



Fédération Nanosatellites pour les Sciences de la Terre et de l'Univers

Prospective scientifique

Avril 2024

1. Introduction

1.1 Newspace et nanosatellites

L'accès à l'espace, traditionnellement réservé aux grandes agences spatiales, a commencé à s'ouvrir à un éventail plus large d'acteurs à la toute fin du XXe siècle, un mouvement qu'on a appelé le *New Space*. Celui-ci représente une approche qui cherche à révolutionner l'industrie spatiale en mettant l'accent sur la réduction des coûts, l'innovation rapide et une accessibilité à l'espace facilitée. Cette évolution a été possible grâce notamment à certaines avancées technologiques, à l'intérêt croissant des investisseurs privés, à l'émergence de nouveaux modèles commerciaux et de nouveaux opérateurs notamment pour les lancements.

Une tendance majeure qui a émergé avec le *New Space* est le développement de nanosatellites. Leur histoire remonte aux années 1990, lorsque, après l'envoi par le Japon de micro-engins au format « CanSat », de la taille d'une canette, en tirs sub-orbitaux, des chercheurs de plusieurs universités américaines développent le standard « CubeSat » en collaboration avec la NASA. Ce petit format de 10x10x10 cm³ empilable a ouvert la voie à une nouvelle ère de l'exploration spatiale, avec le lancement des premiers CubeSats par

des universités américaines au début des années 2000. En France, le premier nanosatellite a été lancé en 2012 (Robusta, Centre Spatial Universitaire de Montpellier). Depuis lors, la technologie des nanosatellites n'a cessé de progresser, souvent avec le soutien des agences spatiales (2006, programme Janus du CNES devenu Nanolab Academy; 2008, programme "Fly Your Satellite" de l'ESA ; 2013, premier programme de support NASA aux CubeSats américains), offrant des opportunités sans précédent pour les entreprises commerciales, les universités, les laboratoires, etc.

1.2 Nanosatellites scientifiques

Si la majorité des nanosatellites universitaires développés depuis deux décennies sont à visée essentiellement pédagogique, on voit apparaître depuis quelques années, en France et dans le monde, des projets de nanosatellites de recherche scientifique. Les thématiques concernées sont diverses : météo de l'espace, programme SSA (*Space Situational Awareness*) de l'ESA, climat / alertes, physique des plasmas, magnétisme terrestre, sondage atmosphérique, géodésie des petits corps, exoplanètes, physique stellaire, radio-astronomie, etc.

En 2016, l'ESA lance un appel d'offre pour des nanosatellites d'accompagnement de la sonde *HERA*, destinée à étudier *in situ* le résultat de l'impact de l'engin *DART* (lui-même ayant largué le cubesat *LICIACube*) de la NASA sur l'astéroïde Dimorphos. Dès lors, des nanosatellites sont envisagés pour accompagner les missions d'exploration de l'ESA. Cette politique permet à de nombreux pays d'initier une activité spatiale grâce aux nanosatellites, soutenus par l'ESA et les agences nationales (Luxembourg, Estonie, Pologne, Italie...). L'ESA crée des lignes de programme dédiées (*Fly Your Satellite*, *ESA Academy*...) ou des projets dans des programmes existants (*M-ARGO* dans le *GSTP*, *General Support Technology Programme*).

En 2018 a lieu le premier lancement d'un nanosatellite scientifique français, *PicSat*, financé par une partie d'une ERC, des crédits CNRS et l'Université PSL (en partie dans le cadre du *LabEx ESEP*). Pendant ce temps, la NASA associe des nanosatellites, dont certains scientifiques, à pratiquement tous ses lancements, et finance également des lancements dédiés.

Cependant, en France, il n'y a pas eu de création de guichet spécifique « nanosatellites scientifiques », les programmes du CNES Janus puis Nanolab Academy restant purement à visée pédagogique. En outre, la France participe peu au financement des programmes nanosatellites de l'ESA. En conséquence, malgré le dynamisme des communautés scientifiques impliquées, malgré les nombreux jeunes chercheurs et ingénieurs formés aux technologies des nanosatellites, et l'existence de nombreux projets de nanosatellites scientifiques français, ceux-ci sont en compétition inégale avec les instruments embarqués dans les missions traditionnelles et très peu d'entre eux peuvent accéder à des financements ainsi qu'aux moyens humains et matériel des laboratoires. La France ne présente pas non plus d'héritage conséquent pour des contributions aux nanosatellites scientifiques européens (pour *HERA*, les contributions françaises sont au niveau de la mission-mère).

1.3 Enjeux de la fédération Nanosatellites

Dans ce contexte en évolution rapide, l'objectif de la fédération Nanosatellites est de mettre en avant le changement de paradigme que représentent les nanosatellites scientifiques pour de nouveaux concepts d'observation et d'exploration spatiales, portant des objectifs scientifiques ciblés et également accélérateurs de technologies spatiales innovantes.

Il s'agit aussi d'accompagner les projets issus des laboratoires impliqués dans la fédération, en favorisant les échanges et la mutualisation, afin de rendre disponibles certains des moyens qui peuvent leur manquer et éviter les redondances. La fédération peut également jouer un rôle de représentation auprès des tutelles, des acteurs privés et des agences dont le CNES.

2. Le paysage des nanosatellites scientifiques en France

2.1 La Fédération Nanosatellites

La fédération Nanosatellites, créée en 2023, a six tutelles (CNRS, Observatoire de Paris – PSL, École Normale Supérieure – PSL, Sorbonne Université, Université Paris Cité et Université Paris Est Créteil) et rassemble neuf UMR (LESIA, IMCCE, LERMA, LPENS, IPGP, APC, LATMOS, IAP, LISA), une UAR (Observatoire de Paris) ainsi que quatre centres spatiaux (CENSUS, PSUPC, CurieSat, CS-UPEC) d'Île-de-France. Elle a vocation à s'étendre à toute la France d'ici quelques années.

S'appuyant sur les composantes listées ci-dessus, la fédération Nanosatellites rassemble de nombreuses expertises et savoir-faire en recherche spatiale.

La fédération dispose en outre de divers équipements et moyens, parmi lesquels :

- Des centres d'ingénierie concourante : CENSUS à l'Observatoire de Paris – PSL (Meudon), CDF de l'Université Paris Cité
- Des méthodes et moyens de développement : modélisation MBSE, suite logicielle DOCKS, logiciels métier des laboratoires spatiaux
- Des moyens de tests (voir Section 4.2)
- Des stations de télémétrie et télécommande : UHF/VHF à l'Observatoire de Paris – PSL (Meudon), antenne UHF/VHF de CurieSat à Sorbonne Université (Paris), antenne du LATMOS,...

2.2 Autres centres en France incluant une composante nanosatellites scientifiques

Le paysage français des nanosatellites hors Île-de-France comporte plusieurs centres ayant une activité importante dans le domaine de la recherche spatiale scientifique :

- À Grenoble, le Centre Spatial de l'Université de Grenoble (CSUG), porté par l'Université de Grenoble-Alpes

- À Montpellier, le Centre Spatial de l'Université de Montpellier (CSUM), porté par l'Université de Montpellier
- À Toulouse, le Centre Spatial Universitaire de Toulouse (CSUT), porté par l'ISAE-Supaéro et rassemblant 7 partenaires dont l'ENAC, l'Université Toulouse III, l'IRAP.

D'autres centres spatiaux sont également présents, comme à l'École Polytechnique, à l'Université de la Côte d'Azur, à Aix-Marseille Université, ou encore à l'Université de Bordeaux, mais ceux-là sont plutôt dédiés à des programmes pédagogiques pour le moment.

3. Les projets de nanosatellites scientifiques de la fédération

Héritière des activités de ses laboratoires-membres, la fédération Nanosatellites porte aujourd'hui un nombre important de projets, à divers niveaux de maturité.

Tout d'abord, trois nanosatellites développés dans le périmètre de la fédération avant même qu'elle existe ont déjà été lancés. Il s'agit de Inspire-Sat et UVSQ-Sat, toujours en vol au moment où ces lignes sont écrites, et de PicSat, dont le retour dans l'atmosphère terrestre s'est produit en 2023.

Les descriptions de ces trois projets, ainsi que leurs statuts, sont consultables sur le site de la fédération :

- [Inspire-Sat](#) *bilan radiatif de la Terre – en fonctionnement*

- [UVSQ-Sat](#) *mesures large bande du budget de radiation de la Terre – en fonctionnement*

- [PicSat](#) *détection du transit de la planète orbitant autour de beta Pic – terminé*

Ensuite, un projet de nanosatellite, [NanoMagSat](#), *constellation de trois nanosatellites pour l'observation du champ magnétique terrestre et de l'environnement ionosphérique*, a été sélectionné récemment dans le cadre du programme Scout de l'ESA, pour un lancement vers 2027 et une durée d'exploitation de 3 ans.

Une douzaine d'autres projets de nanosatellites sont en cours de conception ou de développement. Les descriptions de ces projets sont également consultables sur le site de la fédération.

En orbite basse :

- [IGOSat](#) *rayonnement gamma et électrons haute énergie dans l'anomalie de l'Atlantique sud et les cornets polaires*

- [Meteorix](#) *caractérisation des météores et débris spatiaux*

- [OGMS-SA](#) *mesure de radiations en orbite basse et tests de programmation en logiciel SURE et re-programmation depuis le sol*

- [CASSTOR](#) *spectropolarimétrie stellaire UV à haute résolution*

- [IR-Coaster](#) *comportement photochimique de molécules organiques et inorganiques dans l'environnement spatial*

- [CIRCUS](#) cartographie des couches de l'ionosphère de la Terre

- [ExoLight](#) interféromètre annulant spatial pour l'étude de la lumière exo-zodiacale

En orbite géostationnaire ou lunaire :

- [COSMOcal](#) source polarisée pour la calibration des mesures sol et spatiales de la polarisation du fond cosmologique

- [NOIRE](#) interférométrie radio basse fréquence par un essaim en orbite autour de la Lune

Sondes interplanétaires :

- [BIRDY](#) exploration de la structure interne des petits corps ou reconnaissance d'astéroïde géocroiseur PHA (Potentially Hazardous Asteroids), avec pour première cible le passage d'Apophis en 2029

- [TERACUBE](#) étude in-situ de l'atmosphère de Vénus dans le domaine des fréquences THz

- [VAMOS](#) surveillance de l'activité sismique de Vénus

4. Feuille de route

4.1 Calendrier théorique des projets

Le nombre important de projets de nanosatellites portés par les membres de la fédération témoigne du dynamisme et de l'enthousiasme de notre communauté pour ce nouvel outil scientifique. Abstraction faite des questions de financement, qui demeurent un élément bloquant dans la plupart des cas, l'état d'avancement technique de ces divers projets permettrait d'envisager leur lancement dans les quelques années à venir. Un calendrier envisageable, toujours sans tenir compte des financements, serait alors celui de la Figure 1 ci-dessous.

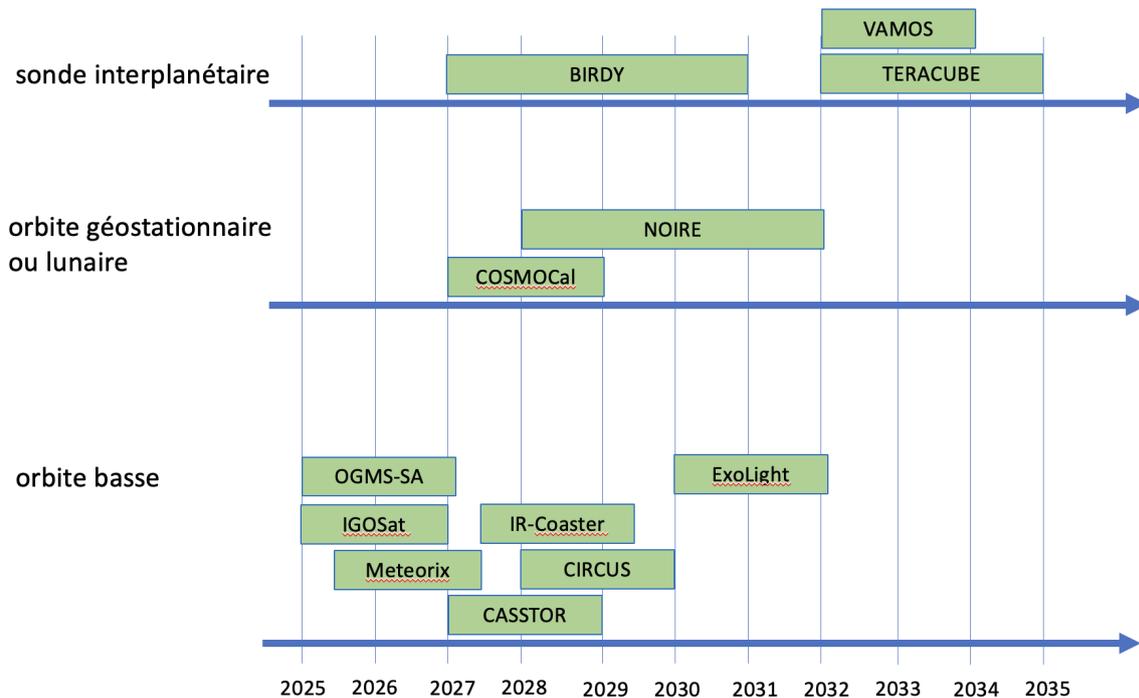


Figure 1. Calendrier théorique de lancement et d'exploitation des projets de nanosatellites de la fédération, compte tenu de la maturité technique de chaque projet, mais ne prenant pas en compte les questions de financement. La limite inférieure de chaque boîte est la date approximative de lancement sous ces hypothèses, et la largeur de la boîte la durée estimée de la mission y compris son exploitation scientifique initiale.

Sans surprise, les projets de nanosatellites en orbite basse sont les plus nombreux et plusieurs d'entre eux sont assez mûrs techniquement pour envisager leur lancement à courte échéance. Les projets en orbite géostationnaire ou en orbite lunaire, ainsi que les projets de sondes interplanétaires, réclament encore des études pour parvenir à maturité.

La conception et le développement de ces projets bénéficient des moyens de réalisation et de tests disponibles au sein de la fédération. Un des enjeux est de parvenir à un niveau de mutualisation adéquat pour apporter un soutien optimisé à ces projets. En outre, malgré son budget modeste, la fédération Nanosatellites peut envisager de participer au soutien financier de quelques activités de conception et de développement de certains de ces projets.

Ce sont les opportunités de financement, plus que les objectifs scientifiques, qui décideront *in fine* quelles missions seront lancées, et dans quel ordre. Il ne semble ni légitime ni judicieux de fixer dès à présent des priorités au niveau de la fédération entre ces divers projets, tous parfaitement justifiés sur le plan scientifique. En revanche, en fonction des opportunités de financement, la fédération pourra jouer un rôle de coordination et d'optimisation de la stratégie pour permettre le développement, puis le lancement et l'exploitation du plus grand nombre de ces projets, dans les meilleures conditions.

4.2 Développement et mutualisation des équipements et des moyens de test

Components off the shelves (COTS)

La fédération s'est donnée pour objectif de créer et de maintenir à jour la liste des *COTS* disponibles chez ses membres, dont certains ont vocation à être mutualisés, en général sur la base du prêt. Ces *COTS* appartiennent à diverses catégories : panneaux solaires, roues à inertie, magnéto-coupleurs, capteurs solaires, viseurs d'étoiles (*star trackers*), imageurs, OBC, etc.

Un inventaire est en cours, intégrant toutes les informations disponibles sur ces *COTS* : nature, datasheets, prix/devis, protocoles de test, retours d'expérience, compte rendu de tests. Et bien sûr, il doit identifier quels sont les *COTS* qui sont prêtables et dans quelles conditions.

Moyens de tests

La plupart des moyens de tests nécessaires au développement d'un nanosatellite sont disponibles au sein de la fédération. Ceux-ci incluent :

- Des salles propres
- Des moyens d'essais thermiques : enceintes climatiques, enceintes vide-thermique, enceintes étuvage et bake-out
- Des moyens d'essais mécaniques : pots vibrants, moyens d'essais chocs, MGSE
- Des moyens optiques : simulateurs solaires et stellaires, OGSE
- Des EGSE, notamment de tests électroniques à distance
- Des équipements de nettoyage, de stockage

Là aussi il est prévu de créer une liste complète de ces moyens existants au sein de la fédération et de la maintenir à jour. L'objectif est de mutualiser ces moyens dans la fédération, en complémentarité de la mutualisation qui est pratiquée dans le cadre du GIS PARADISE.

Certains équipements nécessaires au développement de nanosatellites ne sont pas disponibles dans la fédération, par exemple des moyens pour tests de susceptibilité EM, ou un étage 4K pour tests en vide thermique. Il est envisagé que la fédération se dote de ces moyens à plus ou moins long terme.

4.3 Émergence de nouveaux projets, de nouvelles technologies

Les projets existants (voir Section 3 et Figure 1) sont assez nombreux pour remplir amplement le plan de charge des équipes de la fédération sur la décennie à venir. Cependant, un des enjeux du New Space et des nanosatellites étant d'ouvrir l'espace à de nouvelles technologies, certains des projets actuels de la fédération comportent des objectifs de développement et de tests de technologies innovantes. C'est le cas par exemple de CASSTOR (spectropolarimétrie UV), de NOIRE (interférométrie radio basse fréquence),

de BIRDY (navigation spatiale autonome), ou encore d'ExoLight (interférométrie annulante spatiale dans le visible).

Ces projets, qui allient objectifs scientifiques et technologiques, pourront en cas de succès donner lieu à de nouvelles filières technologiques, et seront dans ce cas systématiquement suivis de missions ultérieures, dont certaines encore à base de nanosatellites. Il n'est pas facile de prévoir dès à présent dans quels domaines ces nouvelles filières se développeront, mais il est à peu près certain que plusieurs d'entre elles seront poursuivies si elles peuvent voler dès demain.

La fédération Nanosatellites doit se préparer à faire face à ces futurs défis. L'organisation d'une réflexion commune, la coordination des efforts, la mise en commun des moyens et des expertises au sein de la fédération, sont autant d'éléments indispensables pour que ces filières technologiques soient développées dans les conditions les plus favorables.

4.4 Sources de financement

Le coût typique d'un nanosatellite (conception, fabrication, tests, lancement, exploitation) varie de 1 à 10 M€ selon sa taille et son profil de mission. Le financement d'un nanosatellite peut donc difficilement être pris en charge seulement par la fédération et ses tutelles.

Comme on l'a vu plus haut, la filière des nanosatellites scientifiques en France souffre de l'absence d'un programme spécifique national, comme il en existe ailleurs dans le monde. Faute d'un tel guichet dédié, les porteurs de projet doivent effectuer un montage budgétaire complexe et rechercher les financements dans de multiples directions (régions, ANR, ERC, universités...), dans des conditions et des calendriers très variables, en agrégeant de nombreux petits financements pour atteindre le budget global nécessaire. Cette situation a plusieurs types de conséquences :

- Une incertitude permanente sur le plan de développement des projets, entraînant des difficultés de management et des durées totales de développement en contradiction avec les enjeux-mêmes du New Space.
- La nécessité dans la plupart des cas de revoir à la baisse les ambitions des projets, tout en les complexifiant parfois, en fonction des financements trouvés.
- L'impossibilité de proposer une stratégie scientifique globale optimisée au niveau de la fédération, effet de synergie que ses membres attendent.

La fédération Nanosatellites plaide donc fortement pour la mise en place d'un programme national de nanosatellites scientifiques, doté d'un budget récurrent, idéalement piloté par le CNES, fonctionnant sur le principe d'appels d'offres annuels. Ce programme, pour être efficace, devrait disposer d'un budget suffisant pour pouvoir financer le lancement d'au moins un petit nanosatellite par an au niveau national, soit environ 3 à 5 M€ annuels. Ceci représenterait 30 à 50 M€ sur la décennie soit l'équivalent d'une contribution scientifique spatiale moyenne pour un effet de rayonnement 10 fois plus important et un élan scientifique et technologique nouveau, inspirant pour les jeunes ingénieurs et chercheurs formés dans les programmes de formation des CSU et du programme JANUS/Nanolab Academy.

De plus, au-delà du programme Scout d'observation de la Terre, et afin que les équipes françaises puissent répondre aux appels d'offres de l'ESA pour des nanosatellites accompagnant les missions ESA par exemple, il est souhaitable que la France contribue aux

programmes nanosatellites de l'ESA, par exemple au GSTP qui finance M-ARGO mais aussi VOLT (successeur de OPS-SAT), comme le font déjà plusieurs pays européens.

5. Conclusion

La fédération Nanosatellites a pour objectif la coordination en Île-de-France (et à terme en France) des activités visant à concevoir et développer des nanosatellites scientifiques. Dans le contexte mondial en rapide évolution du *New Space*, cette initiative permet d'optimiser les moyens humains et techniques présents dans nos laboratoires et nos centres spatiaux pour le développement et l'exploitation des nanosatellites scientifiques.

La feuille de route présentée dans ce document représente la vision commune des membres de la fédération. Elle place en priorité la mutualisation des moyens, notamment les moyens de test et les équipements partageables, ainsi que la coordination des différents projets.

La difficulté majeure identifiée, handicapant fortement les initiatives dans ce domaine, est l'absence d'un guichet principal pour leur financement. C'est pourquoi **la fédération Nanosatellites plaide en faveur de la mise en place d'un programme national pour les nanosatellites scientifiques**, doté d'un budget suffisant pour permettre le développement, le lancement et l'exploitation scientifique d'en moyenne un nanosatellite scientifique de complexité intermédiaire par an sur une période de plusieurs années (5 à 10 ans), ainsi que pour la participation de la France aux programmes de l'ESA qui financent des nanosatellites.