



HAL
open science

Nanosatellites pour l'Astrophysique

Boris Segret

► **To cite this version:**

Boris Segret. Nanosatellites pour l'Astrophysique. Instrumentation et méthodes pour l'astrophysique [astro-ph.IM]. Observatoire de Paris - PSL, 2024. tel-04644369

HAL Id: tel-04644369

<https://hal.science/tel-04644369v1>

Submitted on 11 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



Habilitation à Diriger des Recherches

DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à l'Observatoire de Paris-PSL

Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

Nanosatellites pour l'Astrophysique

Soutenue par

Boris SEGRET

Le 4 juillet 2024

École doctorale n°127

**Astronomie et
Astrophysique
d'Île-de-France**

Spécialité

Astrophysique

Composition du jury :

M. Fabrice MOTTEZ Directeur de Recherche, CNRS Observatoire de Paris-PSL	<i>Président</i>
M. Laurent DUSSEAU Professeur, CSUM et IES Université de Montpellier	<i>Rapporteur</i>
M. Hubert HALLOIN Maître de Conférence, APC Université Paris Cité	<i>Examineur</i>
Mme Karine ISSAUTIER Directrice de Recherche, CNRS Observatoire de Paris-PSL	<i>Examinatrice</i>
M. Özgür KARATEKIN Senior Research Scientist Observatoire Royal de Belgique	<i>Rapporteur</i>
Mme Stéphanie LIZY-DESTREZ Professeure, ISAE-SUPAERO Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace	<i>Examinatrice</i>
M. Vincent MAGET Directeur de Recherche, ONERA	<i>Rapporteur</i>



Habilitation à Diriger des Recherches

DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à l'Observatoire de Paris-PSL

Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

Nanosatellites pour l'Astrophysique

Soutenue par

Boris SEGRET

Le 4 juillet 2024

École doctorale n°127

**Astronomie et
Astrophysique
d'Île-de-France**

Spécialité

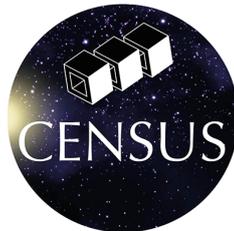
Astrophysique

Composition du jury :

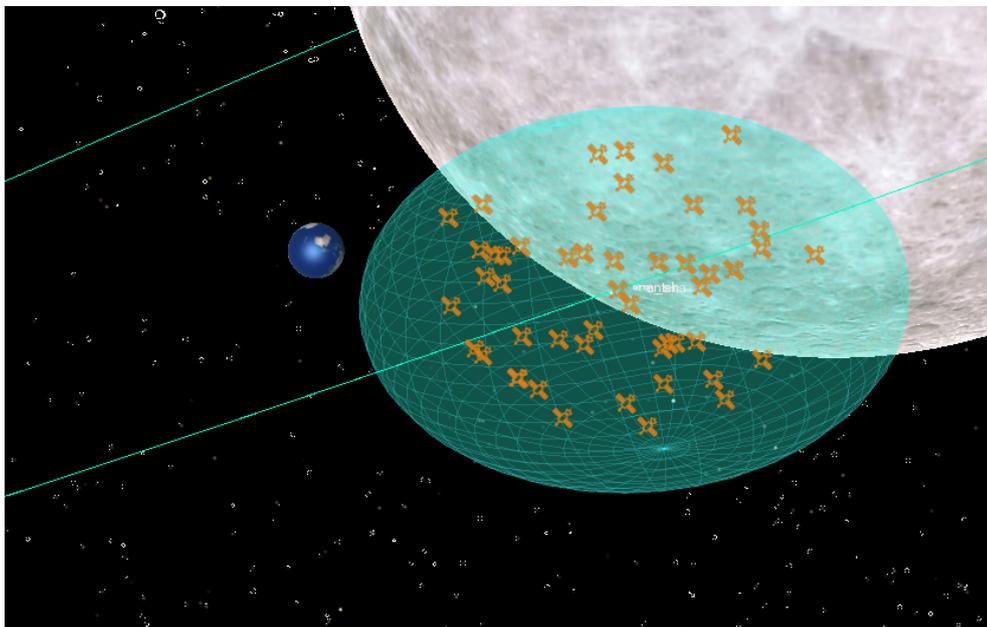
M. Fabrice MOTTEZ Directeur de Recherche, CNRS Observatoire de Paris-PSL	<i>Président</i>
M. Laurent DUSSEAU Professeur, CSUM et IES Université de Montpellier	<i>Rapporteur</i>
M. Hubert HALLOIN Maître de Conférence, APC Université Paris Cité	<i>Examineur</i>
Mme Karine ISSAUTIER Directrice de Recherche, CNRS Observatoire de Paris-PSL	<i>Examinatrice</i>
M. Özgür KARATEKIN Senior Research Scientist Observatoire Royal de Belgique	<i>Rapporteur</i>
Mme Stéphanie LIZY-DESTREZ Professeure, ISAE-SUPAERO Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace	<i>Examinatrice</i>
M. Vincent MAGET Directeur de Recherche, ONERA	<i>Rapporteur</i>

NANOSATELLITES POUR L'ASTROPHYSIQUE

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DE
L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES,
RÉALISÉ DANS LE CADRE DE CENSUS



PÔLE SPATIAL DE L'UNIVERSITÉ PSL,
PÔLE D'EXPERTISE
DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS-PSL



¹figure 4.6 au §4.2

*à mon épouse Chia-Ling, avec une pensée partagée pour Phébus
à ma sœur Leïla
à mon ami Paul*

δός μοί ποῦ στῶ, καὶ κινῶ τῆν γῆν

attribué à Archimède par Pappus d'Alexandrie, selon Ver Eecke [1]

Remerciements

Vous êtes si nombreux à m'avoir permis d'arriver à cette étape, avant ma thèse comme depuis ma thèse, que remercier particulièrement l'un ou l'une laisserait injustement l'autre dans l'ombre. Je mentionne tout de même ma chère épouse, Chia-Ling, qui m'a accompagné au quotidien. Il faudrait aussi remercier tous nos prédécesseurs, dont la pensée a procréé au cours des siècles et sédimenté en un socle sur lequel nous avançons pour aller toujours plus loin. Mon propre chemin a comporté quelques détours mais il est fait d'abord de rencontres. Permettrai-je à d'autres d'aller plus loin ? Rien aujourd'hui, sans nos prédécesseurs hier. Rien de ce que je suis aujourd'hui, sans vous tous, tout autour.

Le « NewSpace » est formidable. Connue pour ses méga-constellations de nanosatellites autour du globe, la surveillance en continu des incendies, le repérage de navires illégaux ou bientôt l'échange de clés cryptées. C'est donc un foyer d'innovations avec de belles opportunités de financement. Mais l'astrophysique, dont l'importance politique ne se dément pas dans l'ère moderne, reste le parent pauvre de ce changement de paradigme, faute de débouchés commerciaux immédiats. Pourtant, je suis convaincu qu'il faut encore et toujours monter en compétences dans ce domaine pour que les décisions de financement s'imposent naturellement. Ce mémoire pour demander l'habilitation à diriger des recherches est donc un acte politiquement engagé. J'y exposerai mon expérience industrielle et mon arrivée dans le spatial scientifique, qui coïncide avec le lancement du premier nanosatellite français en 2012, se poursuit avec les premiers CubeSats interplanétaires en 2018 et, désormais, une première armada vers la Lune et l'astéroïde double Didymos. Il y a fort à parier que toutes les missions d'exploration offriront désormais des opportunités pour des nanosatellites, donc aussi des opportunités de développements technologiques rapides pour les équipes de recherche en astrophysique. Avec mes mentors Pierre Drossart et Jean-Pierre Lebreton dans les années 2015, nous avons fait ce pari et choisi d'investir à long terme sur les nouvelles compétences requises pour des nanosatellites de qualité scientifique, car un « CubeSat » est loin d'être un satellite en kit: il fallait des méthodes, des outils et des équipements dédiés, autrement dit un écosystème, devenu bientôt pôle d'expertise de l'Observatoire de Paris - PSL. Cet environnement m'a permis de co-encadrer 4 doctorants, 9 ingénieurs et 45 étudiants en stages de fin d'études de DUT ou de Master. J'y ai conçu un support d'ingénierie original, au profit de plus de 7 équipes de recherche sur leur projet de nanosatellite scientifique. J'y ai mis en place quelques partenariats avec l'industrie. L'intérêt d'une HDR est donc, pour moi désormais, de promouvoir les spécificités des nanosatellites pour l'astrophysique, et ceci aux plus hauts niveaux académiques, afin que les ingénieurs et docteurs ainsi formés produisent à leur tour du Savoir et des savoir-faire.

Mots clés : ingénierie spatiale, espace profond, radio-astronomie, planétologie, cosmologie, physique stellaire, météo de l'espace, géodésie, interplanétaire, exploration spatiale, autonomie, nanosatellites, CubeSat

Abstract

“NewSpace” is great. Known for its mega-constellations of nanosatellites around the globe, continuous monitoring of fires, tracking of illegal vessels and, soon, the exchange of encrypted keys. It’s a hotbed of innovation, with excellent financing opportunities. But astrophysics, whose political importance is undeniable in the modern era, remains the poor cousin of this paradigm shift, due to a lack of immediate commercial outlets. And yet, I’m convinced that we still need to build up our skills in this field, so that funding decisions can be taken as a matter of course. This dissertation is therefore a politically committed act. In it, I will describe my industrial experience and my arrival in scientific space, which coincides with the launch of the first French nanosatellite in 2012, continues with the first interplanetary CubeSats in 2018 and, now, a first armada to the Moon and the double asteroid Didymos. It’s a safe bet that all exploration missions from now on will offer opportunities for nanosatellites, and therefore also opportunities for rapid technological developments for astrophysics research teams. With my mentors Pierre Drossart and Jean-Pierre Lebreton in 2015, we took this gamble and chose to make a long-term investment in the new skills required for scientific-quality nanosatellites, because a “CubeSat” is far from being a kit satellite: dedicated methods, tools and equipment were required, in other words an ecosystem, which soon has become a center of expertise at Observatoire de Paris - PSL. This environment enabled me to co-supervise 4 PhD students, 9 engineers and 45 students in their final year of a BTS or Master’s degree. I designed an original engineering support for more than 7 research teams on their scientific nanosatellite project. I also set up a number of partnerships with industry. For me, the purpose of an HDR is now to promote the specificities of nanosatellites for astrophysics, at the highest academic levels, so that the engineers and PhDs thus trained in turn produce knowledge and know-how.²

Keywords: *space engineering, Deep space, radio-astronomy, planetology, cosmologie, stellar physics, space weather, geodesy, interplanetary, space exploration, autonomy, nanosatellites, CubeSat*

²Translated with DeepL.com (free version)

Table des matières

1	Introduction	9
	Acronymes	11
2	Parcours et motivations	15
2.1	Curriculum Vitae détaillé	15
2.2	De l'industrie à la science	19
2.3	Revisiter l'ingénierie système	20
3	L'astrophysique dans le <i>NewSpace</i>	23
3.1	Le standard CUBESAT, aux États-Unis et ailleurs	23
3.2	Le <i>NewSpace</i> français (pour l'astrophysique)	28
4	CENSUS et les Projets	31
4.1	BIRDY-T : genèse et repositionnement	31
4.2	NOIRE : essaim pour radioastronomie basse-fréquence	36
4.3	Bien d'autres projets : identifier les « cas »	38
4.3.1	PICSAT, l'honorable premier	38
4.3.2	CASSTOR, précurseur de Pollux	40
4.3.3	CURE : éphémérides pour ARIEL	42
4.3.4	TERACUBE : les vents de Venus	43
4.3.5	COSMOCAL : cible d'étalonnage	44
4.3.6	Et d'autres encore	45
5	L'écosystème CENSUS, pôle spatial, pôle d'expertise	47
5.1	Tout est projet	47
5.1.1	Plateau PROMESS, profils de mission	47
5.1.2	DOCKS, prototypage rapide	48
5.1.3	VEGA, intégration	50
5.1.4	FLATSAT, validation	51
5.1.5	NANOSATGRID, opérations	51
5.1.6	AbC, expérience en vol	52
5.2	Méthodes d'ingénierie	55
5.2.1	Trouver notre place : CML 1 à 5	55
5.2.2	Campagnes PROMESS	57

5.2.3	Analyse fonctionnelle : SADT et MBSE	59
5.2.4	Bilan intermédiaire	63
5.3	Rien sans les personnes	64
5.3.1	Les doctorants	64
5.3.2	Les ingénieurs de CENSUS	66
5.3.3	Contributions pédagogiques et stages	67
6	CENSUS dans la communauté	69
6.1	Le « réseau »	69
6.1.1	Réseau académique	69
6.1.2	Réseau industriel	70
6.2	Les conférences	72
6.3	Actions de sensibilisation	73
6.3.1	PSL Week et FabLabs de PSL	73
6.3.2	Nex'Orbiter	74
6.3.3	Divers	75
7	Perspectives	77
	Bibliographie	83
	A Encadrement	89
	B Publications & Communications scientifiques	93

À mon âge, on redevient pressé, toujours par excitation et aussi, de plus en plus, par manque de temps. Ainsi je soutiens mon Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) seulement 5 ans après ma thèse. Étant une vocation tardive dans le spatial scientifique, c'est à la lumière de l'ensemble de ma carrière que je présente ce manuscrit. J'y actualise ma thématique scientifique, depuis ma thèse de 2019, et mon plan de travail (Chap. 2), car il reste encore beaucoup à faire.

Nous examinerons l'étendue du fameux « paradigme du *NewSpace* » pour l'astrophysique, à l'étranger et en France, dans le chapitre 3. Le constat sera sévère : nous pourrions bien rater cette fusée-là ! Bien sûr, avec d'autres, je veux m'employer à élever nos savoir-faire dans ce domaine et c'est le but de cette HDR. Mais nous n'y suffirons pas si la course à l'innovation continue d'assécher la R&T que l'astrophysique porte en elle. Nous verrons d'ailleurs que des injonctions peuvent contrarier l'émergence de stratégies observationnelles inédites.

Justement, j'ai eu le privilège d'accompagner plusieurs chercheurs dans leurs stratégies originales que nous passerons en revue (Chap. 4), depuis l'exploration des petits corps célestes jusqu'à la cosmologie. L'immersion dans ces divers projets m'a conduit à mettre en place tout un écosystème (Chap. 5), aujourd'hui nommé CENSUS, initialement créé par Pierre Drossart, D.R., puis devenu pôle d'expertise de l'Observatoire de Paris-PSL sous l'impulsion de Coralie Neiner, D.R.. Ma fonction ayant été celle de directeur technique, j'y présenterai l'écosystème mis en place : support en ingénierie avec une approche originale étiquetée *Model-Based System Engineering* (MBSE), appellation que je revendique alors qu'elle peut faire polémique ; collection de systèmes nanosatellites dits *Commercial-Off-The-Shelf*, parfois aussi *Component-Off-The-Shelves* (COTS) ; projets « internes » comme le plateau PROMESS, la salle propre VEGA ou la station sol. Je ne pouvais pas faire tout cela tout seul, et mon rôle d'encadrant y sera aussi présenté, s'agissant le plus souvent de formation *par* la Recherche. Enfin, mes contributions à la communauté, non directement liées à mes travaux, seront récapitulées au chapitre 6 : conférences, comités, mais également support financier, encore et toujours au nom et grâce à CENSUS.

CubeSat Facteur de forme de petits satellites répondant à la norme publiée par cubesat.org.

AbC *Angle-based Correlation*, algorithme d'astrométrie embarqué de CENSUS.

AIT/AIV Assemblage, Intégration et Tests / Assemblage, Intégration et Validation.

APC Laboratoire Astroparticule et Cosmologie, Université Paris Cité.

C²ERES Centre et Campus d'Etude et de Recherche pour l'Exploration Spatiale, ancien nom de CENSUS.

CCSDS Format et protocole d'échange de données du *Consultative Committee for Space Data Systems*.

CENSUS Centre pour les Nanosatellites en Sciences de l'UniverS, pôle d'expertise de l'Observatoire de Paris-PSL, pôle spatial de PSL..

CI/CD *Continuous Integration / Continuous Deployment*.

CIC Format et protocole d'échange de données du CNES, dérivé du CCSDS.

CNES Centre National d'Études Spatiales.

CNRS Centre National de la Recherche Scientifique.

COTS *Commercial-Off-The-Shelf*, parfois aussi *Component-Off-The-Shelves*.

CPU *Central Processing Unit*.

DOCKS *Design and Operations Cross-checkKing Services*, suite logicielle open-source de CENSUS.

DSN *Deep Space Network*, NASA.

ENS École Normale Supérieure, PSL.

ENSAD École Nationale Supérieure des Arts Décoratifs, PSL.

ESA *European Space Agency*.

ESOC *European Space Operations Center*, ESA, Darmstadt (Allemagne).

ESRIN *European Space Research Institute*, ESA, Frascati (Italie).

ESTEC *European Space Research and Technology Centre*, ESA, Noordwijk (Pays-Bas).

ESTRACK *European Space TRACKing*, ESA.

GRGS Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale.

HDR Habilitation à Diriger des Recherches.

IA Intelligence Artificielle.

IFOD *In-Flight Orbit Determination*.

IMCCE Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides, Observatoire de Paris-PSL.

ISRO *Indian Space Research Organisation*.

JPL *Jet Propulsion Laboratory*, NASA, Los Angeles (CA/USA).

L μ PPT *Liquid micro-Pulsed Plasma Thruster*.

LabEx ESEP Laboratoire d'Excellence Exploration Spatiale des Environnements Planétaires, programme Investissements d'Avenir.

LERMA Laboratoire d'Études du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères, Observatoire de Paris-PSL.

LESIA Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique, Observatoire de Paris-PSL.

LISA Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques, Univ.Paris-Est Créteil.

M.I.T. *Massachusetts Institute of Technology*, Boston (MA/USA).

MBSE *Model-Based System Engineering*.

NASA *National Aeronautics and Space Administration*.

NCKU *National Cheng Kung University*, Tainan, Taïwan.

NCU *National Central University*, Jhongli, Taïwan.

OBC *On-Board Computer*.

ONERA Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales.

OSAE Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace, Master de l'Observatoire de Paris-PSL.

P.I. *Principal Investigator*.

PDR *Preliminary Definition Review*.

P-POD *Poly Picosatellite Orbital Deployer*.

PROMESS PROfils de Mission et Enseignements en Sciences Spatiales, plateau d'ingénierie concourante de CENSUS.

PSL Université Paris Sciences & Lettres.

R&T Recherche et Technologie, ici par opposition à “innovation”.

SADT *Structured Analysis and Design Technique*.

SwRI Southwest Research Institute.

TU *Technische Universität* (en Allemagne).

TU Delft *Delft University of Technology*, Pays-Bas.

UFE Unité de Formation et d’Enseignement, Observatoire de Paris-PSL.

2.1 Curriculum Vitae détaillé

Boris SEGRET

- coordonnées personnelles : 1 rue de Béarn, 92210 Saint Cloud.
- coordonnées professionnelles : Observatoire de Paris-PSL / CENSUS, 5 place Jules Janssen, 92195 Meudon Cedex. Tel. : +33.1.4507.7824.
Email : Boris.Segret@ObservatoireDeParis.psl.eu

Diplômes

- 25/09/2019 : Docteur en Astronomie et Astrophysique, de l'Université Paris Sciences et Lettres, préparé à l'Observatoire de Paris au sein de l'École doctorale Astronomie et Astrophysique d'Île-de-France, « Algorithmes embarqués de navigation optique autonome pour nanosatellites interplanétaires ».
- 2011 : Master à finalité professionnelle « Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace », spécialité astronomie, astrophysique et ingénierie spatiale, de l'Observatoire de Paris.
- 1991 : Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique de Poitiers, ISAE-ENSMA.
- 1985 : Baccalauréat, série C, et classes préparatoires au Lycée Henri IV, Paris.

Expérience professionnelle

09/2013-..., OBSERVATOIRE DE PARIS-PSL, **Meudon (92)** – Ingénieur système puis Directeur Technique de CENSUS (2020), pôle spatial de PSL, pôle d'expertise de l'Observatoire de Paris : support aux projets du Laboratoire d'Excellence Exploration Spatiale des Environnements Planétaires, programme Investissements d'Avenir (LabEx ESEP) (réseau de 9 laboratoires spatiaux d'Île-de-France, jusqu'à 2020) ; création et mise en place d'un support d'ingénierie aux projets nanosatellites de PSL, par des méthodes d'ingénierie, des systèmes nanosatellites et des moyens d'essais et d'opérations, développement de collaborations nationales et internationales, encadrement de 4 doctorants, 8 ingénieurs et 45 stagiaires, contributions pédagogiques diverses.

08/2011-08/2013, LATMOS - CNRS, **Guyancourt (78)** – Ingénieur opérations de l'instrument SPICAV de l'orbiteur VENUS EXPRESS/ESA pour spectrométrie in-situ en UV, NIR, IR de l'atmosphère de Vénus : planification et programmation des télécommandes ; ingénierie système de phase E ; calcul scientifique (dont SPICE JPL/NASA).

03-08/2011, INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE, **Orsay (91)** – Étude de faisabilité d'un pointage stable de Jupiter par analyse d'image embarquée, dans le cadre d'une proposition d'instrument sur JUICE, mission spatiale de l'ESA (stage de Master).

(2007-2011, transition de carrière et reprise d'études)

09/2003-05/2007, EADS ASTRIUM SPACE TRANSPORTATION (devenue ArianeGroup), **Les Mureaux (78)** – Ingénieur Acheteur Projet : négociation et rédaction des contrats d'achat de la série « PA » pour la propulsion ARIANE 5 (30 lanceurs, propulsion solide avec EUROPROPULSION, propulsion liquide avec SNECMA devenue SAFRAN), puis pour divers systèmes avec EADS CASA ESPACIO et ASTRIUM SATELLITES.

1999-2003, KADRAS LTD., **Versailles (78), Athènes (Grèce)** – Création d'une offre de conseil en stratégie et maîtrise d'ouvrage logiciel, support en négociation et coordination.

1991-1999, DASSAULT AVIATION, **Saint Cloud (92), Vélizy-Villacoublay (78), Teterboro (USA/NJ)** – Successivement ingénieur en contrôle de vol RAFALE M, en intégration de systèmes de contre-mesures EM et IR et compatibilités électro-magnétiques sur MIRAGE 2000 N&D et RAFALE, en support client pour la maintenance intégrée sur avions d'affaires FALCON.

1991 (9 mois), RHEINISCHE-WESTFALISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE (RWTH), **Aix-la-Chapelle (Allemagne)** – Troisième année d'école d'ingénieur à l'étranger, stage en laboratoire d'aérodynamique et cursus aérodynamique de RWTH.

1990 (6 mois), DASSAULT AVIATION, **Saint Cloud (92)** – Ingénieur stagiaire en aérodynamique théorique, architecture de calcul pour un maillage multi-échelles et multi-codes aérodynamiques (Euler et Navier-Stokes typiquement).

1989 (2 mois), HARTING AG, **Bienne (Suisse)** – Ouvrier stagiaire en usine de production de connecteurs électroniques : thermo-moulage plastique, micro-découpe et pliages métal, galvanisation, qualité.

Activités de recherche et valorisation

- Méthodologie MBSE appliquée à l'ingénierie concourante
- Support d'ingénierie système pour les profils de mission des projets suivants :
 - BIRDY-T (Obs.Paris-PSL, IMCCE), géodésie spatiale d'astéroïde
 - CASSTOR (Obs.Paris-PSL, LESIA), spectro-polarimétrie UV d'étoiles
 - CURE (Obs.Paris-PSL, LESIA), éphémérides de transits d'exo-planètes
 - TERACUBE (Obs.Paris-PSL, LERMA), atmosphère de Vénus en THz
 - COSMOCAL (ENS-PSL), cible spatiale d'étalonnage de mesures du CMB

- CIRCUS (Obs.Paris-PSL, LESIA), dynamique de l'ionosphère terrestre
- SCION-X (NCU, Taïwan), surveillance de la pollution atmosphérique
- TUDsat (TU Darmstadt, Allemagne), démonstration de télécommunication laser
- Co-développement d'une suite logicielle open-source de prototypage de missions « DOCKS »
- Algorithmie de navigation interplanétaire en croisière et opérations de proximité : détermination d'orbite (IFOD), processing d'image en vol (AbC), intelligence artificielle, mesure du CPU
- Valorisation de l'IFOD auprès des sociétés ODYSSEUS (Luxembourg) et D-FINE GMBH (Allemagne), et d'AbC auprès d'EUTELSAT GROUP
- Tests en vol sur nanosatellite OPS-SAT de l'ESA/ESOC (Darmstadt, Allemagne)
- Mutualisation de systèmes COTS et d'expérience AIT/AIV au sein de PSL, puis dans la fédération de recherche CNRS « Nanosatellites »
- Co-conception d'un Plateau d'ingénierie concourante « PROMESS », d'une salle blanche « VEGA », d'un outillage spécialisé « FLATSAT » pour AIT/AIV
- Co-conception avec l'entreprise EUTELSAT GROUP d'une infrastructure d'interopérabilité de stations sol pour nanosatellites « NANOSATGRID »
- Membre des comités de revue des projets suivants :
 - PICSAT (LESIA, CNRS), démo. technologique, surveillance transit exo-planétaire
 - IGOSAT (APC, Univ. Paris Cité), occultation de signaux GPS
 - SCION-X (NCU, Taïwan), surveillance de la pollution atmosphérique
 - CROCUS (ONERA), surveillance des décharges électrostatiques en orbite
- Membre du comité scientifique de la Fédération de Recherche Nanosatellites (CNRS)

Activités d'enseignement et d'encadrement

Thèses :

- Co-encadrement de Gary QUINSAC, directeur de thèse B. Mosser, « *From Commercial-Off-The-Shelf to expected propulsion in nanosatellites* », 2015-2019
- Co-encadrement de The Huynh HOANG, directeur de thèse B. Mosser, outillage de test du contrôle d'attitude nanosatellite, 2016-2017 (interrompue)
- Co-encadrement de Erwan ROUILLÉ, directeur de thèse B. Cecconi, « *NOIRE : a distributed radio imager in space* », en cours
- Co-encadrement de Janis DALBINS à/c 2020, avec A. Slavinskis, thèse dirigée par M. Noorma à l'Observatoire de Tartu (Estonie), « *Telecom experiments for deep space exploration with nanosatellites* », 2016-2024
- Membre du comité de suivi de la thèse de Ryan DAHOUMANE, co-dirigée par V. Lainey et K. Baillé à l'IMCCE, « *Evolution dynamique à long terme des satellites extérieurs de Jupiter et Saturne* » (en cours)

2.1. CURRICULUM VITAE DÉTAILLÉ

- Rapporteur du manuscrit de thèse de doctorat d'Eleonora ANDREIS, thèse dirigée par F. Topputo à Politecnico di Milano (Italie), « *Autonomous Vision-Based Navigation for Deep-Space CubeSats : Algorithm Development and Hardware Validation* », 2024

Encadrement de 8 ingénieurs et 1 assistant ingénieur : Janis DALBINS (IR, 1+ an, en cours), Sébastien DURAND (IE, 2 ans), Grégoire HENRY (IE, 3 mois), Thibault DELRIEU (IE, 3 mois), Louis LE LEUCH (IE, 3 mois), Rashika JAIN (IE, 2 ans), Feliu LACREU (IE, 13 mois), Pedro da FONSECA (IE, 13 mois), Kirill ANOHIN (AI, 13 mois)

Encadrement ou co-encadrement de 45 stages longs (3-6 mois) : liste en annexe

Sujets pédagogiques encadrés, co-encadrés ou mentorés :

- Modules projets du Master OSAE « Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace » de l'Observatoire de Paris-PSL / UFE : 1 à 2 sujets/an de 10 jours en binôme, depuis 2014.
- Modules « Lab. Insertion Unit » du Programme gradué Astrophysique de PSL (M1) et MasterClass (M2), sujets de 10 jours, depuis 2021.
- Mentorat pour PSL-ITI, puis PSL-iTeams (parcours pré-doctoral et entrepreneurial de PSL) : 4 sujets mentorés.
- Mentorat en écoles d'ingénieurs CentraleSepélec, Centrale Lille, ELISA : 5 sujets de 2013 à 2016.
- Séminaires aux Écoles d'été Astronomie et Biologie de Tartu (Estonie) 2018 et 2019
- Séminaire à l'École d'été du Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS) 2016

Communications & Publications (liste jointe en annexe)

- Articles, proceedings et posters : 32, dont 9 en premier auteur
- Communications orales sans publication : 53, dont 28 en premier auteur

Actions de sensibilisation

- PSL Week : Animation de 2 sessions d'une semaine sur la thématique des exo-planètes
- NEX'ORBITER, développement d'un jeu vidéo en réseau sur le vol spatial
- Association Planète Mars : membre du conseil d'administration (2008-2020), conférences grand public, chapitre de livre de vulgarisation sur les enjeux scientifiques, Radio France Inter sur l'arrivée de Curiosity (6/08/2012)
- Article grand public sur les nanosatellites dans *The Conversation France* (15/06/2020)
- Radio France Culture sur ma thèse pour BIRDY (9/05/2018)
- Accueil du « Interplanetary CubeSat Workshop » 2018 à Paris

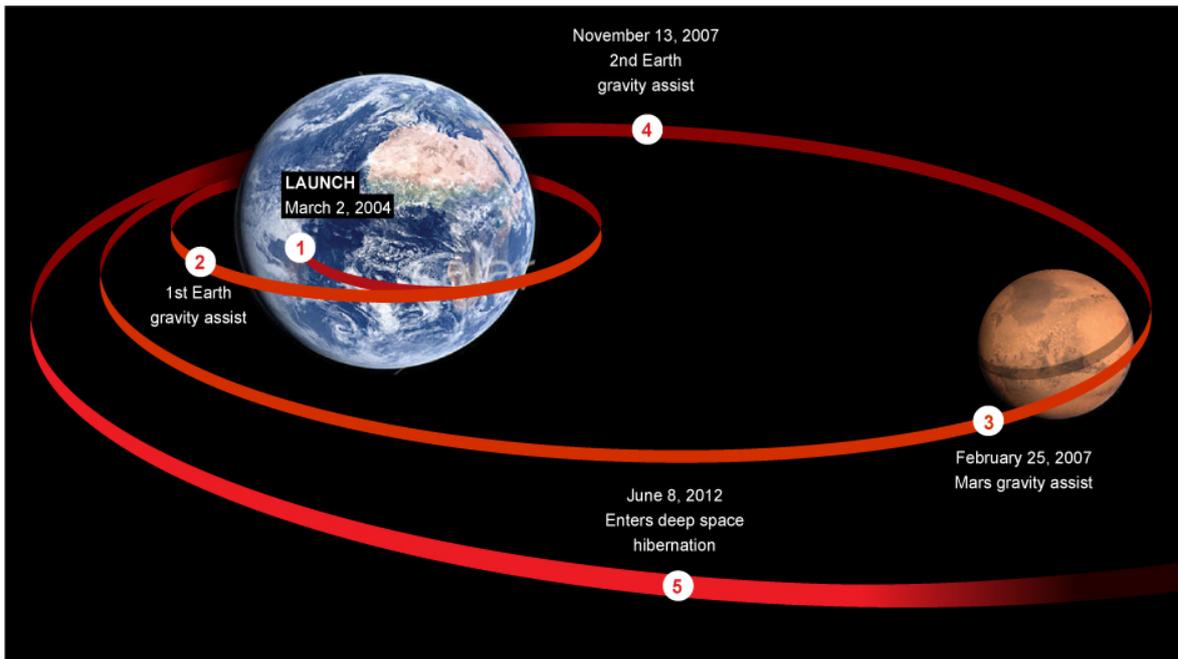


FIGURE 2.1 : *Le 2 mars 2004, ARIANE 518 place ROSETTA sur une trajectoire interplanétaire de 10 ans (illustration : www.telegraph.co.uk, 5/08/2014).*

2.2 De l'industrie à la science

En France, la formation d'ingénieur a longtemps été présentée comme un idéal, donnant accès à tous les métiers possibles, un cursus pour l'élite. Jusque dans les années 90, le diplôme garantissait en effet un accès à l'emploi, souvent même par des pré-contrats proposés dans l'industrie. Ce fut mon cas, avec DASSAULT AVIATION, et j'ai eu la chance d'y découvrir très tôt un large panorama des métiers de l'ingénieur, me préparant ainsi dès mon début de carrière à devenir ingénieur système. Mais c'était également les premières années où des ingénieurs fraîchement diplômés ont connu le chômage. Trop heureux d'être passé entre les mailles du filet, je plaçais l'industrie comme le seul horizon professionnel qui vaille, perpétuant ainsi cette arrogance bien française envers l'université.

Mais les temps changeaient rapidement. À moi, il a fallu plus de 10 ans. Dans les années 2000, alors chez EADS Space Transportation (devenu ARIANEGROUP), je me risquais à combiner ma culture d'ingénieur avec la négociation commerciale. Le 2 mars 2004, j'assistais depuis le site des Mureaux (78, Yvelines) à la retransmission en direct du tir d'ARIANE 5, vol 518 (ou VA158) : ARIANE lançait ROSETTA sur une trajectoire interplanétaire de 10 ans (Fig. 2.1)¹. La tension était palpable, d'autant plus que l'échec du vol précédent avait fait perdre le satellite HOT BIRD 7 de « notre » client Eutelsat. Mais je me demandais aussi qui donc avait réalisé les instruments de ROSETTA que « nous » lançons ce jour-là dans l'espace. Honte à moi, je ne savais pas que des centaines de chercheurs et d'ingénieurs travaillaient pendant des décennies dans les laboratoires de recherche publics pour réaliser les instruments spatiaux : d'où venaient donc mes œillères ? Dans ces laboratoires, des technologies risquées sont développées, qui seront popularisées ensuite par l'industrie si un marché se dessine ; c'est là que des docteurs en instrumentation les conçoivent et que des chercheurs les imaginent pour rapporter les données qui leur manquent sur des questions scientifiques souvent fondamentales. Rappelons au passage que 30 % du temps de ces chercheurs brillants - véri-

¹reproduction autorisée en vertu des "Exceptions to copyright, Non-commercial research and private study" prévues par la législation britannique, <https://www.gov.uk/guidance/exceptions-to-copyright>

tables capitaines de vaisseaux - sont consacrés à chercher les budgets qui permettront ces projets, afin de financer... l'industrie et donc de faire tourner l'ensemble de l'économie. Mais des injonctions continuent de circuler pour réclamer aux scientifiques d'être plus proches de « l'économie réelle » (sic).

Quand j'ai rejoint le spatial scientifique en 2011, j'ai découvert des enseignants à la pointe des technologies, et même en avance sur elles (je repense aux exercices du Master OSAE sur les réseaux neuronaux pour les traitements d'images, alors que l'Internet ne parlait pas encore d'IA). J'y ai rencontré des doctorant(e)s puis des chercheurs et des chercheuses, le plus souvent issus des universités publiques, françaises ou étrangères, qui réfléchissaient bien plus vite, et peut-être mieux, que l'ingénieur déjà expérimenté que j'étais. Je découvrais le rôle de *Principal Investigator* (P.I.) et la polyvalence scientifique, instrumentale et managériale qu'il suppose et qui force le respect. J'y re-découvrais aussi les méthodes d'ingénierie système que j'avais acquises à DASSAULT AVIATION et qui étaient pratiquées ici pour les systèmes complexes de l'astronomie : pour le coup, je les re-découvrais aussi dans toute leur lourdeur documentaire, mais c'est le prix de l'assurance produit et de l'assurance qualité.

2.3 Revisiter l'ingénierie système

À cette époque, je faisais une promotion active du vol habité vers Mars (à la *Mars Society* française) et j'assistais aux conférences sur *Mars Sample Return*. Je notais aussi l'émergence des CUBESATS, ces petits satellites venus des universités américaines et j'ai saisi l'opportunité de participer en 2012 au premier *Interplanetary CubeSat Workshop*, au M.I.T. à Boston. Le premier CUBESAT français, ROBUSTA, venait d'être lancé et j'observais l'arrivée timide en France de ce phénomène, avec un premier forum organisé en 2013 au pavillon du CNES pendant la 50^{ème} édition du salon du Bourget.

D'emblée un « message » m'a choqué : paraît-il, un CUBESAT 3U (10 cm×10 cm×30 cm) se ferait en 3 ans, pour US\$ 1M. Je trouvais ce message biaisé et irresponsable :

- sous 3 ans, le CUBESAT doit être lancé et, *si possible* (objectif secondaire), fonctionner en vol, la priorité étant surtout d'afficher de tels projets !
- une main d'œuvre bon marché est sous-entendue, les étudiants, dont le cycle universitaire aux USA permet une forte modulation sur 3 ans autour d'un projet donné.
- enfin, le « cas scientifique », quand il existe, est déjà faisable (ou faisabilité quasiment acquise) au format CUBESAT avant cette période de 3 ans.

Le marketing du *NewSpace* a aussi popularisé le “*Fly, Learn, Re-fly*”. Pas surprenant qu'on ait assuré les sponsors « d'image » d'un retour sur investissement en 3 ans. C'était oublier, bien sûr, les risques techniques et, pire, psycho-sociaux que la pression ainsi installée entraîne : on a vu des épuisements, des *burn-out* et jusqu'à des accidents cardiaques chez les étudiants et encadrants pédagogiques. Un de mes doctorants a mentionné ce risque pour son équipe projet, dans son papier de thèse *peer-review* (Dalbins et al. [2]), un documentaire en a même été fait². Ces risques de craquage, perçus comme honteux, ont été tellement forts avec la Covid-19, qu'un effet inattendu de la pandémie a été de les sortir du tabou. Mais je ne peux pas cautionner un environnement où l'ingénierie spatiale se ferait à ce prix-là et, avec d'autres, j'ai dénoncé cette pression. La légende des « 3 ans » semble aujourd'hui avoir fait long feu.

Néanmoins, il est certain que le format CUBESAT et le paradigme entier du *NewSpace* peuvent, et donc doivent, simplifier les méthodes. Disons les « moderniser », pour que les ingénieurs y gagnent en cohérence et en productivité.

²“ESTCube saved my life”, par Tero H. Savolainen, 2022, <https://vimeo.com/718959757>

Attention à l'autre marketing, celui du tout informatique, avec de magnifiques outils sur catalogue : modélisations UML pour produire des squelettes de code ou de documentation, SIMULINK en lieu et place d'une analyse en automatique ou le très moderne "auto-code" de MATLAB pour générer le C++ du logiciel de vol. Trois outils (parmi d'autres) pour illustrer la démarche d'ingénierie que j'aimerais enseigner à « mes » étudiants et faire adopter par les ingénieurs. Soyons clairs, tous ces outils sont formidables ! Mais, selon moi :

1. L'analyse fonctionnelle ne peut pas être modélisée en SysML/UML :
 - Son premier but doit être de répartir le travail au sein d'une équipe, de choisir les interfaces pour chacun et de permettre leur évolution maîtrisée.
 - Ce faisant, elle doit forcer l'expression des besoins, avant même l'adoption d'une solution particulière, et conduit à la hiérarchisation des exigences projet.
 - En aval, elle doit aussi organiser le travail de validation, d'intégration et de recette en vol. S'appuyant sur le « besoin », elle devrait inclure les opérations en vol dès le début, dans une philosophie d'autonomie maximum pour rester maîtrisées par une équipe CUBESAT (certes, des sociétés proposent ce service au prix fort).
2. Les CUBESATS sont perçus par les nouveaux entrants (étudiants, ingénieurs ou chercheurs) comme du *Lego*³. Justement, l'excellent – mais cher – MATLAB propose SIMULINK pour agencer en un automate, des modules qu'on clique dans une librairie. Prenons l'exemple de la modélisation d'un système de contrôle d'attitude (certes ils existent aussi sur catalogue) : il m'est arrivé de voir des modèles avec 3 boucles de contrôle (pour 3 voire 4 roues à inertie) et des capteurs gyroscopiques, et montrant qu'avec un filtre de *Kalman* (et des Monte-Carlo), il y a convergence rapide du pointage du CUBESAT dans la direction désirée... mais oubliant l'effet de raideur gyroscopique créé par chaque roue et donc leur couplage ! Une démonstration de 5 mn avec une roue de vélo (à CENSUS, nous l'avons réalisée avec une vraie roue à inertie de CUBESAT) suffit pour ne plus jamais oublier ce piège de la modélisation « hors sol » et rappeler que les tests montreront – toujours – des effets oubliés.
3. Enfin, de même que les simulations Monte-Carlo dispensent d'une analyse de covariance parfois possible, le progrès des ordinateurs de bord dans le *NewSpace* rend les fonctions d'*auto-code* très tentantes (idem pour des générateurs de code par IA), car elles nous épargnent le difficile C++. Mais gare à la tentation d'embarquer du python, connu pour sa consommation de mémoire et sa lenteur. Le spatial a toujours promu l'économie des ressources, or des échecs en vol pourraient bien nous y rappeler, si les règles du logiciel embarqué sont négligées (par exemple l'interdiction d'allocation dynamique de mémoire, ex. cours en ligne [3]). Pour ma part, je veux mettre l'accent sur la difficulté de tester le logiciel de vol, comme en témoignent les pratiques du Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique, Observatoire de Paris-PSL (LESIA) avec le *framework* GERICO, Plasson et al. [4]. La logique *Continuous Integration / Continuous Deployment* (CI/CD) popularisée dans les services en ligne basés sur *git/linux* est une bonne inspiration.

Mon objectif sera d'éviter la sur-qualité dans des systèmes qui sont rendus moins complexes par le *NewSpace*, mais sans esquiver une « pile documentaire » minimum, ni transiger sur les trois règles d'or du spatial : **tester, tester et tester**.

³jouets plastiques de construction par assemblage, conçus en 1932, produits par THE LEGO GROUP, passés dans le langage courant.

L'astrophysique dans le *NewSpace*

L'ambition de présenter le « *NewSpace* », ou ne serait-ce que l'état de l'art des technologies nanosatellites¹, serait démesurée et un « Que sais-je ? »² n'y suffirait pas³. En fait, il y a déjà eu tellement d'introductions sur le sujet, qu'il faudrait un jour disposer d'un article relu par les pairs, qui fasse une *revue sémantique et historique* pour identifier le tronc commun et les contradictions de toutes ces tentatives. Ici, cette présentation se concentre sur l'astrophysique et les raisons du positionnement que j'ai choisi.

3.1 Le standard CubeSat, aux États-Unis et ailleurs

Lors du premier workshop “*Interplanetary CubeSats*” organisé au M.I.T. à Boston (2012), la NASA annonçait enfin un programme dédié de lancements de nanosatellites : « enfin », car le standard CUBESAT (CalPoly and Stanford [6]) s'était développé comme une traînée de poudre dans les universités américaines depuis le début de la décennie précédente. Ce standard consiste à respecter une norme de volume, par unités de 10 cm × 10 cm × 10 cm, correspondant aux capacités d'emport d'un conteneur dit *Poly Picosatellite Orbital Deployer* (P-POD) qui, lui et non plus le satellite, est qualifié pour chaque lanceur. Ce déplacement de la contrainte de qualification a fait tomber le coût du lancement et stimulé de nouvelles chaînes industrielles (nouveaux conteneurs, étages de mise à poste, mécanismes de déploiement, fameux COTS...). Les prix ont encore diminué plus tard grâce à des « tarifs de gros » dans les services de lancement comme ceux de SPACEX ou de l'ISRO, où les places sont revendues au détail par des « *brokers* », par exemple les vendeurs de plateformes nanosatellites eux-mêmes.

Même avec ce standard mis au point par des universités de premier plan (CalPoly et Stanford, donc), il avait tout de même fallu plus de 10 ans pour que la NASA apporte son crédit. Encore en 2023, il s'est trouvé des résistances au sein même du *Science Mission Directorate* de la NASA pour s'offusquer qu'on ait pu réserver de la bande passante du *Deep Space Network* pour les CUBESATS emportés par ARTEMIS 1, au détriment des missions conventionnelles (Williams [7]). Avec plus d'enthousiasme, le JPL s'est engouffré dans cet élan et, notamment, deux projets ont été emblématiques pour l'astrophysique : les jumeaux MARCO-A et -B et ASTERIA, qui adoptaient d'emblée un volume de 6U (3 rangées empilées de 2 unités), pour un contenu remarquablement compact.

¹L'édition 2024 du *Small Spacecraft Technology State-of-the-Art*, [5], fait 441 pages dont, par exemple, 20 pages et 46 références industrielles rien que sur l'avionique.

²Collection publiée par les Presses Universitaires de France (PUF) débutée en 1941, originale par sa diversité, le faible prix et la compacité de chaque livre

³un livre sur l'histoire du CUBESAT est en préparation par Prof. Bob Twiggs, Aaron Zucherman, Stephanie McPherson et Clair Sapilewski

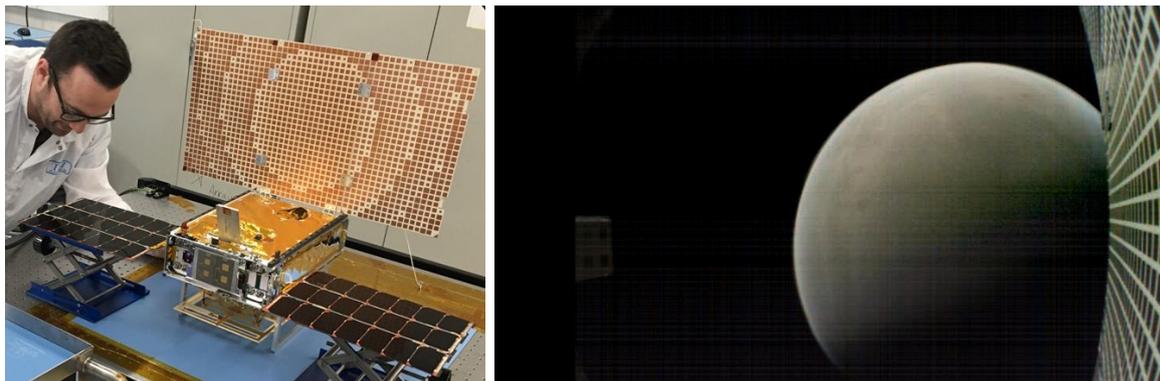


FIGURE 3.1 : MARCO, CUBESAT 6U du JPL/NASA, 2 exemplaires, A et B, ont été lancés avec la sonde martienne INSIGHT. À droite, photo prise par MARCO-B à l'approche de Mars. (Credit : JPL/NASA)

Les CUBESATS jumeaux MARCO-A et MARCO-B (*Mars Cube One*, Fig. 3.1, Cf. livre récapitulatif de Kobayashi et al. [8]) ont pris place à bord de la fusée qui a lancé la sonde INSIGHT vers la planète Mars en 2018. Après insertion sur l'orbite de transfert interplanétaire, les trois satellites ont été séparés et ont poursuivi leur route indépendamment les uns des autres. Il y avait d'ailleurs deux équipes d'opérations distinctes, l'une pour INSIGHT, l'autre pour les MARCO, qui travaillaient sans interférences. Mais, symbole fort, les deux équipes étaient réunies dans le même centre de contrôle le jour de l'arrivée d'INSIGHT sur Mars. Elles portaient des polos différents pour bien marquer qu'il y avait deux missions distinctes. Les MARCO n'ont pas bénéficié du « hourra ! » d'un posé sur Mars, puisqu'ils continuaient leur chemin interplanétaire, mais tout de même de la « Ola » générale des congratulations pour le succès total des deux missions, puisque les données qu'ils relayaient vers la Terre ont bien été reçues en direct.

En effet, les MARCO consacraient le paradigme CUBESAT comme compléments précieux des missions traditionnelles, même en interplanétaire : objectif unique, cycle court (mais pas 3 ans !), compacité, nouvel équilibre risque - prix. Premier principe de sagesse avec les CUBESATS, l'objectif unique était le relais de communication entre INSIGHT et la Terre pendant la phase EDL (*Entry, Descent and Landing*) dans l'atmosphère de Mars le 26 novembre 2018, point ! Les autres opérations tentées (photographies de Mars, Phobos et Deimos, sondage atmosphérique par radio) étaient des bonus. La charge utile était une technologie déjà maîtrisée en 2014 au JPL, puisque le précurseur du transpondeur IRIS pour CubeSat en espace profond était présenté cette année-là (Duncan et al. [9]). Même si le tir était initialement prévu en 2016, le développement a donc duré plus que 3 ans. Quant au coût, on parle de US\$ 18.5M pour les deux jumeaux, opérations incluses : ainsi, le coût étant modeste, une manière de réduire le risque a été d'en faire deux, une « redondance chaude » de toute la mission, c'est une autre innovation du *NewSpace*. Rapporté à un format 3U, ceci porte la nouvelle référence de coût à US\$ 4.5M/3U, loin du US\$ 1M d'un CUBESAT 3U étudiant.

Un autre exemple significatif est, à la même époque (fin 2017), le succès d'ASTERIA, également par le JPL (Fig. 3.2). Regardons sa genèse : le cas scientifique vient du M.I.T., P.I. Sara Seager, j'ai eu la chance de voir les premiers prototypes de charge utile en 2012 à Boston, quand le projet était encore « étudiant ». Il s'est professionnalisé sous la maîtrise d'œuvre du JPL mais il a clairement pris plus de 5 ans et coûté plus que la référence imaginaire de US\$ 2M (6U, orbite terrestre). Le design a été rendu très compact, y compris l'optique qui prévoyait à l'origine un objectif Reflex du commerce, et blindé pour l'environnement spatial, ce qui a conduit à des revues de projet multiples (confirmations orales lors de conférences). L'objectif était technologique, avec la surveillance photométrique d'étoiles (et possiblement de transits

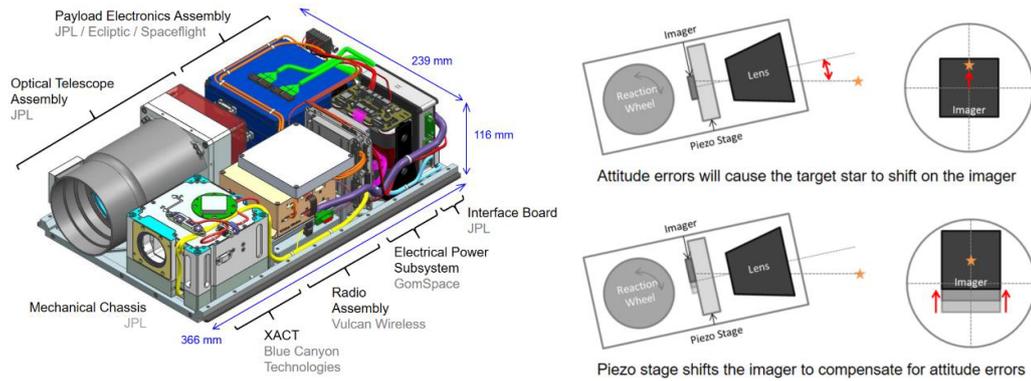


FIGURE 3.2 : Vue CAO (à g.) et système piezoélectrique de poursuite de l'image de la cible dans le plan focal (à dr.) d'ASTERIA, CUBESAT 6U du JPL/NASA, Smith et al. [10]

d'exoplanètes) par un pointage stable de l'ordre de la seconde d'arc. Le concept instrumental est de déplacer tout le plan focal (un imageur) pour garder en son centre l'image de l'étoile cible à travers la lentille. Malgré un système de contrôle d'attitude qualifié spatial (XACT de BLUE CANYON TECHNOLOGIES, un COTS de US\$ 100k, « star » du commerce à l'époque), un champ de vue large était prévu pour l'imageur, afin de garantir la présence de l'étoile dans le champ et engager ensuite la poursuite fine. Par ailleurs un débit de données jusqu'à 1 Mbit/s à redescendre était prévu : la bande S était utilisée, un pointage approximatif était suffisant grâce à deux antennes patch faible gain (large couverture) sur des faces opposées.

En Europe, l'Institut von Karman (Belgique) a proposé le programme « QB50 » en 2011 : initialement prévu comme une constellation de 50 nanosatellites, l'idée était de faire réaliser chacun des satellite par une université différente, en livrant pour chacun une des trois charges utiles scientifiques possibles du programme (spectromètre de masse, mesure d'oxygène, sonde de Langmuir, Cf. Fig. 3.3) qu'il s'agissait donc d'intégrer. Un déploiement unique devait permettre une couverture globale en orbite basse, pour obtenir un maillage de mesures plasma cohérentes sur une longue période. La démarche inspirée des programmes ProAm (Professionnels - Amateurs) se voulait donc à mi-chemin entre l'objectif scientifique et le programme pédagogique, ce qui permettait d'auto-financer une partie des coûts par de nombreuses universités. Finalement, deux déploiements séparés ont eu lieu à un mois d'écart en 2017, totalisant 36 nanosatellites. Le programme a été un énorme succès d'image pour les universités participantes, pour l'industrie et pour l'émergence de vocations. Mais le retour scientifique n'a pas été au rendez-vous, confirmant la difficulté d'arriver à une qualité professionnelle uniquement par des programmes étudiants. La Commission Européenne a publié un bilan très constructif du programme⁴, incluant de nombreuses leçons et notamment le manque de tests par manque de temps qui auraient pu éviter des pannes constatées. Le coût total est affiché à 12 M€, mais comme il ne mentionne pas l'apport financier des universités, il est difficile de l'utiliser en référence.

L'ESA était impliquée comme experte dans le programme QB50, conduit par la Commission Européenne, ce qui rappelle sa dimension avant-tout politique. Face à la complexité des standards du spatial conventionnel, l'ESA a simplifié dès 2016 ses standards pour un contexte CUBESAT. Il en a résulté deux références spécifiques, disponibles gratuitement en ligne : des exigences d'assurance produit et assurance qualité ([11]) et une norme ECSS ([12]), tous deux ciblant l'objectif de « démonstration » en orbite. Une nouvelle norme ISO est aussi disponible à la vente depuis 2017 (pour seulement 216 CHF : ISO 19683 :2017) et

⁴Final Report Summary - QB50 (An international network of 50 CubeSats for multi-point, in-situ measurements in the lower thermosphere and re-entry research), <https://cordis.europa.eu/project/id/284427/reporting>

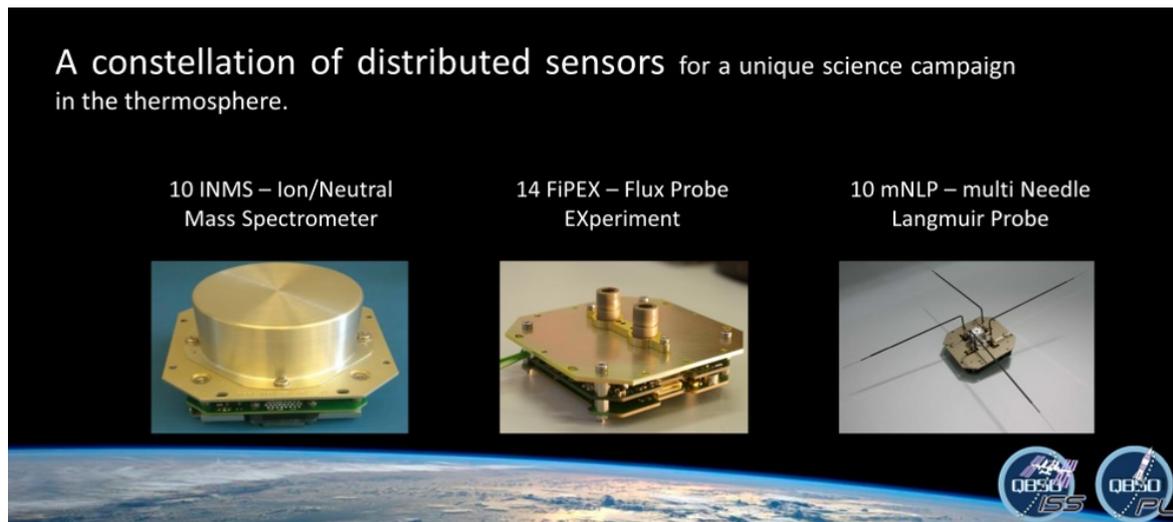


FIGURE 3.3 : Les trois charges utiles du programme QB50 au format CUBESAT (crédit : Projet QB50, MSSL/UK, TU Dresden/Allemagne, Université d'Oslo/Norvège).

cible le *NewSpace* avec « *the minimum test requirements and test methods [...] while maintaining low cost and fast delivery* ». Côté ESA toujours, en particulier grâce à l'investissement continu de Roger Walker dans la décennie passée, à ce jour responsable de la *CubeSat Systems Unit* de l'ESA, des démonstrateurs ont été initiés. Citons comme exemples : M-ARGO (P.M. Roger Walker, Fig. 3.4), sur programme optionnel GSTP (*General Support Technology Programme*), ciblant l'espace profond ; OPS-SAT (P.I. Dave Evans) par et pour le centre des opérations ESOC/ESA afin de tester du logiciel embarqué (Cf. l'expérience CENSUS « AbC » au § 5.1.6) ; la future mission HERA avec deux CubeSats 6U : JUVENTAS, plateforme GOMSPACE Luxembourg-Danemark, et MILANI, plateforme TYVAK INT. Italie.

L'agence spatiale italienne (ASI) a réussi un positionnement particulièrement stratégique, et irrigue désormais ses laboratoires et son industrie avec des projets *NewSpace*, au sol et en vol. Ainsi l'établissement ESRIN/ESA près de Rome inclut le NEOCC (*Near-Earth Object Coordination Centre*) spécialisé en défense planétaire, y compris par exploration d'astéroïdes géocroiseurs, où les nanosatellites sont une composante clé. Ce positionnement fort a aussi été aidé, d'après mes discussions avec des consœurs et confrères italiens, par un changement de politique dans les années 2010 appelant au retour et à la titularisation en Italie de nombreux astrophysiciens italiens qui s'étaient expatriés dans les meilleurs institutions du monde, faute de postes chez eux. Aujourd'hui, l'Italie est leader en Europe dans les nanosatellites *deep space* : ARGOMOON à bord d'Artemis 1 (08/2022), participations dans M-ARGO/ESA vers un astéroïde et dans LUMIO/ESA autour de la Lune, LICIA CUBE avec DART/NASA pour impacter l'astéroïde Didymos (09/2022), MILANI en accompagnement de HERA/ESA (10/2024), et d'autres encore avec des technologies de propulsion et de navigation, notamment. Par exemple, dans les thématiques de CENSUS, l'université polytechnique de Milan (POLIMI) est en très bonne position sur la navigation autonome.

Alors que les CubeSats étudiants se multipliaient dans le monde, le taux d'échec augmentait dramatiquement (le taux de *succès* désormais, tous CubeSats confondus, tend à augmenter, Villela et al. [13]). La faible maturité des « technologies » était pointée du doigt. Je rejoins pour ma part les conclusions du rapport QB50 pour affirmer que le vrai responsable était, et reste, le manque de tests, inhérents au spatial, par manque de temps, manque installé artificiellement. Si le niveau de tests attendu pour le spatial avait été respecté, les tests auraient révélé des hypothèses bien trop optimistes sur des technologies effectivement nouvelles. On peut donc plutôt regretter la naïveté du client qui a payé le prix réel des « in-

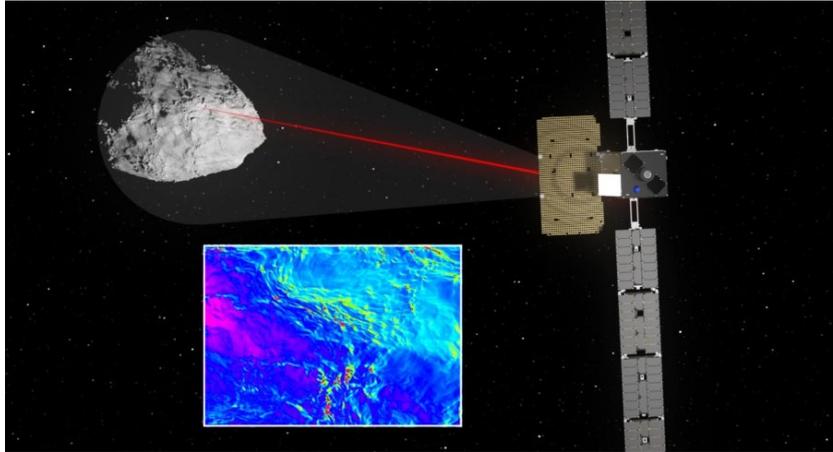


FIGURE 3.4 : *Illustration des opérations Lidar sur M-ARGO (crédit : ESA, Rui Braz).*

novations », tandis que l'industrie s'est enrichie en imposant des paiements d'avance, même sur argent public, ce qui était là-aussi un changement de paradigme, sans partager le risque.

Changement de paradigme encore, mais nécessaire, pour les télécommunications au sol et toute l'activité des opérations. En bandes S et X, les MARCO-A/B identifiaient déjà que les réseaux sols actuels ne suffiront pas à répondre à la tendance et encore moins aux besoins scientifiques. C'est exact : les antennes sol en bande S ciblent des marchés très riches (comme l'IoT, *Internet of Things*) ce qui les rendra trop chères pour l'astrophysique (ex. : entreprises KSAT/Norvège ou SSC/Suède) ; les réseaux institutionnels de type DSN ou ESTRACK ou CNES priorisent, eux, les missions conventionnelles d'exploration. Pour la bande UHF/VHF, les réseaux d'amateurs se sont lassés de prêter gratuitement leur bandes de fréquences aux projets étudiants et, de toute façon, la bande devient trop limitée pour le débit de données attendu et le spectre des fréquences commence à saturer.

Il faut mentionner l'émergence, encore timide, des applications de minage d'astéroïdes où le Luxembourg (et quelques sociétés américaines) tente de se positionner. Afin de garder relativement brève cette introduction aux nanosatellites, malgré l'ampleur du phénomène *NewSpace*, je n'aborde pas ici les applications d'observation de la Terre et les concepts de revisites fréquentes des constellations de nanosatellites en orbites terrestres. Je ne détaille pas non plus le tissu industriel qui s'est développé dans le *NewSpace*, y compris en Europe, depuis les capteurs et actionneurs, jusqu'aux plateformes complètes. Toutefois, l'illustration en figure 3.5 montre l'écosystème industriel européen en 05/2023, où les auteurs⁵ notent que la France est leader en nombre d'entreprises (52 sur 220).

Les exemples précédents montrent les tendances qui se dessinent pour l'astrophysique dans les années à venir : après les mesures plasma, pour lesquelles les nanosatellites ont tout de suite été envisagés, les besoins de précurseurs et d'auxiliaires augmentent dans tous les champs de l'astrophysique. Les technologies qui manquent pour y répondre ciblent toutes un gain d'autonomie, en particulier pour l'espace profond qui est la nouvelle frontière du format CUBESAT. Les technologies et infrastructures se mettent lentement en place autour du maître mot de « l'autonomie » pour les nanosatellites en astrophysique, et surtout :

- La propulsion continue, avec en parallèle des techniques de navigation autonome⁶. De nombreux acteurs et de nombreuses technologies arrivent à maturité, il reste à apprendre à bien les intégrer, aussi bien dans les outils d'analyse de mission que dans les systèmes et tests de contrôle d'attitude.

⁵<https://toulouse-space-team.com/v2-carto-europe/>, 11/05/2023, Toulouse Space Team, consultants

⁶Devinette entre aviateurs : Quel est le meilleur système de navigation ? Réponse : un gros réservoir.

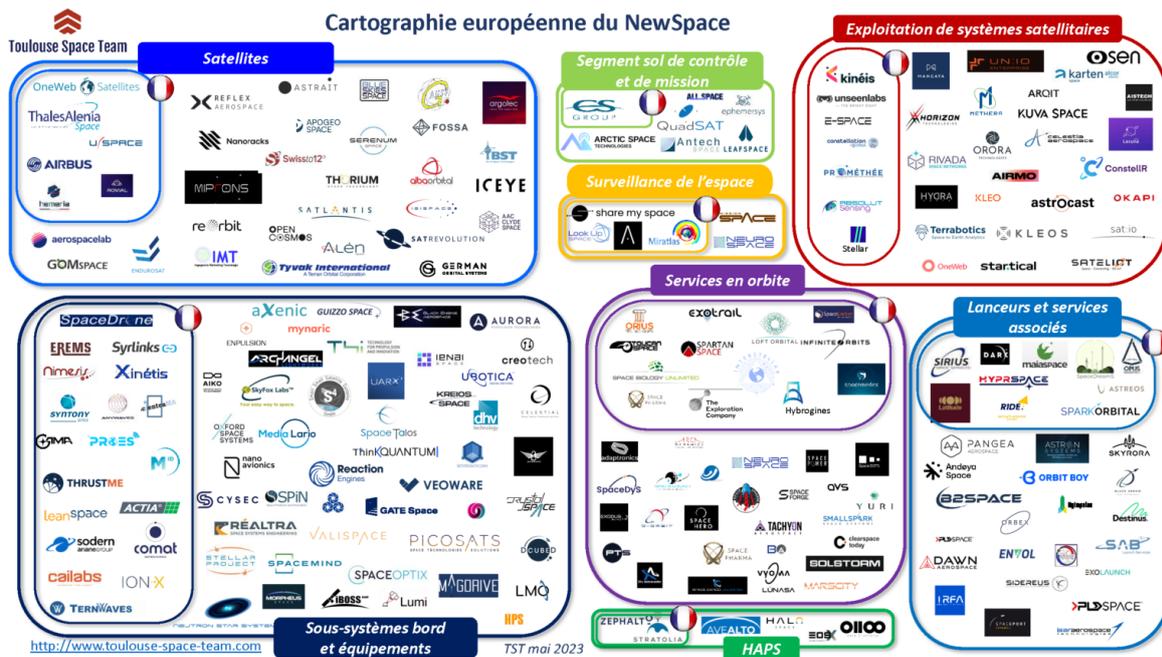


FIGURE 3.5 : « Cartographie du NewSpace européen » (Toulouse Space Team, 11/05/2023).

- Les télécommunications au sol, avec des concepts d'opérations minimalistes (à bord et au sol), alors que les infrastructures UHF/VHF ne seront plus suffisantes dans un avenir proche et que celles existantes ne sont pas adaptées (à l'astrophysique).
- Même sans rechercher l'autonomie, les exigences de performance de pointage et de stabilité sont plus élevées que l'état de l'art. Elles jouent sur les observations scientifiques elles-mêmes et sur la navigation (propulsion et détermination optique d'orbite). L'essor des télécommunications laser (*lasercom*) vers et depuis les orbites terrestres pourrait servir de tremplin à l'astrophysique.

3.2 Le NewSpace français (pour l'astrophysique)

En France, le CNES a initié en 2013 un programme de nanosatellites strictement restreint aux CUBESATS étudiants. Étrangement, la vocation universitaire de l'Observatoire de Paris-PSL, qui délivre en son propre nom des diplômes de Master et de Doctorat, n'a pas été reconnue par ce programme et l'action de C²ERES (aujourd'hui CENSUS) a été ignorée, malgré aussi des co-financements par C²ERES d'autres projets de ce même programme, pour OGMS-SA (LISA/UPEC) et METEORIX (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides, Observatoire de Paris-PSL (IMCCE), Sorbonne Université). Cette situation nous a conduits à choisir, finalement avec bonheur, un positionnement résolument scientifique, alors que nous avons démarré sans préjuger entre science et éducation. Il est rendu difficile de juger la première phase de ce programme du CNES car, à notre connaissance, il n'a pas été publié de bilan économique et pédagogique. Pourtant, son montant probable de 4 M€ sur 2012-2019 le justifierait, montant estimé en considérant un support annoncé de 50%, soit environ 300 à 400 k€, aux douze projets recrutés initialement (de 1U à 3U).

La suite de ce programme, renommé *Nanolab Academy*, maintient ces mêmes objectifs éducatifs. Le programme a publié en 2021 un « Guide Normatif pour le développement de projets nanosatellites étudiants », [14], tirant l'enseignement technique des 9 premières années. Cela fait ainsi écho à l'initiative de l'ESA de 2016 pour la simplification du spatial

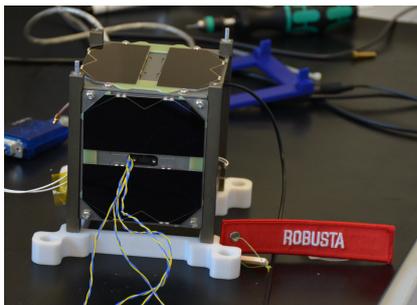


FIGURE 3.6 : ROBUSTA-1B, $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, test de résistance aux radiations en environnement spatial (photo NimesGEII, licence CC-BY-SA-4.0, CSUM, U.Montpellier-II).

conventionnel au profit du *NewSpace*.

Le cadre technique de *Nanolab Academy* est de privilégier une plateforme qui miniaturise le spatial conventionnel avec un cœur système conçu autour d'un « hyperviseur ». Cette approche est indéniablement robuste et dispose d'un héritage fort. Par contre, elle est chère face à la concurrence et trop complexe sans un expert de ces architectures pour l'intégration et les tests. Elle constituerait une perte de maîtrise pour un client scientifique et lui imposerait une sous-traitance coûteuse, y compris dans les opérations. Elle reviendrait à ne *pas* changer de paradigme et à attendre du laboratoire scientifique qu'il se limite à une charge utile, sans concevoir la mission entière, puis la livre à un intégrateur extérieur et la fasse opérer par une agence (ou une société). Mais attention, la concurrence européenne dispose aussi d'un héritage et ouvre déjà des filiales françaises pour capter le marché institutionnel, menaçant donc directement la viabilité économique de l'architecture par hyperviseur : ARGOTEC et TYVAK en Italie, ISISPACE aux Pays-Bas, NANOAVIONICS en Lituanie et annoncé en France, GOMSPACE au Danemark et désormais en France. À l'inverse, la Fondation Van Allen, liée au Centre Spatial Universitaire de Montpellier (CSUM, Université Montpellier), fait le lien entre l'académie et l'industrie autour d'une architecture système décentralisée, robuste par sa simplicité, et une thématique forte sur la tenue aux radiations : la fondation a été créée dès 2012 suite au lancement du CUBESAT ROBUSTA-1A (P.I. Laurent Dusseau), premier nanosatellite français. Son successeur 1B est présenté en figure 3.6.

Le CNES, dans sa mission de soutien à l'innovation française, a résolument aidé à l'émergence d'acteurs industriels et la figure 3.5 en témoigne. Pour l'astrophysique, des acteurs comme SODERN seront des fournisseurs critiques et, dans un avenir proche, on devra surveiller l'effort soutenu en faveur de la propulsion des nanosatellites : THRUSTME et EXOTRAIL, mais ce dernier s'est repositionné sur les « SmallSats », catégorie supérieure aux CUBESATS. Une opportunité de collaboration existe toutefois entre *Nanolab Academy* et CENSUS au niveau des segments sol, car c'est la seule entité du CNES à ce jour qui s'intéresse aux besoins des nanosatellites (confirmations en 2024, lors de réunions techniques avec le département du CNES chargé des applications Telecom, des stations sol et des systèmes d'alertes).

En revanche sur le plan scientifique, ce n'est qu'en 2015 et sur notre insistance (LabEx ESEP et pôle spatial C²ERES, Cf. Chap.6) que les nanosatellites ont eu droit de citer au CNES. Plusieurs projets ont alors été soutenus par quelques financements modestes. Surtout, les experts du PASO/CNES, le Plateau d'Analyse des Systèmes Orbitaux, ont pu travailler avec nous et ont joué un rôle important pour promouvoir les nanosatellites au sein de l'agence. Parmi les tout premiers projets scientifiques examinés par le CNES, il y avait BIRDY et NOIRE, traités en détail ici.

Dans les laboratoires spatiaux, les chercheurs et ingénieurs se sont vite exprimés *pour* ou *contre* le format CUBESAT, les premiers jugeant qu'il conduirait à de nouveaux concepts observationnels, les seconds que la taille limiterait intrinsèquement les performances. Tous

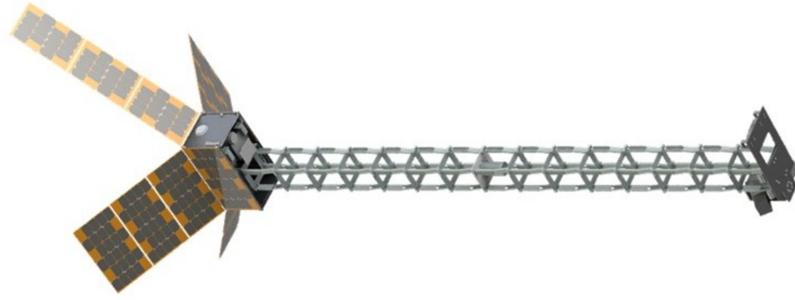


FIGURE 3.7 : CUBESAT 16U NANOMAGSAT ($22 \times 22 \times 44 \text{ cm}^3$, bras déployable de 3 m) de météorologie de l'espace (Open Cosmos & NanoMagSat consortium, licence ESA Standard).

s'accordaient sur la nécessité de réaliser ces petits satellites avec la même exigence de qualité que leurs aînés, c'est-à-dire avec des professionnels dans l'équipe projet. Or, l'absence de financements autres que pédagogiques ne permettait pas de mobiliser des titulaires sur ces projets, qui ont donc avancé laborieusement jusqu'à aujourd'hui.

En 2023, décision est prise par Coralie Neiner (LESIA, directrice de CENSUS) de créer une fédération de recherche CNRS dédiée aux nanosatellites scientifiques, d'abord en Île-de-France, avec vocation à s'étendre. Le premier but est d'identifier et d'exprimer les besoins communs de la communauté. En 2024, une contribution de la fédération à la prospective conjointe CNES-INSU est réalisée, qui réclame un « guichet de financement » au CNES, dédié au *NewSpace* scientifique. En effet, l'avis collégial est que le *NewSpace* est incontournable pour les scientifiques mais bien trop fragile en France face à la concurrence avec les opportunités instrumentales du spatial conventionnel. La fédération estime qu'un budget pluri-annuel représentant une moyenne de 3 M€/an serait efficace, techniquement et politiquement.

Le contraste est saisissant en France entre l'émergence d'un tissu économique du *NewSpace* français et l'absence de la science, surtout astrophysique. Cela me semble illustrer l'idéologie de « l'innovation », de l'immédiateté et de l'utilitarisme, qui se déploie au détriment de la Recherche et Technologie, ici par opposition à « innovation » (R&T) à moyen terme. En disposant d'une compétence socio-économique, cette hypothèse serait à évaluer à l'aune de la situation américaine ou italienne. Si c'était confirmé, ce serait alors oublier qu'en France, l'astronomie est une discipline dont le rayonnement politique est majeur et qu'un *NewSpace* astrophysique est une opportunité de démultiplier ce rayonnement, auprès du public national et des partenaires internationaux.

Avant de détailler mon action de ces douze dernières années, je fais le constat peut-être sévère que la France a raté la fusée des nanosatellites d'astrophysique, alors que les États-Unis et l'Italie y engrangent un succès politique considérable. En 2024, le CNES semble prêt à contribuer à des nanosatellites de l'ESA, si l'on en juge par la sélection de NANOMAGSAT (P.I. Gauthier Hulot, IPGP, Fig. 3.7), une constellation de trois CubeSats identiques pour l'étude de la dynamique du champ magnétique terrestre, sur programme d'Observation de la Terre⁷, pour lequel le PASO/CNES et des financements de R&T ont beaucoup aidé.

⁷[Cliquer ici] News ESA du 21/02/2024 : www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/NanoMagSat_and_Tango_Scout_missions_get_go-ahead

À CENSUS, le développement de l'écosystème de support aux nanosatellites d'astrophysique s'est fait sans décision *a priori*. La réflexion s'est installée au fur et à mesure que le besoin de sécuriser des projets apparaissait. Ces projets, présentés à CENSUS lors des appels d'offre annuels (initialement du LabEx ESEP, Cf. Chap. 5), sont les véritables initiateurs de la réflexion portée par ce manuscrit. Leur grande diversité depuis 2013 a fait émerger des besoins soit « précurseurs » (BIRDY-T) soit « récurrents ». J'ai généralisé ce qui me semblait devoir l'être, et pouvait être fait dans CENSUS, et laissé à la charge des projets ce qui me semblait spécifique ou hors de nos moyens.

4.1 Birdy-T : genèse et repositionnement

Ce premier projet de nanosatellite a été précurseur à bien des égards. Je suis contacté début 2013, via mes relations à la Mars Society, pour suggérer et accompagner un projet de thèse en vue d'un CUBESAT martien. Le doctorant est Jordan Vannitsen, français étudiant à *National Cheng Kung University*, Tainan, Taïwan (NCKU). Une relation se développe rapidement entre le LabEx ESEP, que je venais de rejoindre, et le département d'ingénierie aérospatiale de NCKU dirigé par Professeur Miao, directeur de thèse de J. Vannitsen, co-encadré par Dr. Kaithy Wang. Nous orientons rapidement le projet sur une idée de Ludwig Klein du LESIA vers un CUBESAT de météorologie de l'espace au cours d'une croisière autonome de la Terre à Mars :

- la charge utile reprendrait le concept de l'instrument « RAD », détecteur directionnel de particules énergétiques, développé par Hassler [15] au Southwest Research Institute (SwRI), *Instrumentation & Space Research Division* à Boulder (CO/USA), pour le rover MSL-CURIOSITY de la NASA, dont le fonctionnement n'était pas prévu pendant la croisière, mais s'était révélé néanmoins possible et riche d'enseignement à l'occasion de deux *Solar Particle Events* (SPE) ;
- un CUBESAT sur une trajectoire de Hohmann permettrait des observations à la fois depuis la Terre, le CUBESAT et Mars d'un même SPE se propageant dans le système solaire le long de spirales, démontrant et quantifiant ainsi l'effet dit « Hohmann-Parker » (Fig. 4.1) ;
- une fonction de navigation autonome interplanétaire permettrait de maintenir le CUBESAT sur sa trajectoire de référence calculée à l'avance, afin de récupérer ses données lors de son survol de Mars via un orbiteur déjà en opérations ;

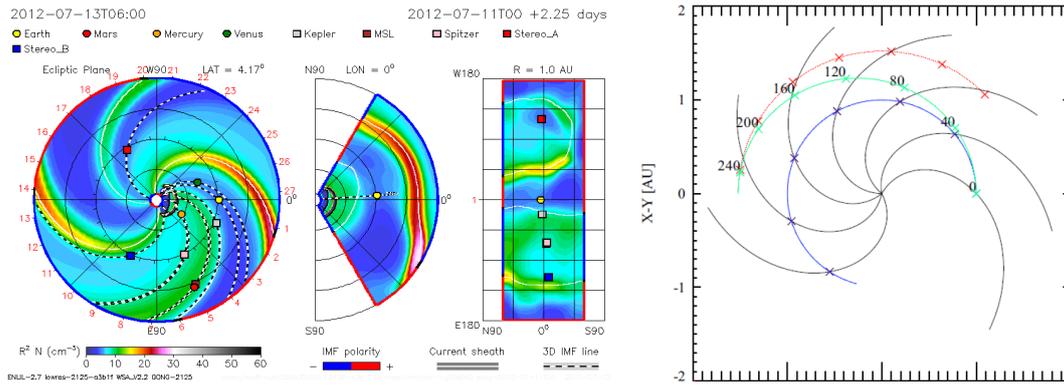


FIGURE 4.1 : Propagation du vent solaire. À gauche : suivi en ligne par NASA/GSFC. À droite (Posner et al. [16]) : Spirales de Parker pour un niveau d'énergie donné (noir), connectant les orbites de la Terre (bleu), Mars (rouge) et d'une sonde en trajectoire de Hohmann (vert). Les croix donnent les positions successives aux dates indiquées (jours) de la Terre, de la sonde et de Mars.

- le CUBESAT comporterait de la propulsion pour un budget de delta-V de 80 m/s, démontrant une technologie à base de propergol liquide (Cf. plus bas) proposée par des vétérans de la propulsion continue sur la sonde SMART-1 de l'ESA.

J'ai assuré le rôle de chef de projet et coordinateur entre la France et Taïwan, où beaucoup d'étudiants taïwanais étaient impliqués au niveau Master et encadrés localement par J. Vannitsen. De mon côté, j'encadrais des équipes françaises d'étudiants issues du Master OSAE de l'Observatoire de Paris ou de différentes écoles d'ingénieur, en particulier de CENTRALE LILLE pour une proposition de structure mécanique pour le CUBESAT. À cette époque, il y avait encore peu de COTS et il était tentant de tout développer soi-même, même si l'objectif de ce module particulier était pédagogique et promotionnel (une présentation par l'équipe lilloise a été donnée à la Mars Society France). Ce module a été poussé jusqu'à la fabrication et une séance de tests sur pot vibrant a été réservée : les étudiants sont venus avec leur prototype pour l'installer dans un « P-POD » de test, conteneur prévu pour recevoir un CUBESAT en vue de son lancement depuis la fusée. Mais le prototype n'a pas pu rentrer dans le P-POD, faute d'avoir respecté les tolérances mécaniques strictes du standard CUBESAT ! L'exercice n'en a rien perdu du point de vue pédagogique, au contraire, et me permettait désormais d'illustrer l'importance des tests précoces à tous les niveaux. La même mésaventure a été rapportée comme fréquente dans le rapport de la Commission Européenne sur QB50¹.

Le P-POD de test pouvant recevoir un CUBESAT 3U (ou « Test-POD ») était une réalisation de NCKU en deux exemplaires, dont un nous a été offert. Deux interfaces mécaniques ont été développées, pour l'installer soit sur le pot vibrant de confrères en Île-de-France, soit sur le plateau d'essai de la cuve à vide thermique SimEnOm du LESIA, offrant ainsi une interface CUBESAT pour des cyclages thermiques à vide. Plus tard, j'ai également fait acheter un Test-POD 6U pour CENSUS.

En plus de la thèse à Taïwan de J. Vannitsen sur un concept de mesures pour BIRDY, deux études principales ont été conduites en France :

- une thèse sur le couplage entre propulsion continue et contrôle d'attitude des nanosatellites, par Quinsac [17] sous la direction de Prof. Benoît Mosser et co-encadrée par Christophe Koppel et moi-même, soutenue en 2019 ;

¹Cf. Final Report Summary - QB50, infra

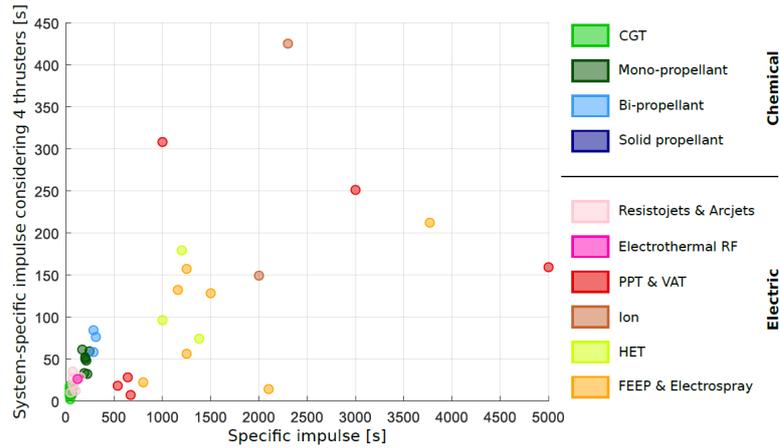


FIGURE 4.2 : Impulsion spécifique système I_{ssp} en fonction de l'impulsion spécifique I_{sp} pour plusieurs familles de solutions de propulsion, en considérant une utilisation de 4 propulseurs en séquence. Extrait de Quinsac [17].

- ma propre thèse sur un algorithme de navigation optique en interplanétaire (Segret [18]), toujours sous la direction de B. Mosser, également soutenue en 2019.

La thèse de G. Quinsac démontra que l'imprécision et l'instabilité des systèmes de contrôle d'attitude disponibles dans le *NewSpace* conduisaient à un excès d'optimisme pour les solutions de propulsion. Plus profondément, l'état de l'art montrait que les critères de performance traditionnellement utilisés pour le contrôle d'attitude et la propulsion n'étaient plus suffisants pour les nanosatellites : une prise en compte soigneuse des imprécisions de centrage ou de pointage devrait conduire (ce qui n'est pas fait en général) à doubler voire quadrupler le budget de delta-V initialement envisagé pour des manœuvres telles que la dé-orbitation depuis une orbite basse. Un nouvel indicateur remplaçant la fameuse impulsion spécifique I_{sp} était repris de Erichsen [19] et a été complété en « impulsion spécifique système », I_{ssp} , redistribuant alors les solutions de propulsion en fonction des usages, comme le montre par exemple la figure 4.2 : une correspondance entre l' I_{sp} et sa traduction en I_{ssp} devrait montrer une droite de régression nette mais, au contraire, les performances sont complètement dispersées quand on passe de l'une à l'autre.

Cette thèse présentait une technologie originale de propulsion, *Liquid micro-Pulsed Plasma Thruster* ($L\mu$ PPT), utilisant un propergol liquide dérivé du téflon. La technologie a été conçue par Serge Barral (par ex. [20, 21]). Elle était portée en France par Christophe Koppel, co-encadrant de thèse avec moi, responsable à SNECMA (devenue SAFRAN) de la propulsion de la sonde Terre-Lune SMART-1/ESA (2003 à 2006). Toutefois, notre laboratoire LESIA avait déjà soutenu, mais sans suite, une technologie de propulsion par effet Hall pour nanosatellites (p.ex. [22]), portée par Prof. Marcel Guyot (Univ.Versailles Saint Quentin) et Prof. Michel Dudeck (Univ.Pierre et Marie Curie), technologie qui donnera naissance à la société EXO-TRAIL. Le LESIA a donc refusé d'aider la propulsion $L\mu$ PPT du projet BIRDY et celle-ci ne sera pas retenue plus avant.

Dans ma propre thèse, je proposais une solution de *Vision-Based Navigation* (VBN) pour la détermination d'orbite autonome en croisière interplanétaire : elle combine des mesures optiques d'objets d'avant-plan sur fond d'étoiles connues et un estimateur de type « UKF » (*Unscented Kalman Filter*). Cet estimateur s'avère plus stable que le bien connu « EKF » (*Extended Kalman Filter*) en cas d'évolutions trigonométriques fortes (comme à l'approche de Mars ou d'un astéroïde). Il présente aussi un fort potentiel d'adaptation pour les opérations de proximité et pour la fusion de données (combinant typiquement optique et radio-science,

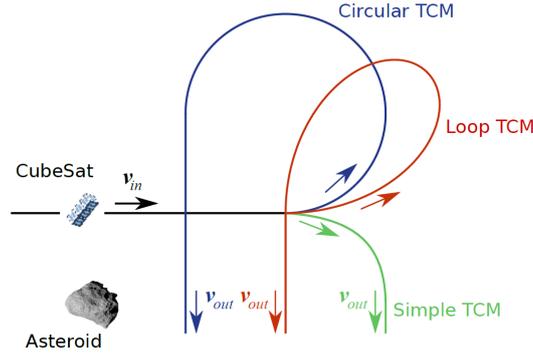
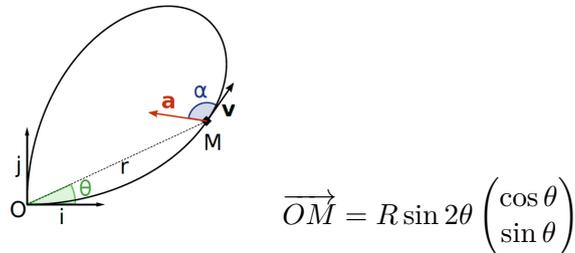


FIGURE 4.3 : « TCM Loop » conçue pour les opérations de proximité (Segret & Quinsac).

Segret et al. [23]), ce qui allait devenir le nouveau contexte pour BIRDY. La complexité de l'UKF se révélait finalement abordable, malgré une opération mathématique délicate mais documentée qui consiste à trouver une racine carrée pour une matrice (Sadeghi [24]). La performance en croisière atteignait, d'après simulations, une précision de reconstruction d'orbite de 30 km à 3σ , à **condition** d'atteindre, en particulier, une précision optique de 0.2 arcsec, soit une forte amélioration par rapport à l'état de l'art sur laquelle nous reviendrons dans un instant. Cette thèse introduisait aussi une modélisation qui ré-injecte les résultats de simulation dans le profil de mission du satellite, méthode que je développerai plus tard sous l'appellation « MBSE ».

Incidemment, ces deux thèses ont nécessité le développement de certains outils de dynamique spatiale qui ont constitué les premières briques de la suite logicielle open-source DOCKS qui sera présentée plus en détails en section 5.1.

Cependant, une fragilité du projet à l'époque était de ne pas afficher de PI-ship fort, avec un chercheur du milieu de la météorologie de l'espace, pour porter ce projet franco-taïwanais. À partir de 2018, le principe d'un CUBESAT autonome pour l'espace profond a été repris par Daniel Hestroffer, pour réaliser des mesures de radio-science à proximité d'un astéroïde. Sous son impulsion, BIRDY a évolué en BIRDY-T, une technologie « sur étagère » : elle est envisagée soit en accompagnement d'une mission-mère pour un rendez-vous avec un astéroïde, soit en survol unique de reconnaissance précoce d'un astéroïde menaçant (*Potentially Hazardous Asteroid*, PHA). Les thèses de G. Quinsac et moi-même ont été étendues à ce cas scientifique supplémentaire pour traiter les « opérations de proximité ». À cette époque, nous concevons d'ailleurs avec G. Quinsac une « TCM Loop » (Fig. 4.3), manœuvre autonome de retournement au voisinage de l'astéroïde, à la fois tolérante, sécurisée et relativement simple, définie sur un paramétrage de « rosace », bien adaptée à une propulsion continue :



Lorsque nous avons voulu publier une synthèse de la technique de détermination d'orbite de BIRDY (finalement publiée hors *peer-review*, [25]), celle-ci a été fortement critiquée. Nous faisons en effet une hypothèse au-delà de l'état de l'art pour la précision optique à $\sigma_{\text{out}} = 0.2 \text{ arcsec}$. Pourtant, cette hypothèse découle d'un pré-traitement embarqué réaliste qui doit

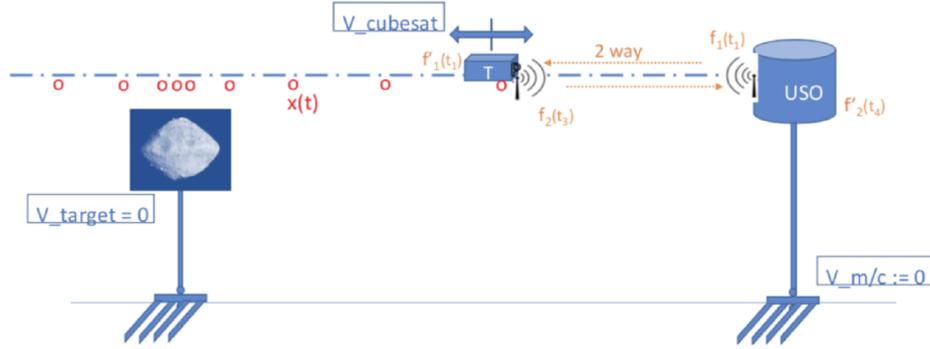


FIGURE 4.4 : *Démonstration au sol : un trolley (T) réalise des tronçons rectilignes qui simulent en distance et vitesse une portion de survol d'astéroïde pendant des mesures radio-science (USO). Hestroffer et al.*

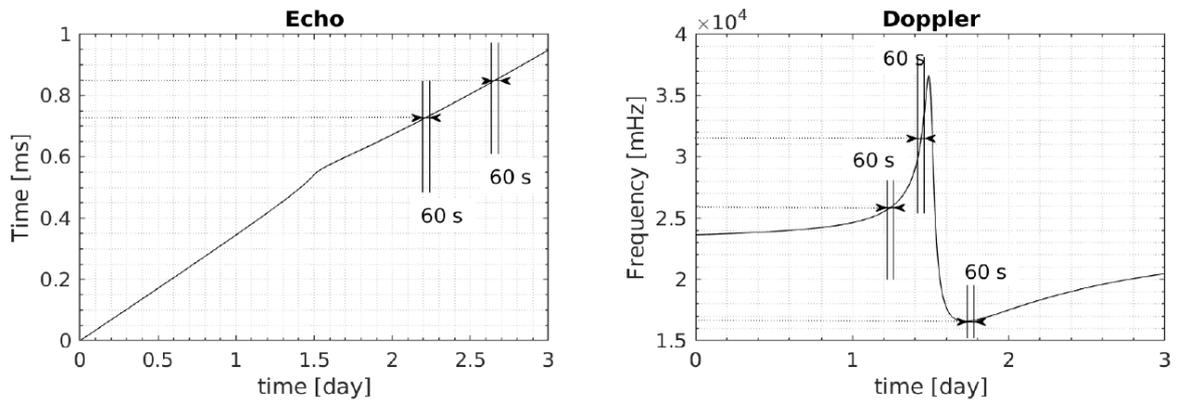


FIGURE 4.5 : *Démonstration au sol : la trajectoire de survol est simulée (plusieurs jours) puis échantillonnée en multiples tronçons (minutes) à simuler par le trolley.*

améliorer rapidement une précision brute de $\sigma_{in} = 10$ arcsec si suffisamment d'étoiles sont reconnues dans le champ :

$$\sigma_{out} \sim \frac{\sigma_{in}}{\sqrt{n^*}} \cdot \left(\frac{\sigma_{in}}{d} \right), \quad (4.1)$$

où n^* est le nombre d'étoiles et d la déviation standard de leurs interdistances (donc leur étendue dans le champ). Cette autre technologie, plus tard baptisée « AbC », étant seulement présentée mais pas encore développée, les relecteurs restaient sceptiques que nous puissions tabler sur une telle précision. J'ai donc initié le développement de l'AbC, que j'ai spécifié (Segret et al. [26]) puis prototypé : il en sera question en section 5.1.6.

BIRDY-T est actuellement en phase de démonstration au sol du concept de mesure radio-science. Un ensemble {station fixe ; trolley} doit simuler une trajectoire de survol d'astéroïde où l'accélération est très faible et récolter des mesures radio-science en bande S. Ce jeu de mesures servira de base pour démontrer qu'il est possible de tester au sol les performances de la technique et, in fine, de reconstruire une trajectoire qui contraindra la masse de l'astéroïde à mieux que 10%. L'expérimentation au sol est un projet à part entière : non seulement il faut faire réaliser un transpondeur en bande-S et intégrer les composants, soit un investissement de plus de 100 k€, mais il faut aussi transposer une trajectoire spatiale de dizaines de kilomètres sur plusieurs jours en une multitude de petits tronçons rectilignes au sol de moins de 500 m et de quelques minutes chacun (Fig. 4.4 et 4.5).

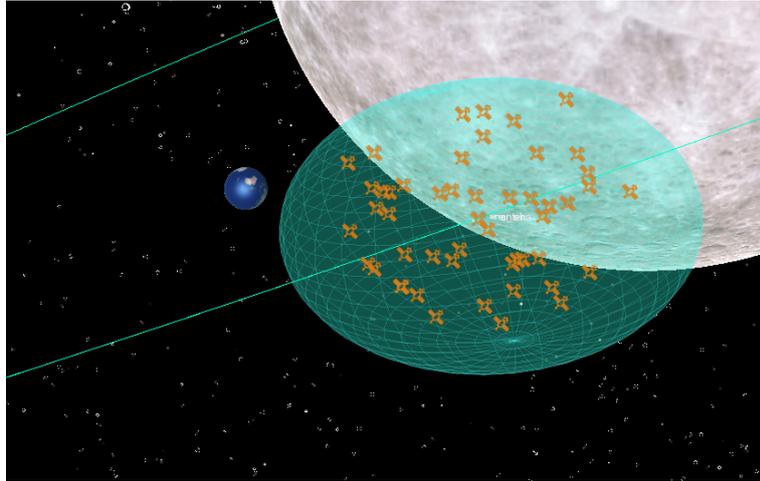


FIGURE 4.6 : NOIRE, concept d’observatoire de radioastronomie en orbite lunaire de 50 nanosatellites en essaim. Crédit : E. Rouillé

Bilan pour BIRDY-T

Il est difficile de prédire le futur de BIRDY-T, et en particulier s’il volera. Mais BIRDY-T a d’ores et déjà été majeur pour installer une dynamique de R&T dans CENSUS. À ce jour, le projet a fait l’objet de trois thèses, a servi de sujet pour des dizaines d’étudiants français et étrangers de Master et de pré-doctorat (programme PSL-ITI de 2014) ; les statistiques sur ResearchGate (qui concernent essentiellement BIRDY-T, mais incluent aussi une part substantielle pour NOIRE, Sec. 4.2) rapportent plus de 80 citations et 4200 consultations ; la suite open-source DOCKS a été initiée pour du prototypage rapide de profils de mission ; les bases de ma future approche MBSE ont été posées ; une collaboration de long-terme a été engagée avec la start-up luxembourgeoise ODYSSEUS SPACE² créée par Jordan Vannitsen avec Marco Agnan et Julien Hennequinn ; l’algorithme AbC a été initié avec, récemment, quelques premiers vols sur le satellite OPS-SAT de l’ESA (Cf. § 5.1.6) ; la faisabilité d’une intelligence artificielle pour la détermination d’orbite est en cours d’étude par la société allemande D-FINE GMBH ; le portage d’une technique de radio-science à l’échelle nanosat est en cours.

4.2 NOIRE : essaim pour radioastronomie basse-fréquence

En 2014, j’accompagne Baptiste Cecconi du LESIA / Observatoire de Paris-PSL à un *workshop* aux Pays-Bas sur une idée d’essaim de nanosatellites. Il s’agissait de discuter la possible transposition au spatial des concepts de radioastronomie sol de LOFAR (*LOW Frequency Array*, van Haarlem, M. P. et al. [27]), observatoire par interférométrie à très longues lignes de base, réparti entre plusieurs pays d’Europe. L’idée conduira à l’étude « NOIRE », soutenue par l’équipe PASO³ du CNES et portée par B. Cecconi, pour un observatoire en orbite lunaire fait d’une cinquantaine de nanosatellites en essaim (Fig. 4.6). Compte-tenu que le ciel n’est tout simplement pas observable depuis le sol aux fréquences radio inférieures à 10 MHz du fait de la coupure ionosphérique, cette configuration présente de nombreux avantages :

- imagerie du ciel complet ou de zones ciblées, à des fréquences choisies, adressant de

²<https://www.odysseus.space>, 23/04/2024

³Plateau d’Architecture des Systèmes Orbitaux, chargé du dimensionnement des avant-projets sélectionnés par le CNES

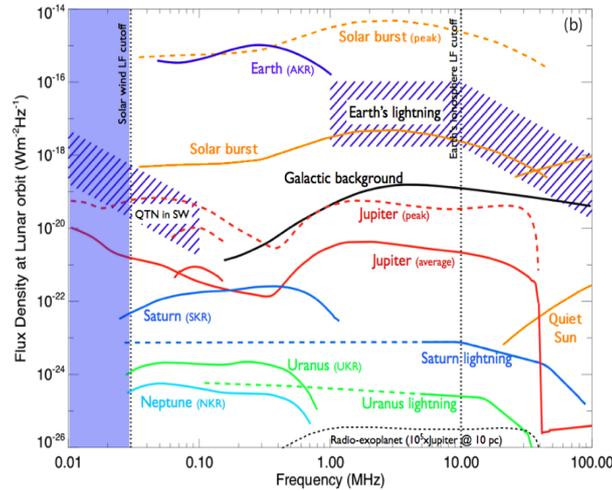


FIGURE 4.7 : Densités de puissances des signatures radioastronomiques de 10 kHz à 100 MHz (Adapté de Zarka et al. [28], Zarka and Cecconi [29]).

nombreux cas scientifiques possibles, de la planétologie à la cosmologie (exemples ci-dessous) ;

- un essaim nécessite peu de maintenance d'orbite et procure de multiples lignes de bases évoluant en longueurs de 10 à 100 km et dans toutes les orientations ;
- l'orbite de l'essaim autour de la Lune permet d'observer alternativement le ciel à l'abri des émissions terrestres ou solaires ou la globalité de l'environnement terrestre ;
- le nombre de nanosatellites permet une fabrication en série, potentiellement économique, et une redondance naturelle, voire un renouvellement dans le temps, même si certains satellites doivent être spécialisés pour répartir la charge de calcul (pré-traitements par tous, réduction des données et envoi vers la Terre par certains).

Le rapport d'étude du PASO/CNES a conclu à l'absence de points manifestement bloquants, malgré l'évidente difficulté technique du projet. Une première thèse dédiée à NOIRE a été engagée sous la direction de B. Cecconi, avec mon co-encadrement, préparée par Erwan Rouillé depuis 2022. De nombreuses thématiques scientifiques sont accessibles par NOIRE et, justement, une difficulté du projet est de se concentrer sur les cas les plus dimensionnants ou les plus « vendeurs » (*O tempora, o mores!*). C'est le premier travail de notre doctorant dont l'objectif sera de poser les fondements d'un simulateur instrumental pour appuyer les diverses spécifications scientifiques.

La thématique cosmologique est bien sûr très tentante mais elle est certainement la plus complexe : l'enjeu serait de détecter la signature de la raie de l'hydrogène de l'aube cosmique à des redshifts extrêmes ($Z \sim 1000$). Cela nécessite la plus grande sensibilité et la soustraction de tous les signaux d'avant-plan, en particulier le signal galactique, lui-même non résolu spatialement (la figure 4.7 montre les puissances relatives). En revanche, le cas cosmologique pourrait bénéficier d'aides pour financer des démonstrations technologiques déterminantes, comme la synchronisation d'horloges au sein d'un trio de nanosatellites ou des solutions de compatibilités électro-magnétiques.

La sélection retenue pour la spécification des premiers cas scientifiques s'oriente (à ce jour) plutôt sur la physique solaire et la rotation des planètes géantes : dans le premier cas, l'imagerie permettra de localiser et caractériser finement les lieux et les processus de transfert d'énergie entre les particules expulsées par le Soleil et les différentes composantes

de l'héliosphère (champs magnétique, vent solaire, magnétosphères, etc...); dans le deuxième cas, à l'abri de la Terre grâce à la Lune, des mesures du spectre radio des planètes (Uranus, Neptune dont la période de rotation est mal connue, mais aussi Jupiter pour un suivi à long terme) sont possibles et contraindraient alors la structure interne des géantes de glace, dans le cadre général de compréhension de la répartition des moments gravitationnels dans le système solaire.

Ces trois exemples, de la cosmologie à la planétologie, illustrent un vaste potentiel d'observations impossibles autrement, sur des questions scientifiques de première importance et toujours sans réponse. Au-delà de l'intérêt scientifique incontestable de NOIRE, la thèse d'E. Rouillé me conduit à l'accompagner par la déclinaison et la quantification de spécifications scientifiques en contraintes d'ingénierie pour un projet nanosatellite d'envergure. En particulier, mon objectif est de repérer si des simplifications sont possibles, par rapport aux approches d'ingénierie système pour le spatial conventionnel : j'y privilégie ainsi une modélisation par *Structured Analysis and Design Technique* (SADT) (je préfère parler de cartes de processus) que j'utilise dans tous mes projets et qui sera présentée en section 5.2. S'il est trop tôt pour y pratiquer une approche MBSE, celle-ci apparaît néanmoins tout à fait souhaitable et faisable pour chaque cas scientifique quantifié.

4.3 Bien d'autres projets : identifier les « cas »

BIRDY-T avait démontré, s'il le fallait encore, qu'un projet scientifique nécessite d'être porté par un chercheur ou une chercheuse, et justifié par un « cas scientifique ». À défaut, le projet ne trouvera ni soutien, ni collaborations, ni donc financement. L'étendue des sujets abordés par NOIRE ne dément pas non plus cette règle, puisque c'est la sélection d'objectifs scientifiques concrets et quantifiables qui nous permet d'avancer. Pour tous les projets que j'accompagnerai ensuite, j'insisterai pour identifier en détails les cas scientifiques, ce qui sera également indispensable pour prioriser les spécifications techniques. Les sections ci-dessous ne suivent pas un ordre chronologique, beaucoup de projets étant conduits en parallèle, l'objectif étant, au chapitre 5, d'en dégager les axes de développement que j'ai choisis pour CENSUS.

4.3.1 PICSAT, l'honorable premier

En janvier 2018, le premier CUBESAT scientifique français est lancé. On le doit à l'énergie impressionnante d'une petite équipe du LESIA, conduite par Sylvestre Lacour et Vincent Lapeyrere. Les leçons que PICSAT nous a laissées sont présentes en permanence dans mes conseils aux autres projets, en particulier la nécessité d'un contrôle serré des fournisseurs du *NewSpace* et de l'impossibilité de sacrifier des tests, même quand ils ne sont pas possibles (sic). Ma contribution à PICSAT a été tout à fait minime (reviewer pour le LabEx ESEP qui était co-financeur), en revanche je lui dois beaucoup pour le succès programmatique déterminant qu'il a été dans le démarrage de CENSUS et pour son retour d'expérience, d'où la présente section.

L'objectif scientifique était de surveiller en permanence l'étoile Beta-Pictoris par photométrie, pendant une période où un passage de sa planète *Beta-Pictoris b* devant l'étoile était estimé probable. Cet objectif était adossé à la démonstration d'une technologie d'injection de la lumière dans une fibre optique par suivi actif du spot lumineux dans le plan focal : le capteur « mono-pixel » était donc déplacé par des actionneurs piezo-électriques contrôlés à 100 Hz (le CUBESAT ASTERIA, Cf. infra, a aussi adopté cette stratégie où tout l'imageur était mobile dans le plan focal). La totalité du développement, de sa conception à sa livraison pour le lancement a duré moins de 4 ans, de 2014 à 2017 (Fig. 4.8). Les données télémétriques ont montré que la technologie embarquée fonctionnait comme attendu. En revanche,

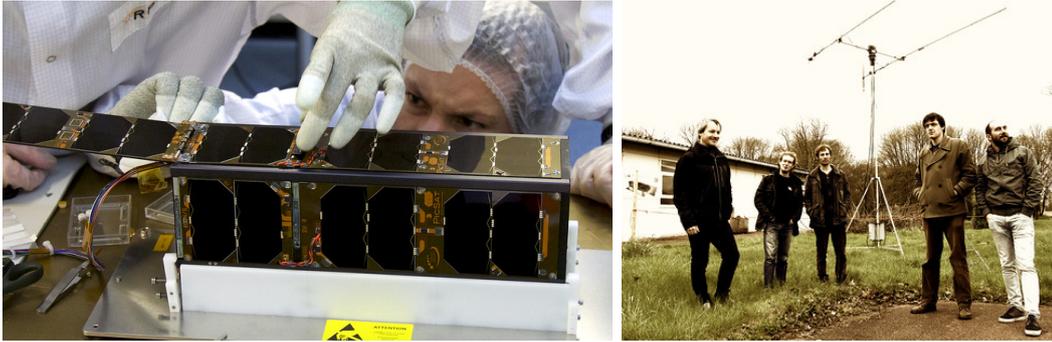


FIGURE 4.8 : Le CUBESAT PICSAT, format 3U, en cours d'intégration. L'équipe PICSAT (de g.à d. : Vincent Lapeyrere, Lester David, Antoine Crouzier, Mathias Nowak, Sylvestre Lacour ; absents : Guillaume Schworer, Maarten Roos) devant la station sol UHF/VHF de 2018 qui sera consolidée par CENSUS. Crédit : équipe PICSAT.

une défaillance du système de pointage (COTS, fourni par HYPERION/N.L. sur un design de BERLIN SPACE TECHNOLOGIES AG) n'a pas permis de stabiliser le satellite et l'étoile n'a pas été observée. PICSAT a cessé de fonctionner après 10 semaines, lors d'un passage dans l'anomalie de l'Atlantique Sud, alors qu'une mise à jour logicielle était en cours et qu'un événement solaire venait d'avoir lieu. Pour la petite histoire, PICSAT a recommencé d'émettre le 21/06/2022 (réveil accidentel) et jusqu'au 10/05/2023 puis est retombé dans l'atmosphère. Malgré plusieurs TC/TM échangées avec succès, il n'a pas été possible de faire un diagnostic de la panne initiale du satellite.

Les enseignements de PICSAT pour moi-même et pour CENSUS peuvent être récapitulés ainsi :

- le marketing *NewSpace* qui prétend faire un CUBESAT en 3 ans est un mensonge coupable (moins entendu de nos jours), qui séduit les financeurs mais conduit l'équipe projet à prendre des risques (parfois humains) et faire des impasses techniques, notamment au moment des tests ;
- les fournisseurs du *NewSpace* doivent rester contrôlés par l'équipe projet, quitte à inventer de nouvelles techniques d'achat qui imposeraient de partager les risques quand l'héritage en vol n'est pas prouvé, ce qui était le cas ici pour le système de contrôle d'attitude fourni en COTS.
- justement, les méthodes de gestion publique des achats ne sont pas du tout adaptées à la dynamique du *NewSpace*, ce qui reporte à nouveau sur l'équipe toute la prise de risque contractuelle ; ces méthodes doivent être revisitées ;
- les seules impasses qu'il ne faut pas faire sont sur les tests (plus importants que la performance opérationnelle qui devra inclure des marges), ils doivent couvrir la totalité des « fonctions » et inclure une recette contractuelle stricte au sol de tous les COTS achetés ; le contrôle d'attitude (voire d'orbite) est intrinsèquement difficile à tester, encore plus dans un contexte de boîte noire avec des COTS, il faudra réussir à combiner des tests de réponses impulsionnelles avec des simulations pour « dé-risquer » au mieux ;
- le segment sol doit être initié et achevé en même temps que le satellite avec, en particulier, un souci constant de simplicité des opérations et encore du temps pour tester et s'entraîner : le satellite doit travailler « par défaut », l'envoi de télécommandes et l'interprétation des télémessures doivent être optionnels (en tout cas le plus possible) ;

- enfin, comme pour le segment sol, le processing des données (*housekeeping* ou scientifiques) doit être préparé en parallèle du satellite pour permettre leur ingestion dans un *pipeline* dès le début des opérations et participer au moins à la recette en vol, au mieux à la communication vers le public des premiers résultats scientifiques.

Le LabEx ESEP avait financé certains équipements ainsi que le lancement. À la fin du projet, CENSUS a récupéré la station sol UHF/VHF et l'a consolidée (voir Chap. 5). Enfin, mentionnons que PICSAT a également été un formidable succès de communication vers le public, avec un reportage au journal télévisé du soir de FRANCE 3 et l'implication de la communauté radio-amateur mondiale dont plus de 100 personnes ont contribué à collecter les données de PICSAT. Encore merci, donc, à l'équipe PICSAT.

4.3.2 CASSTOR, précurseur de Pollux

Avec le projet CASSTOR, nous utilisons mon approche MBSE pour la première fois en interaction avec le CNES. Celle-ci s'est avérée très efficace pour répondre en profondeur aux contraintes plateformes.

CASSTOR est un démonstrateur technologique et scientifique, porté par Coralie Neiner du LESIA : il doit démontrer la faisabilité d'un spectro-polarimètre en UV, précurseur de l'instrument Pollux proposé par le CNES comme contribution française à la mission HWO (ex-LUVOIR) de la NASA ; il doit aussi fournir les premières observations polarimétriques UV d'une sélection d'étoiles, donnant accès à leur environnement circum-stellaire. L'observation en UV, donc depuis l'espace, permettra de suivre des traceurs du champ magnétique dans les atmosphères des étoiles, et non pas seulement à leur surface comme ce qui se fait en IR. Cette connaissance permet de remonter aux lois de transport de matière dans le voisinage des étoiles.

Afin de démontrer la faisabilité de telles mesures, il faut pointer chaque cible et intégrer pendant un temps suffisant, avec une grande stabilité et toujours la même orientation sur l'axe. Il faut aussi observer régulièrement des « calibrateurs » (étoiles d'étalonnage). Un compromis évident se présentait entre la stabilité de la plateforme et le besoin, ou non, d'un pointage fin au niveau de l'instrumentation. De plus, une autre analyse s'est rapidement imposée : comment concilier le mouvement orbital avec le besoin d'intégrations longues de la plupart des cibles ? Enfin, les considérations habituelles de budgets de puissance et de volumes de données se posaient.

Pour la stabilité de la plateforme, les besoins étaient tels (0.23 px de stabilité de pointage, soit ~ 2 arcsec) qu'aucune plateforme connue n'y répondait, la performance habituelle de pointage étant autour de 0.1° hors axe, soit près de 200 fois plus faible. Un « étage » de pointage fin s'est imposé dans l'instrument, à coupler au système de contrôle d'attitude de la plateforme. On voit ici que le besoin « astrophysique » n'est pas du tout couvert par les solutions commerciales qui privilégient les observations Nadir côté jour. Pour répondre aux durées d'observation attendues, en général, les experts du CNES fournissent leur analyse sous forme de duty-cycle (pourcentage de temps d'orbite disponible pour l'observation scientifique), puis se retournent vers l'équipe scientifique pour demander si ça convient. Mais cette analyse macroscopique s'adaptait mal à la diversité des cibles stellaires considérées, avec le risque de conclure à la non-faisabilité opérationnelle. Concernant les besoins de puissance et de volume de données, le CNES répond également par des duty-cycles jugés acceptables (pour la plateforme et le sol). Là encore, le risque était de tomber dans des schémas trop simplificateurs exigeant des arbitrages excessifs au niveau scientifique : restreindre le nombre de cibles ou sous-utiliser l'orbite.

À la place des duty-cycles, nous avons finalement dialogué autour d'une stratégie qui nous permettait d'établir automatiquement un planning des observations, ensuite confronté

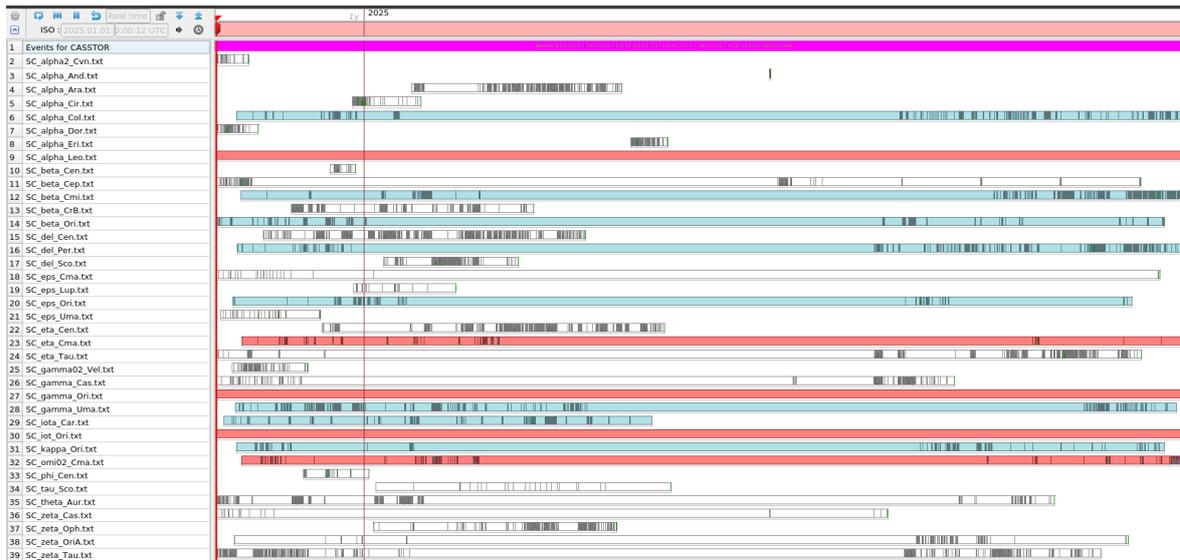


FIGURE 4.9 : Récapitulatif sous VTS des observations pour chaque cible, en lignes : succès (blanc), succès partiel (bleu), échec (rouge). Crédit : équipe CASSTOR.

à un profil de mission complet (Fig. 4.9). CENSUS a modélisé le profil de mission, avec nos ingénieurs Rashika Jain puis Feliu Lacreu que j'encadrerais : calculs pour l'orbite, les pointages, le cumul d'observations, le data volume, le temps de fonctionnement (puissance)... Sur la base de ces « modèles », j'ai animé une campagne d'ingénierie concourante avec l'équipe projet (Nov.2021, puis actualisation en 2023). En préparation de la campagne, nous avons convenu que Vincent Lapeyrere, chef de projet, concevait le modèle de planification, tandis que CENSUS réalisait les modèles qui vérifient si les conditions d'observation requises sont remplies et, alors, comptabilisent les observations réussies. Le but de la campagne a été d'anticiper les principales options d'orbite et de plateforme que le CNES nous proposerait, par exemple à cause des angles d'évitement du Soleil, de la Lune et du limbe terrestre. Lorsque des points durs ont été soulevés et ont réclamé des adaptations, cette approche nous a permis de rapidement mettre à jour la stratégie d'observation et de montrer que le planning pouvait être adapté pour maximiser les besoins scientifiques.

Il est utile d'insister, ici, sur le besoin de préparation d'une campagne d'ingénierie concourante. Une veille sur les techniques utilisées par le CNES, l'ESA et le JPL à la NASA, notamment lors des conférences SECESA organisées tous les deux ans par l'ESA (Cf. Chap. 6), m'avait convaincu qu'il fallait préparer l'équipe en amont et choisir quelques objectifs concrets, adaptés à la maturité du projet. En l'occurrence, pour une campagne en 2022 sur 5 jours d'affilée, j'avais proposé à Coralie Neiner et Vincent Lapeyrere de cibler une architecture de modèles fluide avec une première stratégie d'observation, et une analyse en profondeur de l'alternative plateforme / instrument pour le pointage fin. Ces modèles de planification et d'analyse des observations sont l'approche MBSE qui sera développée au § 5.2 : on ne simule pas l'instrument (ça prendrait des années), mais les conditions *attendues* pour une observation réussie. Ainsi, on pose à la fois les spécifications de la charge utile scientifique, les exigences à tenir par le système complet (vol et sol) et la référence de vérification de ces exigences (le profil de mission).

Pour les savoir-faire de CENSUS, le projet CASSTOR a apporté beaucoup :

- la démonstration qu'une modélisation dite « MBSE » est réactive et change la nature du dialogue avec l'agence spatiale, et probablement avec tout fournisseur de plateforme ;
- l'expérience grandeur nature d'une campagne d'ingénierie concourante en amont d'une

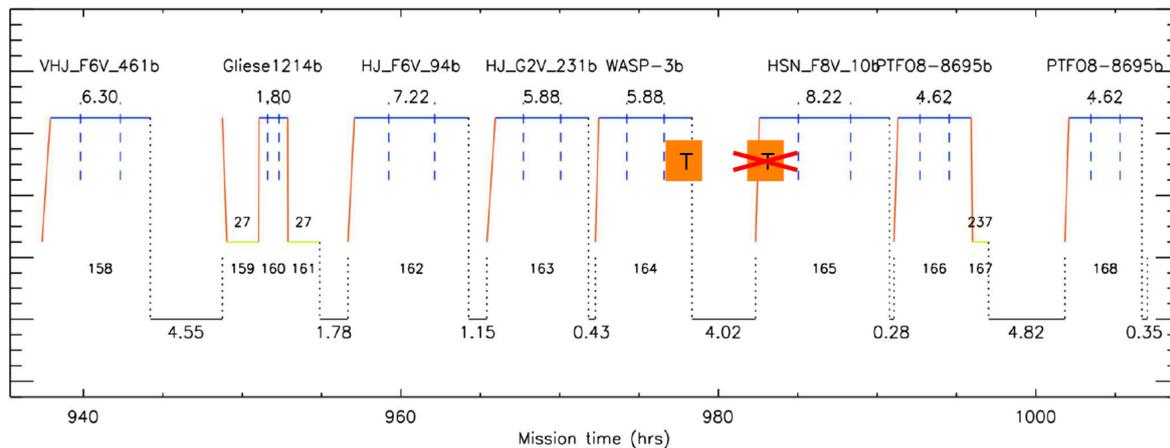


FIGURE 4.10 : Planification d'une observation par ARIEL, illustration en cas de passage exoplanétaire à un moment mal estimé. Crédit : V.Coudé du Foresto

phase 0 du CNES, donc à niveau de maturité intermédiaire, soit CML4 vers CML5 (l'échelle « CML » sera présentée au chapitre 5) ;

- les exigences astrophysiques allant au-delà des performances du *NewSpace*, il nous faudra trouver la bonne manière d'interagir avec les fournisseurs, sachant que nos projets sont pour eux une vitrine possible, mais pas un marché.

4.3.3 CURE : éphémérides pour ARIEL

Voilà un projet qui ne pouvait pas aboutir. Mais le retour sur investissement est loin d'être nul : il est en effet devenu la base technique pour développer nos produits pédagogiques en ingénierie concourante. Comme je le constatais déjà pour BIRDY-T, il n'y a pas d'avenir à un projet sans P.I., or celui-ci a été proposé en 2017 par Vincent Coudé du Foresto, du LESIA, qui est devenu peu après directeur du LESIA. Sa disponibilité pour CURE a donc chuté et, de même, les ressources humaines lui ont manqué. Les ramifications des projets ARIEL, mission en préparation de l'ESA, et BIRDY pour l'exploration d'astéroïdes ont aussi révélé des relations communes avec l'Observatoire de Tartu (Estonie), avec qui un partenariat de long terme a pu se concrétiser à cette occasion.

ARIEL est la future mission ESA de classe M pour la spectrométrie IR des atmosphères d'exo-planètes. L'idée centrale de CURE est que la planification des observations par ARIEL est tellement dense et complexe qu'une erreur de date de transit sur une cible (Cf. Fig. 4.10) coûterait environ le prix d'un projet de CUBESAT. Dès lors, il était intéressant d'envisager un CUBESAT dont l'objectif serait de vérifier les dates des transits pour optimiser la planification d'ARIEL. En effet, les dates des passages d'exo-planètes devant leur étoile sont estimées avec une erreur d'autant plus importante que la dernière date de confirmation de transit est ancienne. Si CURE peut actualiser ces dates avec une haute précision, c'est autant d'économiser dans les marges de planification d'ARIEL.

Bien évidemment, l'enjeu ne se justifie que pour des éphémérides qui ne peuvent être confirmées que depuis l'espace. Le signal collecté doit être suffisant pour *fitter* un modèle de baisse de luminosité à partir de la photométrie faisable avec un CUBESAT. Un doctorant anglais invité pour l'occasion, Billy Edwards, était à la manœuvre sur cet aspect. Sous la coordination de Vincent Lapeyrière et avec la mobilisation d'une équipe de l'Observatoire de Tartu expérimentée sur les CUBESATS ESTCube-1 & -2, nous avons organisé une campagne d'ingénierie concourante d'une semaine à Meudon en 04/2019, entre deux écoles d'été à Tartu

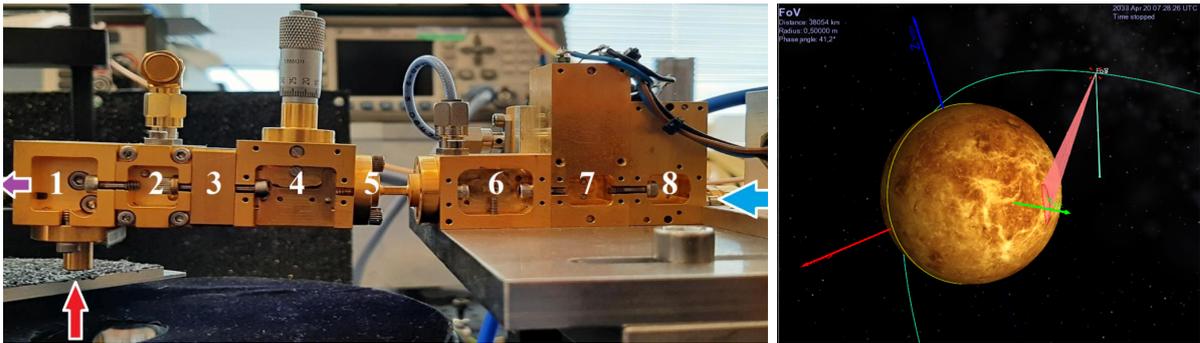


FIGURE 4.11 : À gauche, instrumentation TERACUBE : le signal à observer à 600 GHz est injecté par le bas dans le mélangeur (1) avec un signal de référence à 300 GHz obtenu par multiplications successives (2 à 8) ; le signal hétérodyne de 1 à 10 GHz est recueilli à gauche, amplifié et numérisé (crédit : J. Treuttel). À droite, exemple d'orbite et de pointage pour TERACUBE autour de Vénus.

(2018 et 2019) qui ont exploité ce cas scientifique. Je me suis chargé de la préparation d'une architecture MBSE initiale et de l'animation de la semaine à Meudon. Le résultat de la campagne a recensé deux familles de cibles, pour deux configurations optiques différentes (mono-cible de type PICSAT ou multi-cible de type imageur) qui pouvaient justifier un profil de mission. Mais en conclusion, ces familles ont été jugées trop limitées par rapport à la population cible d'un millier d'étoiles d'ARIEL.

Notons que le besoin pour la préparation d'ARIEL a été bien établi depuis 2017 : pour les cibles qui pouvaient être confirmées du sol, un programme de science participative a été mis en place, dit « ExoClock »⁴, avec déjà 800 participants dans le monde.

De par sa thématique des exo-planètes très appréciée du public, le projet CURE a constitué un excellent support pour initier des groupes à l'ingénierie concourante. J'ai donc reformulé l'enjeu scientifique pour l'adapter à une cible d'étudiants de M2 à D1, et les enjeux d'ingénierie pour des étudiants de L2 à M2. Concrètement, si des doctorants sont présents, ils doivent partir d'une estimation de SNR qui déterminera le nombre d'observations requises pour une liste d'exo-planètes imposées. S'il n'y a pas de doctorant, ce nombre est directement fourni dans la table des exo-planètes à observer. Pour l'ingénierie, il est possible, selon les niveaux des participants, d'inclure les dimensionnements d'énergie, de contrôle d'attitude ou de data-volume. J'ai déjà pu animer quelques sessions sur cette base (Cf. § 6.3).

Enfin, la relation avec l'Observatoire de Tartu s'est développée. Elle avait démarré à l'occasion de ma rencontre en 2018 avec Andris Slavinskis, alors post-doc à NASA Ames, à la conférence IEEE Aerospace de Big Sky (MT/USA) autour des missions interplanétaires vers les atéroïdes. Nous nous sommes trouvés des scientifiques en commun sur ARIEL, V. Coudé du Foresto de mon côté et Anna Aret à Tartu, puis un financement par la Europlanet Society, suggéré par son président Nigel Mason, également rencontré à Tartu. La relation s'est poursuivie avec le co-encadrement du doctorant Janis Dalbins (Cf. Chap. 5), déjà dans l'équipe invitée à Meudon pour la campagne CURE. Ce projet illustre donc aussi comment mon activité de réseau (Chap. 6) fait naître des collaborations.

4.3.4 TERACUBE : les vents de Venus

Alors que le Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères, Observatoire de Paris-PSL (LERMA) avait obtenu sa sélection pour la chaîne TéraHertz de l'instrument SWI à bord de la sonde JUICE de l'ESA, Jeanne Treuttel et ses collègues ont vu dans le format CUBESAT le moyen d'embarquer cette instrumentation pour

⁴<https://www.exoclock.space/>, visité 24/04/2024



FIGURE 4.12 : *Prototype au sol de COSMOCAL : une source à 270 GHz et une grille de polarisation éclairent, depuis Pico Veleta, l'antenne de 30 m de l'IRAM à quelques kilomètres en contre-bas.*

d'autres destinations que Jupiter. Avec la complicité de Raphaël Moreno du LESIA dans un rôle de P.I., ils proposent à partir de 2021 le projet TERACUBE (Fig. 4.11) comme satellite d'accompagnement de l'armada qui partira vers Vénus à la fin de la décennie, en particulier la sonde ENVISION de l'ESA. Le spectre entre 300 et 600 GHz permet en effet de mesurer l'abondance et le mouvement de traceurs de l'atmosphère de Vénus, à des altitudes non couvertes par les autres missions planifiées, pour ainsi compléter l'exploration en profondeur de notre plus proche voisine, jusque-là plutôt délaissée.

CENSUS intervient en priorité pour le profil de mission de TERACUBE. Il y a, d'une part, le portage d'une technologie prévue pour Jupiter et revisitée pour Vénus par la thèse de Tomas Thuroscy (collaboration LERMA-IETR-C2N⁵), dans un format bien plus compact et un environnement a priori bien plus chaud (collaboration LERMA-LESIA). D'autre part, il faut concevoir une stratégie d'observation, et à nouveau l'approche MBSE sera ma réponse au besoin de conseil de TERACUBE. L'ingénieur Feliu Lacreu que j'encadrais à CENSUS a apporté les profils de trajectoire et la modélisation sous VTS (logiciel gratuit de visualisation, voir Chap. 5). Sur cette base, j'ai proposé une stratégie de pointage par rotation permanente du CUBESAT sur son orbite, donc à faible coût de contrôle d'attitude, assurant alternativement l'observation de l'atmosphère à différentes latitudes et l'étalonnage par source froide lorsque tourné vers le ciel. CENSUS se charge des analyses géométriques (fauchées, heures solaires, angles zénithaux, couverture surfacique...). L'intérêt de l'architecture de MBSE est bien sûr de mettre en place ces calculs et représentations graphiques pour les actualiser facilement lorsque de nouvelles hypothèses sont envisagées. Les techniques d'ingénierie concourante mobilisées pour TERACUBE, aux stades de maturité CML 2 à 3, se sont concentrées sur le « Manifesto » et l'identification des « métriques », étapes qui seront présentées au chapitre 5.

4.3.5 COSMOCAL : cible d'étalonnage

Je finirai cette liste détaillée par l'exemple COSMOCAL (Ritacco et al. [30]) qui diffère des autres projets à deux titres : tout d'abord il est lui-même l'observable et non l'observateur, de plus il ne sera finalement peut-être pas un CUBESAT. Ainsi, l'objectif de CENSUS est d'abord d'appuyer les laboratoires de PSL pour explorer des options nouvelles, sans préjuger du format le mieux adapté.

En l'occurrence, ce projet permettra l'observation de la *polarisation* du fond cosmologique. Cette information, en complément des cartes de température, est une signature des âges

⁵IETR : Institut d'Électronique et des Technologies du numéRique - UMR CNRS 6164, Rennes
C2N : Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies - UMR CNRS 9001, Saclay

primordiaux dont la connaissance manque toujours et représente la prochaine étape pour dévoiler l'origine quantique des structures de l'univers. Le projet est porté par Prof. François Boulanger à l'École Normale Supérieure, PSL (ENS) avec Dr. Alessia Ritacco à l'université Tor Vergata de Rome⁶.

COSMOCAL doit être une source d'étalonnage pour des gros instruments au sol, voire dans l'espace si la mission LITEBIRD est sélectionnée par l'ESA. Plusieurs fréquences sont envisagées, autour de 90, 150 et 250 GHz. La difficulté est de placer la source assez loin pour obtenir une onde plane, tout en restituant parfaitement (à 0.1° près) l'angle de polarisation du signal émis. Mon rôle dans CENSUS pour COSMOCAL a été essentiellement de conseiller sur le champ des possibles avec les nanosatellites et les enjeux thermo-élastiques dans l'environnement spatial, lors de réunions de travail et de préparation de demandes de financement. Par nos relations industrielles, nous avons de plus ouvert l'option d'un placement de COSMOCAL en orbite géostationnaire, ce qui paraissait au CNES trop cher de prime abord, mais pourrait se révéler plus économique qu'un développement complet de nanosatellite. Mais nous appuyons plutôt l'option « GEO » : non seulement l'orbite basse conduirait à une poursuite trop rapide par des grandes antennes sol et l'orbite moyenne imposerait des contraintes de désorbitation coûteuses ; de plus, les performances de connaissance d'attitude, même si 0.1° est modeste, supposeraient tout de même une datation précise des télémétries et des opérations sol non triviales.

4.3.6 Et d'autres encore

Il n'est pas possible ici, ni pertinent, de détailler tous les concepts de nanosatellites que les chercheurs ont présentés à CENSUS. Le lecteur sera au moins convaincu que leur imagination est sans limite, pour peu qu'on leur offre des opportunités pour réaliser leurs idées. Je cite ici encore quelques collaborations qui ont été envisagées ou initiées, pour lesquelles j'ai été sollicité et qui ont été porteuses de sens pour CENSUS :

- Au premier confinement Covid-19, beaucoup d'étudiants sont restés « coincés » dans leur chambre avec un stage précaire en télétravail. Je me suis retrouvé à encadrer un tel stagiaire de M2 pour bâtir une architecture MBSE pour le CUBESAT qu'il étudiait. Ce stagiaire, Lancelot Le Guern, est devenu par la suite l'ingénieur système de la jeune entreprise GAMA que nous avons appuyée lors de quelques tests et qui a lancé la première voile solaire française début 2023, sur un CUBESAT 6U de NANOAVIONICS.
- SCION-X (INSPIRESat-6) est un CUBESAT taïwanais, porté par Loren Chang de l'Institut des Sciences Spatiales de la *National Central University*, Jhongli, Taïwan (NCU), en coopération avec NTU Singapour⁷. Cette collaboration a été ouverte sous l'égide du LabEx ESEP et j'ai été invité à une *Preliminary Definition Review* (PDR) pour ce projet de surveillance de la pollution atmosphérique (WANG et al. [31]). Plus tard, j'ai présenté l'approche MBSE qui a beaucoup plu pour sa capacité à structurer les différentes études au sein de l'équipe. J'ai alors été ré-invité à Taïwan pour l'introduire auprès de l'équipe locale (dont deux doctorants et des étudiants de Master). Hélas, la crise Covid a interrompu cette relation jusqu'à ce jour, ce qui a été une opportunité manquée.
- TUDSat est un projet étudiant austro-allemand⁸ pour tester la télécommunication laser entre Darmstadt (Allemagne) et Graz (Autriche), via réflexion sur un nanosatellite

⁶Dipartimento di Fisica, Università di Roma "Tor Vergata", Roma, Italy

⁷Nanyang Technological University, Singapour

⁸<https://tudsat.space/>, visité 28/04/2024

cible. Son chef de projet rencontré en conférence, Fabian Burger, a développé une architecture MBSE sur mon conseil et avec mon accompagnement de démarrage.

- OPS-SAT est un CUBESAT 3U réalisé et opéré par ESA/ESOC (Darmstadt), porté par David Evans [32]. De 2020 à 2024, OPS-SAT a été une plateforme spatiale de tests d'algorithmes embarqués. J'ai contacté l'équipe suite à un *Open Source CubeSat Workshop* et mon idée d'algorithme « AbC » (initialement développé pour BIRDY-T) a été sélectionnée et financée en vue de ses premiers tests en vol. Nous avons alors identifié, par sérendipité, une application inattendue, de caractériser les performances de stabilité en vol *de la plateforme* (voir encore §5.1.6).

L'écosystème CENSUS, pôle spatial, pôle d'expertise

Il est apparu des sujets sur lesquels je pouvais assez naturellement concevoir des pratiques originales, plutôt au début des projets, en phases 0/A. J'ai aussi repéré le besoin d'aller au-delà et de préparer les étapes d'intégration, dont les approvisionnements, puis d'opérations. J'étais moins compétent sur ces étapes-là, j'ai donc choisi d'embaucher des ingénieurs. Leur rôle a été déterminant pour installer un écosystème qui n'existait pas encore. Sans prétendre être complet, il présente déjà une vision à terminaison robuste et, espérons-le, pertinente.

5.1 Tout est projet

À CENSUS, « tout est projet » (en paraphrasant le monde *Unix*) : ceux que nous soutenons sous différentes formes, mais aussi ceux que nous conduisons en propre, afin de constituer notre « capital ». En général, ces derniers résultent d'un besoin apparu pour un projet de nanosatellite (souvent BIRDY-T) qui mérite d'être porté plus loin pour servir dans d'autres contextes, là où le projet initial ne peut pas les accompagner, en vue de financements propres. C'est prendre ainsi le contrepied de l'idéologie du *financement sur projet* qui prétend qu'une équipe qui a déjà la tête dans le guidon, compte-tenu de financements exsangues, trouverait encore des ressources pour réfléchir à du *Business Plan* (d'autant que la compétence *business* est aux antipodes de l'astrophysique, absente des embauches de laboratoires et de leurs tutelles, et des cursus que nous offrons).

J'ai ainsi mis en place des « projets internes » dans CENSUS, en tablant sur un besoin de lier les phases 0/A (faisabilité) jusqu'à E (exploitation) du cycle de vie d'un nanosatellite, au rythme des ressources que je pouvais y impliquer.

5.1.1 Plateau PROMESS, profils de mission

PROMESS, « PROfils de Mission et Enseignements en Sciences Spatiales », est le plateau d'ingénierie concourante de CENSUS. Je l'ai conçu et réalisé en 2016-2017, en partage avec l'Unité de Formation et d'Enseignement, Observatoire de Paris-PSL (UFE). Le Plateau PROMESS comporte 21 postes informatiques pour l'UFE avec un système Debian qui leur est propre, dont 7 machines sont en plus équipées d'un système Windows dédié à CENSUS. Une projection confortable sur 2 écrans géants de n'importe laquelle des 7 machines, ainsi qu'un système audio de qualité pour des participants distants, complètent l'équipement (Fig. 5.1). Nous avons donc une salle confortable et très opérationnelle.

Mais le plus important n'est pas, et n'a jamais été, dans les équipements ou les logiciels (les participants utilisent d'ailleurs autant nos postes que leur propre ordinateur avec leurs propres

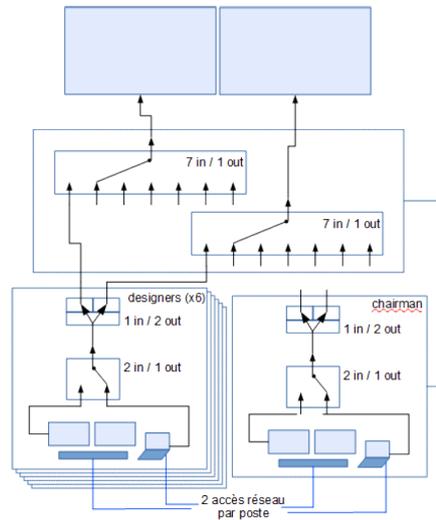


FIGURE 5.1 : Partages video entre stations informatiques du Plateau PROMESS.

logiciels métier). L'important est dans la méthode d'ingénierie selon laquelle les campagnes sont organisées et animées, cette méthode est présentée au §5.2.

5.1.2 DOCKS, prototypage rapide

Design and Operations Cross-checking Services, suite logicielle open-source de CENSUS (DOCKS), Fig. 5.2, est codée actuellement en *python*¹ et placée sous license GNU GPL v2. Son utilisation facilite le prototypage d'un profil de mission, donc typiquement en phases 0/A, mais aussi en préparation de la phase E.

Plusieurs modules sont déjà réalisés : propagateur de trajectoire à pas flexible avec modèles de perturbation personnalisables, calculs de quaternions selon des stratégies de pointage proposées, calcul des événements d'intervisibilité (éclipses, visibilités de stations sol, occultations entre objets), modélisation et estimation d'énergie à bord², serveur DOCKS à distance pour lancer les calculs sur une machine CENSUS par *drop & collect* qui évite une installation locale pour l'utilisateur. D'autres modules sont en préparation : stratégies de propulsion continue, génération de trajectoires coniques simples, modélisation et estimation de data-volume, modélisation générique d'une boucle de contrôle d'attitude (coopération avec Fabio de Oliveira Fialho de l'université de São Paulo).

Démarré vers 2013 avec le propagateur pour les besoins de BIRDY-T, DOCKS a impliqué plusieurs dizaines d'étudiants stagiaires ou en modules courts. À l'époque, les ingénieurs étaient formés sur le – très cher – logiciel STK³ (suivant la stratégie commerciale – toxique – de licence pédagogique qui les rend captifs), les alternatives étant STELA par le CNES, en France, mais limité à l'orbite terrestre, ou GMAT en open-source par le Goddard Space Flight Center (NASA), mais à pas fixe (à l'époque), difficile de prise en main et restreint en termes de perturbations. Il a fallu faire aussi bien, d'abord en termes de validation, et même mieux pour couvrir les besoins poussés de BIRDY. La validation a franchi un pas important grâce à Tomás Nunes en 2024 (M2 de TUDelft, en stage à CENSUS) qui a conduit des tests comparatifs sur une série de scénarios soigneusement choisis, entre DOCKS, GMAT, TUDat⁴

¹ce qui pose désormais des problèmes de performance

²ce module est toutefois en maintenance, suite à des régressions observées

³par ANSYS Government Initiatives (AGI)

⁴par Tudat Space, à l'Université Technologique de Delft, Pays-Bas

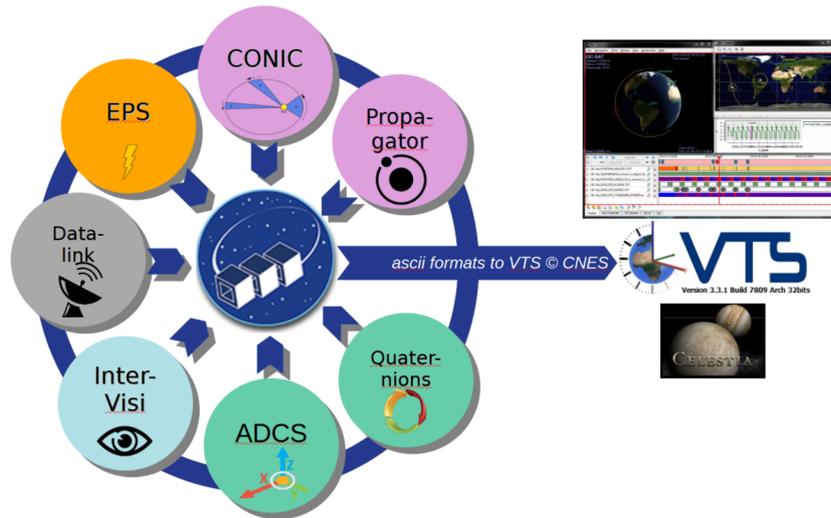


FIGURE 5.2 : Suite logicielle open-source (licence GNU GPL v2), pour prototypage précoce d'un profil de mission nanosatellite. À droite, toutes les sorties de DOCKS sont formatées pour une visualisation directe par le logiciel gratuit VTS du CNES (qui utilise le moteur graphique open-source CELESTIA).

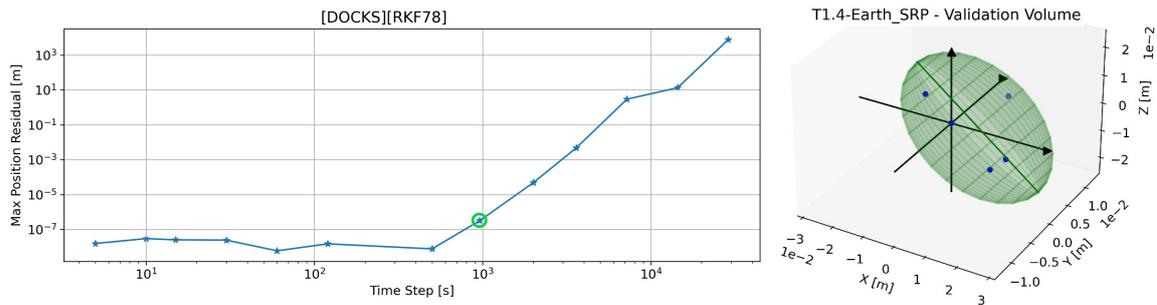


FIGURE 5.3 : Exemples de test du propagateur de DOCKS. À g. : choix du pas de temps, dans un régime d'erreur numérique non aléatoire (truncation error regime). À dr. : résiduels par comparaison avec GMAT, FreeFlyer et TUDat, après 24h de trajectoire en orbite terrestre, en considérant la pression de radiation, hors éclipses. (T. Nunes, 2024).

et FreeFlyer⁵. Par exemple en figure 5.3, après analyse des erreurs liées soit à la méthode de calcul, soit à l'ordinateur qui calcule, un pas de temps est choisi et les intégrateurs des différents logiciels sont comparés. Ces tests montrent que les différences entre DOCKS et les autres propagateurs, pour une trajectoire de 24 heures, sont incluses dans un ellipsoïde de moins de 3 cm d'envergure, donc que DOCKS est au niveau de l'état de l'art.

Ce haut niveau de validation est désormais la règle pour tous les modules de DOCKS. Il est déjà atteint avec le propagateur, les stratégies de pointage et les calculs d'intervisibilité. L'idée ensuite est de conserver et d'enrichir les tests, à chaque évolution, de les systématiser en les intégrant dans une chaîne de production CI/CD : le gestionnaire de code de DOCKS (GitLab) inclut ce mécanisme de tests après chaque évolution, et de déploiement sous forme de *release* à certaines étapes. Le CI/CD permet en plus de sécuriser la non-régression du code et la cohérence des versions entre modules.

Mes ingénieurs sont intervenus directement dans DOCKS pour consolider et professionnaliser les développements à différentes étapes, ainsi successivement Sébastien Durand, Rashika

⁵par *a.i. solutions*



FIGURE 5.4 : *Salle propre et Moyen d'essai « FLATSAT » de chaînes fonctionnelles simples de COTS. Un brevet est envisagé et impose le masquage ci-dessus.*

Jain, Thibault Delrieu et Feliu Lacreu, avec une priorité désormais sur le CI/CD. Le concept même de CI/CD, d'ailleurs, peut certainement s'élargir à d'autres outils comme l'approche MBSE, ou des outils non logiciels, ce qui rejoint la préoccupation de lier les phases de développement de 0/A à E, comme exprimée pour le futur de l'écosystème CENSUS.

5.1.3 VEGA, intégration

VEGA est la salle propre de CENSUS. Un chantier important du LabEx ESEP a consisté à ré-habiller un bâtiment en 2018, pour y créer deux salles propres, baptisées ARIANE et VEGA par le LESIA qui les gère : ARIANE récupère la cuve à vide thermique du LESIA, VEGA est dédiée aux nanosatellites. Les salles sont en classe de propreté ISO 5, ISO 7 sous deux flux laminaires disponibles, et compatibles des exigences de protection planétaire, elles peuvent être entièrement isolées de toute lumière extérieure et disposent de deux caméras de surveillance. J'ai pris en charge les particularités pour VEGA lors du chantier, en m'appuyant sur l'expertise de Jérôme Parisot, responsable des salles propres. Même si l'activité de CENSUS en 2018 (année de lancement de PICSAT) n'en était pas à intégrer des satellites en série, son inauguration par Alain Fuchs, devenu président de l'Université Paris Sciences & Lettres (PSL), a été une étape programmatique importante. VEGA est utilisée régulièrement par CENSUS pour accueillir des tests de CASSTOR ainsi que des projets étudiants (du Master OSAE et du programme gradué), elle a été louée à une entreprise (GAMA, qui a lancé son satellite en 2023 et a réalisé chez nous ses premiers essais de pliage de voile solaire) et prêtée pour intégrer l'instrument MIRS qui volera vers Phobos, sur la sonde spatiale MMX de la JAXA. Enfin, VEGA stocke une grande partie de nos COTS et accueille notre nouveau moyen d'essai « FLATSAT » (voir ci-dessous).

Par ailleurs, en lien étroit avec la salle propre, le **VEGA Kit** désigne un ensemble de COTS achetés par CENSUS en 2019 et 2020 pour se familiariser, avant et à la place des projets, avec ce que le *NewSpace* peut offrir : roues à inertie, caméra, ordinateur de bord, panneaux solaires, carte de puissance, kit telecom... Non seulement nous expérimentons ainsi les processus d'approvisionnement, et ce après le bouleversement mondial provoqué par la Covid-19, mais en plus nous concevons de nouveaux modules pédagogiques, en particulier en électronique embarquée, par et pour nos étudiants, par exemple pour une Master Class, les modules projets du Master OSAE ou les stages de découverte des laboratoires du programme

gradué. Cette activité de « test » est cruciale pour l'intégration de systèmes spatiaux et donc dans le *NewSpace*. Pourtant les compétences ne sont pas enseignées dans les cursus d'ingénierie spatiale et pas du tout dans les formations de chercheurs en astrophysique. Expérimentés avec ces systèmes « sur catalogue », parfois échaudés lorsque la *datasheet* ne correspond pas au produit, lui-même non testé avant livraison⁶, nous pouvons mieux conseiller les projets dans leur plan de développement.

Une autre utilisation du VEGA Kit est de directement prêter des COTS aux équipes qui souhaitent se familiariser ou ont un besoin ponctuel : nous devrions intensifier cette formule dans les années à venir, avec la création de la fédération Nanosats (fédération de recherche CNRS), la nouvelle Académie Spatiale Île-de-France (Cf. § 6.1.1) et le groupe des « FabLabs » de PSL.

Nous allons poursuivre dans cette voie en développant des montages électroniques de COTS facilement déployables lors de prêts. Ces montages seront conçus et soigneusement testés dans le cadre plus large de la fédération Nanosats : une embauche est prévue en 2024 dans ce but et la démarche s'inscrit dans une stratégie plus large de *Hardware-in-the-Loop* qui prendrait le relais de l'approche MBSE (Cf. § 5.2).

5.1.4 FLATSAT, validation

Le **FLATSAT** est notre plus récent moyen de test et d'intégration en salle propre, donc pour les phases C/D. Sa vocation est aussi de sensibiliser une équipe projet au moment où elle prépare son plan de développement, donc en phase B, pour bien dimensionner ses phases C et D. Mon idée est venue du besoin de montrer, et tester, des chaînes fonctionnelles plus ou moins complexes de COTS (ex. : panneaux - carte EPS, ou roue à inertie - OBC - imageur...) sans re-fabriquer des harnais toujours similaires mais jamais identiques, qui deviennent aussitôt une forêt de fils partant dans tous les sens. Notre ingénieur et doctorant Janis Dalbins a pris en charge ce projet fin 2022. Il l'a augmenté d'un concept de contrôle à distance issu de sa propre expérience sur le nanosatellite estonien ESTCUBE-2, pour limiter le plus possible la présence en salle propre. Nous envisageons un brevet, sans trop savoir s'il y a un marché, d'où le masquage sur l'illustration de la Fig. 5.4 pour éviter une publication avant dépôt (voilà bien une injonction qui devient un frein à la recherche, pour des doctorants qui *doivent* publier leurs travaux!). Dans cet esprit, des contacts en « valorisation » ont été pris et un binôme d'étudiants du cursus PSL-iTeams a été impliqué pour des résultats attendus en 2024. La fabrication a été sous-traitée à SODITECH pour tout ce qui était harnais et nous avons sollicité l'expertise en assurance qualité de Vincent Leray à HENSOLDT.

La relation avec HENSOLDT, ou plus précisément son expert V. Leray, est un exemple d'ouverture vers l'industrie puisqu'il est désormais impliqué dans le comité scientifique de CENSUS.

Le FLATSAT est une étape importante vers le développement du support en phases C/D. Il s'inscrit lui aussi dans la stratégie à plus long terme de *Hardware-in-the-Loop*.

5.1.5 NANOSATGRID, opérations

NANOSATGRID est un projet proposé dès 2022 pour les phases E (exploitation) des nanosatellites. Son démarrage est chaotique : j'ai réuni un consortium de 10 partenaires (6 académiques, 3 privés, 1 associatif) autour de CENSUS et de l'entreprise EUTELSAT GROUP pour présenter une demande, non retenue, de financement à la Région Île-de-France.

La station sol initialement utilisée pour PICSAT avait été récupérée par mon ingénieur Sébastien Durand en 2018, avec plusieurs stagiaires impliqués. Modernisée puis déménagée

⁶mésaventure vécue par nous avec une roue à inertie de NANOAVIONICS, mais aussi par quasiment toutes les équipes CUBESATS si l'on en croit les retours d'expérience en conférences

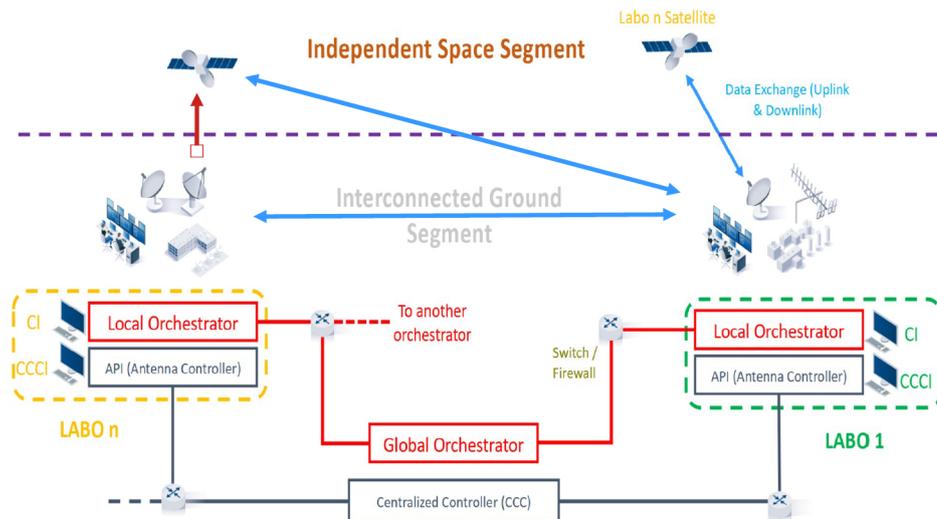


FIGURE 5.5 : NANOSATGRID est un projet de mise en réseau des stations sol académiques et R&T d'un consortium d'acteurs français.

de son emplacement précaire, nous l'avons connectée au réseau open-source de stations radio SatNOGS⁷, rassemblant plus de 3000 stations dans le monde pour une utilisation en réception seule. SatNOGS a été réalisé par la *Libre Space Foundation* (Grèce). Notre approche permettait d'éprouver notre système et de contribuer à la communauté : nous avons ainsi assuré plus de 9000 passes de télécommunications en un an et demie. Après une nouvelle phase de travaux pour réaliser et installer un châssis de maintenance, et remplacer les moteurs d'orientation des antennes YAGI, elle sera reconnectée à SatNOGS en attendant d'en avoir l'utilité sur des opérations d'émission-réception.

Le but de NANOSATGRID est d'aller plus loin et de rendre inter-opérables en réception et émission les stations sol des membres du consortium : le réseau ainsi constitué représente une couverture géographique et spectrale qui peut évoluer au cours du temps et assure un haut niveau de redondance lors des opérations des membres avec leurs nanosatellites respectifs. Bien sûr, le réseau a aussi pour but de s'ouvrir à des partenaires hors consortium qui voudraient accéder à des moyens de télécommunication spatiale à un prix « R&T », car les tarifs du privés sont déjà hors de portées de notre communauté académique. Un tel réseau nécessite d'adapter les infrastructures matérielles des partenaires, et de mettre en place, informatiquement et matériellement, un « orchestrateur » et un « contrôleur centralisé » (Fig. 5.5). Il est aussi prévu de pouvoir se déconnecter du réseau ou d'y connecter un orchestrateur supplémentaire comme celui du réseau SatNOGS, la *Libre Space Foundation* avait ainsi accepté d'entrer dans le consortium.

Alors que l'enjeu de R&T, de structuration public-privé, d'image, sociétal et même économique est majeur, le projet a été jugé de manière incompréhensible « trop » logiciel par la Région Île-de-France. Que faut-il comprendre ? Le projet reste néanmoins d'actualité et, avec notre partenaire EUTELSAT GROUP, nous l'adaptions en ce moment pour l'étendre et nous adresser à d'autres guichets de financement.

5.1.6 AbC, expérience en vol

Enfin, le projet interne **AbC** (*Angle-based Correlation*) tient une place à part : il ne cible pas du support aux projets mais une *technologie*, potentiellement valorisable. Répondant initia-

⁷SatNOGS Network, *Crowd-sourced satellite operations*, <https://network.satnogs.org/>

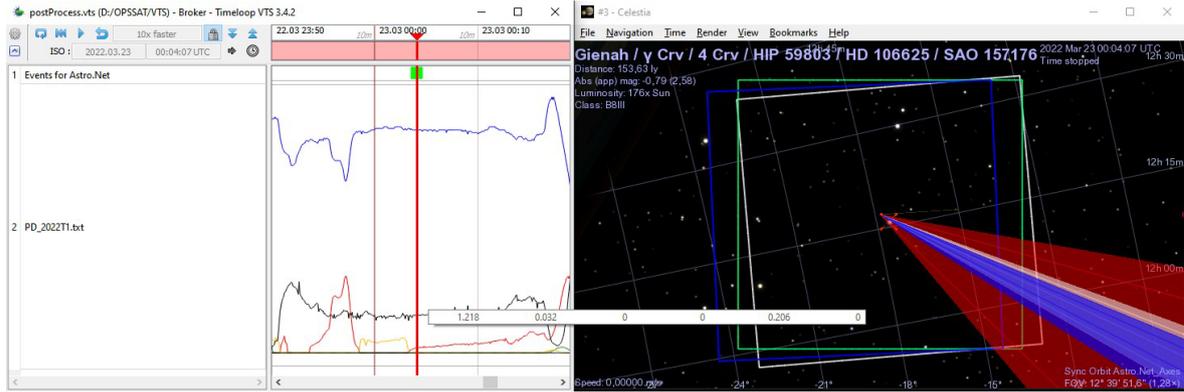


FIGURE 5.6 : Champs de vue de 10° tel qu'attendu (vert), reconstruit d'après les données embarquées d'attitude (bleu et à gauche), réel d'après l'image analysée (blanc).

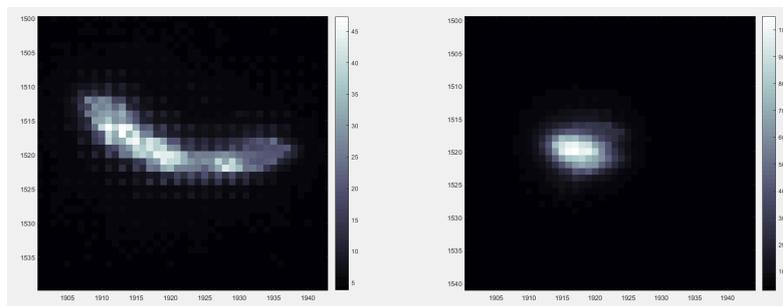


FIGURE 5.7 : Cinq images empilées de Sirius sans (à gauche) et avec recentrage (à droite). Exposition de 0.5s, soit 2,5s au total.

lement au besoin de navigation autonome pour un « capteur augmenté » ([18, 25, 26]) dans BIRDY-T, j'espère lui trouver des applications beaucoup plus générales dans le *NewSpace*.

Le but d'AbC est de fournir une mesure absolue de haute précision d'un *beacon* optique en avant-plan d'un champ d'étoiles. J'ai proposé la méthode dès ma thèse, à partir du constat que les distances angulaires du *beacon* aux étoiles voisines et reconnues dans le champ de l'image étaient fortement corrélées les unes aux autres. Dans le cas idéal où le *beacon* serait au barycentre des étoiles reconnues, la formulation analytique se simplifie grandement et aboutit à l'équation 4.1 annoncée dans la présentation de BIRDY-T (§4.1). À ce stade, des simplifications sont faites comme l'absence d'aberrations optiques, considérant qu'il sera possible de les étalonner plus tard.

En 2021, alors que l'équipe ESA en charge du CUBESAT OPS-SAT recrute des idées d'algorithmes originaux, je veux proposer AbC. Mais la faible stabilité du satellite risque de compromettre l'expérience en vol. Je me dis alors que AbC peut justement aider à diagnostiquer des instabilités (sérendipité!) et je le propose dans cette optique. Après quelques premières images prises en vol où je finis laborieusement par déceler des étoiles, le projet est financé par l'ESA à hauteur de 50 k€. Cela me permet d'embaucher un développeur passionné d'astronomie, Pédro da Fonseca, déjà expérimenté sur du processing d'images. Je développe un segment sol de préparation de mission afin de calculer les pointages réclamés à OPS-SAT et d'analyser les images retournées au sol. P. da Fonseca implémente en C++ mon algorithme embarqué, en vue d'une compilation croisée vers les cibles PC (à des fins de test au sol) et ARM (pour OPS-SAT).

Incidemment, OPS-SAT nous apporte aussi l'expérience du code embarqué dans une plateforme *NewSpace*, donc une expérience de phase E.

Avant même la première version embarquée, j’obtiens des images de ciel sur la base de mes demandes de pointages et je les analyse : elles montrent que les pointages inertiels sont biaisés (de quelques degrés) et instables comme montré en Fig. 5.6. Plus important, elles me permettent de quantifier les instabilités (Fig. 5.7) à basse fréquence (≤ 2 Hz) sous forme d’un effet de *wobbling* des images d’étoiles, et celles à haute fréquence (≥ 2 Hz) par l’épaisseur de la trace, probablement liée aux vibrations internes (à-coups de magnéto-coupleur ou vibrations des roues à inertie). Ces simples images permettent également de quantifier la sensibilité en fonction de la stabilité, le vieillissement du plan focal (déformations, pixels chauds), de même que les aberrations optiques par simple analyse sous **Astrometry.net** (Lang et al. [33]), solution open-source de caractérisation d’une image du ciel. Ces résultats sont publiés, avec l’équipe OPS-SAT en co-auteurs (Segret et al. [34]). Ainsi, alors que les pointages « Nadir » semblent satisfaisants pour l’observation de la Terre, les pointages inertiels apparaissent trop exigeants pour la plateforme. Nos résultats conduisent l’équipe OPS-SAT à essayer de nouvelles stratégies. Lorsque notre première version d’AbC est prête en C++, nous la faisons voler et constatons que les images sont bien prises, que des vignettes autour des étoiles attendues sont bien extraites... mais point d’étoiles dans les vignettes, ni nulle part dans les images ! Nous continuerons le développement et je continuerai de proposer des pointages, mais nous ne parviendrons plus à obtenir d’images stabilisées depuis OPS-SAT, malgré l’implication très importante de toute l’équipe OPS-SAT dans ce sens. Le pointage du satellite semble se dégrader inexorablement et la trainée atmosphérique se fait de plus en plus sentir alors qu’il descend vers l’atmosphère (rentrée estimée pour le 24/05/2024 selon l’ESOC). Notons encore que nous avons un intérêt annexe de travailler sur OPS-SAT, du fait que le système de contrôle d’attitude sélectionné en COTS était le même que sur PICSAT, celui de BERLIN SPACE TECHNOLOGIES... semble-t-il avec le même mauvais résultat.

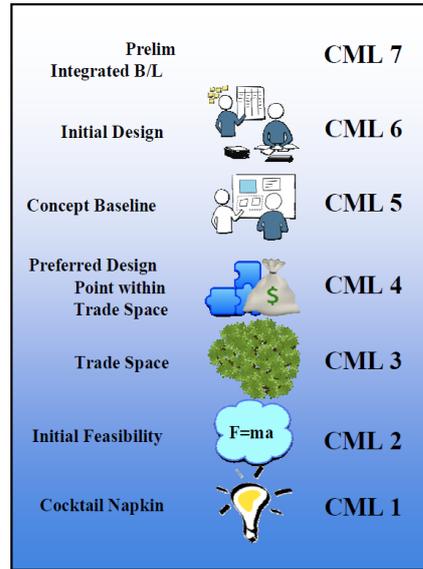
OPS-SAT n’en demeure pas moins une expérience très riche. Excitante aussi pour moi, puisque j’y retrouvais le rythme et le sel des opérations spatiales que j’avais vécues lors de mon expérience avec VENUS EXPRESS.

- Pour AbC, nous avons acquis la conviction qu’un traitement embarqué est faisable pour caractériser la stabilité d’une plateforme par des mesures intensives (donc sans téléchargement au sol des images *full frame*), même s’il reste à tester sa sensibilité par rapport à toutes les sources d’erreurs (cosmiques, aberrations, lumière parasite...). Dans cet objectif, un demi-financement de thèse a été obtenu en 2024.
- Le traitement intensif embarqué (images non redescendues au sol) permet en plus d’estimer quels sont les corrections d’alignements à appliquer à chaque contributeur de l’ensemble de la chaîne d’erreurs (capteur solaire, viseur stellaire, imageur), ce qui à ma connaissance est tout à fait original.
- Nous avons constitué une base de données d’images sur laquelle nous pouvons tester au sol cette sensibilité de l’algorithme, au moins partiellement, en vue d’une prochaine opportunité de vol.
- AbC est donc une solution sérieuse pour le *commissioning* en vol de nanosatellites, phase encore mal couverte de nos jours, qui ouvre un champ possible de valorisation vers « l’économie réelle » (comme on dit) et, ce qui intéresse davantage CENSUS, vers une amélioration des pratiques du *NewSpace*.

Enfin, nous savions déjà que les cameras du *NewSpace* étaient souvent mal adaptées à l’observation du ciel (faible sensibilité, matrice RGB, fortes aberrations) et que le traitement d’image à bord est un domaine où nous devons investir, à nouveau dans une perspective

Concept Maturity Level: CML

- ▶ Created by Mark Adler, JPL
- ▶ Inspired by TRL scale
- ▶ Covers the phase of mission concept formulation from “cocktail napkin” to NASA PDR
- ▶ **PDR = CML 8**
- ▶ Embraced by NASA PSD and now an integral part of JPL’s formulation approach



▶ 8

NASA Jet Propulsion Laboratory

July 6, 2009

FIGURE 5.8 : Récapitulatif de l'échelle de CML (Concept Maturity Level), extrait de Vane [35].

Hardware-in-the-Loop. OPS-SAT nous révèle un autre problème possible : alors que le *NewSpace* teste des contrôles d'attitude en contexte d'observation de la Terre, nous, astrophysiciens, espérons les utiliser aussi pour l'observation du ciel, peut-être à tort.

5.2 Méthodes d'ingénierie

Au-delà des moyens mis en place dans CENSUS pour les différentes phases de développement d'un nanosatellite, comme le Plateau PROMESS ou le FLATSAT présentés plus tôt (§ 5.1), j'ai mis l'accent jusqu'à présent sur le développement de méthodes d'ingénierie, donc ciblant les phases 0/A. Ces méthodes visent à faire émerger un « profil de mission » mais aussi à structurer le dialogue pour l'ensemble du projet dans ses phases ultérieures.

5.2.1 Trouver notre place : CML 1 à 5

L'ingénierie concourante se prête tout à fait à la structuration d'un projet de nanosatellite scientifique. Les agences CNES, ESA ainsi que le JPL pour la NASA, et sans doute d'autres, ont exploré ces pratiques depuis longtemps pour leurs missions spatiales. Des outils ont été développés, adossés à des « services » : par exemple, le CNES met en place une « étude PASO », animée par un ingénieur très expérimenté, qui produit un rapport sur la faisabilité technique, calendaire et budgétaire du projet. Ce rapport servira de support de décision pour le financement et la planification du projet. Au cours d'une telle étude, une campagne d'ingénierie concourante peut être organisée et mettre en œuvre des outils comme STELA (production et analyse d'orbites dans l'environnement terrestre), IDM-CIC (illustration 3D de la plateforme, collecte des caractéristiques nécessaires aux budgets systèmes, visualisations) ou encore VTS (visualisation de données spatiales dans un scénario de mission). D'autres outils « métiers » du CNES existent, ouverts à la communauté ou internes, par exemple pour le dimensionnement thermo-mécanique ou l'environnement radiatif. L'équivalent existe

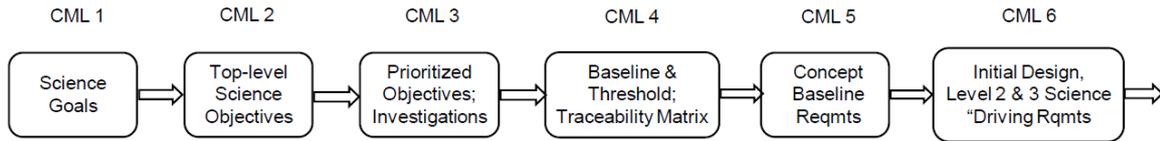


FIGURE 5.9 : Objectifs associés à chaque niveau de CML (Concept Maturity Level), extrait de Vane [35].

à l'ESA, avec le CDF (*Concurrent Design Facility*) à l'ESTEC, qui utilise encore d'autres outils. Le JPL a développé plus explicitement la notion de service, comme le montage possible d'une *Team-X*, composée de membres de l'équipe projet et d'experts du JPL. L'approche du JPL est de livrer des « produits » adaptés à la maturité du projet. Par exemple, un produit peut être le narratif du projet en vue de sa candidature à un financement, ou une opération de *costing*, sous-entendu une optimisation des coûts par une prospective sur les technologies utilisables ou à développer.

Dans un tel environnement où le niveau de professionnalisme de l'ingénierie concourante est si élevé, ne risquons-nous pas de refaire, en moins bien, ce qui se fait déjà ? La réponse, ce sont les « métriques ». Au début d'un projet, il lui manque ses métriques, c'est-à-dire ses paramètres clés qui exprimeront le niveau de réponse atteint par une solution particulière. À l'occasion de l'étude PASO pour le projet NOIRE, j'ai très vite remarqué que les experts du CNES soutenaient son fort potentiel mais attendaient de nous, les scientifiques, des chiffres que nous n'avions pas les moyens (humains) de leur apporter. L'implication du CNES a donc permis de décomposer le plus loin possible les attendus scientifiques et a conclu qu'il n'y avait pas de point bloquant identifié à ce stade. En d'autres termes, pour aller plus loin, il fallait une spécification scientifique structurée et, à cette condition, les guichets de financement nous écouteront d'une oreille très favorable, preuve en est les financements déjà obtenus comme la demi-thèse d'Erwan Rouillé que je co-encadre.

Alors que les propositions d'instruments par nos scientifiques suivent un cheminement bien jalonné de spécification scientifique, les projets de nanosatellites n'avaient pas cette approche. Sans surprise, puisque le paradigme du *NewSpace* nous invite à simplifier pour accélérer. Mais le résultat est que l'agence spatiale « ne comprend pas » ce que nous voulons : celle-ci se positionne comme experte des problématiques de plateforme mais ne peut pas nous remplacer pour concevoir la stratégie d'observation.

En fait, le JPL a théorisé cette difficulté dès 2009 par une échelle de maturité, le CML (*Concept Maturity Level*, Vane [35], Wessen et al. [36]), où la revue de définition préliminaire est organisée lorsque le projet a atteint un CML7 (Cf. Fig. 5.8 et 5.9). Dans un format typiquement américain, la « Team-X » a justement pour objectif de gentiment brutaliser l'équipe projet afin qu'émerge un positionnement fort : celui qui permettra de décrocher les financements, de sécuriser le planning et d'atteindre les objectifs affichés au départ (et donc de formuler les bons objectifs). Bref, c'est la mission du chef de projet ! J'en ai retrouvé une autre formulation lors de mon expérience à EADS Lanceurs (devenu ARIANEGROUP) sous la forme « OCOTOQ » pour *On Cost, On Time, On Quality*.

CENSUS se place au cœur de la Science avec l'Observatoire de Paris-PSL. Il apparaît naturel de positionner CENSUS dans le paysage du *NewSpace* comme un service de montée en maturité des projets, jusqu'à ce que les agences spatiales (par exemple) puissent prendre le relais, à partir de CML4 ou 5. À partir de là, les analyses au niveau de la plateforme spatiale sont conduites avec une bonne visibilité sur leurs conséquences scientifiques et, mieux encore, une bonne capacité d'adaptation de la stratégie d'observation (grâce en particulier à l'approche MBSE, détaillée ci-dessous). C'est exactement ce dialogue que le CNES souhaitait dans l'étude PASO pour NOIRE, et celui que nous avons eu, avec succès, pendant l'étude

PASO pour CASSTOR. Ce positionnement a ainsi motivé ma façon d'adapter ou de créer des techniques d'ingénierie, dans un contexte d'utilisation principale de « campagne PROMESS » comme il va être présenté maintenant.

5.2.2 Campagnes PROMESS

Acceptons un peu de marketing en parlant de « Plateau PROMESS » pour désigner le centre d'ingénierie concourante de CENSUS. Malgré la tendance actuelle de réduire tous les savoir-faire à une question d'outils, il ne suffit pas (hélas) de rassembler dans une même salle quelques personnes avec des logiciels, même sous licences coûteuses, pour faire émerger un concept de mission spatiale. Même en réunissant de brillants étudiants, il n'y suffira pas non plus : les étudiants seront peut-être sensibilisés mais aucun concept de mission utile n'en sortira. Car une campagne d'ingénierie concourante doit se préparer et viser des objectifs précis.

Préparations

Un format typique de campagne PROMESS est une semaine complète d'immersion au Plateau PROMESS. Une variante est un volume de 5 journées non consécutives. Parfois aussi, des contributeurs sont connectés à distance, d'où l'importance d'un excellent son pour supporter toute une journée de connexion. Un programme de travail est soigneusement préparé à l'avance :

- Identification, avec le responsable scientifique et le chef de projet, des participants à la campagne et de leurs rôles (optique, thermo-mécanique, ingénierie système...). En effet, il n'est pas rare que certaines compétences manquent en début de projet, les objectifs doivent donc être adaptés.
- Choix d'une problématique concrète à résoudre au cours de la campagne. Pour ce faire, je me suis inspiré des techniques du JPL/NASA et je propose de formuler l'objectif en fonction du CML :
 - Formulation du « manifeste » du projet (une sorte de profession de foi scientifique), par exemple pour répondre à un appel d'offre.
 - Explicitation des « métriques » de la future mission.
 - Structuration des exigences, en particulier la filiation des spécifications scientifiques vers les exigences d'ingénierie, cette filiation étant le moyen d'arbitrer le moment venu.
 - MBSE (voir ci-dessous), dans ce cas un gros travail de modélisation initiale revient à CENSUS, avec l'aide du scientifique pour sa partie, dans l'objectif de transférer la MBSE à l'équipe projet lors de la campagne.
 - Il peut aussi s'agir d'Analyse de risque, ou de *Costing* (pour nous, une confrontation à l'état-de-l'art) mais à ce jour nous n'avons pas l'expérience dans un format d'ingénierie concourante.
- Planification, invitations et sensibilisation de l'équipe pour la campagne.
- Commande du café pour 5 jours (eh oui!) et animation de la campagne.
- Préparation d'un livrable (produit par l'équipe, avec consolidation CENSUS).

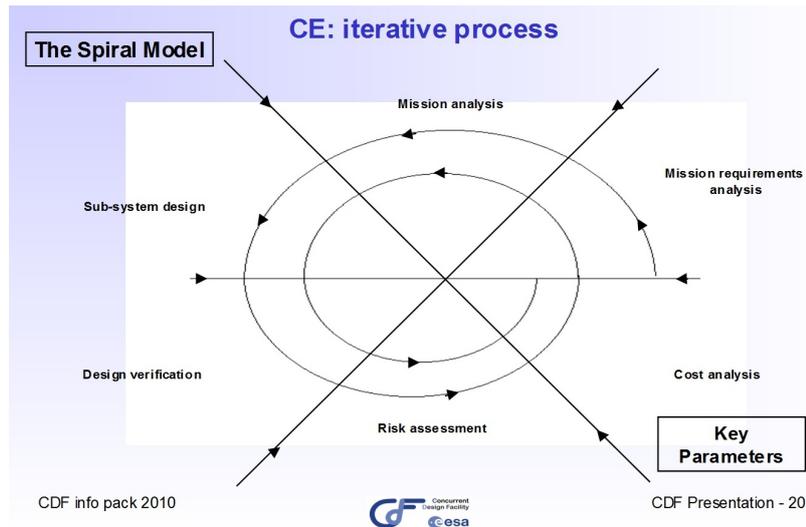


FIGURE 5.10 : Outil de maïeutique, Concurrent Design Facility (CdF) de l'ESTEC/ESA.

Animation

Parmi les savoir-faire irremplaçables, il faut ceux des chercheurs et ingénieurs en instrumentation. Leur présence sur un Plateau PROMESS est gage de succès. Il faudrait idéalement ajouter un savoir-faire d'ingénieurs plateforme et opérations.

Mais, pour focaliser les échanges vers un objectif commun, il faut aussi le « savoir-être » de l'animateur qui a lui aussi besoin d'outils, davantage méthodologiques :

- Celui que j'utilise systématiquement est le **modèle en spirale**, emprunté au *Concurrent Design Facility* de l'ESTEC/ESA (Fig. 5.10). Je l'utilise essentiellement comme outil de maïeutique avec l'équipe projet. Il permet de faire un récapitulatif intermédiaire de l'avancement de la campagne, typiquement deux à trois fois au cours d'une semaine.
- Ce modèle en spirale pousse, entre autre, à identifier les *Key Parameters*, nommés également ici « les métriques ». Je n'ai pas d'outil à proprement dit pour les identifier mais les métriques deviennent ensuite des instruments de pilotage et d'arbitrage dans la définition du projet.
- Le **Manifesto** est encore un exercice de maïeutique, c'est aussi un livrable de la campagne. Il consiste en une synthèse du projet qui récapitule les raisons fondamentales de faire le projet et les performances qui seront atteintes. Inspiré par le JPL, c'est un outil puissant dans une réponse à appel d'offre.
- Des **Tableurs & Listes**. Bien sûr le recensement des exigences, spécifications ou contraintes, de même que les risques identifiés, nécessite un outil. Plutôt que d'utiliser des outils de gestion dédiés et payants (comme DOORS⁸), nous nous contentons de simples tableurs, avec toutefois un paramètre de « filiation » entre exigences. Un modèle a été constitué qui suit les étapes de la mission (du pré-lancement au retrait de service) : ainsi, l'équipe raisonne sur les besoins à terminaison, puis décline (avec traçage des filiations) en besoins techniques et de développement. Cette approche est largement suffisante pour un nombre limité de spécifications (jusqu'à la centaine, ce qui est le cas aux débuts d'un nanosatellite), d'autant que leur formulation est tâtonnante au début et nécessitera de nombreuses revisites.

⁸ par IBM Engineering Requirements Management

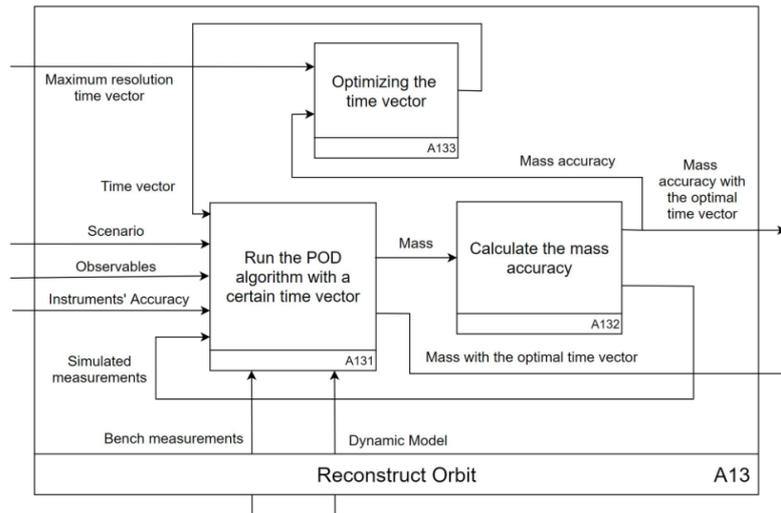


FIGURE 5.11 : Exemple de SADT pour le volet A13 de la démonstration au sol de BIRDY-T (Abd El Dayem, 2020, ref. interne BIRDY GEO-005).

- **Le MBSE** est la grande originalité de CENSUS : avec mon profil d'ingénieur système, je souhaitais une approche intégrant l'analyse fonctionnelle. Les cartes de processus forcent une vision à terminaison dans la conception de mission nanosatellite. Ces cartes sont développées juste après. Le MBSE vise à inclure « les métriques » identifiées et à restituer quantitativement la couverture scientifique atteinte, puis à l'actualiser au cours des arbitrages et du développement. L'adhésion d'une équipe à l'approche MBSE est rapide et facile. Mais son *appropriation* est moins évidente. De même, la formation à cette approche n'est pas simple, et fait partie de mes objectifs futurs.

5.2.3 Analyse fonctionnelle : SADT et MBSE

Nombreuses sont les méthodes d'analyse fonctionnelle qu'on enseigne dans des cours d'ingénierie système, mal vécus par les étudiants s'ils manquent de maturité technique. Parmi celles-ci, j'ai découvert à DASSAULT AVIATION les cartes de processus, utilisant la syntaxe des diagrammes « SADT ». Ils me servent à décrire tout système technique complexe, par exemple un nanosatellite, une partie de celui-ci, une organisation (celle de l'équipe projet) ou la mission nanosatellite elle-même. Alors que SysML et UML sont souvent mis en avant, et proposés dans des outils logiciels pour les décliner en pile documentaire (de bas niveau), je pense que c'est un mauvais choix : l'UML cible du logiciel, et non des systèmes en général (système humain, matériel...) et impose un typage trop précoce, car de trop bas niveau. Son insuffisance est connue (Normantas et al. [37]), il est même proposé par Marca [38] de compléter l'UML avec le SADT. Réciproquement, lorsqu'il s'agit de logiciel, en effet, il est proposé de compléter le SADT par l'UML (Baldwin et al. [39]).

J'ai adopté les SADT dans toutes les analyses fonctionnelles que j'ai accompagnées : le démonstrateur au sol pour BIRDY-T, le simulateur instrumental pour NOIRE, les divers profils de mission nanosatellites, notamment pour CURE (et son sous-produit mCure), CASSTOR et prochainement TERACUBE.

Modélisations simples mais efficaces

Sans détailler ici tous les concepts des SADT, grandement repris par la modélisation IDEF0, il est utile d'en mentionner quelques principes (Cf. Fig. 5.11). Le lecteur intéressé par la genèse

de ces modélisations de 1970 à 1981 pourra se référer à Ross et al. [40].

C'est un cahier de cartes de processus hiérarchisées les unes dans les autres en une arborescence. Chaque carte présente un « système » décrit par ses processus principaux (boîtes, verbes d'action), recevant ou utilisant un flux d'entrée sur sa gauche et produisant un flux de sortie sur sa droite. Certains flux d'entrée peuvent être considérés comme des *déclencheurs* et sont alors représentés comme arrivant du haut, ou comme des *mécanismes* (ou ressources), alors arrivant du bas. Le nombre recommandé de processus est de 3 à 6, sinon il faut décomposer. Le but des SADT est pour moi de localiser les transformations (processus), d'identifier ce qui les permet (entrées) et à quoi elles servent (sorties). On ne cherche pas à être exhaustif, mais cohérent : les interfaces doivent être identiques de la boîte d'une carte, à la sous-carte qui décrit cette boîte ; le but est de repérer *qui fait quoi*, mais pas *comment*, donc indépendamment de leur future implémentation (pour un code ou un système) ou de l'organigramme (pour une organisation). On est loin d'une modélisation SysML, mais loin aussi d'un automate façon *Matlab/Simulink* ou d'un algorithme, là encore orientés logiciel.

En fait, plusieurs initiatives visent à développer des logiciels de traçage et suivi d'un design, souvent avec l'intention de générer automatiquement du code ou des squelettes de code (ne serait-ce que pour la documentation). C'est le cas au *Concurrent Design Facility* de l'ESTEC/ESA avec son OCDT, *Open Concurrent Design Tool* qui s'appuie sur la référence normative ECSS-E-TM-10-25. Mais les enjeux ne sont pas les mêmes qu'à CENSUS : outre l'intérêt commercial bien compris pour des sociétés qui développent des « outils »⁹, l'ESA doit accueillir des dizaines de professionnels, notamment industriels, dont les contributions revêtent une dimension contractuelle forte, et l'ESA s'investit d'une mission de structuration des méthodes et des dialogues dans la communauté. Les équipes soutenues par CENSUS sont petites et visent la réactivité et la flexibilité dans un objectif de couverture scientifique : des outils trop complexes seraient probablement un frein à la maturation et à l'engagement des équipes, et détourneraient l'attention sur les outils plutôt que la stratégie d'observation. Toutefois, il n'est pas exclu de migrer vers des outils de type OCDT. Notre adoption du logiciel VTS¹⁰ du CNES nous fait *aussi* adopter des formats de données CCSDS. Par contre, il faudra veiller à rendre ces outils les plus transparents possibles pour les équipes projet.

Notre rôle de conseil, en tant que CENSUS, est d'installer une modélisation de la couverture scientifique d'un projet. Ce n'est donc pas de produire un « design », qui est le rôle de l'équipe projet, avec ses propres méthodes et outils. Il ne s'agit pas, non plus, de s'engager dans un simulateur instrumental qui pourrait prendre des années sans répondre à l'objectif de dialogue au sein du projet et avec les partenaires. Notre **approche MBSE** est donc de modéliser les *conditions* dans lesquelles l'observation est attendue : l'analyse associée trace ensuite *quand* ces conditions sont remplies et, alors, quel niveau quantitatif d'observation est atteint (SNR, couverture spatiale ou temporelle, cibles observées...). Le « système » que nous concevons dans un « profil de mission » est l'ensemble

{Nanosatellite, Trajectoire, Segment sol},

combiné à une projection calendaire donnée.

L'analyse fonctionnelle de ce système conduit à une modélisation très proche d'un diagramme SADT, dont les sorties sont calculées sur la base des « métriques » du projet (les *Key Parameters* du modèle en spirale), puis formatées pour visualisation sous VTS. La modélisation est spécifique à chaque projet. Prenons l'exemple de CASSTOR qui a fait l'objet d'une campagne PROMESS en préparation de l'étude PASO du CNES, et dont l'architecture MBSE est montrée en Fig. 5.12 :

⁹j'ai rencontré l'expression « sales & consulting cash cow » à propos de l'UML

¹⁰<https://timeloop.fr/vts/>, visité le 25/04/2024

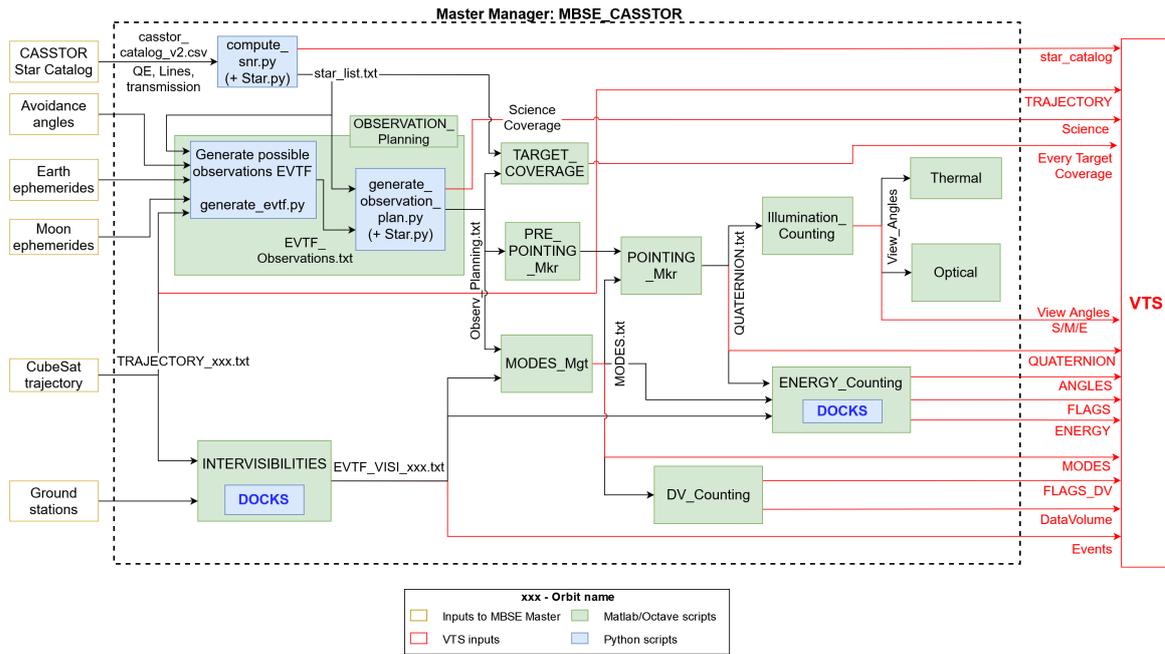


FIGURE 5.12 : Architecture MBSE pour CASSTOR en 2023.

- Les différentes boîtes sont les « modèles », des petits codes en différents langages (le plus souvent GNU Octave ou Python, parfois du bash, et un répertoire partagé). Certains modèles utilisent des modules de DOCKS. Les sorties sont des chronogrammes, des fichiers d'événements et des fichiers d'orientation en quaternions ou vecteurs, visualisables sous VTS.
- L'architecture initiale a été réalisée par mes soins, en adaptant des briques de précédentes architectures MBSE, les besoins étant globalement récurrents. Elle est préparée en avance d'une campagne PROMESS. Il en est de même pour les modèles scientifiques qui sont convenus avec les PI et PM, ici pour le catalogue d'étoiles, la stratégie de planification, les conditions de succès d'une observation (dont les angles d'évitement de lumière parasite). Après une première campagne en 2021, l'architecture a été enrichie et actualisée.
- Chaque boîte est sous la responsabilité d'une personne (de l'équipe projet ou de CENSUS) qui voit clairement de qui elle dépend et à qui elle fournit des données. L'actualisation de l'ensemble des modèles peut s'avérer complexe mais, fonctionnellement, chacun peut travailler entre deux mises à jour avec un jeu de données cohérent. Du coup, le nommage et le versionnage des données sont des éléments importants de l'approche MBSE.

Le problème de la synchronisation entre plusieurs acteurs devrait être couvert au moins partiellement, par le recours au CI/CD dans le courant d'une campagne. Même pour des données volumineuses, des solutions compatibles avec GitLab existent (*git-lfs*).

Une demande de budget pour un « ingénieur plateau » est en cours d'examen en 2024 par l'Académie Spatiale d'Île-de-France (Cf. 6.1.1). La mission de cet ingénieur couvrira l'ensemble du processus de préparation, d'animation et de capitalisation des campagnes, pour l'ingénierie et pour la formation académique ou continue. Cela illustre un axe fort de développement pour CENSUS.

Problème d'outil ou de méthode ?

Avec MBSE, on entend bien *Model-based system engineering*, d'un point de vue sémantique : la stratégie d'observation, le design optique, les performances de pointage fin... tous ces aspects sont consolidés grâce à une modélisation des conditions d'observation où les métriques du projet sont profondément ancrées dans les modèles, ceux-ci ne font « que » vérifier si ces conditions sont rencontrées au cours d'une simulation de mission.

Alors que je présentais cette approche sous l'appellation MBSE lors d'une conférence spécialisée d'ingénieurs systèmes (SECESA, organisée par ESA et CNES), je me suis entendu répondre qu'il s'agissait « plutôt » de modèles de missions, sous-entendu « pas » de MBSE. Je revendique cette appellation et souhaite plutôt réclamer aux tenants du SysML d'y renoncer dans leur « marketing » des contraintes qu'ils déportent chez le client : en effet, tout en confirmant la nécessité d'outils spécialisés à partir d'un certain niveau de complexité, les outils de modélisation appliqués aux CUBESATs me semblent surtout relever d'une idéologie du « tout outil » qui dénature le but de l'ingénierie concourante. Par exemple, un gestionnaire d'exigences ne conduira pas à modifier les angles d'évitement de lumière parasite, alors que mon approche le fera. Or un tel gestionnaire aura réclamé un effort substantiel sur des aspects non prioritaires en phase précoce.

Il faut surtout remarquer le potentiel de notre approche MBSE à CENSUS :

1. Elle structure le projet mais aussi l'équipe elle-même, et évolue facilement avec le temps. Alors qu'il y a toujours un flottement au moment d'arrêter des hypothèses de *design* de l'instrument ou de la plateforme, ici, une vision à terminaison est imposée dès le début. Elle permet à chaque spécialiste d'explorer des options dans son propre espace d'autonomie, puisque tout le modèle MBSE est distribué à chacun et reste fonctionnel. Chacun connaît les attendus de sa part et le but final à atteindre (des chronogrammes qui maximisent la science couverte).
2. Elle pourrait devenir contractuelle dans des appels d'offre, pour des systèmes critiques ou toute la plateforme qui, avec les nanosatellites, seront de plus en plus sous responsabilité de l'équipe scientifique (au lieu d'une responsabilité agence dans le spatial conventionnel). Par son format compact et son souci des outils *open source* (en tout cas jusqu'à présent), une modélisation complète MBSE est nomade et se porte sans difficulté vers d'autres ordinateurs (toutefois, les Macs sont plus capricieux avec VTS, une machine virtuelle Linux ou un Docker sont envisageables). Par exemple, le jeu de données pour CASSTOR en sortie de la campagne PROMESS représentait 685 Mo sans compression (hors bibliographie). Bien que nous n'ayons pas encore l'expérience d'inclure nos MBSE dans des clauses contractuelles, il apparaît plus facile d'imposer des livrables compatibles avec notre MBSE (format CIC-CCSDS) que de se faire imposer des outils payants et des données propriétaires : MS Office pour VBA et autres macros, Sharepoint ou simplement Google docs, STK, Matlab, Thermica, CATIA ou GoogleSketch... pour ne citer que ceux-là, souvent popularisés grâce à la stratégie – toxique – d'addiction par licence gratuite pour l'éducation. Sur le même principe, et là encore nous manquons de retour d'expérience, la modélisation MBSE devrait pouvoir accompagner aussi les phases D/E, pour la recette au sol et en vol des sous-systèmes, en intégration et validation de l'ensemble, avec une vision précise des impacts scientifiques de toutes modifications.
3. Elle pourrait s'appliquer aussi dans le spatial conventionnel au niveau de l'instrument, lorsqu'une proposition est soumise pour une mission multi-instrumentale. Dans ce cas, le profil de mission n'est pas facilement négociable mais ses conséquences sur la couverture scientifique sont directement analysables, justifiant alors d'installer un dialogue précoce

avec les agences sur la base de modèles (trajectoires, flexibilité des données d'attitude, calcul d'événements géométriques). Même si les équipes ont l'habitude de monter en maturité de manière bien plus structurée et documentée qu'avec les nanosatellites, elles gagneraient ainsi en adaptabilité et en capacité d'arbitrage. Ceci pourrait motiver une démarche de formation vers les chercheurs et les ingénieurs.

4. Il en est probablement de même pour des missions spatiales scientifiques non astrophysiques, voire des projets non spatiaux mais à haute complexité. D'où une possible valorisation vers la formation continue.

En 2018, le CNRS a suggéré que CENSUS conduise une ANF (Action Nationale de Formation) sur cette approche MBSE, en alternance annuelle avec une ANF déjà mise en place depuis peu par l'OVSQ appelée « ingénierie concourante au service des avant-projets ». Pour une telle formation qui touche beaucoup au savoir-être pour un public hors du domaine spatial, le format minimum que je ciblais était de 5 jours, soit celui d'une campagne PROMESS (ce que nos actions ultérieures confirmeront). Mais il y avait trop de contraintes : les agents du CNRS ne devaient arriver que le lundi midi au plus tôt (voyage hors week-end) et repartir dès le vendredi midi ; ils devaient être logés et nourris à proximité, ou alors transportés ; aucun budget n'était alloué pour CENSUS, ni pour le montage de la formation ni pour son animation. CENSUS ne pouvait prendre un tel effort en autofinancement et n'a pas donné suite à cette tentative.

Il n'en demeure pas moins un potentiel pour la formation continue qui pourra être examiné dans le cadre de l'Académie Spatiale d'Île-de-France (Cf. § 6.1.1).

5.2.4 Bilan intermédiaire

Nous n'avons pas encore le recul suffisant pour dire si les campagnes PROMESS, l'analyse fonctionnelle SADT et l'architecture MBSE vont durablement et positivement impacter les phases B, C, D, E des projets. En particulier, un enjeu me semble majeur à long terme : si ces phases conservent comme fil conducteur l'architecture MBSE mise au point en phase 0, à savoir sa maintenance et son utilisation comme référence dans les revues et dans les spécifications avec les partenaires, alors nos méthodes d'ingénierie auront démontré leur pouvoir structurant. Nous avons été rassurés de voir leur bonne acceptation par les projets eux-mêmes, par le CNES pour CASSTOR et par plusieurs partenaires extérieurs. L'étape ultime serait concrètement d'autoriser un paiement de fournisseur sur la base de tests directement issus des simulations MBSE : elle sera permise par la culture *Hardware-in-the-Loop* déjà évoquée.

Il nous reste à promouvoir nos méthodes dans d'autres secteurs et à les compléter par des automatisations et des contrôles de cohérences, inspirés du CI/CD que je souhaite adopter pour CENSUS. Bien sûr, il faudra aussi s'intéresser aux interfaces possibles avec les agences et industriels, tout en restant vigilant dans la problématique des licences captives : l'outil *OCDT* de l'ESA, les outils *IDM-CIC*, *STELA* (et d'autres) du CNES, les méthodes *Team-X* et α -*Team* du JPL...

Enfin, des problématiques récurrentes pour l'astrophysique (notamment) demeurent mal couvertes dans CENSUS. Elles nécessiteront des développements dédiés à l'échelle des nanosatellites. Il s'agit tout particulièrement des besoins pour pré-dimensionner les aspects suivants :

- dans DOCKS : le budget de puissance à bord (un module « EPS » a été initié dans DOCKS mais doit encore être repris et étendu), le budget de liaison (*data volume*, des modèles simplifiés sont toutefois disponibles), les stratégies de propulsion continue pour les injecter dans la propagation de trajectoire ;

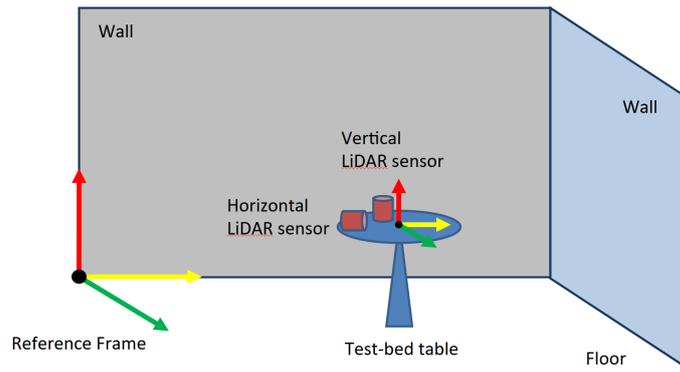


FIGURE 5.13 : Proposition de plateforme de tests ADCS (Hoang, 2017).

- les exigences de contrôle d'attitude, une collaboration sur ce thème a été ouverte en 2022 pour CASSTOR sur la base de l'expérience avec les données PICSAT disponibles, par Prof. Fabio de Oliveira Fialho de l'Université de São Paulo (Brésil), [41] ;
- le design thermo-mécanique, alors que l'expertise doit primer sur l'outil, il faut une approche qui se limite à modéliser quelques « nœuds » pour analyser les inerties thermiques et les options de contrôle passif ou actif (la reprise d'un code python de Tristan Buey du LESIA est envisagée) ;
- les compatibilités électro-magnétiques en conduction et rayonnement, une initiative est d'ailleurs à l'étude pour NOIRE avec la société ARIANEGROUP et l'école ISAE-SUPMECA, l'analyse précoce devant favoriser des solutions auprès des industriels.

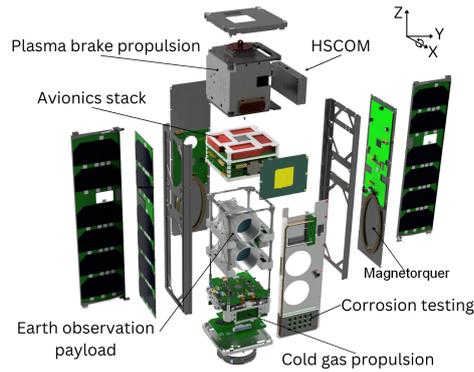
5.3 Rien sans les personnes

5.3.1 Les doctorants

Prof. Benoît Mosser, en tant que directeur pédagogique dès les débuts de CENSUS, nous a durablement installés dans la programmation de PSL avec un budget conséquent et récurrent. J'ai accompagné cet effort en proposant un candidat au cursus pré-doctoral PSL-ITI (*Institute of Technology and Innovation*) en 2014, Gary Quinsac. Celui-ci est devenu ensuite notre premier « doctorant CENSUS », en 2015, première thèse que j'ai co-encadrée : la thèse portait sur le contrôle d'attitude des nanosatellites équipés de propulsion continue ([17]). Comme nous le remarquons déjà avec la figure 4.2 pour BIRDY-T, cette thèse a conclu à une alerte vers la communauté et l'article associé [42] figure parmi les plus lus de ceux que j'ai coordonnés, avec plus de 1500 consultations et 19 citations rapportées par RESEARCHGATE¹¹ depuis 2020.

En parallèle de cette thèse, en 2016, B. Mosser a mis en place une co-direction de thèse avec USTH (*Université de Sciences et Technologies d'Hanoï*, Vietnam) pour le doctorant Hoang The Huynh, que j'ai alors co-encadré. Avec H. Hoang, nous voulions réaliser un plateau de test à 3 degrés de liberté, contrôlé en rotations par 2 lidars, pour stimuler les systèmes de contrôle d'attitude des nanosatellites (Fig. 5.13). Hélas, après une première année, les financements vietnamiens étaient insuffisants et H. Hoang a dû privilégier un emploi d'ingénieur dans l'industrie. Le design de l'outillage envisagé annonçait un projet complexe. Aujourd'hui, avec la collaboration de l'Université de São Paulo (§5.2.4), nous reprenons ce chemin en combinant simulations et tests impulsionsnels, en vue d'un volet spécifique dans DOCKS.

¹¹<https://www.researchgate.net>, visité le 18/03/2024

FIGURE 5.14 : *Vue éclatée de ESTCube-2 (Dalbins et al. [2]).*

Après le projet CURE, les liens entre CENSUS et l'Université de Tartu (Estonie) se sont étoffés. Nous avons reçu le doctorant Janis Dalbins comme visiteur, il s'est efficacement investi dans les travaux d'électronique embarquée où je n'avais pas la compétence. Il m'a été proposé de devenir son co-encadrant de thèse, aux côtés de Andris Slavinskis et sous la direction de Mart Noorma. J. Dalbins était chargé des télécommunications du nanosatellite estonien ESTCUBE-2 (Fig. 5.14, lancé fin 2023, celui-ci a subi un échec de séparation et est retombé dans l'atmosphère avec le lanceur) et de l'encadrement de nombreux étudiants de Tartu en électronique. ESTCUBE-2 a été un projet difficile, techniquement et programmatiquement, s'étalant sur une période de 7 ans, reprenant et complexifiant l'héritage de ESTCUBE-1. Le but était de poser les bases d'un nanosatellite « MAT » (*Multiple Asteroid Tour*) avec accélération continue par voile électrique « eSail ». Mon rôle a été de consolider la fin de thèse en structurant toute l'expérience technique et managériale acquise par J. Dalbins dans ce projet au parcours chaotique mais à haute valeur [2]. Si le satellite a été livré en temps voulu, il a néanmoins été rendu complexe par des financements fractionnés qui ont conduit à multiplier les charges utiles secondaires (apportées par les financeurs) et imposé de nombreux arbitrages de mission, jusqu'au report de la démonstration *deep space*. Ce co-encadrement de thèse a apporté dans CENSUS la culture des tests électroniques et nous a permis de proposer plusieurs modules pédagogiques pour les cursus de l'observatoire.

Dans le projet NOIRE, le soutien du CNES a permis d'engager une thèse pour structurer les exigences scientifiques d'un projet capable de servir de nombreuses thématiques. Erwan Rouillé avait fait un stage de fin d'études puis une première année comme ingénieur autour de l'idée de « Radio Source Tracker » (RST), sous mon co-encadrement, déjà avec Baptiste Cecconi du LESIA. Le RST avait été identifié comme un besoin, fonctionnant par reconnaissance de sources radio connues du ciel pour déterminer l'attitude globale de l'essaim (chaque nanosatellite ayant sa propre attitude), et aussi un démonstrateur du concept d'interférométrie par essaim. Il a permis, de manière exploratoire, de fixer un plan de travail pour la thèse d'E. Rouillé qui a suivi (toujours en cours), sous la direction de B. Cecconi et avec mon co-encadrement. Le périmètre technique et technologique est apparu immense et nous avons choisi les priorités suivantes : développer deux cas scientifiques porteurs (au sens des financements), en physique solaire et en planétologie, poser leurs exigences techniques et initier un simulateur instrumental qui illustrera ces deux cas. Notre objectif sera de modéliser la réponse instrumentale en présence de différents modèles de ciel proposés par la littérature, sachant bien que celui-ci n'est tout simplement pas connu aux fréquences ciblées (<10 MHz). En parallèle, nous reportons à des temps plus prodigieux en financements, des questions hautement prioritaires aussi mais que nous ne pouvons pas encore traiter, comme les compatibilités électro-magnétiques (une étude est néanmoins initiée, Cf. § 5.2.4), les synchronisations d'horloge ou le design d'antennes déployables.

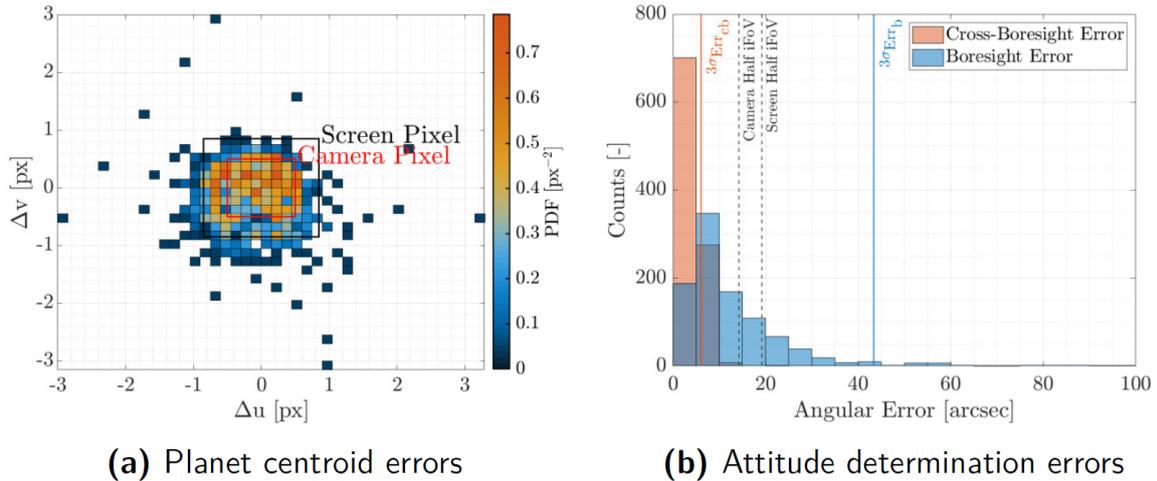


FIGURE 5.15 : *Statistiques du comportement d'un algorithme de centroiding dans une simulation Hardware-in-the-Loop incluant une simulation injectée dans un montage optique et le traitement de l'image obtenue (Andreis [43]).*

Ces thèses illustrent l'importance, pour moi, de la thématique d'exploration *Deep Space*. Comme je le notais en présentant le *NewSpace* (§3), selon moi l'Italie ne s'y est pas trompé.

L'université polytechnique de Milan (*Politecnico di Milano*) est devenue un acteur majeur, avec plusieurs articles proches de mon sujet de prédilection, la navigation interplanétaire. J'ai donc voulu m'en rapprocher. Après des discussions en conférences, Prof. Francesco Topputo m'a invité à Milan pour découvrir ses installations et m'a proposé début 2024 d'être rapporteur sur la thèse de sa doctorante Eleonora Andreis qui a soutenu avec succès le 9 mai 2024. Son sujet, « Autonomous Vision-Based Navigation for Deep-Space CubeSats : Algorithm Development and Hardware Validation », recoupe tout à fait les priorités de CENSUS, et les justifie toujours plus. Cette thèse, et l'ensemble des travaux de l'équipe de F. Topputo, sont une initiative ambitieuse d'approche *Hardware-in-the-Loop* : par exemple, la figure 5.15, extraite du manuscrit de E. Andreis [43], montre la performance d'un algorithme de calcul de centroïde, après injection d'une simulation dans un banc optique (RETINA) et exploitation de l'image produite par un capteur. Peut-être pourrions-nous apprendre et contribuer : ainsi nous pourrions soumettre des algorithmes sur leurs installations (UKF, AbC) et les en faire bénéficier sur leurs projets *deep space*, partager nos expériences avec les COTS (caméra, FLATSAT) et pour l'évaluation des systèmes de contrôle d'attitude. Avoir une contribution *deep space* sur un nanosatellite italien serait peut-être un début vers un nanosatellite *deep space* français.

Enfin, j'ai occupé un rôle de membre du comité de suivi de thèse du doctorant Ryan Dahoumane, aux côtés de Josselin Desmars de l'IMCCE, depuis 2023. Son sujet porte sur l'étude de la dynamique à long terme des satellites lointains de Jupiter et Saturne, sous la co-direction de Kévin Baillié et Valéry Lainey, également de l'IMCCE.

5.3.2 Les ingénieurs de CENSUS

Pierre Drossart et Coralie Neiner ont obtenu et renouvelé divers financements, tout particulièrement auprès de PSL. Nous avons ainsi pérennisé un deuxième poste à temps plein dans CENSUS, toutefois par des embauches en CDD. J'ai ainsi encadré successivement trois ingénieurs :

- Sébastien Durand (DOCKS et Station Sol),

- Rashika Jain (DOCKS, MBSE et OSAE),
- Feliu Lacreu (DOCKS, MBSE, station sol, PSL-Week et OSAE).

J'ai aussi embauché, sur d'autres budgets, l'ingénieur Grégoire Henry (d'abord stagiaire puis ingénieur) pour les analyses fonctionnelles du démonstrateur sol de BIRDY-T, puis l'assistant ingénieur Kirill Anohin pour son intégration. Ponctuellement, j'ai embauché en renforts les ingénieurs Thibault Delrieu (diagnostics CPU et parallélisation de DOCKS) et Louis Le Leuch (station sol). Enfin, pour le projet AbC, j'avais spécifiquement embauché le développeur Pedro da Fonseca (voir § 5.1.6).

Le doctorant Janis Dalbins a, par ailleurs, été embauché également sous contrat d'ingénieur en parallèle de la fin de sa thèse. Ainsi, depuis la création de CENSUS, j'ai encadré 8 ingénieurs et 1 assistant ingénieur.

5.3.3 Contributions pédagogiques et stages

Dès sa création, CENSUS prévoyait de jouer un rôle dans les cursus de l'Observatoire de Paris-PSL, essentiellement grâce à l'interaction entretenue par B. Mosser, directeur pédagogique de CENSUS.

Plutôt que de proposer des cours magistraux sur l'ingénierie système des nanosatellites, j'ai proposé des sujets pour des « modules projets » étudiants, que j'ai ensuite encadrés ou co-encadrés avec mon équipe, en différents formats :

- **Master Professionnel « Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace » (OSAE, Observatoire de Paris-PSL avec 3 co-tutelles) :** depuis 2014, un à trois projets par an ont été proposés, représentant 10 journées d'un binôme d'étudiant reçu à CENSUS, par sujet. Les sujets ont ciblé des contributions ou analyses sur ou avec DOCKS, ou des montages électroniques avec des COTS du VEGA KIT.
- **Programme gradué AstroParis, Observatoire de Paris-PSL :** depuis 2021, nous avons mis en place une maquette de MasterClass sur la thématique des « tests de chaînes fonctionnelles », couplée aux modules projets du Master OASE, utilisant le VEGA KIT et prochainement le FLATSAT.
- **PSL-ITI, puis PSL-iTeams :** ITI était un programme pré-doctoral d'un an mis en place par PSL et orienté sur la création d'entreprise, j'y ai mentoré deux équipes, l'une en 2014 qui comptait notre futur doctorant G. Quinsac autour de la propulsion continue, l'autre en 2015 autour du minage d'astéroïde. En 2023, le cursus iTeams de PSL, également à vocation entrepreneuriale et de valorisation de la recherche, a pris la suite de PSL-ITI. J'y ai proposé deux sujets, l'un sur AbC que j'ai mentoré et l'autre sur FLATSAT mentoré par Janis Dalbins.
- **École d'été Astronomie et Biologie, Tartu, Estonie :** j'ai participé à deux éditions de cette école (2018 et 2019), organisée par Prof. Dr. Wolf Dietrich Geppert de l'Université de Stockholm, Suède. J'y ai organisé et animé des sessions sur l'ingénierie système des nanosatellites, avec des exemples autour des projets BIRDY-T et CURE.
- **École d'été du GRGS :** j'ai participé à l'édition 2016, à Aussois, avec une présentation de la technique de détermination d'orbite de BIRDY-T, dans une version préliminaire de mes résultats de thèse.
- **Écoles d'ingénieurs :** j'ai pu mentorer à plusieurs reprises des projets longs sur BIRDY-T en écoles d'ingénieurs (niveaux M1 ou M2) pour ELISA (2013/14, 3 étudiants), Centrale Lille (2013-2015 7 étudiants, 2014-2016 7 étudiants) et Centrale Paris (2014/15



FIGURE 5.16 : Wall of Fame de CENSUS, incluant les noms des stagiaires de L2 à M2.

10 étudiants, 2015/16 3 étudiants). L'équipe 2015 de Centrale Lille a pu présenter ses travaux¹² lors de l'assemblée générale de l'Association Planète Mars (chapitre français de la *Mars Society*, dont j'étais administrateur), ce qui a entretenu un engouement de quelques années sur les thématiques martiennes dans leur école.

Enfin, puisque j'apprécie la relation spéciale qui se noue lors des stages, mes contributions pédagogiques ont principalement adopté ce format. Depuis les débuts de CENSUS, j'ai reçu 45 stagiaires en ingénierie spatiale, télécommunications sol, électronique embarquée ou dynamique de vol, sur les projets de nanosatellites ou les outils de CENSUS, encadrés directement ou co-encadrés avec mes ingénieurs. Depuis 2020, la Covid-19 ayant abîmé ce lien, nous avons institué dans l'équipe des présentations mensuelles des stages, en répétitions des futures soutenances, ainsi que l'inscription sur un « wall of fame » de CENSUS lors de chaque départ d'un stagiaire ou d'un embauché, avec remise de son exemplaire individuel au partant. Ainsi, les noms des stagiaires, de L2 à M2 sont récapitulés, pour la gloire, avec ceux des professionnels passés par CENSUS : la dernière édition du « wall of fame » est donnée en figure 5.16 (liste également en annexe). Cette liste n'inclut pas les nombreux étudiants reçus par CENSUS, plusieurs dizaines, lors des modules projets encadrés ou mentorés, ni les stagiaires de NCKU à Taïwan pour BIRDY-T.

¹²<https://planete-mars.com/le-projet-de-cubesat-birdy/>, 18/03/2015

6.1 Le « réseau »

6.1.1 Réseau académique

Il est inutile de détailler à quel point nous excellons, en France, à complexifier et ramifier nos organisations, mais peut-être est-ce la clé pour pérenniser nos actions. Nous avons vu au chapitre 3 que même à l'étranger, les guichets de financement ont mis du temps à s'installer, hormis pour les projets étudiants.

Le rôle de CENSUS dans la communauté a été déterminant dès ses débuts, sous l'impulsion de Pierre Drossart qui a réclamé que se tienne, sous l'égide du CNES, un forum dédié aux nanosatellites scientifiques. Ce forum a eu lieu le 1^{er} Avril 2015 et a réuni la communauté scientifique au siège du CNES à Paris. Il a vraiment lancé les discussions, révélant l'insuffisance des nanosatellites étudiants et conduisant au soutien par le CNES de (notamment) BIRDY-T, que j'ai présenté à cette occasion avec Daniel Hestroffer par un financement sur Appel à Proposition de Recherche (APR) et de NOIRE avec une sélection pour étude PASO/CNES, à laquelle j'ai participé en support de Baptiste Cecconi.

Lorsque Coralie Neiner a repris CENSUS en 2020, ses efforts ont pris le relais de ceux de Pierre Drossart pour convaincre le CNES d'ouvrir un guichet spécifique aux nanosatellites scientifiques. Elle a également créé, au 1^{er} janvier 2023, la Fédération de recherche CNRS Nanosatellites, d'abord en Île-de-France, et œuvré à la sécurisation du budget PSL en un contrat pluri-annuel (au lieu du contrat annuel qui s'est avéré un cauchemar de gestion). On l'a vu, ces contrats ont permis des embauches et des stages. Ces actions ont donné à CENSUS une forte dynamique et une bonne visibilité.

Mon rôle a donc été naturellement d'appuyer la fédération aux côtés de C. Neiner puisque j'ai été élu à son comité scientifique. J'ai pris en charge certaines actions de mutualisation (sous-systèmes de nanosats, montages et moyens électroniques partagés, segments sol). Toutefois, l'inertie de ces structures transverses impose plus de recul pour en dresser le bilan et nous n'en sommes qu'au tout début. Une action de la fédération, à laquelle j'ai pris part au cours de son premier atelier en 2024, a été de préparer une contribution pour la prospective CNES-INSU de 2024, exprimant les attentes de la Fédération pour un guichet dédié.

À un niveau plus technique, mon rôle dans la communauté pour l'émergence des nanosatellites d'astrophysique a adopté des formes variées :

- J'ai mis en place très tôt une solution de prêt de systèmes et outillages nanosats qui a permis à plusieurs projets d'expérimenter de tels systèmes. Par exemple, pour le projet OGMS-SA du LISA, un ensemble roue à inertie et plateau sur coussin d'air.
- j'ai participé régulièrement au *iCubeSat*, *Interplanetary CubeSat Workshop*, depuis la

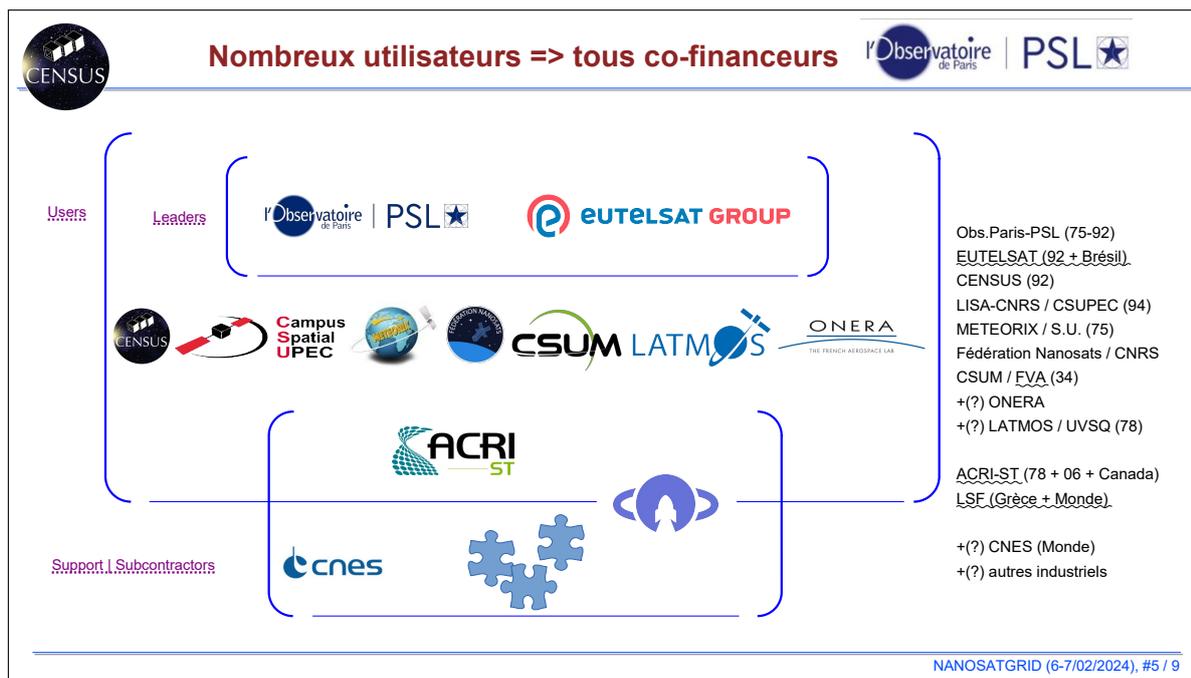


FIGURE 6.1 : Exemple d'ouverture à l'industrie, consortium initial NANOSATGRID.

première édition en 2012 au M.I.T. à Boston, puis j'ai proposé de l'accueillir à Paris en 2018¹.

- J'ai fait partie de 4 comités de revue de nanosatellites :
 - En 2015, ponctuellement, pour une revue de définition préliminaire du projet IgoSat de l'Université Paris Cité,
 - Pour le nanosatellite PICSAT du LESIA qui a été lancé en 2018,
 - En 2019, ponctuellement, pour une revue de définition préliminaire du projet SCION-X de NCU, Taïwan,
 - Pour le nanosatellite CROCUS de l'ONERA dont la revue préliminaire de définition s'est tenue en 2023.

Enfin, mais c'est aussi une action en démarrage sans recul suffisant, « l'Académie Spatiale d'Île-de-France » réunit quelques grandes universités de la région. Elle a été créée en 2023 par l'obtention d'un budget de 20 M€ sur 5 ans. Elle doit mettre sur pied une nouvelle offre de formation donnant une place importante au *NewSpace*. Ma contribution porte essentiellement sur la création d'un module d'enseignement dérivé de notre offre « PSL Week » (présentée au § 6.3), au profit des cursus académiques et de la formation continue : il s'agira d'utiliser le Plateau PROMESS et nos méthodes d'ingénierie concourante, parfois en coordination avec des modules d'autres universités, si possible dès la rentrée 2024. Ceci devrait conduire au financement d'un poste « ingénieur Plateau » à CENSUS, en coordination avec l'UFE.

6.1.2 Réseau industriel

Vis à vis de l'industrie, plusieurs actions ont été engagées avec plus ou moins de succès, tant l'astrophysique est difficile à « valoriser » (comme on dit) dans un *Business Model* et pour un marché cible. Toutefois, nous faisons de notre mieux pour engager des collaborations avec

¹<https://icubesat.org/archive/2018-2/icubesat-program-2018/>

l'industrie, ce qui m'incombe principalement. Il est utile de mentionner ici les quelques leçons que nous en tirons :

- La belle start-up française GAMA nous a très tôt approchés avec sa technologie de voile solaire (j'avais encadré un de ses ingénieurs pendant la Covid-19). Nous leur avons loué notre salle blanche pour qu'ils testent leur procédure de pliage de voile. Ils ont lancé leur premier satellite début 2023. Nous aurions pu les accompagner sur leurs profils de mission, la dynamique de vol et les cas scientifiques, en plus de moyens de tests et d'intégration. Hélas, nos délais de réponse (par manque de personnel juridique) pour établir des contrats ont fini par décourager les dirigeants. Partie remise ?
- EUTELSAT GROUP, opérateur majeur de satellites de télécommunication, a proposé des places en charges utiles secondaires sur ses futurs satellites. Nous avons vite trouvé des centres d'intérêt communs dans les nanosatellites. Ainsi, nous candidatons aujourd'hui ensembles sur des recherches de financement pour AbC (thèse), NANOSATGRID (équipements), la remise en état d'une antenne au sol de 18 m, ou une opportunité de vol pour COSMOCAL. La première leçon qui émerge ici est qu'il faut être patient !
- ACRI-ST, déjà dès 2022, avait candidaté à nos côtés pour une version préliminaire de NANOSATGRID, élargie ensuite à un consortium complet (Fig. 6.1). Leur contribution au réseau d'antennes est une indéniable valeur ajoutée au projet, toutefois non financé à ce stade.
- Pour ce même projet NANOSATGRID, mentionnons l'implication en co-financement de l'organisation à but non lucratif LIBRE SPACE FOUNDATION (Grèce) et, en sous-traitance sans co-financement, des sociétés THE QT COMPANY (Finlande) pour les interfaces et GMV (Espagne) pour les couches logicielles d'orchestrateur et de centralisateur.
- Sur la thématique de détermination d'orbite, une tentative de collaboration est en cours avec l'entreprise D-FINE GMBH (Allemagne) pour étudier l'intérêt d'une « intelligence artificielle » embarquée qui optimiserait le choix des cibles d'observation pour la navigation et économiserait ainsi du budget système conséquent dans le contrôle d'attitude.
- Grâce à l'aimable autorisation de la FONDATION VAN ALLEN, nous avons touché une audience d'entrepreneurs à l'occasion de l'accueil de leur « Club des Partenaires » en 2024. C'est une tentative d'un genre nouveau qui pourrait nous apporter quelques contacts industriels.

Il y a eu d'autres tentatives, et nous continuerons, mais il faut rappeler que notre mission fondamentale de diffusion des connaissances est contradictoire avec l'utilitarisme, la « confidentialité des affaires » ou le principe des brevets (par exemple, les doctorants *doivent* publier). Les injonctions des financeurs à nous rapprocher de l'économie dite « réelle », puisque nous ne serions pas dans le réel, se doublent d'une manie à fractionner ou tronquer les financements demandés : ainsi, je trouve contre-productif (euphémisme) de financer des demi-thèses, puisqu'il nous faudra trouver un autre guichet pour les compléter, ou de n'accorder que 80 % d'un budget demandé par un projet qui a été organisé et présenté en vue du financement de 100 % de ce budget... Ces remarques ont toute leur place dans un manuscrit de HDR en tant que volet « programmatique », tant l'action scientifique est contrainte, voire contrariée, par la fraction de temps consacrée aux demandes de financement et aux tentatives d'innovations – donc à court terme et en concurrence de la R&T.

6.2 Les conférences

Notre réseau au sein de la communauté internationale s'est essentiellement mis en place lors des conférences. L'inter-personnel a toujours été fondamental pour moi, quitte à présenter un bilan carbone négatif, qu'il s'agit donc d'assumer par une transformation en collaborations concrètes. À ce titre, je ne mentionne pas ici toutes les conférences auxquelles j'ai participé mais celles qui, je crois, jouent un rôle structurant pour CENSUS :

- IEEE AEROSPACE², Big Sky, Montana/USA : peut-être par l'effet de l'isolement géographique, cette conférence a été propice pour nouer des relations autour de concepts avant-gardistes comme l'exploration d'astéroïdes avec des nanosatellites ou les outils de dynamique de vol. Hélas, l'inflation aux États-Unis a placé le coût de cette conférence au-dessus du per-diem.
- SMALLSAT CONFERENCE³, Logan, Utah/USA : devenu un rendez-vous annuel, il me permet d'entretenir le lien d'une année sur l'autre avec des industriels, sans toutefois créer vraiment de nouveaux contacts, malgré des relations de prime abord faciles. Par exemple, avec E. Rouillé, pour NOIRE, nous avons élargi nos réflexions grâce à des équipes américaines.
- SECESA⁴, itinérante : organisée tous les deux ans par l'ESA et le CNES, elle réunit une communauté d'ingénieurs systèmes autour des méthodes et outils de l'ingénierie concourante ; j'y ai développé le lien avec l'équipe PASO du CNES autour de ses outils IDM-CIC et VTS, notamment pour donner du retour d'expérience utilisateur au développeur SPACEBEL ou réfléchir à des alternatives au logiciel propriétaire MS-EXCEL.
- ISSFD⁵, itinérante : c'est aussi un rendez-vous bisannuel, qui permet une veille sur les réflexions de dynamique de vol, dans un format assez convivial pour y nouer des relations entre experts ; c'est aussi une opportunité de publications *peer-review* qui font référence et j'y ai présenté plusieurs de mes travaux de navigation optique autonome.
- OSCW⁶, itinérante : initialement organisée par une équipe d'ingénieurs de ESA/ESOC, il y a eu plusieurs éditions auxquelles CENSUS a pu régulièrement présenter l'outil open-source DOCKS et notre approche MBSE ; c'est aussi dans ce cadre qu'un rapprochement avec la *Libre Space Foundation* s'est réalisé pour appuyer NANOSATGRID.
- ICUBESAT⁷, itinérante : déjà mentionnée car je l'ai accueillie en 2018 à Paris sous l'égide du LabEx ESEP, elle a joué un rôle important dans la décennie 2010 pour la réflexion *Deep Space* et j'y ai régulièrement présenté des projets ; elle a été hélas très tôt concurrencée, puis annulée lors de la Covid-19, avec le risque de ne plus continuer.

Enfin, des conférences périodiques plus généralistes (comme IEEE Aerospace, d'ailleurs) ont été des opportunités pour nouer des contacts pour des collaborations en devenir, comme 4S, IAC et ESA Industry Days avec *Politecnico di Milano* ou l'entreprise sud-africaine SIMERA SENSE pour la navigation optique et AbC.

²<https://www.aeroconf.org/>

³<https://smallsat.org/>

⁴Systems & Concurrent Engineering for Space Applications, per ex. à ISU, Strasbourg, en 2024
<https://technology.esa.int/event/secesa-conference-2024>

⁵International Symposium on Space-Flight Dynamics, <https://issfd.org/>

⁶Open Source CubeSat Workshop, <https://oscw.space>

⁷Interplanetary CubeSat Workshop, <https://icubesat.org/>



FIGURE 6.2 : Affiche de conclusion de la PSL Week 2022 (S. Cnudde, SIGAL/LESIA).

6.3 Actions de sensibilisation

6.3.1 PSL Week et FabLabs de PSL

La plus académique de mes actions de sensibilisation est la « PSL Week ». L’université PSL invite tous ses étudiants à découvrir d’autres disciplines, sous la forme d’une immersion d’une semaine dans ses divers établissements. Cette semaine compte dans leur cursus comme une semaine d’enseignement. J’ai proposé une contribution sous forme d’une campagne d’ingénierie concurrente, pour laquelle j’ai conçu un scénario adapté aux niveaux techniques attendus. Ce « produit pédagogique » a ensuite servi de base pour les contributions que j’ai proposées à l’Académie Spatiale d’Île-de-France (Cf. § 5.3).

Le scénario est issu du projet CURE de mesure des dates de transits d’exo-planètes, en préparation possible de la mission ARIEL de l’ESA. Pour la PSL Week, CURE est présentée comme une mission non sélectionnée mais pour laquelle une nouvelle mouture pourrait être adoptée, appelée « mCURE », plus légère et plus ciblée, car limitée à 10 exo-planètes à très haute valeur. Les participants constituent deux équipes et apprennent ce que c’est de définir une mission spatiale. Ils doivent concevoir un profil de mission réaliste et un plan de développement qui garantit l’observation réussie de la totalité des 10 exo-planètes.

Deux éditions ont déjà eu lieu, en 2022 (Fig. 6.2) et 2024, ainsi qu’une première séance d’une demi-journée pour des scolaires (2023).

En plus de la « PSL Week », le développement de liens autour de la thématique des « FabLabs de PSL » m’a permis de découvrir en 2023 d’autres entités de PSL et, par ricoché, les disciplines de l’École Nationale Supérieure des Arts Décoratifs, PSL (ENSAD) qui dispose de moyens importants de fabrication (et d’un FabLab) dans divers matériaux. J’y ai donné



FIGURE 6.3 : « Nex'Orbiter » est un projet de jeu en réseau d'après le simulateur de vol spatial open-source ORBITER créé par Dr.Martin Schweiger. (Crédit : « Jia », jiaspace.pro)

un séminaire et, par la suite, une première résidence d'artiste a été organisée (fin mai 2024, accueil d'Olivain Porry). C'est une nouvelle tentative pour toucher un cercle professionnel différent du nôtre qui, à son tour, pourrait relayer le rôle de l'astrophysique vers le grand public, dans des registres artistiques.

6.3.2 Nex'Orbiter

Passionné depuis 2009 par « ORBITER *Spaceflight Simulator* »⁸, créé par Dr. Martin Schweiger au début des années 2000, je réfléchis depuis longtemps à un paradigme de navigation interplanétaire futuriste : la brachistochrone, qui consiste à voyager avec une poussée constante, délivrant par exemple 1G d'accélération *prograde* pour la première moitié du voyage puis *retrograde* pour la deuxième moitié. Certes il n'existe pas, à ce jour, de propulsion continue avec un tel niveau de puissance, hélas car ce concept permettrait de ramener à quelques jours seulement un trajet Terre-Mars. ORBITER est un simulateur qui respecte les règles de la dynamique de vol spatial, dans un élégant moteur graphique 3D. Sur cette base, il est possible d'utiliser ORBITER pour un univers persistant en réseau et en temps-réel : c'est une approche ludique pour sensibiliser à l'exploration spatiale et à l'état des connaissances astrophysiques, tout en stimulant la réflexion politique sur les usages futurs de l'espace.

Alors que je contribue activement depuis 2019, à titre privé, à la communauté ORBITER sur le développement d'une fonction « réseau », Martin Schweiger a choisi d'ouvrir le code en open-source sous licence MIT, le 27/07/2021. J'ai alors orienté résolument mes efforts vers un « jeu vidéo en réseau » basé sur ce simulateur. Constatant que la thématique CUBESAT se prête assez naturellement à la réflexion futuriste de l'exploration (sondes auxiliaires d'un vaisseau principal...), j'ai présenté ce projet au Programme Blanc de l'Observatoire de Paris en 2022. L'observatoire a accepté de soutenir le projet et a renouvelé son soutien en 2024.

Voilà un projet personnel qui met un pied dans ma sphère professionnelle. Il est désor-

⁸site officiel <http://orbit.medphys.ucl.ac.uk/>, présentation à l'ESA en 2006 [44]

mais appelé « Nex’Orbiter » et est conduit conjointement avec mon épouse sur les aspects graphiques, de scénario et de communication (Cf. Fig. 6.3 par Chia-Ling “Jia” Liang). Nous espérons établir ainsi une nouvelle passerelle vers la connaissance scientifique depuis l’univers du jeu vidéo. Avec de la chance et beaucoup de travail, la thématique des nanosatellites astrophysiques toucherait aussi le public via l’univers persistant de Nex’Orbiter.

6.3.3 Divers

Mon activité d’administrateur de l’association Planète Mars (Cf. CV détaillé), chapitre français de la fédération *Mars Society*, m’a conduit à donner quelques conférences grand public en France sur les divers projets de vol habité vers Mars. J’ai également contribué au livre collectif de l’association « Embarquement pour Mars », préfacé par l’astronaute français Thomas Pesquet : j’y ai écrit le chapitre « Les enjeux scientifiques » (à l’époque, soit en 2013). Des éditions ultérieures ont suivi, j’ai contribué aux deux premières, en 2013 et 2015.

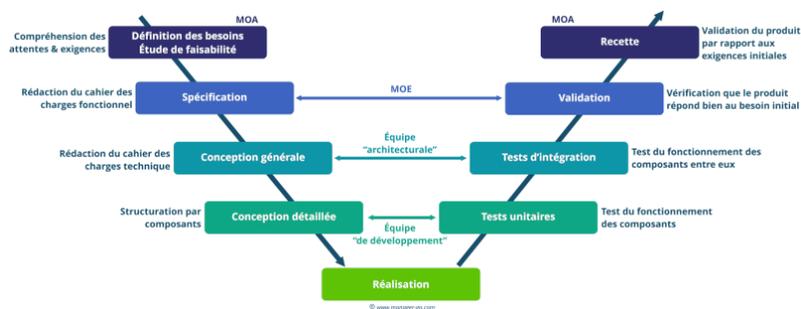
J’ai écrit en 2020 un article d’information sur les nanosatellites scientifiques et notre activité à CENSUS, dans le média participatif « The Conversation France » : « Les nanosatellites permettent aussi de faire de la science »⁹.

Enfin, j’ai été invité deux fois à Radio France. Une première fois sur France Inter en tant que membre de Planète Mars, le jour de l’arrivée du rover *CURIOSITY*/NASA dans le cratère Gale de Mars le 6/08/2012¹⁰. Une deuxième fois sur France Culture, le 9/05/2018, pour un « 4 minutes » sur mon projet de thèse en navigation autonome interplanétaire¹¹.

⁹<https://theconversation.com/les-nanosatellites-permettent-aussi-de-faire-de-la-science-136274>

¹⁰<https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/on-verra-ca-demain/objectif-mars-2130111>

¹¹<https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-recherche-montre-en-main/navigation-autonome-pour-un-cubesat-interplanetaire-6331564>



1

Nous avons encore beaucoup à faire à CENSUS. S'il fallait extraire des priorités, j'en mentionnerais quatre, ci-dessous, qui vont dimensionner mon activité dans les années à venir.

1. Généraliser MBSE et CI/CD

Des orientations sont mentionnées au § 5.2.4 qu'il est déjà possible de détailler : maintenir la modélisation MBSE au cours des phases B/C/D/E, contractualiser des réponses à cette modélisation, promouvoir l'approche dans le spatial conventionnel, voire dans d'autres secteurs.

L'intérêt de l'ingénierie système, mais aussi sa difficulté, est de rester à jour tout au long du projet. L'approche MBSE en fait partie et il faut capitaliser sur son effet de séduction en phase 0/A. Puisqu'elle porte sur le déroulement de la mission et non sur le design du satellite lui-même, son intérêt apparaît moins critique après la revue de définition préliminaire. À tort, car elle peut devenir stratégique pour arbitrer des solutions face à des problèmes anticipés ou non, pour définir et prioriser les campagnes de tests, les recettes des sous-systèmes achetés et le commissioning en vol : c'est la phase remontante du « Cycle en V ». Justement, les solutions CI/CD (désormais appliquées à notre logiciel DOCKS, § 5.1) s'appliquent particulièrement bien à l'approche MBSE : les évolutions peuvent être tracées et archivées comme n'importe quel code par un outil de versionnage et, en plus, des tests cumulatifs peuvent lui être associés pour surveiller que la couverture scientifique reste assurée. L'objectif pour CENSUS sera donc de populariser à la fois l'approche MBSE, son environnement CI/CD sous *git+GitLab* et son actualisation à chaque revue de projet.

Dans le monde commercial peu scrupuleux du *NewSpace*, l'approche MBSE peut réguler le dialogue avec les sous-traitants. Il ne s'agira pas (ou pas avant longtemps) de garantir un fonctionnement en vol. Même en cas d'achat d'une plateforme complète, au mieux le contrat

¹ « Cycle en V » : difficile d'attribuer ce schéma à quelqu'un en particulier, ici emprunté à l'article en ligne de Rémi Lardilleux, du 3/07/2023

assurera son bon fonctionnement en laboratoire. Alors la conception des tests élémentaires par le client, ou des chaînes fonctionnelles complexes, pourront s'inspirer de la MBSE de la mission. Ce faisant, des livrables par le fournisseur pourront aussi être prévus au contrat, par exemple en avance de la livraison des systèmes : il peut s'agir d'un jeu de données à fournir en réponse à une stimulation issue de la MBSE. La phase d'intégration pourra alors commencer plus tôt et plus efficacement. De même, en inspirant très en amont les opérations en vol, la modélisation structurera le commissioning et donc sa contractualisation, en particulier si ce commissioning est confié (par naïveté ou par obligation) à l'intégrateur choisi pour la plateforme. Bien sûr, il ne s'agit que d'un espoir à ce stade, mais CENSUS aura plusieurs occasions de proposer aux équipes projets ce type de clauses.

Enfin, la conception du Plateau PROMESS s'entendait dès l'origine pour une utilisation au-delà des seuls nanosatellites. Il est tentant de l'utiliser pour appuyer une « proposition » d'instrument, même hors *NewSpace*. L'approche MBSE, en ciblant la mission, contribuerait à changer radicalement la tonalité des propositions soumises aux agences spatiales ou de financement (ANR, Horizon..). C'est aussi le cœur méthodologique pour de nouvelles formations à l'ingénierie système. CENSUS donnera des séminaires dans ce sens pour promouvoir de telles offres de service dans le spatial, au CNRS et vers les entreprises. Un autre facteur de promotion, davantage technique, sera de rechercher des interfaces avec les outils du « MBSE conventionnel », j'entends par là ceux qui ciblent les squelettes de codes embarqués et les diagrammes UML. En particulier, des interfaces fluides vers OCTD de l'ESA, IDM-CIC du CNES et pour la production de structures documentaires seront à rechercher.

Notons aussi que la période est favorable puisque la nouvelle Académie Spatiale d'Île-de-France vient de retenir la demande de CENSUS pour financement de 2 ans, voire plus, d'un poste « d'ingénieur Plateau » sur nos travaux d'ingénierie concourante.

2. Adopter le *Hardware-in-the-Loop*

Le *Hardware-in-the-Loop* prend tout son sens lorsque des systèmes sont stimulés par une modélisation de mission et que les effets du système sont automatiquement exploités, pour analyse des résultats ou stimulation d'autres systèmes.

Le projet de FLATSAT joue un rôle immédiat en phase de tests élémentaires. Son évolution logique est de recevoir des couches logicielles toujours plus complexes pour contrôler les COTS qu'on voudra y connecter. Le FLATSAT deviendra donc le lien naturel entre l'approche MBSE et les phases d'AIT/AIV.

L'approche MBSE doit se traduire en tests élémentaires, puis en tests fonctionnels. La modélisation de la mission permettra d'extraire des phases typiques ou « aux limites du domaine de vol ». Elles seront concaténées en un scénario raccourci mais toujours en temps réel. Par exemple :

- Pour tester un viseur d'étoiles, après une caractérisation statique des angles d'évitement de sources lumineuses (Soleil, Lune, limbes de jour, réflexions de la plateforme), les alternances d'éclipses et les risques de lumière parasite pour la mission seront facilement simulés. Il est même possible de les coupler avec notre plateforme de rotation un axe, qui supporterait le viseur d'étoiles, et une source de lumière variable.
- Toujours avec cette plateforme de rotation un axe, il est possible de commander une roue à inertie et vérifier ses limites de saturation, dans un scénario avec des variations de pointage fréquentes.

Toujours via le FLATSAT, les réactions des systèmes seront récupérées et exploitées pour analyse. L'objectif est alors de les ré-injecter comme des entrées de la MBSE pour vérifier si les conditions d'observation scientifique restent satisfaites et, in fine, si la couverture scientifique

est impactée. Par exemple, le viseur d'étoiles peut cesser de produire des quaternions pendant un certain temps ce qui se traduira par un retard dans l'établissement des pointages inertiels. Ou encore, la roue à inertie peut délivrer un couple plus faible que prévu, voire saturer, retardant la durée de *slew* entre deux pointages.

Un acteur académique comme *Politecnico di Milano* pourra nous initier au *hardware-in-the-loop* et, en retour, notre expertise en astrométrie pourrait lui servir. Ces quelques exemples illustrent déjà la nécessité de compléter les tests d'un fournisseur de plateforme avec ceux conduits par le client scientifique de la plateforme. Ils ne nécessitent pas forcément, ou pas tous, un outillage lourd. Pour certains (et contractuellement), ils pourraient même être conduits directement chez le fournisseur, ce qui ajoutera encore de la flexibilité et diminuera le risque calendaire.

3. Promouvoir les CEM

L'enjeu des Compatibilités Électro-Magnétiques (CEM) est critique pour les scientifiques, autant en conduction qu'en rayonnement en particulier dans les basses fréquences (ex. : projet NOIRE, Chap. 4.2). Il est mal couvert par l'industrie et impose des itérations précoces entre le client et les fournisseurs. Je notais au §5.2.4 qu'il est également mal couvert par CENSUS et une collaboration avec ARIANEGROUP sera effectivement initiée en 09/2024 sur le sujet : la fédération de recherche Nanosats CNRS vient d'accepter de financer un ingénieur électronicien à CENSUS pour les besoins génériques de la fédération, ce qui inclue explicitement cette étude des CEM.

La thématique est d'autant plus délicate dans le *NewSpace* que la philosophie des COTS ne prévoit pas de re-design des sous-systèmes. Il faut donc « promouvoir » les CEM alors qu'elles sont rarement un enjeu commercial. Nos tentatives viseront à s'allier aux intégrateurs qui sont les plus concernés, au moins pour les CEM en conduction qui créent des couplages fonctionnels non désirés. À ce titre, ARIANEGROUP est dans la même position que nos intégrateurs nanosatellites et son argumentaire sera précieux pour faire bouger les lignes.

Quoiqu'il en soit, nous devons spécifier et tester les CEM. Les méthodes originales d'ARIANEGROUP sont prometteuses : elles combinent de « simples » demandes de mesures par le fournisseur et une contribution à « nos » modélisations. Elles peuvent s'envisager en phase de consultations préalables aux appels d'offres, puis en livrables d'une tranche préliminaire de travaux, avant de confirmer la commande effective d'un sous-système. Sans préjuger des solutions qui seraient techniquement faisables au vu des résultats, il ne semble pas trop optimiste d'espérer inclure (et financer) ces étapes supplémentaires aux contrats d'approvisionnement, d'autant qu'elles représentent de la plus-value et de la valorisation pour le fournisseur.

4. Compléter DOCKS pour la propulsion continue

La suite logicielle DOCKS en open-source est encore trop confidentielle. Pourtant, malgré l'existence d'autres solutions également libres, comme GMAT ou TUDat, son originalité est réelle : les « propagateurs » sont indispensables techniquement et donnent sa légitimité à l'outil. Mais les autres modules, intervisibilités, pointage, puissance, data... sont majeurs pour structurer toute mission et sont génériques. Il faut d'ailleurs compléter DOCKS avec davantage de fonctions, par exemple pour y intégrer un couplage avec les simulations d'ADCS (via la collaboration en cours avec nos confrères de l'Institut MAUA au Brésil), avec la CEM, ou pour évaluer les principales contraintes thermo-mécaniques sans recourir à des outils lourds en début de projet.

La propulsion continue est typique du *NewSpace* (j'y inclus les solutions par gaz froid). Elle est prioritaire dans les compléments de DOCKS. Elle deviendra probablement systématique

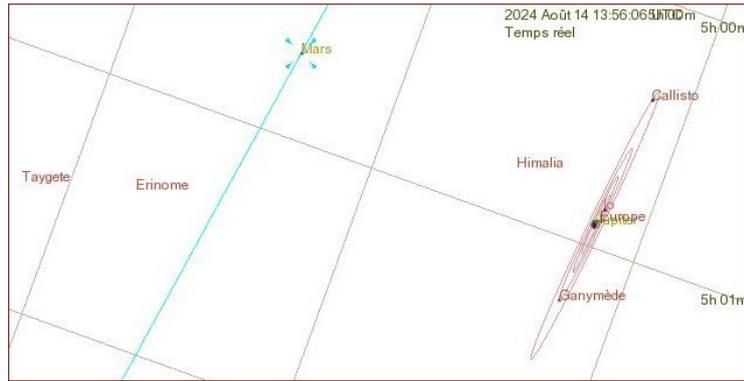


FIGURE 7.1 : Conjonction Mars-Jupiter du 14/08/2024 (modélisation Celestia)

dans les nanosatellite, que ce soit pour la désorbitation, le complément de mise à poste et, en *deep space*, pour les opérations de proximité ou même la croisière. Son implémentation a été initiée dans DOCKS en 2020. Le propagateur étant désormais robuste, il est possible de reprendre ce développement en lui associant des stratégies de propulsion particulières. En effet, il ne suffit pas d'introduire une nouvelle composante dans le calcul de propagation lui-même, il faut proposer à l'utilisateur des stratégies de propulsion qui combinent phases actives et pointage. Ceci nous amènera à augmenter notre compétence en dynamique de vol et, l'obligation devenant opportunité, ouvrira la voie à un « solveur de trajectoire », évolution naturelle d'un bon propagateur.

Enfin, il faut constituer une communauté d'utilisateurs, avec des « emphinstall parties » en ligne de DOCKS, des webinaires techniques et par des interfaces avec les outils des agences (OCDT à l'ESA, IDM-CIC et STELA au CNES). Justement, l'arrivée d'un ingénieur Plateau permettra de développer à la fois les fonctions et notre communauté.

Pour conclure

Ce mémoire se concentre sur l'astrophysique, encore trop mal servie par le *NewSpace*. Néanmoins, par une montée en compétences de notre communauté, j'espère que nous contribuerons à tirer le *NewSpace* vers le haut, mais aussi d'autres secteurs, industriels ou scientifiques. Je pense d'abord aux milieux extrêmes avec la robotique pour les fonds marins, les extrêmophiles ou les sites nucléaires, par exemple, si toutefois ce n'est pas au contraire ces secteurs qui nous en apprendront. Les échanges ne pourront qu'être enrichissants.

Il ne faut pas se méprendre sur le niveau de réflexion nécessaire pour développer ces savoir-faire. Il s'agit bien de recherche instrumentale et de sciences de l'ingénieur : ingénierie système, électronique embarquée avec des COTS, astrophysique à l'échelle nanosatellite. C'est pourquoi, avec le professeur Benoît Mosser, nous proposons une chaire *NewSpace* dans le cadre de la nouvelle Académie Spatiale Île-de-France qui financera des contrats post-doctoraux et des « résidences scientifiques » sur ces sujets dans les 4 ans à venir.

Certes les contraintes demeurent, notamment l'idéologie de l'innovation en défaveur de la recherche ou, tout simplement, la tendance du « tout-outil » et l'inertie des fonctions support dans le public. Mais il y a aussi comme un rapprochement des planètes pour CENSUS en 2024 : Mars sera à ~ 15 secondes d'arc de Jupiter le 14 août, puis nous aurons à la rentrée 3 postes d'ingénieur, un doctorat obtenu sur AbC (et une réponse toujours attendue pour un ingénieur supplémentaire) et un post-doctorat grâce à la chaire *NewSpace*. Souhaitons désormais le financement de nos CubeSats scientifiques !

Annexes

- [1] P. Ver Eecke, “Note sur une interprétation erronée d’une sentence d’archimède,” *L’Antiquité Classique*, vol. 24, no. 1, pp. 132–133, 1955.
- [2] J. Dalbins, K. Allaje, H. Ehrpais, I. Iakubivskyi, E. Ilbis, P. Janhunen, J. Kivastik, M. Merisalu, M. Noorma, M. Pajusalu, I. Sünter, A. Tamm, H. Teras, P. Toivanen, B. Segret, and A. Slavinskis, “Interplanetary student nanospacecraft : Development of the leo demonstrator estcube-2,” *Aerospace, MDPI*, vol. 10, no. 6, 2023.
- [3] Collectif, *Informatique Embarquée 2021-2022 (cours en ligne)*, haute école d’ingénierie et d’architecture of Fribourg (Suisse), <https://ie.isc.heia-fr.ch/>.
- [4] P. Plasson, C. Cuomo, G. Gabriel, N. Gauthier, L. Gueguen, and L. Malac-Allain, “Gericos : A generic framework for the development of on-board software,” in *DASIA - Data Systems In Aerospace*, O. L., Ed. European Space Agency, 2016.
- [5] Collectif, “State-of-the-art 2024, small spacecraft technology,” Small Spacecraft Systems Virtual Institute, Ames Research Center, NASA, Tech. Rep., 2024.
- [6] CalPoly and Stanford, “Cubesat design specification (cds),” *The CubeSat Program, California Polytechnic State University, CA/USA*, 2009.
- [7] E. Williams, “Nasa advisory council science committee meeting, august 29-30, 2023,” NASA, Tech. Rep., 2023.
- [8] M. M. Kobayashi, M. Shihabi, and J. Taylor, *Mars Cube One Telecommunications Subsystem Design*, ser. DESCANSO Design and Performance Summary Series, E.-i.-C. Jon Hamkins, Ed. Deep Space Communications and Navigation Systems, Center of Excellenc, JPL/NASA, 2021.
- [9] C. B. Duncan, A. E. Smith, and F. H. Aguirre, “Iris transponder – communications and navigation for deep space.” Small Satellite Conference, 2014.
- [10] M. W. Smith, A. Donner, M. Knapp, C. M. Pong, C. Smith, J. Luu, P. Di Pasquale, J. Bocchino, R. L., B. Campuzano, J. Loveland, C. Colley, A. Babuscia, M. White, J. Krajewski, and S. Seager, “On-orbit results and lessons learned from the asteria space telescope mission,” in *Proceedings of the 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2018.

-
- [11] ESTEC, *Product and Quality Assurance Requirements for In-Orbit Demonstration CubeSat Projects*, issue 1 rev 2 ed., ESA/ESTEC, European Space Research and Technology Centre, Noordwijk, The Netherlands, 2016.
- [12] —, *Tailored ECSS Engineering Standards for In-Orbit Demonstration CubeSat Projects*, issue 1 rev 3 ed., ESA/ESTEC, European Space Research and Technology Centre, Noordwijk, The Netherlands, 2016.
- [13] T. Villela, C. A. Costa, A. M. Brandão, F. T. Bueno, and R. Leonardi, “Towards the thousandth cubesat : A statistical overview,” *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [14] NanolabAcademy, *Guide Normatif pour le développement de projets nanosatellites étudiants*, 3rd ed., CNES, Centre National d’Etudes Spatiales, 2021.
- [15] D. Hassler, “Curiosity Rover,” in *16th Annual Mars Society Convention*. Mars Society, 2014.
- [16] A. Posner, D. Odstrčil, P. MacNeice, L. Rastaetter, C. Zeitlind, B. Hebere, H. Elliott, R. A. Frahm, J. J. Hayes, T. T. Von Rosenvinge, E. R. Christian, J. P. Andrews, R. Beaujeane, S. Böttchere, D. E. Brinza, M. A. Bullock, S. Burmeistere, F. A. Cucinottah, B. Ehresmann, M. Epperly, D. Grinspoon, J. Guo, D. M. Hassler, M. H. Kim, J. Köhler, O. Kortmann, C. Martin Garcia, R. Müller-Mellin, K. Neal, S. C. Rafkin, G. Reitz, L. Seimetz, K. D. Smith, Y. Tyler, E. Weigletm, and R. E. Wimmer-Schweingruber, “The Hohmann-Parker effect measured by the mars science laboratory on the transfer from Earth to Mars : Consequences and opportunities,” *Planetary and Space Science*, vol. 89, pp. 127–139, 2013.
- [17] G. Quinsac, “From COTS to expected propulsion in nanosatellites,” Ph.D. dissertation, PSL University, 2019.
- [18] B. Segret, “Algorithme embarqué de navigation optique autonome pour nanosatellites interplanétaires,” Ph.D. dissertation, Université Paris Sciences Lettres, 2019.
- [19] P. Erichsen, “Performance evaluation of spacecraft propulsion systems in relation to mission impulse requirements,” *Second European Spacecraft Propulsion Conference, Paris*, 1997.
- [20] H. Rachubinski, S. Barral, J. Kurzyna, A. Szelecka, E. Ramirez, R. Martin, P. Ortiz, J. Alonso, S. Bottinelli, Y. Mabillard, A. Zaldivar, p. Rangsten, and C. Koppel, “First experimental characterization of a pulsed plasma thruster with non-volatile liquid propellant,” 2014.
- [21] S. Barral, J. Kurzyna, H. Rachubinski, A. Szelecka, D. Danilko, R. Martin, E. Ramirez, P. Ortiz, J. Alonso, Y. Mabillard, S. Bottinelli, A. Zaldivar, P. Rangsten, and C. Koppel, “Time-of-flight spectrometry and performance of a pulsed plasma thruster with non-volatile propellant,” 2015.
- [22] M. Guyot, M. Dudeck, S. Denise, M. Tessier, P. Claude, and C. Elmaleh, “La propulsion par plasma pour les nanosatellites,” 2013, séminaire INTENS, Université de Montpellier 2, 14-15 novembre 2013.
- [23] B. Segret, D. Hestroffer, G. Quinsac, M. Agnan, J. Vannitsen, and B. Mosser, “Optimizations of Autonomous Orbit Determination for a Deep-Space CubeSat,” in *27th*
-

International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD) - 18th Australian International Aerospace Congress, no. February. Melbourne, Australia : Engineers Australia, Royal Aeronautical Society, 2019, pp. 1129–1134.

- [24] A. Sadeghi, “Approximating the principal matrix square root using some novel third-order iterative methods,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 993–999, 2018.
- [25] B. Segret and B. Mosser, “Autonomous orbit determination for a cubesat cruising in deep space,” arXiv :2104.09989, 2021.
- [26] B. Segret, Y. Diaw, and V. Lainey, “Refined astrometry on board a cubesat,” in *IEEE Aerospace Conference 2022*, 2022.
- [27] van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., Heald, G., McKean, J. P., Hessels, J. W. T., de Bruyn, A. G., Nijboer, R., Swinbank, J., Fallows, R., Brentjens, M., Nelles, A., Beck, R., Falcke, H., Fender, R., Hörandel, J., Koopmans, L. V. E., Mann, G., Miley, G., Röttgering, H., Stappers, B. W., Wijers, R. A. M. J., Zaroubi, S., van den Akker, M., Alexov, A., Anderson, J., Anderson, K., van Ardenne, A., Arts, M., Asgekar, A., Avruch, I. M., Batejat, F., Bähren, L., Bell, M. E., Bell, M. R., van Bemmell, I., Bennema, P., Bentum, M. J., Bernardi, G., Best, P., Bîrzan, L., Bonafede, A., Boonstra, A.-J., Braun, R., Bregman, J., Breitling, F., van de Brink, R. H., Broderick, J., Broekema, P. C., Brouw, W. N., Brüggen, M., Butcher, H. R., van Cappellen, W., Ciardi, B., Coenen, T., Conway, J., Coolen, A., Corstanje, A., Damstra, S., Davies, O., Deller, A. T., Dettmar, R.-J., van Diepen, G., Dijkstra, K., Donker, P., Doorduyn, A., Dromer, J., Drost, M., van Duin, A., Eislöffel, J., van Enst, J., Ferrari, C., Frieswijk, W., Gankema, H., Garrett, M. A., de Gasperin, F., Gerbers, M., de Geus, E., Grießmeier, J.-M., Grit, T., Gruppen, P., Hamaker, J. P., Hassall, T., Hoefl, M., Holties, H. A., Horneffer, A., van der Horst, A., van Houwelingen, A., Huijgen, A., Iacobelli, M., Intema, H., Jackson, N., Jelic, V., de Jong, A., Juette, E., Kant, D., Karastergiou, A., Koers, A., Kollen, H., Kondratiev, V. I., Kooistra, E., Koopman, Y., Koster, A., Kuniyoshi, M., Kramer, M., Kuper, G., Lambropoulos, P., Law, C., van Leeuwen, J., Lemaitre, J., Loose, M., Maat, P., Macario, G., Markoff, S., Masters, J., McFadden, R. A., McKay-Bukowski, D., Meijering, H., Meulman, H., Mevius, M., Middelberg, E., Millenaar, R., Miller-Jones, J. C. A., Mohan, R. N., Mol, J. D., Morawietz, J., Morganti, R., Mulcahy, D. D., Mulder, E., Munk, H., Nieuwenhuis, L., van Nieuwpoort, R., Noordam, J. E., Norden, M., Noutsos, A., Offringa, A. R., Olofsson, H., Omar, A., Orrú, E., Overeem, R., Paas, H., Pandey-Pommier, M., Pandey, V. N., Pizzo, R., Polatidis, A., Rafferty, D., Rawlings, S., Reich, W., de Reijer, J.-P., Reitsma, J., Renting, G. A., Riemers, P., Rol, E., Romein, J. W., Roosjen, J., Ruiter, M., Scaife, A., van der Schaaf, K., Scheers, B., Schellart, P., Schoenmakers, A., Schoonderbeek, G., Serylak, M., Shulevski, A., Sluman, J., Smirnov, O., Sobey, C., Spreeuw, H., Steinmetz, M., Sterks, C. G. M., Stiepel, H.-J., Stuurwold, K., Tagger, M., Tang, Y., Tasse, C., Thomas, I., Thoudam, S., Toribio, M. C., van der Tol, B., Usov, O., van Veelen, M., van der Veen, A.-J., ter Veen, S., Verbiest, J. P. W., Vermeulen, R., Vermaas, N., Vocks, C., Vogt, C., de Vos, M., van der Wal, E., van Weeren, R., Weggemans, H., Weltevrede, P., White, S., Wijnholds, S. J., Wilhelmsson, T., Wucknitz, O., Yatawatta, S., Zarka, P., Zensus, A., and van Zwieten, J., “Lofar : The low-frequency array,” *Astronomy and Astrophysics*, vol. 556, p. A2, 2013.
- [28] P. Zarka, J.-L. Bougeret, C. Briand, B. Cecconi, H. Falcke, J. Girard, J.-M. Grießmeier, S. Hess, M. Klein-Wolt, A. Konovalenko, L. Lamy, D. Mimoun, and A. Aminaei,

-
- “Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the moon,” *Planetary and Space Science*, vol. 74, no. 1, pp. 156–166, 2012, scientific Preparations For Lunar Exploration.
- [29] P. Zarka and B. Cecconi, “Solar system low frequency radio spectra [data set],” PADC/MASER, Data set, 2022.
- [30] A. Ritacco, L. Bizzarri, F. Boulanger, M. Pérault, J. Aumont, F. Bouchet, M. Calvo, A. Catalano, D. Darson, F. Désert, J. Errard, A. Feret, J. F. Macías-Pérez, B. Maffei, A. Monfardini, L. Montier, M. Murgia, P. Morfin, F. Nati, G. Pisano, N. Ponthieu, J. L. Puget, S. Savorgnano, B. Segret, K. Schuster, J. Treuttel, and M. Zannoni, “Polarization angle accuracy for future cmb experiments, the cosmocal project and its prototype in the 1 mm band.” *mm Universe 2023*, Grenoble, 06/2023.
- [31] Y.-S. WANG, B. S. LEE, R.-Y. WANG, G. F. GACAL, H.-I. TU, K.-J. HOU, W.-Y. LIN, and L. C. CHANG, “Scintillation and ionosphere extended (scion-x) a 12u cubesat for ionospheric and atmospheric science,” 2023.
- [32] D. Evans and M. Merri, *OPS-SAT : A ESA nanosatellite for accelerating innovation in satellite control*. SpaceOps 2014 Conference, 2014.
- [33] D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle, M. Blanton, and S. Roweis, “Astrometry.net : Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images,” *The Astronomical Journal*, vol. 139, no. 5, p. 1782, mar 2010.
- [34] B. Segret, S. Bammens, S. Bras, D. Marszk, V. Shiradhonkar, V. Zelenevskiy, and D. Evans, “On-board images to specify and commission the adcs.” *The 4S Symposium 2022*, Vilamoura (Portugal), 2022.
- [35] G. Vane, “Concept maturity level (cml), establishing a shared language to articulate maturity of a space-science mission concept and cost uncertainty in the early formulation phase,” 2009, presentation to the Planetary Science Decadal Survey Steering Group.
- [36] R. Wessen, C. S. Borden, R. C. Moeller, J. Lang, J. K. Ziemer, and J. Ervin, “Space Mission Concept Development using Concept Maturity Levels,” pp. 1–18, 2013.
- [37] K. Normantas, O. Vasilecas, and S. Sosunovas, “Augmenting uml with decision table technique,” in *Proceedings of the International Conference on Computer Systems and Technologies and Workshop for PhD Students in Computing*, ser. CompSysTech '09. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2009.
- [38] D. A. Marca, “Sadt/idef0 for augmenting uml, agile and usability engineering methods,” in *Software and Data Technologies*, M. J. Escalona, J. Cordeiro, and B. Shishkov, Eds. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 38–55.
- [39] J. L. Baldwin, A. Werbos, and T. S. Zaccheo, “Augmenting sadt with uml, a hybrid approach for the design of operational science algorithms,” *A. M. Society*, Ed., 1991.
- [40] D. T. Ross, S. Hori, C. G. Feldmann, D. E. Thornhill, R. R. Bravoco, M. F. Connor, D. A. Marca, and J. Kornfeld, *Function Modeling Manual (IDEF0)*, ser. Integrated Computer Aided Manufacturing, 460 Totten Pont Road, Waitham, MA/USA, 1981, vol. IV.
- [41] C. G. Menegaldo, F. de O. Fialho, E. Janot-Pacheco, F. M. Pait, and V. Lapeyrère, “Picsat’s enduring legacy. probing the flight of a small astronomical satellite,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 134, no. 1033, p. 034501, mar 2022.
-

- [42] G. Quinsac, B. Segret, C. Koppel, and B. Mosser, “Attitude control : A key factor during the design of low-thrust propulsion for cubesats,” *Acta Astronautica*, vol. 176, pp. 40–51, 2020.
- [43] E. Andreis, “Autonomous vision-based navigation for deep-space cubesats : Algorithm development and hardware validation,” PhD dissertation, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 05 2024.
- [44] M. Schweiger, “Spacecraft simulation and visualisation with orbiter 2006,” <http://orbit.medphys.ucl.ac.uk/press/orbiter2006.pdf>, 2006, 3rd International Workshop on Astrodynamics Tools and Techniques, ESTEC, Noordwijk, 4 October 2006.



Encadrement

Doctorants (co-encadrement)

Co-encadrement de Erwan ROUILLÉ, directeur de thèse B. Cecconi, « *NOIRE : a distributed radio imager in space* », 2021-(en cours)

Co-encadrement de Janis DALBINS à/c 2020, avec A. Slavinskis, thèse dirigée par M. Noorma à l'Observatoire de Tartu (Estonie), « *Telecom experiments for deep space exploration with nanosatellites* », 2016-2024

Co-encadrement de The Huynh HOANG, directeur de thèse B. Mosser, outillage de test du contrôle d'attitude nanosatellite, 2016-2017 (interrompue)

Gary QUINSAC, directeur de thèse B. Mosser, « *From Commercial-Off-The-Shelf to expected propulsion in nanosatellites* », 2015-2019

Équipe & Ingénieur(e)s

En tant que directeur technique de CENSUS, j'ai encadré les ingénieure et ingénieurs suivants :

Janis DALBINS (IR, 1+ an, en cours)
Kirill ANOHIN (AI, 2022-2023, 13 mois)
Pedro da FONSECA (IE, 2022-2023, 13 mois)
Feliu LACREU (IE, 2022-2023, 13 mois)
Rashika JAIN (IE, 2020-2022, 2 ans)
Grégoire HENRY (IE, 2020, 3 mois)
Thibault DELRIEU (IE, 2020, 3 mois)
Louis LE LEUCH (IE, 2020, 3 mois)
Sébastien DURAND (IE, 2017-2019, 2 ans)

Stagiaires

M2 Kirill ANOHIN, 07/2024, 6 mois
M1 Guillaume BACHELIER, 06/2024, 6 mois
M2 Tomàs NUNES, 04/2024, 6 mois

M1 Cindy LAMBERT*, 03/2024, 5 mois
M2 Thuy Linh LA, 11/2023, 6 mois
M2 Feliu LACREU, 10/2023, 19 mois
M1 Elias MAZMOUZ*, 08/2023, 3 mois
DUT/L2 Alpha Mamadou DIALLO*, 07/2023, 3 mois
DUT/L2 Maimouna DIOP*, 07/2023, 3 mois
M2 Mohamed MANSOURI, 10/2022, 6 mois
L3 Yanis GOUGEAT, 08/2022, 5 mois
DUT/L2 Aoussetou KEITA*, 07/2022, 3 mois
M1 Augustin DECOCQ, 01/2022, 4 mois
M2 Harshul SHARMA*, 09/2021, 6 mois
M1 Thomas LE VARLET, 09/2021, 9 mois
M2 Silla S. DJIBRIL DRAMANE, 08/2021, 6 mois
M2 Erwan ROUILLE, 08/2021, 6 mois
M1 Julien BOUET, 06/2021, 5 mois
M1 Youssoupha DIAW, 06/2021, 5 mois
M2 Léa LARRIVET, 04/2021, 6 mois
M2 Grégoire HENRY, 12/2020, 9 mois
M2 Yoshimi CHAUVEL, 12/2020, 6 mois
M2 Lancelot LE GUERN, 08/2020, 6 mois
M1 Karim ABD EL DAYEM, 08/2020, 4 mois
M2 Tim GLASIUS, 08/2020, 6 mois
M1 Essaid TIGUERCHA, 08/2020, 3 mois
M2 Rashika JAIN, 09/2019, 6 mois
M2 Roxane MORICE*, 09/2019, 6 mois
M2 Claire CASTELL, 08/2019, 6 mois
BTS Jonathan LUU*, 08/2019, 4 mois
M1 Jean-Baptiste JARNOUX, 08/2019, 4 mois
M2 Balaji VISWANATHAN*, 10/2018, 6 mois
M2 Laetitia LEBEC, 09/2018, 6 mois
M1 Aurore BOINEAU, 09/2018, 2 mois
M2 Jimmy FOUQUART, 02/2018, 6 mois
M2 Florian JOUSSAUME, 09/2017, 6 mois
M1 Nicolas BOCHARD, 09/2017, 4 mois
M1 Guillaume THEBAULT, 08/2017, 4 mois
M2 Tobias FLECHT*, 08/2016, 6 mois
M2+MEng. Nima TRAORE, 08/2016, 7 mois
M1 Zacharie BARROU DUMONT, 07/2016, 2 mois
M1 Thomas GASCARD, 09/2016, 4 mois
M2 Jordan DIBY, 11/2015, 6 mois
M1 Hao-Chih « Jim » LIN, 10/2015, 4 mois
M1 Sébastien DURAND, 08/2014, 4 mois

* : *co-encadrement*

Projets

Chef de projet de **NANOSATGRID** : interconnexion de segments sols d'opérations nano-satellites (2022+)

Chef de projet de **BIRDY** (2013+) :

- BIRDY : projet de CubeSat interplanétaire pour mesures de radiation entre Terre et Mars
- QBDIM : projet de CubeSat interplanétaire en mission d'accompagnement à un astéroïde
- BIRDY-T, fusion de BIRDY et QBDIM

Chef de projet de **AbC** (2020+) : Algorithme d'astrométrie embarquée pour nanosatellite

Chef de projet de **NOIRE** (2021+) : Essaim de nanosatellites de radio-astronomie en orbite lunaire

Chef de projet de **Nex'Orbiter** (2020+) : Jeu en réseau de navigation interplanétaire sur simulateur open-source

Chef de projet de **DOCKS** (2015+) : Suite logicielle open-source de prototypage de mission nanosatellite

Chef de projet de **PROMESS** (2016-2017) : Plateau d'ingénierie concurrente au bâtiment 15 du site de Meudon de l'Observatoire de Paris-PSL

Co-encadrement des projets VEGA (salle blanche, 2017-2018), FLATSAT (outillage de tests électroniques à distance, 2022+)



Publications & Communications scientifiques

Articles, Proceedings, Posters

(publications en auteur ou co-auteur)

6th ESA Industry Days, Delft (Pays-Bas), 09/2023, Poster : « AbC, an ADCS Commissioning Service », Pedro da Fonseca & al.

mm Universe 2023, Grenoble, 06/2023, Proc. : « The COSMOCal project and its prototype in the 1 mm band » , Alessia Ritacco & al.

MDPI Aerospace 2023, PAPER

Dalbins, J. & al. "Interplanetary Student Nanospacecraft : Development of the LEO Demonstrator ESTCube-2". Aerospace 2023, 10, 503. doi :10.3390/aerospace10060503

SmallSat 2022, PAPER

B. Segret, S. Bammens, S. Bras, D. Marszk, V. Shiradhonkar, V. Zelenevskiy, D. Evan, « On-board images to characterize a CubeSat's ADCS », SSC22-VI-06, 36th Annual Small Satellite Conference, Logan (Utah/USA), 08/2022

4S 2022, PAPER

B. Segret, S. Bammens, S. Bras, D. Marszk, V. Shiradhonkar, V. Zelenevskiy, D. Evan, "On-Board images to specify and commission the ADCS," The 4S Symposium 05/2022, Vilamoura (Portugal)

4S 2022, Small Satellite System and Services, Vilamoura (Portugal), 05/2022, Poster : « A radio-source tracker : An adaptation of the star tracker technique to satellite swarm radio interferometer », Erwan Rouillé & al.

IEEE 2022, PAPER

B. Segret, Y. Diaw and V. Lainey, "Refined Astrometry on Board a CubeSat," 03/2022 IEEE Aerospace Conference (AERO), Big Sky, MT, USA, 2022, pp. 01-15

IEEE 2022 PAPER

R. Jain, H. Sharma and B. Segret, "DOCKS Propagator : An Open-source Adaptive Time-step Trajectory Propagator for CubeSat Missions," 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO), Big Sky, MT, USA, 2022, pp. 1-12

arXiv > astro-ph 2021, PAPER

Boris Segret, Benoît Mosser, « Autonomous Orbit Determination for a CubeSat Cruising in Deep Space », Instrumentation and Methods for Astrophysics (astro-ph.IM), arXiv :2104.09989 [astro-ph.IM]

IEEE 2021, PAPER

B. Segret, M. Agnan and D. Hestroffer, "Autonomous Orbit Determination for CubeSat Adapted to Proximity Operations at an Asteroid," 2021 IEEE Aerospace Conference (*distanciel*)

EPSC, European Planetary Science Congress 09/2020 (*distanciel*), Proc. : « TERACUBE : THz instrument concept for CubeSat », Raphaël Moreno & al.

Acta Astronautica 2020, PAPER

Gary Quinsac & al., « Attitude control : A key factor during the design of low-thrust propulsion for CubeSats », Acta Astronautica, Volume 176, 2020, doi :10.1016/j.actaastro.2020.03.053.

ISSFD 2019, PAPER

B. Segret, D. Hestroffer, G. Quinsac, M. Agnan, J. Vannitsen, and B. Mosser, “Optimizations of Autonomous Orbit Determination for a Deep-Space CubeSat,” in 27th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD) - 18th Australian International Aerospace Congress, 2019, no. February, pp. 1129–1134.

ECS, 10th European CubeSat Symposium 12/2018 (Toulouse), Poster : “An Open-Source Deep-Space Propagator that Uses your Own Gravitational Models”, Laetitia Lebec & al.

iCubeSat, 7th interplanetary CubeSat Workshop 05/2018 (Paris), Poster : « Assessment of the performance of propulsion systems for CubeSats exploring small bodies », Gary Quinsac & al.

IEEE 2018, PAPER

B. Segret, D. Hestroffer, G. Quinsac, M. Agnan, J. Vannitsen, and B. Mosser, “In-flight orbit determination for a deep space CubeSat,” in 2018 IEEE Aerospace Conference, 2018, pp. 1–12.

arXiv > astro-ph 2017, PAPER

Baptiste Cecconi & al., « NOIRE Study Report : Towards a Low Frequency Radio Interferometer in Space », Instrumentation and Methods for Astrophysics (astro-ph.IM), arXiv :1710.10245 [astro-ph.IM]

EPSC, European Planetary Science Congress 09/2017 (Riga, Latvia), Poster : « BIRDY-T – Interplanetary CubeSat to small body of the Solar System », Daniel Hestroffer & al.

ISSFD, Joint 31st ISTS, 26th ISSFD (International Symposium for Space Flight Dynamics), 9th NSAT, Matsuyama, Japon 06/2017, Proc. : "On-board Orbit Determination for a Deep Space CubeSat in BIRDY Technology"

JoAA 2017, PAPER

Jordan Vannitsen & al., “Satellite Data Analysis and CubeSat Instrument Simulator Tool for Simultaneous Multi-Spacecraft Measurements of Solar Energetic Particles,” Journal of Astrophysics & Astronomy (2017) 38 :70, DOI 10.1007/s12036-017-9485-2

NSAT, 7th NanoSAT Symposium, Bulgaria, 10/2016, Proc. : « Dynamic control of a CubeSat Attitude and Orbit Control System (AOCS) with propulsion for deep-space missions », Kai-Chun Wu & al.

4S, Small Satellite System and Services 05/2016 (4S Symposium, Malta), Proc. : « Functional Analysis of a CubeSat AOCS with Propulsion for Deep-Space Missions », Gary Quinsac & al.

SSEA, 1st Symposium on Space Educational Activities, 12/2015 (Padoue, Italie), Proc. : « Autonomous Navigation for Deep-Space CubeSats »

ECS, 7th European CubeSat Symposium 09/2015 (Liège, Belgique), Poster : « AOCS for BIRDY : first performance tests », Jordan Diby & al.

NSAT, 6th Nano-Satellite Symposium, 07/2015 (Kobe, Japan), Poster : « CubeSat on an Earth-Mars Free-Return Trajectory to Study Radiation Hazards in Future Manned Mission », Jordan Vannitsen & al.

EPSC 2014, European Planetary Science Congress, Estoril (Portugal), 09/2014, Proc. : « BIRDY : an interplanetary CubeSat to collect radiation data on the way to Mars and back »

SPIE 2014 PAPER

B. Segret et al., “BIRDY : An interplanetary CubeSat to collect radiation data on the way to Mars and back to prepare the future manned missions,” in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2014, vol. 9150.

SPIE 2014 PAPER

B. Segret et al., “The paving stones : Initial feed-back on an attempt to apply the AGILE principles for the development of a Cubesat space mission to Mars,” in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2014, vol. 9150.

4S 2014, Small Satellite System and Services, Majorque (Espagne), 05/2014, Proc. : « CubeSat on an Earth-Mars Free-Return Trajectory to Study Radiation Hazards in Future Manned Mission » (Proceedings et Poster, sans participation orale)

NSAT, 5th Nano-Satellite Symposium, 11/2013 (Tokyo, Japan), Proc. : « CubeSat on an Earth-Mars Free-Return Trajectory to Study Radiation Hazards in Future Manned Mission », Jordan Vannitsen & al.

EPSC, European Planetary Science Congress 2013, Londres (UK) 09/2013, Proc. : « CubeSat on an Earth-Mars Free-Return Trajectory to study radiation hazards in the future manned mission »

Autres communications

(Autres communications en premier auteur)

Séminaire ISU, International Space University, Strasbourg, 03/2024, Oral : « CENSUS, stepping up to the challenge »

1er atelier de la Fédération de Recherche Nanosatellites du CNRS, Meudon, 02/2024, Oral : « NANOSATGRID, Interconnection des stations sol »

1er atelier de la Fédération de Recherche Nanosatellites du CNRS, Meudon, 02/2024, Oral : « Partager nos “COTS” dans la fédération »

BSATA 2023, 1st Brazilian School of Aerospace Technology and Astronomy, São Paulo (Brésil), 11/2023, Oral : « CENSUS, stepping up to the challenge »

IAC 2022, 73rd International Astronautical Congress, 29th IAA SYMPOSIUM ON SMALL SATELLITE MISSIONS Paris, 09/2022, Oral : « Image-based characterization of a CubeSat's ADCS »

ZENITH workshop, Paris, 12/2021, Oral : « Astrometry on board a CubeSat ? »

OSCW, 5th Open-Source Cubesat Workshop, (*distanciel*), 12/2021, Oral : « Astrometry on board OPS-SAT1 ? »

SECESA 2020, 9th International Systems & Concurrent Engineering for Space Applications Conference & MBSE Workshop (*distanciel*), 09/2020, Oral : « Lessons at C²ERES with an MBSE approach for scientific nanosatellites »

Prospective INSU 2020, Atelier Défi 12 « Nano-satellites », Paris, 01/2020, Oral : « C²ERES, pôle spatial de PSL, CTS, Complexe Technologique pour le Spatial pour nanosatellites scientifiques »

OSCW, 3rd Open-Source Cubesat Workshop, Athènes (Grèce), 10/2019, Oral : « DOCKS, a growing software suite for space mission prototyping »

École d'été Astronomie et Biologie, Tartu (Estonie), 07/2019, Oral : « How to Set-up a Model-Based System Engineering (MBSE) aka “parametric models” for nanosat missions »

IAA/LCPM, 13th IAA Low-Cost Planetary Missions Conference, Toulouse, 06/2019, Oral : « In-Flight Orbit Determination for a Deep Space CubeSat (BIRDY Technology) »

UTOPIAE Workshop on Uncertainty Quantification and Optimization (UQOP), Paris 03/2019, Oral : « Algebra for a Space Flight Algorithm in a Deep-Space CubeSat (BIRDY Technology) »

UP³ to Space International Symposium, 11/2018, Tainan (Taïwan), Oral : « C²ERES at Paris Observatory, the space pole of PSL Université Paris »

ZhengHe Mission Meeting, Paris, 09/2018, Oral : « BIRDY-T at CCERES »

École d'été Astronomie et Biologie, Tartu (Estonie), 08/2018, Oral : « BIRDY-T, from CRUISE to PROXOPS context for Radio-Science / Space Geodesy »

iCubeSat, 7th interplanetary CubeSat Workshop 05/2018 (Paris), Oral : « In-Flight Orbit

Determination for a Deep-Space CubeSat (BIRDY Technology) »

ECS, 9th European CubeSat Symposium, 12/2017 (Oostend, Belgium), Oral : « On-board Orbit Determination for a Deep-Space CubeSat in BIRDY Technology »

GRGS, 8ème école d'été du GRGS, Aussois, 09/2016, Oral : « Détermination d'orbite à bord d'un CubeSat interplanétaire, étude de sensibilité »

iCubeSat, 5th interplanetary CubeSat Workshop 05/2016 (Oxford, UK), Oral : « Orbit Determination for a deep-space CubeSat »

NCU Seminar, Graduate Institute of Space Science, 5/11/2015 (Taoyuan City, Taiwan), Oral : « Autonomous Navigation for Deep-Space Cubesats » (invited talk)

NCKU-OBSPM Space Day, 29/10/2015 (Tainan, Taiwan), Oral : « Two Deep-space CubeSats within CCERES, the PSL space pole »

Assemblée Générale Association Planète Mars 03/2015 (Paris), Oral : « BIRDY : CubeSat 3U interplanétaire, scientifique & pédagogique »

Atelier ESEP Nanosats, 12/2014 (Paris Jussieu), Oral : « BIRDY, Autonomous Space Weather 3U CubeSat in deep space »

European Mars Society Convention 11/2014 (Ivry-sur-Seine), Oral : « CubeSat on an Earth-Mars Free-Return Trajectory to study radiation hazards in the future manned mission »

JPL's Mars CubeSat/NanoSat Workshop 11/2014 (Pasadena, via Webex), Oral : « Autonomous Space Weather 3U CubeSat in deep space »

iCubeSat, 3rd interplanetary CubeSat Workshop 05/2014 (Pasadena, CA/USA), Oral : « BIRDY : interplanetary CubeSat to Mars to provide observational data at low-risk »

Atelier CIAS-ESEP « Quels débouchés pour les nanosatellites ? », 11/2013, Oral : « The Mars Flyby CubeSat »

US Mars Society Convention 07/2013 (Boulder, CO/USA), Oral : « CubeSat on an Earth-Mars Free-Return Trajectory to Study Radiation Hazards in Future Manned Missions »

(Autres communications en co-auteur)

1er atelier de la Fédération de Recherche Nanosatellites du CNRS, Meudon, 02/2024, Oral : « CENSUS, CEntre pour les Nanosatellites en Sciences de l'UniverS de PSL », Coralie Neiner & al.

1er atelier de la Fédération de Recherche Nanosatellites du CNRS, Meudon, 02/2024, Oral : « BIRDY - SmallSat for SSSBs reconnaissance and exploration », Daniel Hestroffer & al.

OSCW, 5th Open-Source Cubesat Workshop, (*distanciel*), 12/2021, Oral : « DOCKS : An open-source software suite for space mission profiles », Rashika Jain & al.

ECS, 12th European CubeSat Symposium 11/2021 (Saclay), Oral : “DOCKS : An open-source software suite for space mission profiles”, Rashika Jain & al.

OSCW, 4th Open-Source Cubesat Workshop, (*distanciel*), 12/2020, Oral : « DOCKS, a growing software suite for space mission profiles », Rashika Jain & al.

OSCW, 4th Open-Source Cubesat Workshop, (*distanciel*), 12/2020, Oral : « 'New comer' ground station challenge : demodulate data », Louis Le Leuch & al.

Prospective INSU 2020, Atelier Défi 12 « Nano-satellites », Paris, 01/2020, Oral : « Premier élan français pour l'intégration d'un spectromètre TéraHertz autour de 664 GHz », Jeanne Treuttel & al.

Colloque GRGS, Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale, Colloque G2, , Le Mans, 11/2019, Oral : « BIRDY – Interplanetary nanosat for exploration & planetary geodesy of SSSBs », Daniel Hestroffer & al.

École d'été Astronomie et Biologie, Tartu (Estonie), 07/2019, Oral : « Design of Small Satellite Missions for planetary studies for nanosat missions », Daniel Hestroffer & al.

ISTS & NSAT 2019, Fukui (Japon), 06/2019, Oral : « BIRDY : A public-private partnership for deep space exploration », Marco Agnan & al.

IAA/LCPM, 13th IAA Low-Cost Planetary Missions Conference, Toulouse, 06/2019, Oral : « BIRDY an interplanetary CubeSat to visit Small Bodies », Daniel Hestroffer & al.

IAA Planetary Defense Conference, Washington DC (USA), 04/2019, Oral : « Space missions to small bodies », Daniel Hestroffer & al.

Comet Interceptor Workshop, Londres (UK), 01/2019, Oral : « BIRDY, Planetary Geodesy of Small Bodies through CubeSats in Autonomous Navigation », Daniel Hestroffer & al.

COSPAR 2018, 42nd COSPAR Scientific Assembly, Pasadena (CA/USA), 07/2018, Oral : « BIRDY - PLANETARY GEODESY OF SMALL BODIES THROUGH CUBESATS IN AUTONOMOUS NAVIGATION », Daniel Hestroffer & al.

ASIME-2018, Asteroid Science Intersections with In-Space Mine Engineering, 04/2018 (Esch-sur-Alzette, Luxembourg), Oral : « BIRDY : Extensive Exploration of Small bodies with Autonomous Navigation », Marco Agnan & al.

ISSI Workshop, 01/2018, Oral : « Potential use of SmallSat - nano-orbiter », Daniel Hestroffer & al.

AGU Fall Meeting 2017, Nouvelle Orléans (USA), 12/2017, Oral : « BIRDY, CubeSat to Small Body », Daniel Hestroffer & al.

COSPAR Symposium, Jeju Island, South Korea, 09/2017, Oral : « Autonomous navigation for small satellites : unlocking new science missions and commercial applications », Marco Agnan & al.

iCubeSat, 6th interplanetary CubeSat Workshop 05/2017 (Cambridge, UK), Oral : « BIRDY-T iCubeSat to small body of the Solar System », Daniel Hestroffer & al.

iCubeSat, 6th interplanetary CubeSat Workshop 05/2017 (Cambridge, UK), Oral : « Focus on propulsive aspects of an iCubeSat to small bodies of the Solar System », Gary Quinsac & al.

ECS, 8th European CubeSat Symposium 09/2016 (Londres, UK), Oral : « Progress report of an Attitude and Orbit Control System with propulsion for deep space CubeSats », Gary Quinsac & al.

ECS, 7th European CubeSat Symposium 09/2015 (Liège, Belgique), Oral : « Pertinence of a space weather mission with an interplanetary scientific CubeSat », J.Vannitsen & al.

Assemblée Générale Association Planète Mars 03/2015 (Paris), Oral : « BIRDY (suite) : Equipe Mars Escapade, Centrale Lille », Nicolas Heim & al.

Taiwan-Russia CubeSat Workshop, 11/2014 (Tainan-Taiwan), Oral : « BIRDY : an interplanetary CubeSat to collect radiation data on the way to Mars and back with a precursor flight around the Earth in GTO », Jim Lin & al.

ECS, 6th European CubeSat Symposium 10/2014 (Estavayer, Suisse), Oral : « BIRDY : an interplanetary CubeSat to collect radiation data on the way to Mars with a precursor flight around the Earth in GTO », Jordan Vannitsen & al.

RÉSUMÉ

Le « NewSpace » est formidable. Connue pour ses méga-constellations de nanosatellites autour du globe, la surveillance en continu des incendies, le repérage de navires illégaux ou bientôt l'échange de clés cryptées. C'est donc un foyer d'innovations avec de belles opportunités de financement. Mais l'astrophysique, dont l'importance politique ne se dément pas dans l'ère moderne, reste le parent pauvre de ce changement de paradigme, faute de débouchés commerciaux immédiats. Pourtant, je suis convaincu qu'il faut encore et toujours monter en compétences dans ce domaine pour que les décisions de financement s'imposent naturellement. Ce mémoire pour demander l'habilitation à diriger des recherches est donc un acte politiquement engagé. J'y exposerai mon expérience industrielle et mon arrivée dans le spatial scientifique, qui coïncide avec le lancement du premier nanosatellite français en 2012, se poursuit avec les premiers CubeSats interplanétaires en 2018 et, désormais, une première armada vers la Lune et l'astéroïde double Didymos. Il y a fort à parier que toutes les missions d'exploration offriront désormais des opportunités pour des nanosatellites, donc aussi des opportunités de développements technologiques rapides pour les équipes de recherche en astrophysique. Avec mes mentors Pierre Drossart et Jean-Pierre Lebreton dans les années 2015, nous avons fait ce pari et choisi d'investir à long terme sur les nouvelles compétences requises pour des nanosatellites de qualité scientifique, car un « CubeSat » est loin d'être un satellite en kit: il fallait des méthodes, des outils et des équipements dédiés, autrement dit un écosystème, devenu bientôt pôle d'expertise de l'Observatoire de Paris - PSL. Cet environnement m'a permis de co-encadrer 4 doctorants, 9 ingénieurs et 45 étudiants en stages de fin d'études de DUT ou de Master. J'y ai conçu un support d'ingénierie original, au profit de plus de 7 équipes de recherche sur leur projet de nanosatellite scientifique. J'y ai mis en place quelques partenariats avec l'industrie. L'intérêt d'une HDR est donc, pour moi désormais, de promouvoir les spécificités des nanosatellites pour l'astrophysique, et ceci aux plus hauts niveaux académiques, afin que les ingénieurs et docteurs ainsi formés produisent à leur tour du Savoir et des savoir-faire.

MOTS CLÉS

ingénierie spatiale, espace profond, radio-astronomie, planétologie, cosmologie, physique stellaire, météo de l'espace, géodésie, interplanétaire, exploration spatiale, autonomie, nanosatellites, CubeSat

ABSTRACT

"NewSpace" is great. Known for its mega-constellations of nanosatellites around the globe, continuous monitoring of fires, tracking of illegal vessels and, soon, the exchange of encrypted keys. It's a hotbed of innovation, with excellent financing opportunities. But astrophysics, whose political importance is undeniable in the modern era, remains the poor cousin of this paradigm shift, due to a lack of immediate commercial outlets. And yet, I'm convinced that we still need to build up our skills in this field, so that funding decisions can be taken as a matter of course. This dissertation is therefore a politically committed act. In it, I will describe my industrial experience and my arrival in scientific space, which coincides with the launch of the first French nanosatellite in 2012, continues with the first interplanetary CubeSats in 2018 and, now, a first armada to the Moon and the double asteroid Didymos. It's a safe bet that all exploration missions from now on will offer opportunities for nanosatellites, and therefore also opportunities for rapid technological developments for astrophysics research teams. With my mentors Pierre Drossart and Jean-Pierre Lebreton in 2015, we took this gamble and chose to make a long-term investment in the new skills required for scientific-quality nanosatellites, because a "CubeSat" is far from being a kit satellite: dedicated methods, tools and equipment were required, in other words an ecosystem, which soon has become a center of expertise at Observatoire de Paris - PSL. This environment enabled me to co-supervise 4 PhD students, 9 engineers and 45 students in their final year of a BTS or Master's degree. I designed an original engineering support for more than 7 research teams on their scientific nanosatellite project. I also set up a number of partnerships with industry. For me, the purpose of an HDR is now to promote the specificities of nanosatellites for astrophysics, at the highest academic levels, so that the engineers and PhDs thus trained in turn produce knowledge and know-how.^a

^aTranslated with DeepL.com (free version)

KEYWORDS

space engineering, Deep space, radio-astronomy, planetology, cosmologie, stellar physics, space weather, geodesy, interplanetary, space exploration, autonomy, nanosatellites, CubeSat

RÉSUMÉ

Le « NewSpace » est formidable. Connue pour ses méga-constellations de nanosatellites autour du globe, la surveillance en continu des incendies, le repérage de navires illégaux ou bientôt l'échange de clés cryptées. C'est donc un foyer d'innovations avec de belles opportunités de financement. Mais l'astrophysique, dont l'importance politique ne se dément pas dans l'ère moderne, reste le parent pauvre de ce changement de paradigme, faute de débouchés commerciaux immédiats. Pourtant, je suis convaincu qu'il faut encore et toujours monter en compétences dans ce domaine pour que les décisions de financement s'imposent naturellement. Ce mémoire pour demander l'habilitation à diriger des recherches est donc un acte politiquement engagé. J'y exposerai mon expérience industrielle et mon arrivée dans le spatial scientifique, qui coïncide avec le lancement du premier nanosatellite français en 2012, se poursuit avec les premiers CubeSats interplanétaires en 2018 et, désormais, une première armada vers la Lune et l'astéroïde double Didymos. Il y a fort à parier que toutes les missions d'exploration offriront désormais des opportunités pour des nanosatellites, donc aussi des opportunités de développements technologiques rapides pour les équipes de recherche en astrophysique. Avec mes mentors Pierre Drossart et Jean-Pierre Lebreton dans les années 2015, nous avons fait ce pari et choisi d'investir à long terme sur les nouvelles compétences requises pour des nanosatellites de qualité scientifique, car un « CubeSat » est loin d'être un satellite en kit: il fallait des méthodes, des outils et des équipements dédiés, autrement dit un écosystème, devenu bientôt pôle d'expertise de l'Observatoire de Paris - PSL. Cet environnement m'a permis de co-encadrer 4 doctorants, 9 ingénieurs et 45 étudiants en stages de fin d'études de DUT ou de Master. J'y ai conçu un support d'ingénierie original, au profit de plus de 7 équipes de recherche sur leur projet de nanosatellite scientifique. J'y ai mis en place quelques partenariats avec l'industrie. L'intérêt d'une HDR est donc, pour moi désormais, de promouvoir les spécificités des nanosatellites pour l'astrophysique, et ceci aux plus hauts niveaux académiques, afin que les ingénieurs et docteurs ainsi formés produisent à leur tour du Savoir et des savoir-faire.

MOTS CLÉS

ingénierie spatiale, espace profond, radio-astronomie, planétologie, cosmologie, physique stellaire, météo de l'espace, géodésie, interplanétaire, exploration spatiale, autonomie, nanosatellites, CubeSat

ABSTRACT

"NewSpace" is great. Known for its mega-constellations of nanosatellites around the globe, continuous monitoring of fires, tracking of illegal vessels and, soon, the exchange of encrypted keys. It's a hotbed of innovation, with excellent financing opportunities. But astrophysics, whose political importance is undeniable in the modern era, remains the poor cousin of this paradigm shift, due to a lack of immediate commercial outlets. And yet, I'm convinced that we still need to build up our skills in this field, so that funding decisions can be taken as a matter of course. This dissertation is therefore a politically committed act. In it, I will describe my industrial experience and my arrival in scientific space, which coincides with the launch of the first French nanosatellite in 2012, continues with the first interplanetary CubeSats in 2018 and, now, a first armada to the Moon and the double asteroid Didymos. It's a safe bet that all exploration missions from now on will offer opportunities for nanosatellites, and therefore also opportunities for rapid technological developments for astrophysics research teams. With my mentors Pierre Drossart and Jean-Pierre Lebreton in 2015, we took this gamble and chose to make a long-term investment in the new skills required for scientific-quality nanosatellites, because a "CubeSat" is far from being a kit satellite: dedicated methods, tools and equipment were required, in other words an ecosystem, which soon has become a center of expertise at Observatoire de Paris - PSL. This environment enabled me to co-supervise 4 PhD students, 9 engineers and 45 students in their final year of a BTS or Master's degree. I designed an original engineering support for more than 7 research teams on their scientific nanosatellite project. I also set up a number of partnerships with industry. For me, the purpose of an HDR is now to promote the specificities of nanosatellites for astrophysics, at the highest academic levels, so that the engineers and PhDs thus trained in turn produce knowledge and know-how.^a

^aTranslated with DeepL.com (free version)

KEYWORDS

space engineering, Deep space, radio-astronomy, planetology, cosmologie, stellar physics, space weather, geodesy, interplanetary, space exploration, autonomy, nanosatellites, CubeSat