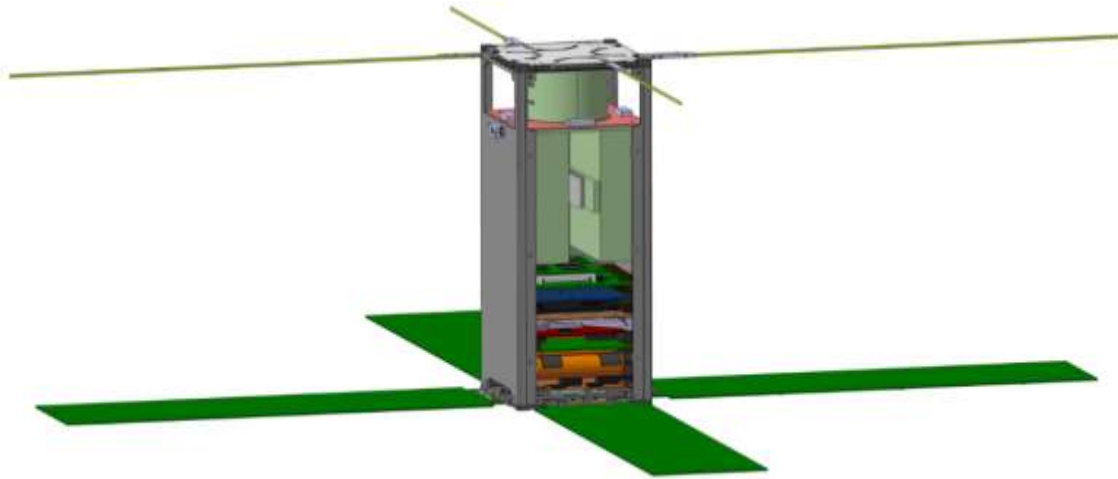
Le nanosatellite NIMPH est conçu au standard CubeSat 3U, mesure 30 cm de long pour 10 cm de largeur et de hauteur et pèse environ 4 kg. Il intègre deux charges utiles principales : EDMON et RADMON pour tester la dégradation sous radiations de différentes fibres optiques dopées en erbium, ainsi que le bon fonctionnement des composants optoélectroniques du système : lasers, photodiodes, commutateurs MOEMS (microsystèmes opto-électro-mécaniques).

Chaque charge utile a un rôle bien défini :

- **EDMON** : L'amplificateur à fibre optique dopée EDMON est la charge principale de NIMPH. Il est configuré pour évaluer la stabilité du gain et du bruit du signal en réponse aux radiations cosmiques. La fibre optique est exposée directement à l'environnement spatial pour simuler les conditions réelles des systèmes de communication par satellite en orbite. Des mesures de gain et de bruit in-situ seront effectuées régulièrement pour détecter les signes de dégradation. Les résultats sont envoyés à la station sol à chaque fois que le satellite passe au-dessus de Toulouse, ville d'où est piloté le projet.

- **RADMON** : Ce capteur secondaire, développé en collaboration avec le CERN, surveille l'environnement radiatif dans lequel le satellite évolue. Les données fournies par RADMON permettent de corréler les niveaux de radiation mesurés aux éventuelles dégradations observées sur les performances de l'EDMON, offrant ainsi un aperçu direct de l'impact des radiations sur les composants photoniques embarqués.

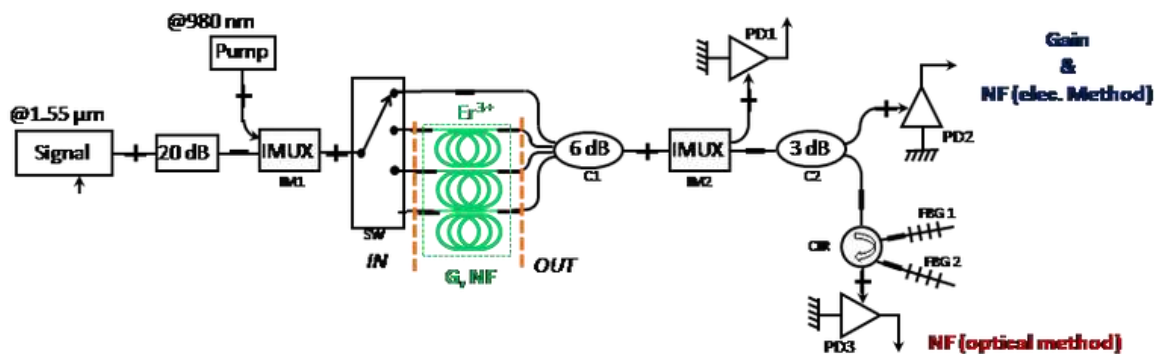
⁵ Lefèvre, s.d.)



NIMPH – Vue en coupe

• Mesures et exploitation scientifique

La mesure de performance des EDFA⁶ est réalisée à l'aide d'une source laser stabilisée à 1.550 nm et modulée à 10 MHz. Les mesures de bruit et de gain utilisent une méthode de détection sélective en fréquence, ce qui permet de séparer le signal amplifié de l'émission spontanée amplifiée (ASE), et donc d'améliorer la précision des résultats obtenus. La modulation de fréquence est utilisée pour éviter d'amplifier artificiellement l'émission spontanée et garantir la validité des mesures⁷.



NIMPH – Mesure de la performance des EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier)

Le système EDMON comprend également une photodiode optimisée pour minimiser le bruit de fond. Cette photodiode est associée à des filtres qui éliminent les bruits thermiques et ceux de type inverse de la fréquence, ce qui permet des mesures précises du bruit de fond induit par les radiations cosmiques. Ces techniques avancées d'optométrie permettent ainsi de surveiller la dégradation de l'amplification dans la fibre dopée en fonction du temps et des niveaux de radiation cumulés.

NIMPH devraient fournir des informations critiques sur la durabilité des composants photoniques micro-ondes en conditions réelles d'orbite terrestre basse (LEO). Les paramètres mesurés, tels que le gain optique et le rapport signal-bruit, indiqueront dans quelle mesure les fibres optiques dopées peuvent être déployées pour des applications en orbite plus longue, comme celles des satellites géostationnaires.

➤ Conclusion

Le projet NIMPH peut être considéré comme pionnier dans l'évaluation des technologies photoniques pour les applications spatiales et original par le format universitaire retenu. En mesurant l'impact des radiations sur les fibres dopées en erbium, NIMPH fournira des informations essentielles pour la conception de futurs systèmes de télécommunications. Les résultats de cette mission permettront d'envisager des satellites plus légers, résistants aux interférences, et capables de transmettre des données à haute fréquence sur de longues distances. Ces résultats auront des implications considérables pour l'avenir de l'industrie spatiale, tout en renforçant les capacités des futures générations d'ingénieurs grâce à des projets éducatifs d'envergure. La conception de NIMPH est quasiment achevée et le lancement est prévu courant 2025.

⁶ Lopez-Arreguin, et al.

⁷ LAAS, s.d.

Références

- AFP. (2024). <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/airbus-le-gouvernement-s-engage-a-ce-qu-il-n-y-ait-pas-de-licenciements-20241023>. *Le Figaro*.
- Barensky, S. (2017). *Les vrais chiffres de la compétitivité d'Ariane 6*. Récupéré sur <https://www.aerospatium.info/vrais-chiffres-de-la-competitivite-ariane-6/>
- Henquinet, L. (2022). Face aux États-Unis, la menace antisatellite chinoise. *Conflits*.
- LAAS. (s.d.). *Optique micro-onde : liens fibrés et fonctions optiques pour le spatial*. Récupéré sur <https://www.laas.fr/fr/equipes/most/optique-micro-onde-liens-fibres-et-fonctions-optiques-pour-le-spatial/>
- Lefèvre, R. (s.d.). *La fibre optique et la technologie WDM*. Récupéré sur https://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2007/rlefierv_Fibre_Optique_et_WDM/wdm_amplificateurs.htm
- Lopez-Arreguin, A., Rissons, A., Estepa-Avellaneda, Y., Lizy-Destrez, S., Destic, F., Fernandez, A., & Gilard, O. (s.d.). Theoretical study of the space radiation effects in an EDFA for a small satellite mission. *HAL*.
- Wikipedia. (2024). *Syracuse IV*. Récupéré sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Syracuse_IV