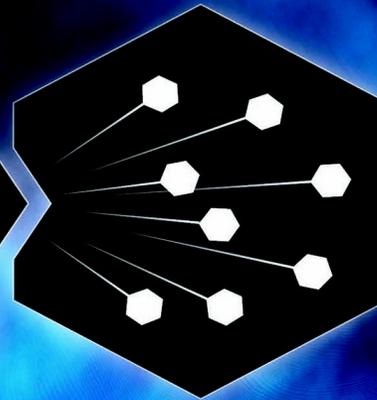


HELIO SWARM



THE NATURE OF TURBULENCE IN SPACE PLASMAS

Olivier Le Contel¹, Benoit Lavraud^{2,3}, Alessandro Retinò¹, Matthieu Kretzschmar⁴, Vincent Génot³, Olga Alexandrova⁵, Malik Mansour¹, Guillaume Janet⁴, C. Amoros³, Fatima Mehrez¹, Dominique Alison¹, Claire Revillet⁴, Sylvain Pledel¹, Laurent Mirioni¹, Clémence Agrapart⁴, Gérard Sou⁶, Nicolas Geyskens⁷ et équipe IRAP/LAB

(1) LPP, UMR7648, CNRS, Observatoire de Paris, Université Paris sciences et lettres, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Ecole Polytechnique Institut Polytechnique de Paris (2) LAB, UMR5805 EPOC, Université de Bordeaux, Pessac, (3) IRAP, UMR5277, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Observatoire Midi-Pyrénées, CNRS, (4) LPC2E, UMR7328, CNRS, Université d'Orléans, CNES (5) LESIA, CNRS, Observatoire de Paris Université Paris sciences et lettres, Sorbonne Université, Université de Paris, CNES (6) LGEEP, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris-Saclay, Centrale-Supélec, (7) DT-INSU, CNRS



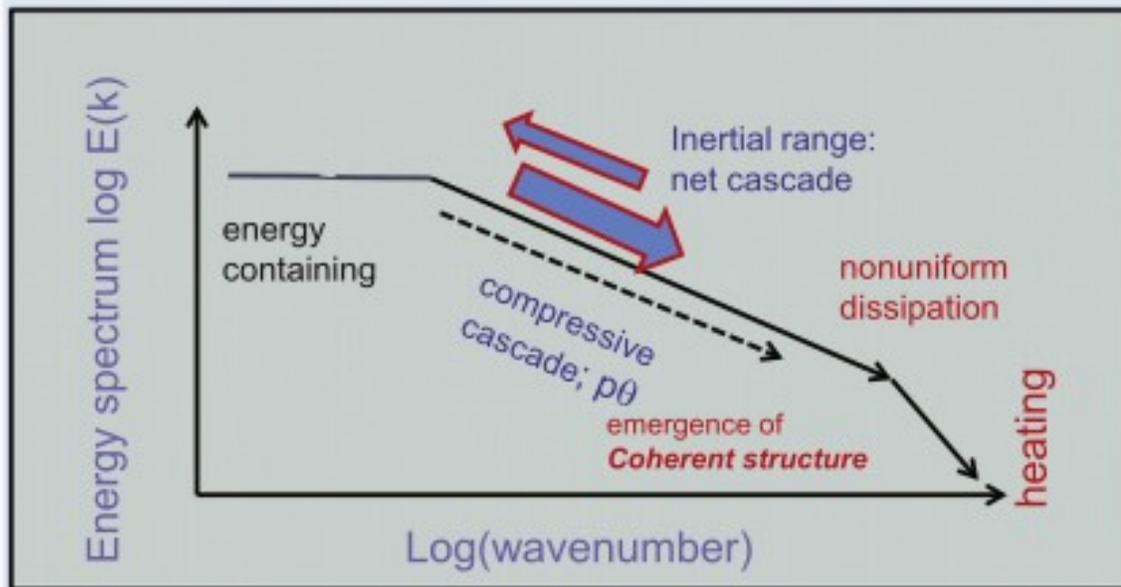
Introduction



La turbulence joue un rôle important dans le transport de masse, de quantité de mouvement et d'énergie notamment dans les plasmas magnétisés

Elle est présente dans de nombreux plasmas astrophysiques et de laboratoire et peut se coupler à d'autres processus fondamentaux (reconnexion, chocs, accélération ...)

Cascade turbulente, dissipation et chauffage
[e.g. Matthaeus et al., ApJ, 2020 & présentation Pauline Simon]



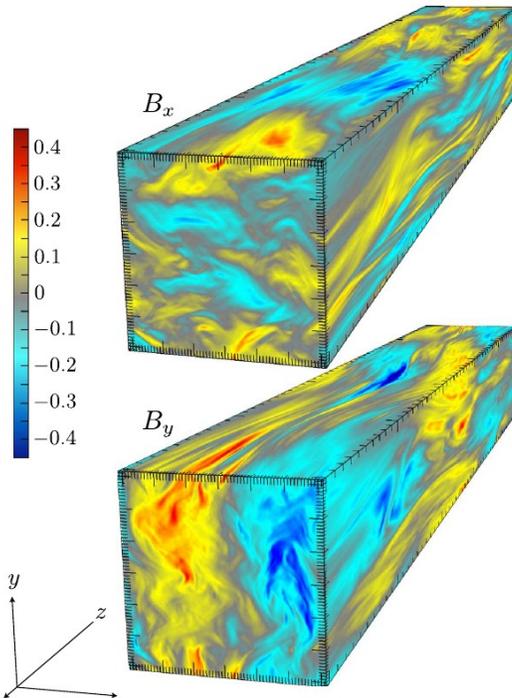
Processus plasmas très dynamiques et impliquant des couplages multi-échelles allant des échelles fluides aux échelles électroniques

=> Mesures multi-points multi-échelles (fluides à subioniques)
HelioSwarm & Plasma Observatory ESA/M7 (phase 2)

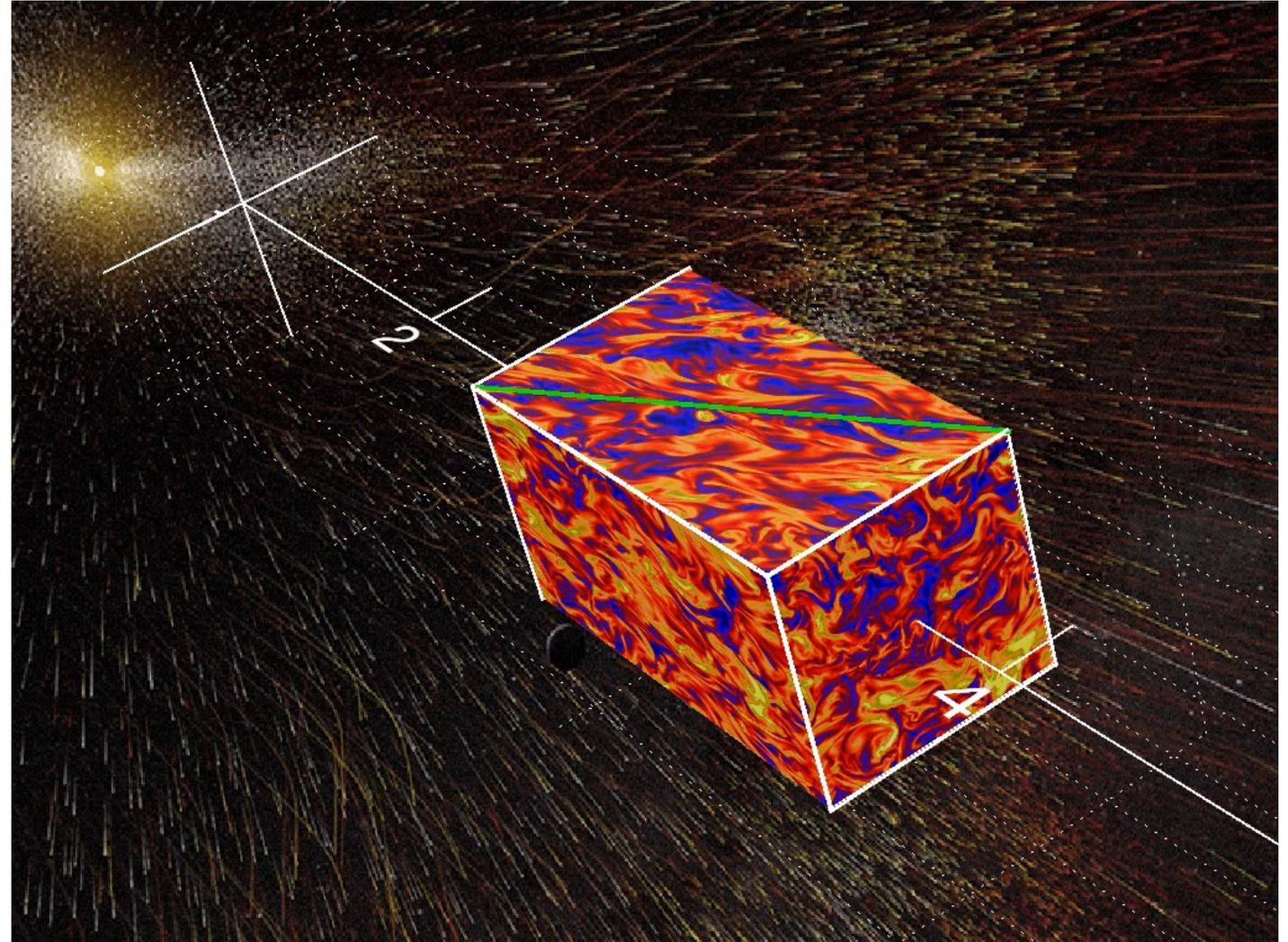


Introduction

Modélisation MHD 3D de la turbulence dans
le vent solaire en expansion radiale
(R. Grappin et al.)



Simulations Hybrid-Vlasov 3D :
Chauffage ionique par ondes d'Alfvén cinétiques
[Arzamanskiy et al., ApJ, 2019]

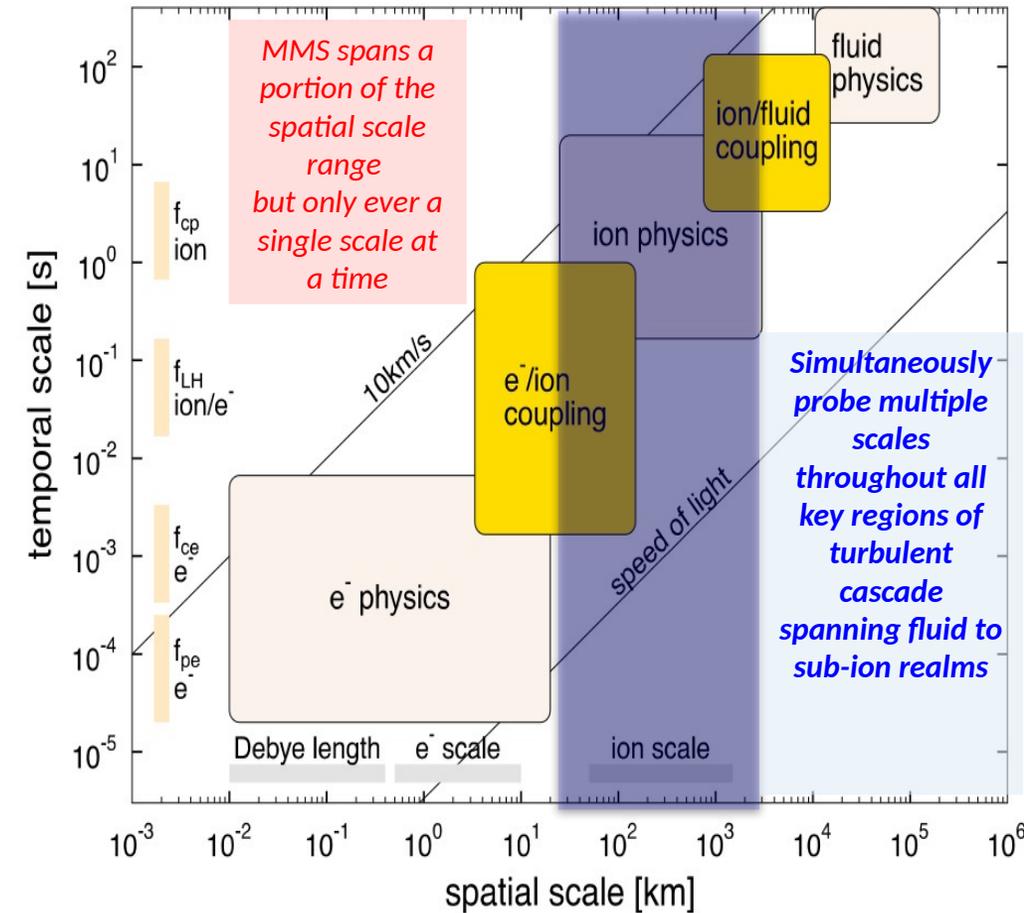


Contexte observationnel



- Mesures multi-points dans le vent solaire par **Cluster** (4, ESA), **THEMIS/ARTEMIS/NASA** (5/2, NASA), **MMS** (4, NASA)
- Conjonctions grande échelle dans l'héliosphère **Parker Solar Probe** (NASA), **Stereo A** (NASA), **Solar Orbiter** (ESA), **BepiColombo** (ESA/JAXA) **et missions terrestres**
- Campagne d'étude de la turbulence du vent solaire par **MMS** (2 semaines)
 - Augmentation de l'apogée à 30 RT (8 février 2019)
 - Augmentation du tilt de l'axe de spin (diminuer les effets de sillage sur les mesures électriques)
 - Configuration en collier de perles (25, 50 et 100 km) pour l'étude de cohérence de phase des fluctuations à différentes échelles
 - Sensibilité de SCM insuffisante mais relativement bonnes mesures particules, **B** (DC <4 Hz) et **E**

Toutes ces missions ne peuvent fournir des mesures au mieux qu'à une échelle à la fois

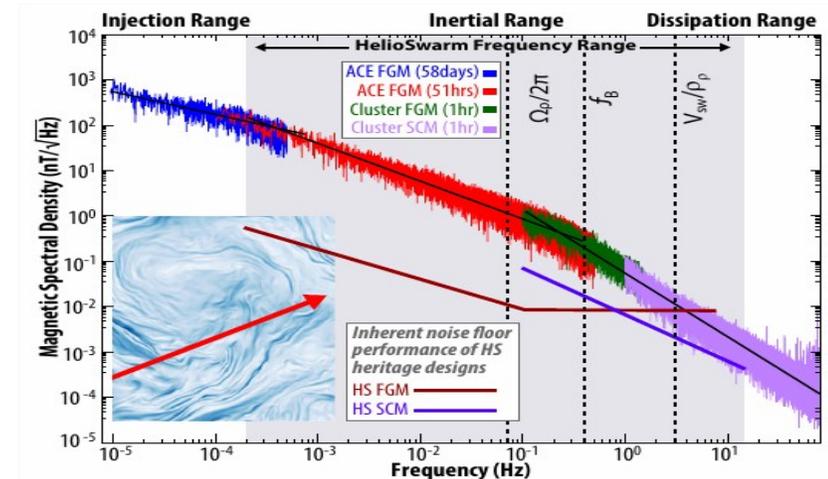
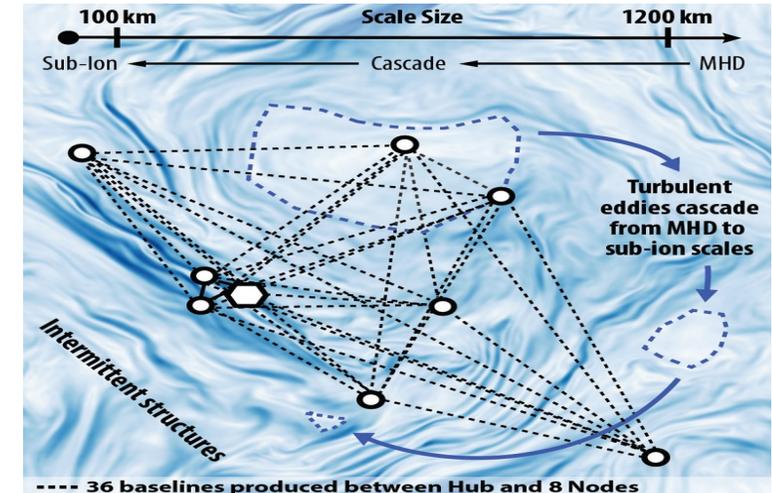


[Courtesy of H. Spence]

Objectifs scientifiques



- L'environnement plasma proche de la Terre (vent solaire, magnétogaine, magnétosphère) est un des seuls laboratoires naturels qui permettent l'étude *in situ* des processus universels liés à la turbulence plasma conduisant à la cascade de l'énergie des grandes échelles (fluide) vers les petites échelles cinétiques (ionique et subionique)
 - Les 2 objectifs principaux de la mission HelioSwarm sont
 - Etudier la distribution tridimensionnelle temporelle et spatiale de la turbulence plasma
 - Déterminer l'influence mutuelle entre les frontières et les structures grandes échelles (ex: éjection de masse coronale, chocs interplanétaire et terrestre, magnétopause, ...) et la turbulence plasma
- Grâce à des **mesures simultanées** des échelles fluides aux échelles subioniques



Concept de mission (I)

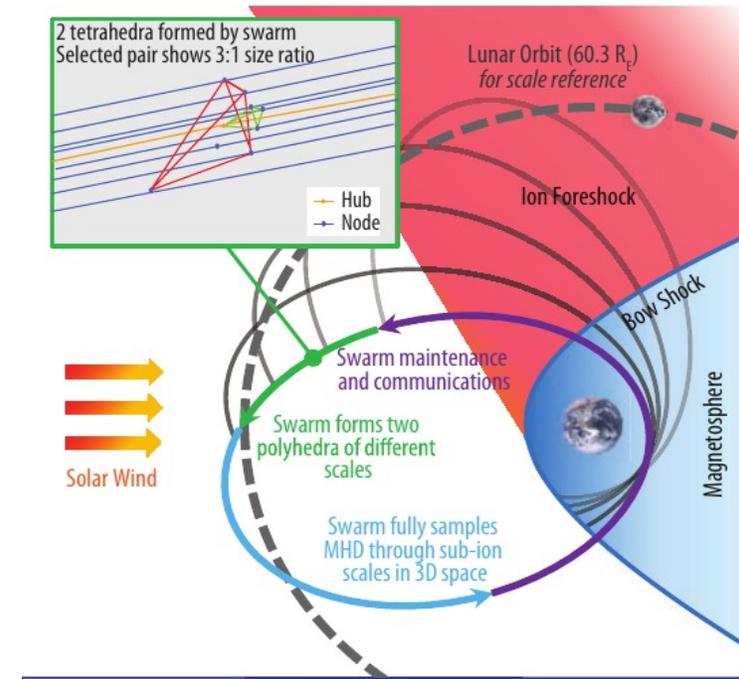


Helioswarm a été sélectionnée en phase A (9 mois, 1.25 millions \$/prop.) de l'AO MIDEX NASA 2019 avec 5 autres propositions le 28/08/2020.

Rapport de phase A : 07/07/2021 => **Sélectionnée le 10 février 2022** (avec Muse)
<https://www.nasa.gov/press-release/new-sun-missions-to-help-nasa-better-understand-earth-sun-environment>

Mission (PI H. Spence, UNH ; CoPI K. Klein, Univ. Arizona)

- 1 plateforme (Hub) + 8 petits satellites (nodes) identiques stabilisés trois axes avec propulsion et permettant une **analyse à plusieurs échelles simultanément** avec 36 combinaisons de paires et 126 tétraèdres couvrant les séparations de ~3000 km (MHD) à ~50 km (subionique)
- Orbite : résonance lunaire ~ 60 RT (pour s'éloigner suffisamment du choc) et périgee à 15 RT (bonne télémétrie)
- **Budget** : 250 M\$, **durée** : 1.5 an et **lancement prévu** : **2028** (Muse en 2026)



Science Instruments

High-TRL, high-heritage instrument suite optimized for solar wind turbulence measurements.

HUB & NODE

Fluxgate Magnetometer (FGM)

- Vector DC magnetic fields
- Solar Orbiter post-environmental heritage and JUICE design heritage



Search Coil Magnetometer (SCM)

- Vector AC magnetic fields
- JUICE design heritage



Faraday Cup (FC)

- Solar wind plasma density and velocity
- Parker Solar Probe, WIND, DISCOVER flight heritage



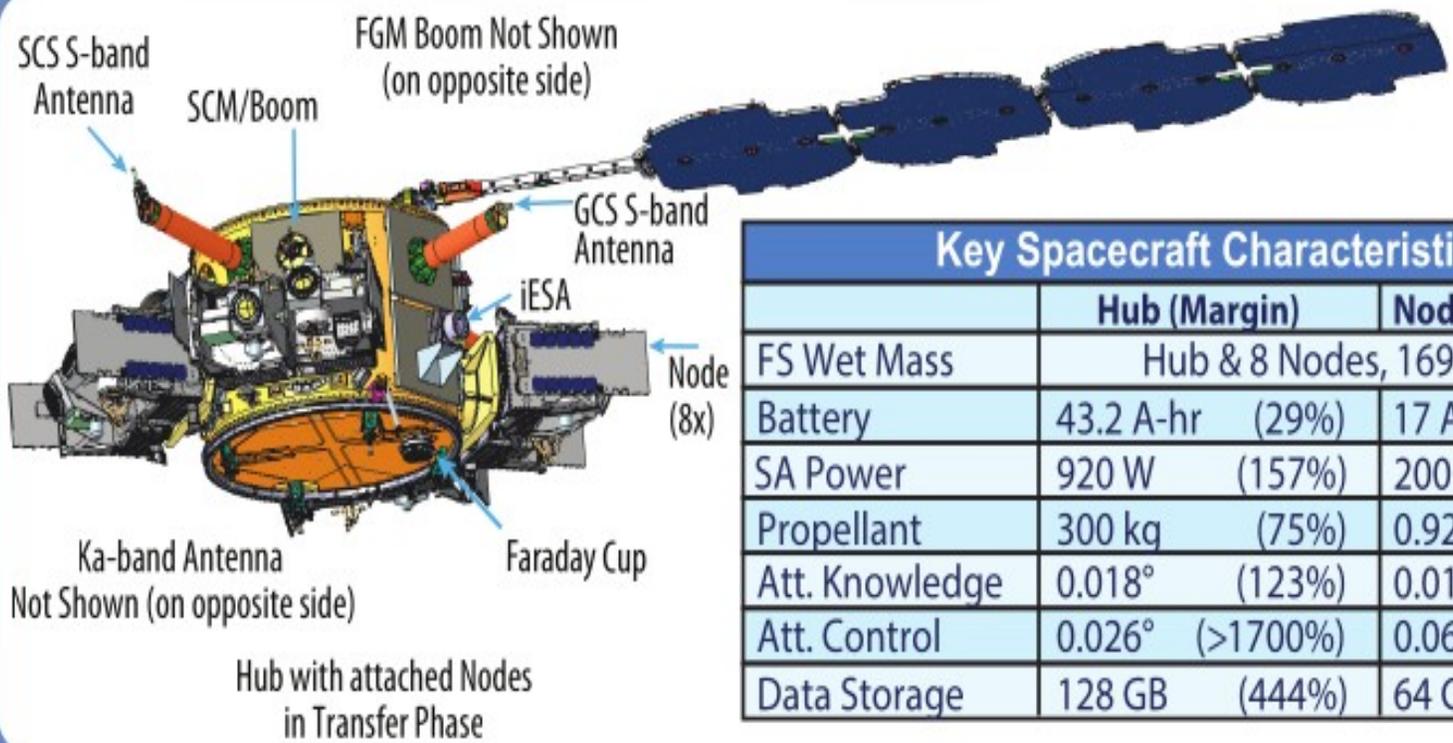
HUB ONLY

Ion Electrostatic Analyzer (iESA)

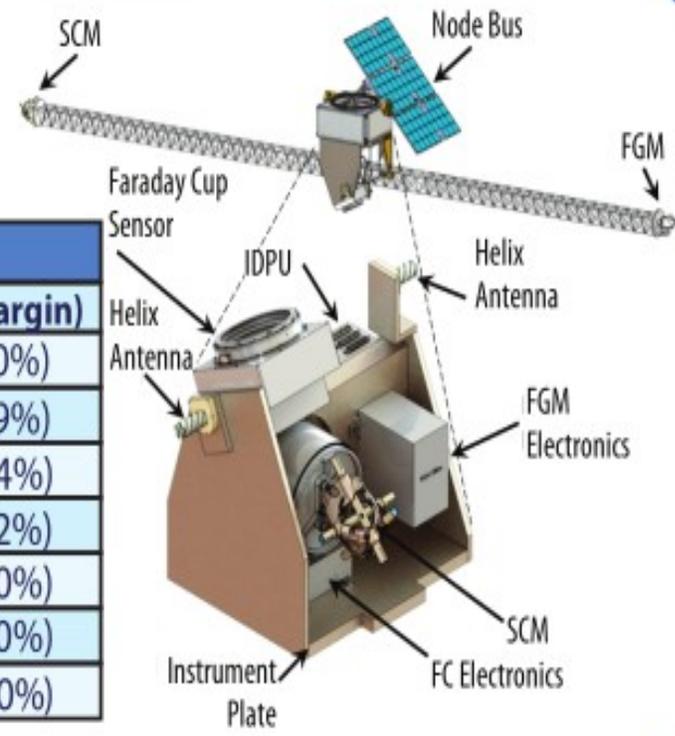
- Ion velocity distributions
- Solar Orbiter post-environmental heritage and MAVEN flight heritage



Concept de mission (II)



| Key Spacecraft Characteristics | | |
|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| | Hub (Margin) | Nodes, ea. (Margin) |
| FS Wet Mass | Hub & 8 Nodes, 1695.8 kg (90%) | |
| Battery | 43.2 A-hr (29%) | 17 A-hr (149%) |
| SA Power | 920 W (157%) | 200 W (104%) |
| Propellant | 300 kg (75%) | 0.92 kg (562%) |
| Att. Knowledge | 0.018° (123%) | 0.015° (180%) |
| Att. Control | 0.026° (>1700%) | 0.069° (>600%) |
| Data Storage | 128 GB (444%) | 64 GB (>5000%) |



Quel compromis pour le nombre de points de mesure ?



Compromis science/coût/ingénierie (redondance)

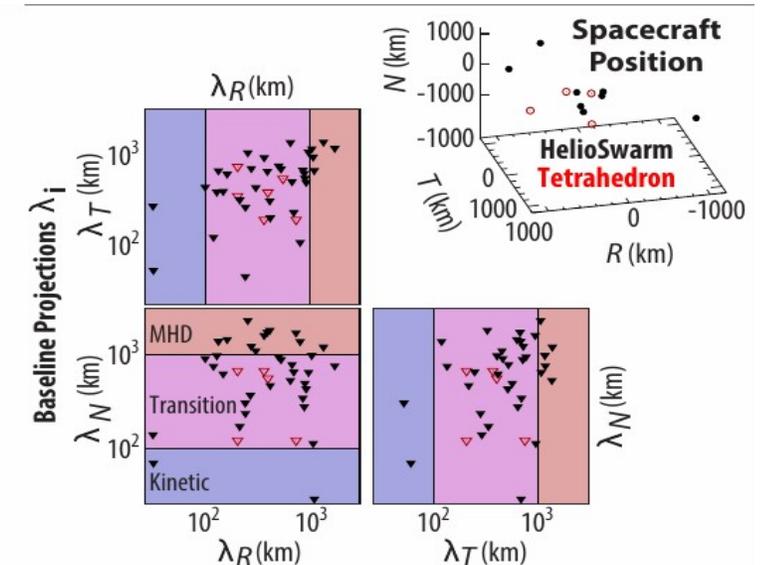
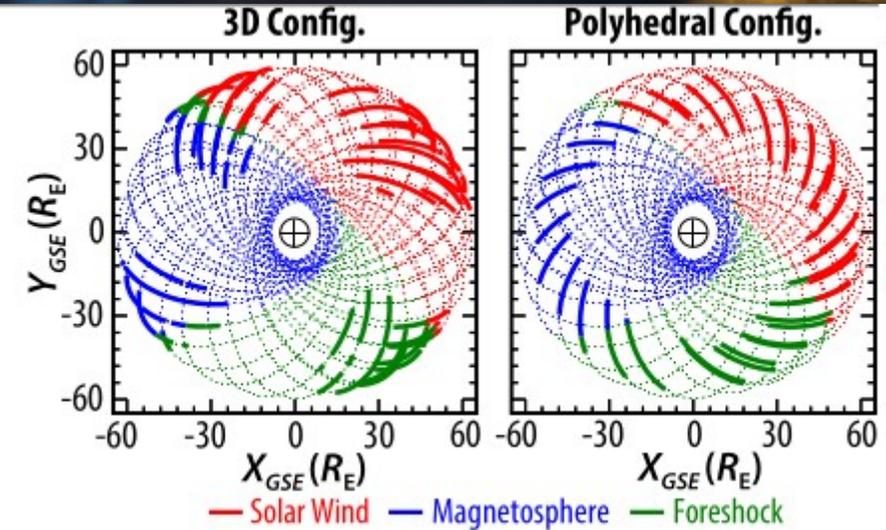
MMS and Cluster

THEMIS

Plasma Observatory



| | MMS and Cluster | THEMIS | Plasma Observatory | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------|--------|--------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Size of Swarm | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Number of Nodes | 0 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| # of unique s/c pair separations | 6 | 10 | 15 | 21 | 28 | 36 | 45 | 55 | 66 |
| # of unique 4-s/c tetrahedra | 1 | 5 | 15 | 35 | 70 | 126 | 210 | 330 | 495 |



Nouveau calendrier NASA



Difficultés budgétaires NASA FY2024

- Phase B : juin 2022 jusqu'à août 2025 (Livraison EM en fin de phase B)
- Phase C : sept. 2025 à déc. 2026 (Livraison FMs)
- Phase D : jan. 2027 à début 2029 (Intégration sur satellites) avec **lancement nov. 2028**
- Phase E/F : 6 mois de « commissioning » + 1,5 an d'exploitation

Point clé CNES de fin de phase A (2 jours) octobre 2022

Seach-Coil Magnetometer (SCM)



Helioswarm node (x8)

Description:

système tri-axe d'antennes magnétiques monté au bout d'un mât rigide (3 m) opposé à celui de FGM

Fonction clé :

SCM fournit la mesure analogique des fluctuations magnétiques entre 0.1 et 16 Hz qui est ensuite numérisée par le DPU (UNH)

Heritage: JUICE

Structure mécanique

PEEK
(conception DT-INSU/CNRS)

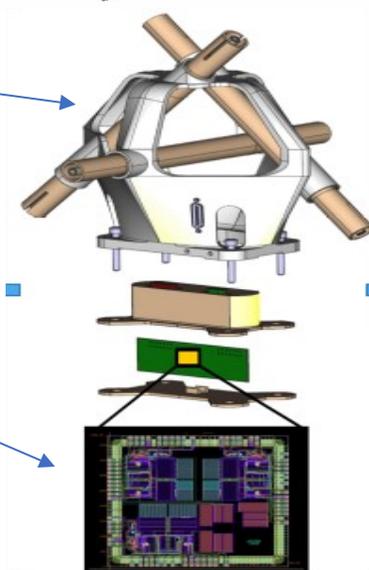
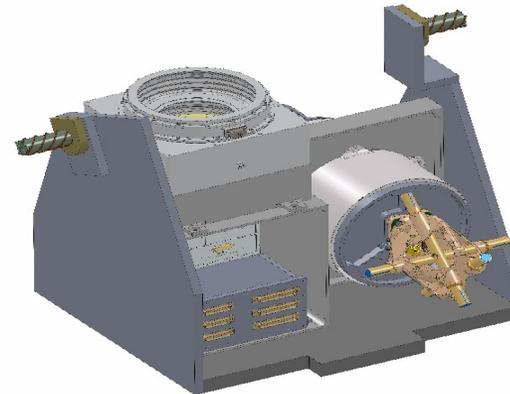
ASIC

350 nm, Rad-hard
(500 krad)

Prototype

Simulations
Augmentation de la sensibilité [0.1Hz-16Hz]
Filtrage basse bas
BBM PA&capteur
en cours de réalisation

Budget 1,5 Meuros



Frequency range 0.1 - 16 Hz

Sensitivity (requirement) 10 pT/√Hz @ 1Hz
1 pT/√Hz @ 10Hz

Sensitivity (simulation) 10 pT/√Hz @ 1Hz
0.6 pT/√Hz @ 10Hz

Alignment (requirement) Absolute pointing knowledge :
+/-0.5° (TBR)
FGM/SCM coalignment : +/-2°

Mass Sensor: 545 g
MLI fourni par UNH: TBC
Harness fourni par UNH:
<400 g (TBC)

Dimensions 20.0x20.0x20.0 cm

Power 0.25 W (0-5.5V)

Qualification Temperature Range -150C to +40C (operational)
-180C to +70C (non-operational)

Data rate 1.5 kbp (TBR)

TRL 7/8 (2021)

Equipe SCM LPP/LPC2E

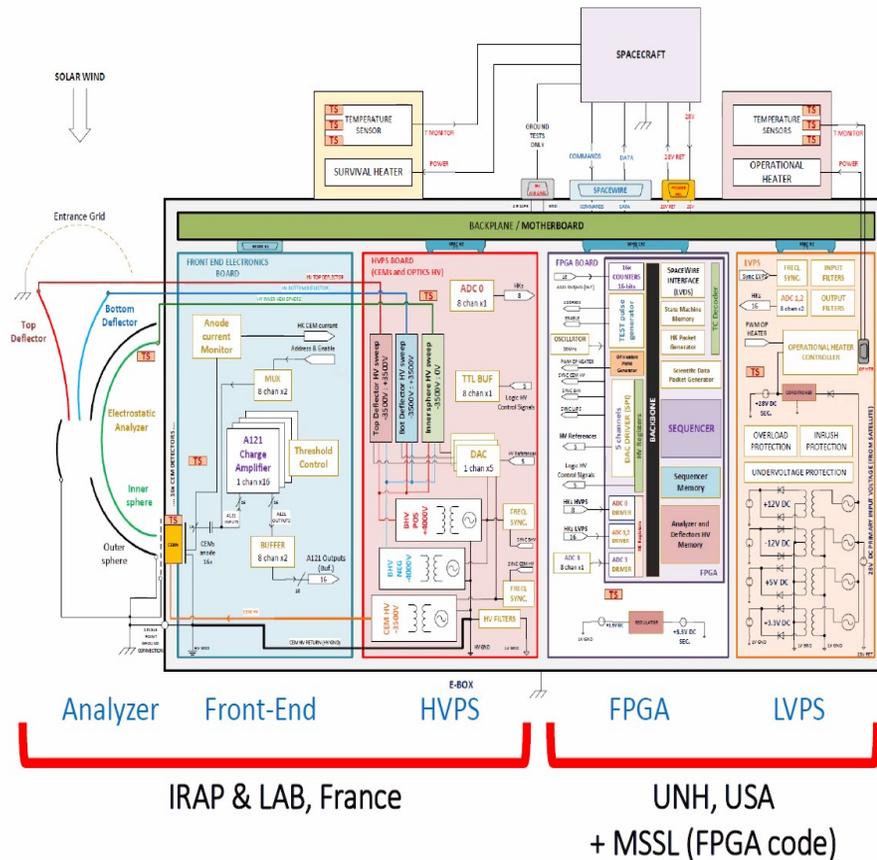


| | Fonction | Statut | ETPT | Laboratoire |
|-----------------------|---------------------------------|---------------|-------------|---|
| O. Le Contel | CoI (Lead instrument) | CR CNRS | 0.5 | LPP |
| A. Retino | CoI (calibration) | CR CNRS | 0.5 | LPP |
| M. Kretzschmar | CoI (calibration) | MDC | 0.25 | LPC2E (+JL Pinçon/analyse multi-points) |
| M. Mansour | TM | IR CNRS | 0.5 | LPP |
| G. Jannet | CoTM/GSE | IR CNRS | 0.5 | LPC2E |
| F. Mehrez | Micro-electronics | IR CNRS | 0.5 | LPP |
| C. Revillet | GSE software | IR CNRS | 0.3 | LPC2E |
| C. Agrapart | AP/AQ | IR CNRS | 0.1 | LPC2E |
| CDD | Instrumentation | IE | 1 | LPP |
| D. Alison | Electronics | AI CNRS | 0.5 | LPP |
| S. Pleedel | Mechanics (Design&machining) | AI CNRS | 0.2 | LPP |
| N. Geyskens | Mechanics (Design) | IR CNRS | 0.1 | DT-INSU (sous réserve AO 09/2022) |

Ion Electrostatic Analyser iESA (I)

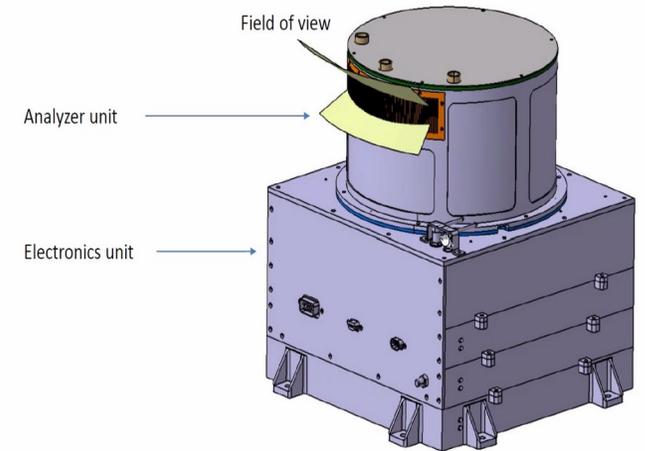


iESA block diagram with main subsystems



iESA mechanical design

- 16 channel electron multipliers (CEMs)
- 16 A 121 Amptek amplifiers
- 3° resolution in azimuth
- 3° resolution in elevation
- Angular FoV $\pm 24^\circ$



Same motherboard, integrate FPGA and LVPS boards at IRAP

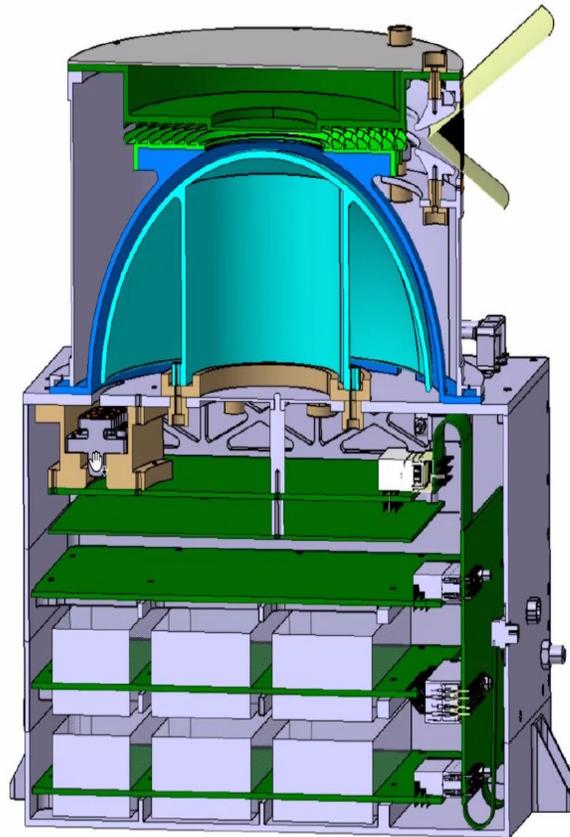
iESA (II)



iESA mechanical design

Main sub-systems:

- Deflectors
- Collimators
- Analyzer spheres
- 16 Channel Electron Multipliers (CEM)
- Front-End Electronics (FEE) board with 16 Amptek A121
- High Voltage Power Supply (HVPS) board
- FPGA Board
- Low Voltage Power Supply board



Amélioration vs héritage Solar Orbiter

Même sphère, même diamètre.

Changement des collimateurs et des déflecteurs.

Sur SolO pour empêcher que des UVs rentrent dans l'instrument, les déflecteurs étaient à l'intérieur ce qui limitait leur surchauffe.

Sur HS, ils sont remis à l'extérieur (MAVEN, STEREO, ...)

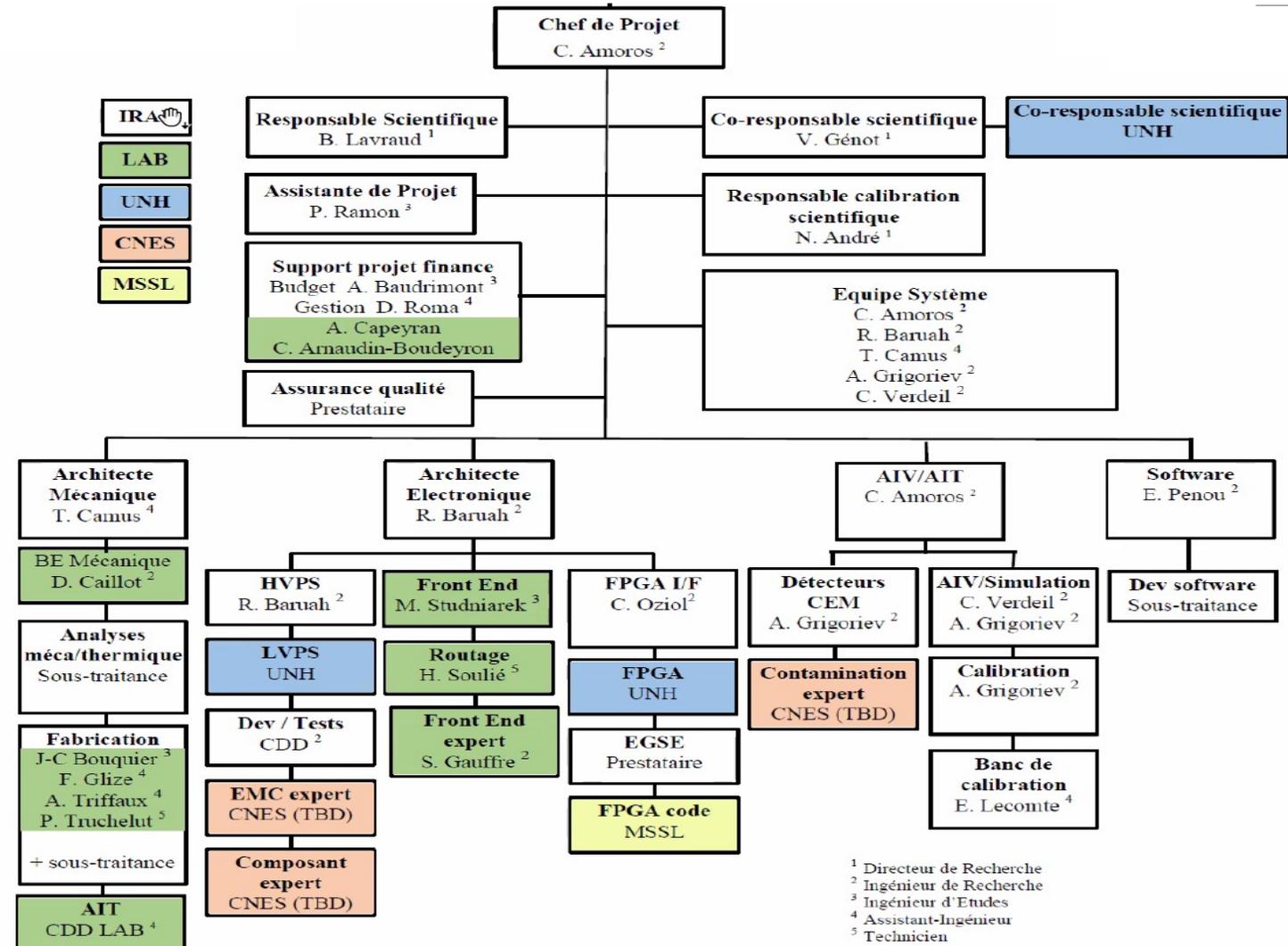
| | |
|---------------------------|---------|
| iESA mass | 3580,61 |
| iESA mass with 20% margin | 4296,73 |

Budget 3,27 Meuros

Equipe iESA IRAP/LAB



Organigram HelioSwarm iESA



Résumé



- Une thématique (Etude 3D spatiale et temporelle de la turbulence plasma) dans laquelle la communauté française est fortement impliquée dans un contexte de nombreuses missions héliosphériques (PSP, SoLO, Bepi, STA, MMS, ARTEMIS, Cluster, ...)
- Lien avec de nombreuses études astrophysiques (milieu interstellaire, disque d'accrétion, chocs astrophysiques, ...)
- Une expertise de la communauté française SHM pour l'analyse des mesures multi-points héritée de Cluster et MMS
- Première constellation en orbite terrestre lointaine avec plus de 5 satellites
- Première constellation de petits satellites en orbite terrestre lointaine
- Une instrumentation SCM (LPP/LPC2E) et iESA (IRAP/LAB) à fort TRL héritée des missions ESA JUICE et SoLO qui ne nécessite pas de développements importants
- Budget total (CNES) : ~ 4.8 Meuros. Début phase B juin 2022.
- Lancement novembre 2028. Durée nominale 1,5 an. Données en accès libre.

