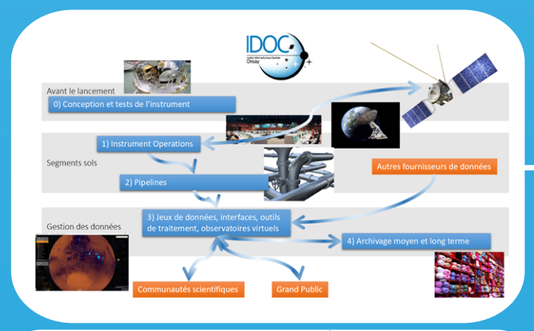

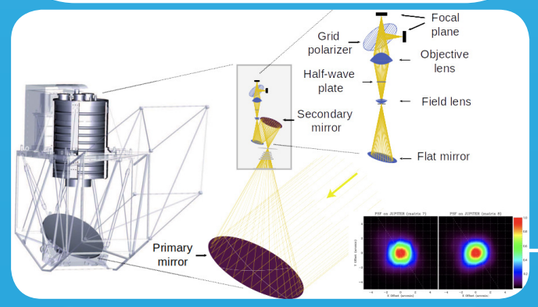

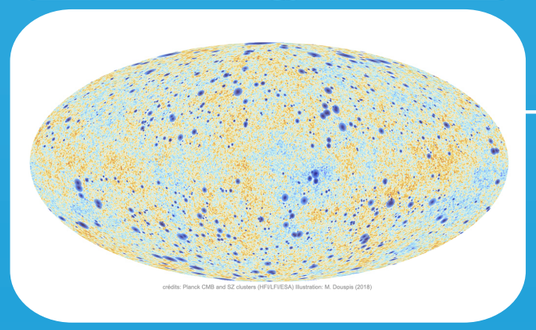

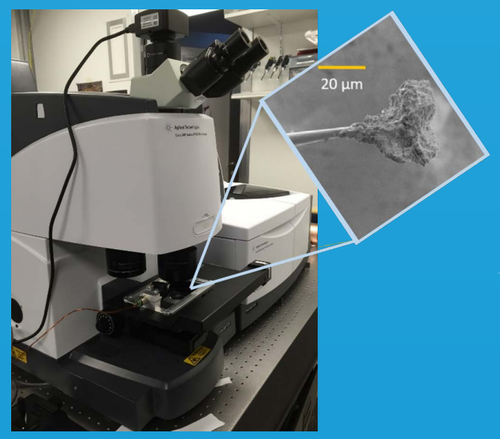

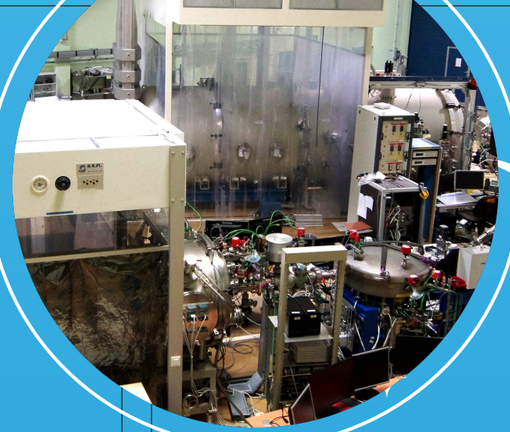

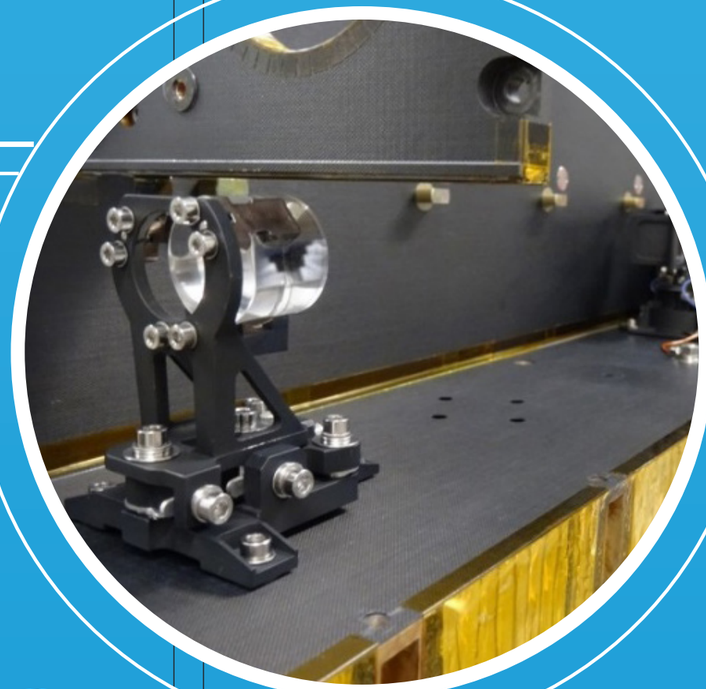

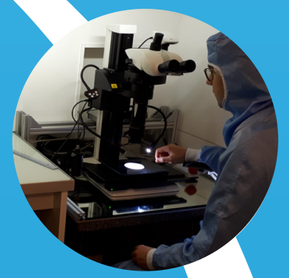

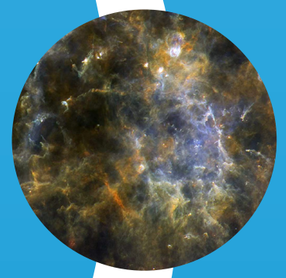

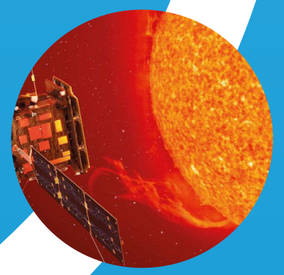

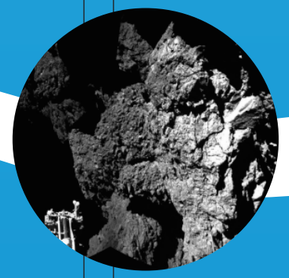

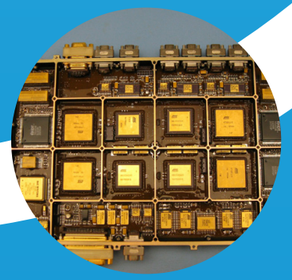

IAS
Institut d'Astrophysique Spatiale
Orsay

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE

www.ias.universite-paris-saclay.fr

Bâtiment 121
Faculté des sciences 91405
Orsay cedex FRANCE

communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

cnrs
université PARIS-SACLAY
IAS Orsay

L'INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE

L'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS) est une unité mixte de recherche du CNRS et de l'Université Paris-Saclay, fondée en 1989 et implantée sur le campus universitaire d'Orsay. Elle a établi depuis plusieurs décennies un partenariat étroit avec le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). Le laboratoire compte 140 personnes : chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, techniciens, administratifs, doctorants, et post-doctorants. La recherche en astrophysique menée au laboratoire couvre un domaine large de la physique de notre soleil jusqu'à la physique des galaxies et la cosmologie en passant par l'étude de la formation et de l'évolution des planètes du système solaire et des autres systèmes planétaires (exoplanètes), de la matière extraterrestre, du gaz et de la poussière interstellaires.

L'IAS est l'un des grands laboratoires spatiaux européens dont la recherche s'appuie fortement sur l'observation faite depuis l'espace grâce à des instruments embarqués à bord des grandes missions spatiales en astronomie. Dans ce contexte, les équipes scientifiques et techniques de l'IAS définissent et conçoivent les instruments, en supervisent la réalisation, en réalisent l'intégration et en mesurent les performances avant le lancement. Une fois la mission spatiale lancée, l'IAS assure la mise en œuvre opérationnelle de certains instruments. Durant les phases d'observation, il assure la collecte des données et leur mise à disposition pour la communauté scientifique nationale et internationale. Les projets sont réalisés essentiellement dans le cadre de collaborations avec d'autres laboratoires spatiaux, en France et à l'étranger.

L'IAS participe ainsi à la plupart des missions majeures en astrophysique du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et collabore régulièrement avec les agences spatiales étrangères (NASA aux Etats Unis, JAXA au Japon...). L'histoire du laboratoire est déjà jalonnée de succès scientifiques et techniques prestigieux :

- **SOHO** a permis d'étudier la structure interne et l'atmosphère du Soleil,
- **MarsExpress** a conduit à la réalisation de cartes minéralogiques de la surface de Mars, permettant de réécrire complètement l'histoire géologique de la planète rouge,
- **Rosetta** a effectué la première mise en orbite autour d'une comète. **Philae**, son atterrisseur, a permis l'observation in situ de ce vestige du système solaire primordial,
- **CoRoT** a permis la détection de la première exoplanète dont la densité mesurée est comparable à celle de la terre,
- **Planck** a permis d'obtenir une carte à très grande résolution de la première lumière de l'Univers, et de ses anisotropies qui sont à l'origine des grandes structures actuelles (galaxies, amas de galaxies...), et de contraindre précisément le modèle cosmologique.

D'autres projets sont aujourd'hui à l'étude ou en phase de développement. Ils s'inscrivent directement dans la continuité de ces missions pionnières et modifieront profondément, dans la prochaine décennie, notre vision du cosmos et de tous les objets qui le composent.
L'IAS travaille le plus souvent en partenariat avec les grands groupes industriels impliqués dans le spatial, Thales Alenia Space, Airbus Defense and Space, Air Liquide...

L'IAS met au point et développe des dispositifs expérimentaux en laboratoire et sur des plateformes expérimentales nationales (accélérateurs, lignes synchrotron), et conduit un important programme de Recherche et Développement pour inventer l'instrumentation astrophysique spatiale de demain.

RECHERCHE EN ASTROPHYSIQUE SPATIALE

La recherche en astrophysique à l'IAS est structurée autour de 5 équipes scientifiques :

- **Cosmologie** : étude de l'univers primordial, du fond diffus cosmologique, de la formation et de l'évolution des grandes structures de l'univers pour comprendre le modèle cosmologique.
- **Astrophysique et Matière Interstellaire** : étude de la formation et de l'évolution de la poussière et du gaz dans notre Galaxie, lien avec la formation des étoiles et des systèmes planétaires, environnements circumstellaires.
- **Système solaire et systèmes planétaires** : étude de la formation et de l'évolution du système solaire, des planètes et des petits corps, par la caractérisation de leur composition, en orbite et *in situ*, ainsi que par l'analyse en laboratoire d'échantillons extraterrestres ; détection et caractérisation d'exoplanètes.
- **Physique solaire et stellaire** : étude du soleil, structure interne, chauffage de la couronne, atmosphère. Structure interne des étoiles. Relations étoiles-planètes.
- **Astrochimie et Origines** : étude de l'origine et de l'évolution de la matière et d'objets extraterrestres (petits corps, surfaces planétaires, milieu interstellaire) à partir d'expériences et d'analyses en laboratoire confrontées aux observations spatiales.

La recherche s'appuie fortement sur l'instrumentation spatiale embarquée développée au laboratoire, au sein des services techniques : Mécanique/Thermique, Optique, Electronique, Informatique, Instrumentation et Station d'étalonnage.

L'IAS assure une large gamme de fonctions dans les projets grâce à la diversité de ses métiers : chef de projet ; responsable système ; architecte optique, mécanique, électronique ; responsable des tests et intégrations.

ENSEIGNEMENT

Les personnels de l'IAS, enseignants-chercheurs, chercheurs et ingénieurs, participent aux enseignements de l'Université Paris-Saclay aux niveaux Licence, Master, et Doctorat. De plus, le laboratoire est impliqué depuis sa création dans des enseignements à vocation professionnelle dans le cadre, notamment, de la seconde année de Master professionnalisant « Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace ».

Les enseignements sont dispensés principalement dans les domaines des sciences physiques, de l'astrophysique, de l'instrumentation et de l'ingénierie spatiale. Ils s'adressent à des publics d'étudiants de différentes filières : physique bien sûr, mais aussi chimie, électronique, informatique, mathématique et sciences de la Terre.

Plusieurs centaines d'heures par an de cours et de travaux pratiques sont dispensés dans les locaux de l'IAS : enseignements méthodologiques en instrumentation, en méthodes numériques, en traitement du signal, en informatique. Les étudiants ont accès à un environnement informatique dédié.

L'IAS participe à trois écoles doctorales. Depuis la création du laboratoire, plus de 150 doctorants français et étrangers ont été formés par la recherche et pour la recherche. L'IAS accueille chaque année plusieurs dizaines de stagiaires issus des Licences et Masters de l'Université Paris-Saclay, et d'autres universités ou d'écoles d'ingénieurs. Il accueille aussi des apprentis, qui suivent un cursus de formation en alternance. Il participe enfin à la promotion des métiers de la science en accueillant chaque année une quinzaine de collégiens de troisième lors de stages de découverte.

PLATEFORMES

L'IAS dispose de moyens techniques regroupés au sein de deux plateformes nationales.

Integrated Data and Operation Center - IDOC :

Le centre regroupe toutes les activités informatiques relatives à l'élaboration des missions spatiales (logiciel de bord, étalonnage, simulation), aux opérations des instruments embarqués à bord de satellites, à la réception des données satellitaires, au développement et à l'exécution d'une chaîne de traitement, à la mise à disposition du public, et à leur archivage pérenne.

A partir des observations effectuées, des jeux de données sont produits pour permettre l'interprétation scientifique. Des interfaces utilisant les dernières technologies numériques et virtuelles offrent une recherche aisée dans ces jeux de données, volumineux et complexes, ainsi que des capacités de traitements intensifs (calcul parallèle, deep learning). IDOC fournit un éventail complet d'outils de visualisation des résultats produits et garantit l'expertise des savoirs associés.

La Station d'Etalonnage :

Avec ses simulateurs d'environnement spatial, ses moyens d'intégration et de tests lourds, la station est un acteur majeur du développement des instruments spatiaux en France et en Europe. Elle est membre fondateur d'un Groupement d'Intérêts autour du Spatial (GIS), réseau national de moyens d'essais qui s'inscrit dans un Projet d'Activités de Recherche Appliquée et de Développement en Instrumentation pour le Sol et l'Espace (PARADISE).
Les sous-systèmes ou instruments complets sont intégrés puis testés et qualifiés au cours de nombreux essais : mesures physiques, essais en vibrations, étuvages et cyclages thermiques sous vide, puis vient l'étalonnage qui permet une connaissance approfondie de l'instrument.

L'étalonnage est l'étape finale du long processus qu'est le développement d'un instrument scientifique spatial avant sa livraison à l'agence spatiale et son intégration sur le satellite ou la sonde.

PLANÈTES, EXOPLANÈTES : SYSTÈME SOLAIRE ET SYSTÈMES PLANÉTAIRES

L'activité de l'équipe est orientée selon trois axes principaux de recherche : étude des processus d'évolution des corps planétaires du Système Solaire, étude des exoplanètes, et étude des conditions initiales du Système Solaire.

Processus d'évolution par observation des corps différenciés (planètes terrestres et géantes, satellites)

Les propriétés des surfaces des planètes et des satellites du Système Solaire permettent de contraindre leur formation, leur évolution et leur potentiel astrobiologique. Les imageurs hyper-spectraux proche-infrarouge à bord des missions spatiales ont révolutionné, au cours des deux dernières décennies, notre compréhension de l'évolution des surfaces de ces objets grâce à leur capacité à identifier et caractériser les matériaux (minéraux, glaces, composés organiques) présents en surface des objets planétaires.

En s'appuyant sur de tels moyens spatiaux qui permettent des observations depuis des plateformes orbitales ou *in situ*, plusieurs résultats majeurs ont été obtenus concernant la composition de la surface de Mars, notamment grâce à l'instrument OMEGA/ MarsExpress développé à l'IAS (Figure 1).

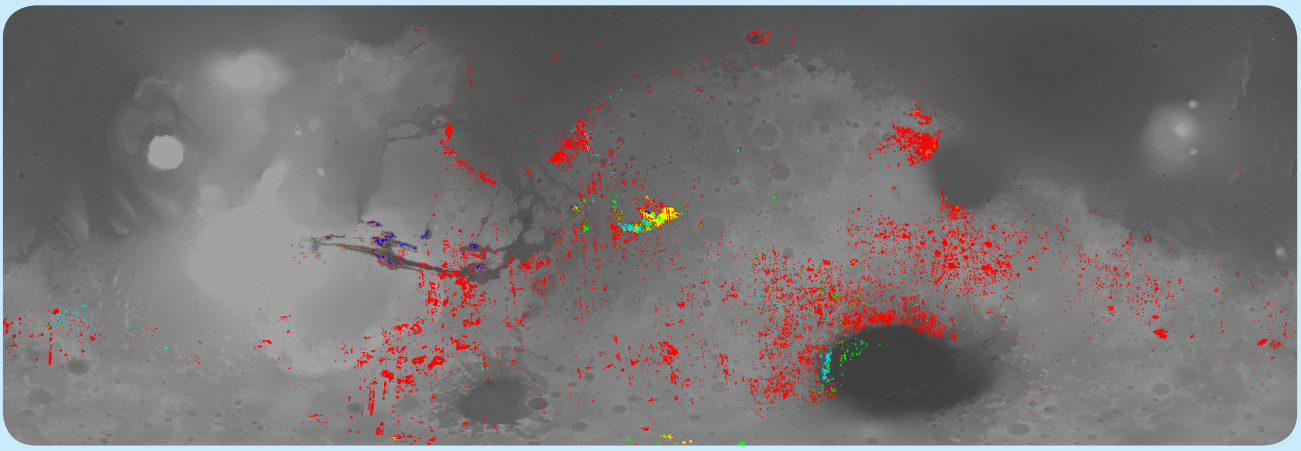

Figure 1 : Cartographie des minéraux hydratés à la surface de Mars.
Les différentes couleurs correspondent à des phases minérales (phyllosilicates, sulfates, carbonates,...)

Le laboratoire est très fortement impliqué dans la mission Bepi-Colombo qui observera la surface de Mercure avec des couvertures spectrale et spatiale inégalées, et pilote le développement instrumental de l'imageur hyperspectral MAJIS qui sera à bord de la mission JUICE pour explorer le système de Jupiter.

L'exploration spatiale du Système Solaire s'oriente de plus en plus vers la miniaturisation des instruments. Pour cela, une piste privilégiée consiste à utiliser des filtres acousto-optiques (AOTF) comme système dispersif. Les AOTFs sont ainsi au cœur de certains instruments tels que MicrOmega/ExoMars et MicrOmega/Curation facility (microscopes hyper-spectraux proche-IR) dont l'IAS a la responsabilité (Figure 2).

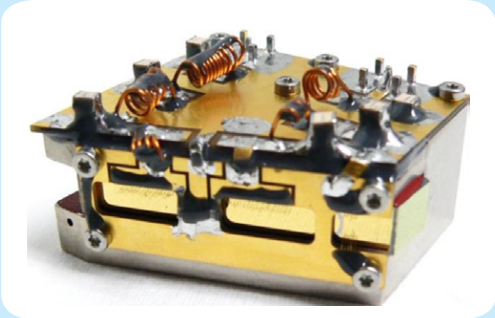

Figure 2 : MicrOmega/ ExoMars (microscope hyperspectral proche-IR) dont l'IAS a la responsabilité. AOTF développé pour le microscope hyperspectral proche-IR MicrOmega.

Planètes extrasolaires

L'IAS propose une approche théorique, observationnelle et instrumentale pour étudier les exoplanètes et leurs environnements, notamment grâce à une contribution importante aux missions spatiales de détection et de caractérisation de ces objets par la méthode des transits : COROT (2006-2012) et PLATO (lancement vers 2026). Le projet phare à moyen terme est le télescope spatial ARIEL (Figure 3) qui sondera de manière systématique les atmosphères de plusieurs centaines de planètes extra-solaires, des géantes gazeuses aux planètes rocheuses, qu'elles soient chaudes ou tempérées autour d'étoiles de différents types.

Figure 3 : Vue d'artiste de la mission ARIEL.

Conditions initiales de la formation du Système Solaire à travers l'étude de la matière primitive (grains cométaires, météorites, observations des corps primitifs)

L'essentiel des activités a été lié à la participation à la mission Rosetta qui a étudié la comète 67P. Cela a permis d'analyser la morphologie des grains de la coma grâce à l'instrument COSIMA (dont la caméra a été développée à l'IAS) sur l''orbiter (Figure 4) et d'imager la surface du noyau cométaire grâce aux caméras Civa (Figure 5) à bord de l'atterrisseur Philae, pour lequel l'IAS a assuré la coordination scientifique globale.

Nos recherches se poursuivront à travers des consortiums d'exploitation des données de moyens spatiaux similaires au montage effectué pour la mission Hayabusa-2 (coordination, mesures *in situ*/orbitales et retour d'échantillons).

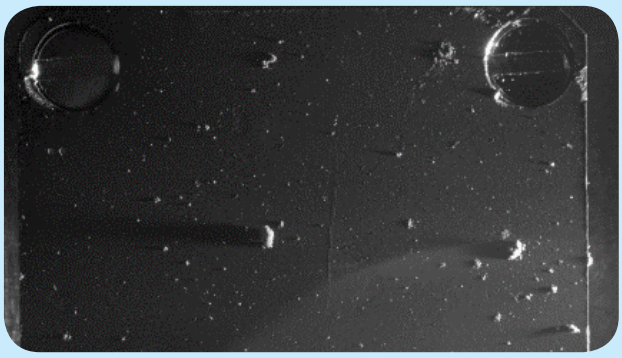

Figure 4 : Cible COSIMA instrument à bord du satellite Rosetta.

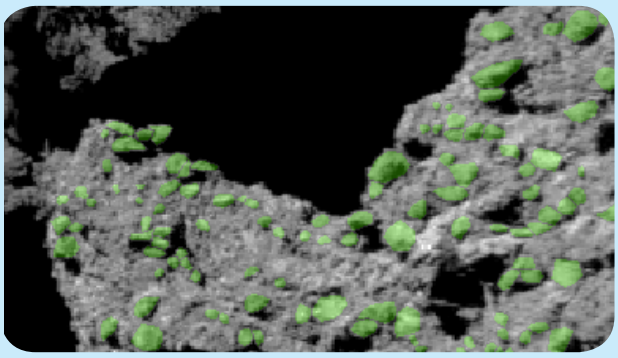

Figure 5 : Zoom d'une image CIVA indiquant la présence de particules de taille centimétrique (en vert) potentiellement indicatrices des processus d'accrétion du système solaire.

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

PHYSIQUE DU SOLEIL ET DES ETOILES

STRUCTURE INTERNE DU SOLEIL ET DES ETOILES

L'intérieur du Soleil et des étoiles n'est pas accessible à l'observation directe. Pour comprendre le fonctionnement et la physique interne de ces astres, il faut observer des oscillations en surface qui résultent d'ondes affectant l'ensemble de l'étoile, jusqu'à son centre. Les caractéristiques de ces oscillations (comme par exemple leur fréquence) dépendent en effet des conditions rencontrées par les ondes lors de leur propagation. Il est ainsi possible de remonter à la température, la composition chimique ou encore la rotation interne de l'étoile. Cette technique est dénommée «héliosismologie» pour le Soleil et «astérosismologie» dans le cas des étoiles en général.

Pour l'héliosismologie, l'instrument de prédilection à l'IAS est le spectromètre GOLF à bord du satellite SoHO, qui observe le Soleil 24h sur 24, et ce depuis 1996. L'IAS assure les responsabilités scientifique et technique de cet instrument qui observe les oscillations globales du Soleil en mesurant la vitesse de déplacement de la surface. Côté étoiles, c'est la mission CoRoT (2006-2013) dans laquelle l'IAS s'est investi, qui a apporté une moisson de nouveaux résultats sur l'intérieur des étoiles, certaines ressemblant au Soleil, d'autres plus massives ou plus évoluées (les géantes rouges). L'IAS s'implique maintenant dans la future mission PLATO de l'ESA, qui sondera encore plus précisément et largement les étoiles, permettant ainsi de comprendre la physique des systèmes stellaires autres que le nôtre.

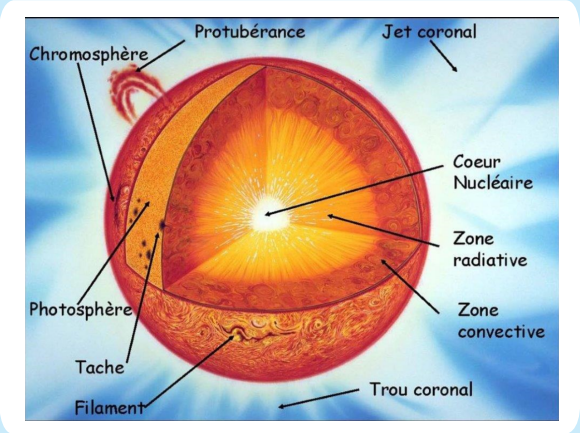

Figure 1 : Vue d'artiste de la structure du Soleil.

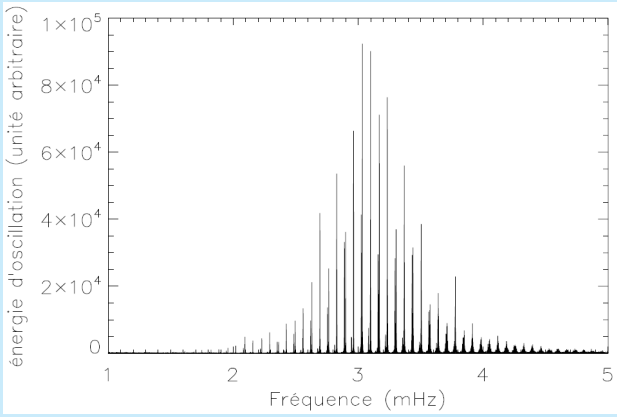

Figure 2 : Spectre des oscillations acoustiques du Soleil.

Figure 3 : Vue d'artiste de la mission PLATO.

L'ATMOSPHERE SOLAIRE

Une autre question importante pour les chercheurs de l'IAS est celle de l'interaction entre le Soleil et la Terre, interaction qui commence dès la couronne solaire dont les mécanismes de chauffage et d'accélération sous forme de vent solaire représentent de véritables défis pour les observations et la modélisation. Selon la phase du cycle d'activité magnétique solaire, des structures locales et transitoires peuvent avoir une influence sur l'environnement terrestre. Par exemple, des structures magnétiques peuvent être éjectées brusquement du Soleil, comme les protubérances éruptives ou les CME (éjections coronales de masse).

Afin d'étudier ces structures et leurs mécanismes de déclenchement, l'IAS conçoit des imageurs et des spectromètres dans les domaines ultraviolet (UV) et extrême UV, à hautes résolutions (spectrale et spatiale), notamment le spectro-imageur EIT à bord de SoHO. Autres contributions majeures : SUMER/SoHO, SECCHI/STEREO, CLASP (expérience fusée), et une batterie d'instruments embarqués à bord de Solar Orbiter (lancé en février 2020) : les spectromètres EUI et SPICE, ainsi que l'imageur polarimétrique PHI, pour la mesure du champ magnétique et des champs de vitesse, ce dernier permettant, de plus, l'analyse sismique des couches subatmosphériques.

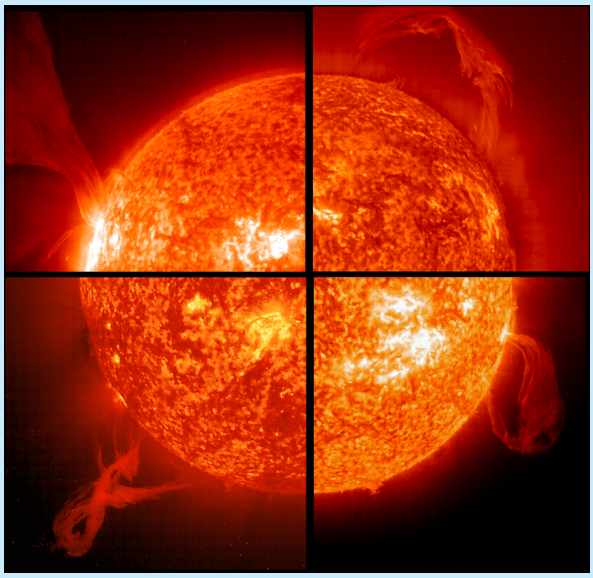

Figure 4 : Montage d'observations obtenues à des dates différentes, par l'instrument EIT à bord du satellite SoHO, montrant 4 protubérances éruptives (plasma dense et froid comparativement à la couronne solaire environnante). Les images sont obtenues dans l'ultraviolet et codées en fausses couleurs ; elles révèlent la haute chromosphère (température de l'ordre de 60 000 degrés). Les zones les plus chaudes apparaissent presque blanches (régions magnétiquement actives), alors que les zones les plus froides sont sombres (soleil dit calme).

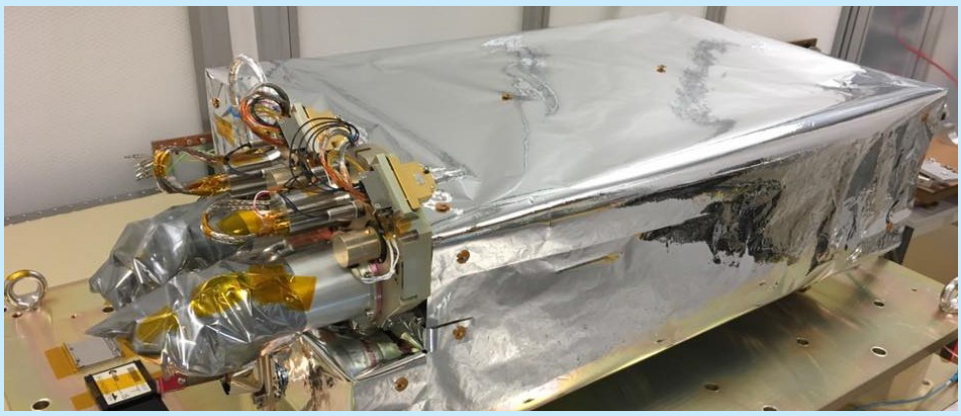

Figure 5 : Instrument EUI (Extreme Ultraviolet Imager) pour Solar Orbiter.

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

COSMOLOGIE

L'équipe Cosmologie aborde deux des grands thèmes de la discipline Astrophysique & Astronomie : les lois physiques qui gouvernent la formation et l'évolution de l'Univers, et les processus physiques à l'œuvre lors de sa structuration au cours de son histoire. Les activités de l'équipe Cosmologie s'articulent donc autour d'un continuum de problèmes physiques liés à la structuration de la matière depuis le Fond Diffus Cosmologique jusqu'aux galaxies. Les périodes de l'inflation primordiale, de la réionisation, et de la structuration récente de l'univers dominé par l'énergie noire sont au cœur des études de l'équipe. Ces recherches font appel à des approches observationnelles, de modélisation, de simulation et théoriques, souvent avec des collaborations internationales.

Un effort tout particulier est mené pour le développement d'outils de traitement et d'analyse de données basés sur les méthodes statistiques modernes. Des techniques novatrices sont adaptées et mises à profit au sein de l'équipe telles que le « Machine Learning » ou l'utilisation de GPU. Un effort particulier est porté sur la diffusion de produits et de logiciels de référence pour la communauté.

Notre activité en R&D et instrumentation s'inscrit dans le contexte programmatique spatial et sol de la discipline.

Nous avons été Principal Investigator (PI) de Planck/HFI, et avons eu des engagements sur des contributions instrumentales ou au segment sol sur ISO, XMM-Newton, PRONAOS (ballon CNES), NIKA (instrument sur le télescope IRAM 30m). Nous sommes impliqués dans les développements des chaînes cryogéniques, la caractérisation des détecteurs à bas bruit et les optimisations optiques.

Nous participons aux missions Euclid (M2 ESA), ATHENA (L2 ESA) et sommes moteurs dans le développement de satellites (Litebird, JAXA) et de précurseurs ballons de l'étude du Fond Diffus Cosmologique.

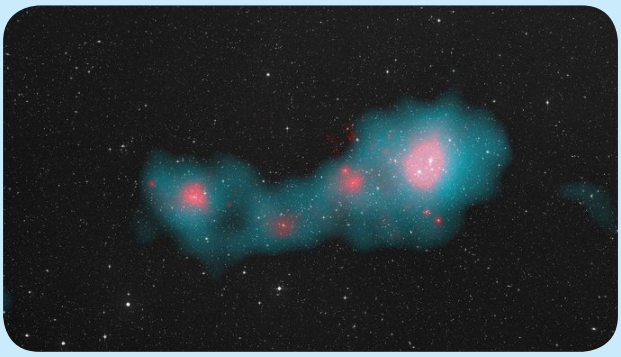

Figure 1 : Le superamas de galaxies de Shapley, vu en SZ (Planck, bleu), en X (Rosat, rose) et en optique (DSS) [ESA & Planck Collaboration/Rosat/Digitised Sky Survey]

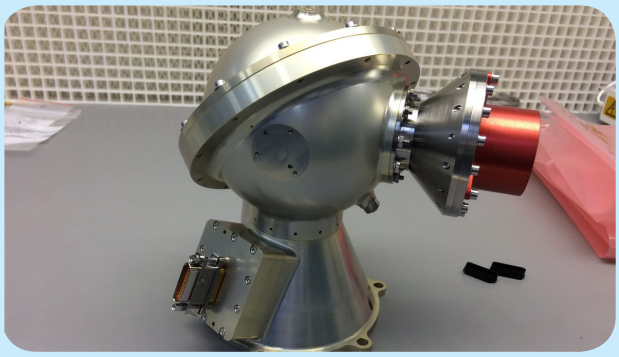

Figure 2 : Modèle de qualification de l'unité d'étalonnage de l'instrument VIS d'Euclid conçu à l'IAS

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

Lancement de la sonde européenne MarsExpress le 2 juin 2003 à 17h45 UTC de Baïkonour.

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

IDOC (INTEGRATED DATA AND OPERATION CENTER)

IDOC est la plateforme de l'IAS qui fédère les centres de données couvrant les différentes thématiques scientifiques du laboratoire. IDOC est géré par le service informatique du laboratoire.

IDOC intervient pour les missions spatiales où l'IAS a un rôle actif. Il participe aussi aux avant-projets spatiaux et aux projets spatiaux en cours de développement ou de test.

Les actions de la plateforme sont les suivantes :

1. la conception, la réalisation et l'étalonnage des instruments,
2. le contrôle des opérations des instruments embarqués à bord de satelllites,
3. le traitement, l'analyse et l'interprétation des données,
4. la production des données (avec automatisation et surveillance),
5. la valorisation et la mise à disposition de données,de haut niveau immédiatement utilisables à l'interprétation scientifique (outils de visualisation, diffusion dans l'observatoire virtuel...),
6. l'archivage pérenne des jeux de données (Figure 1).

Figure 1 : Baies de stockage de la salle Virtual Data

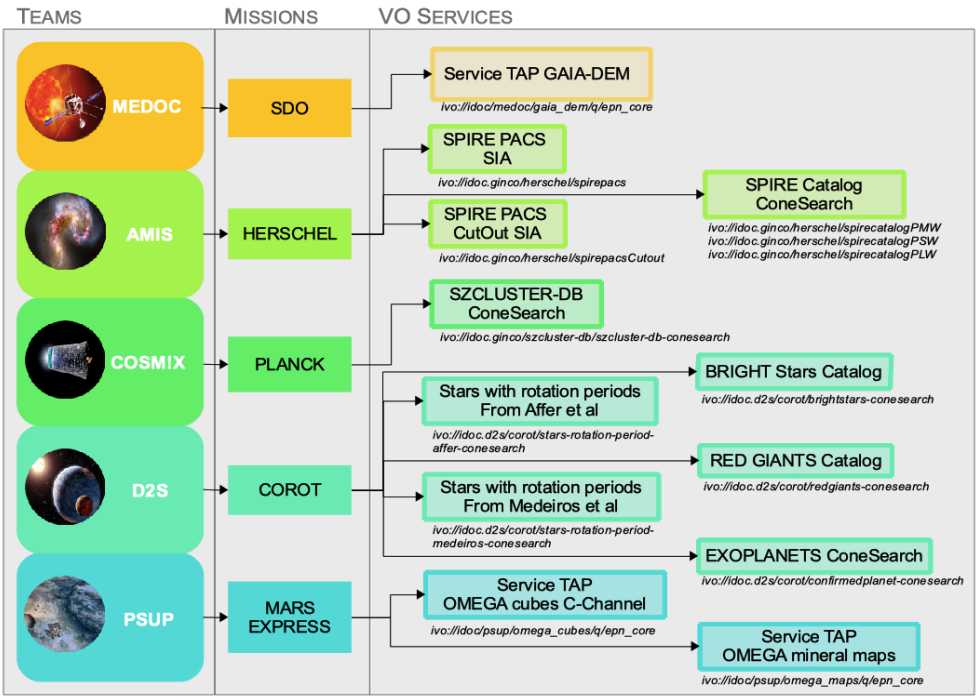

Figure 2 : Exemple de diffusion des données à travers l'observatoire virtuel (les données de nombreuses autres missions déjà disponibles à IDOC ou futures rejoindront bientôt ces observatoires virtuels)

L'observatoire virtuel (ou OV) permet aux astrophysiciens d'interroger de multiples centres de données, de façon transparente. L'OV offre de puissants outils d'analyse et de visualisation (Figures 2 à 7).

La mise à disposition des données d'IDOC suit les 4 principes FAIR :
F = Faciles à trouver, A = Accessibles, I= Interopérables, R = Réutilisables.

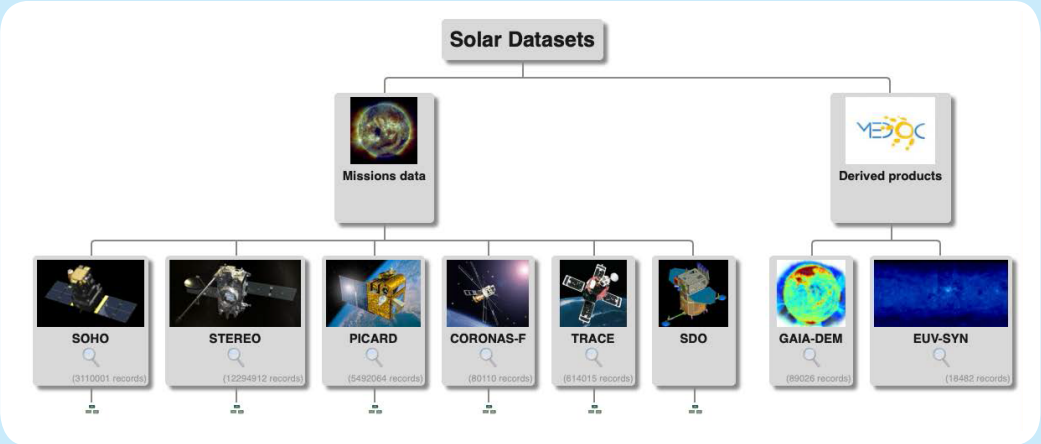

Figure 3 : Interface d'accès aux données solaires

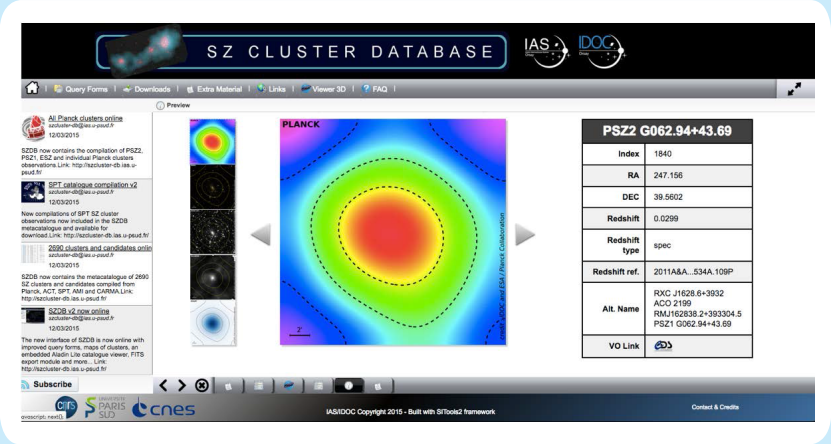

Figure 4 : Interface d'accès aux données du satellite PLANCK

Le portail IDOC
https://idoc.ias.u-psud.fr
permet de retrouver les interfaces d'accès aux données d'IDOC pour toutes les thématiques.

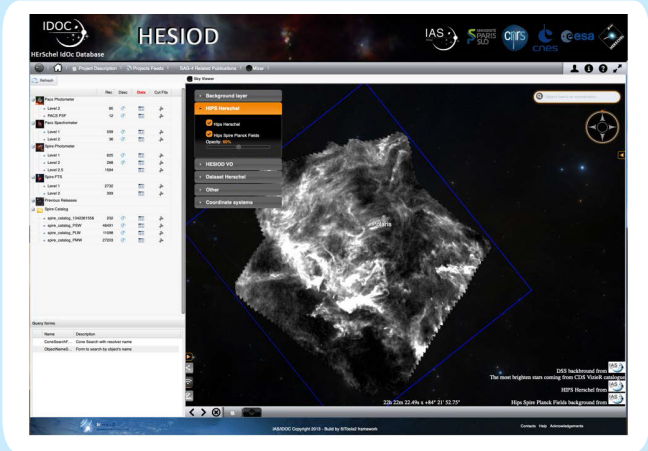

Figure 5 : Interface d'accès aux données du satellite HERSCHEL

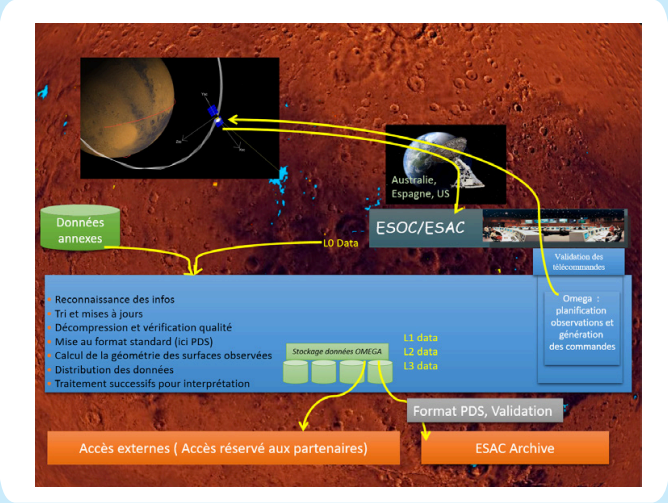

Figure 6 : Contrôle de l'instrument OMEGA (en vol) pour la mission Mars Express

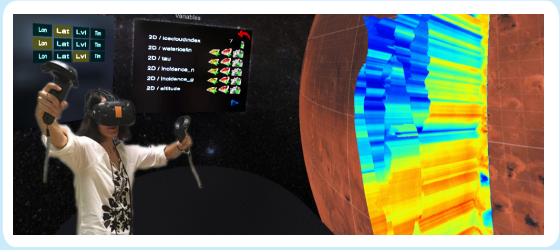

Figure 7 : Visualisation de données OMEGA en réalité virtuelle

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

STATION D'ETALONNAGE

L'ETALONNAGE

Parmi les phases qui jalonnent la vie d'un projet spatial, la dernière opération à effectuer sur un instrument scientifique avant l'intégration sur un satellite ou une sonde est l'étalonnage.

Il s'agit de placer l'instrument dans des conditions proches de celles qu'il rencontrera dans l'espace (vide, température) et de simuler les observations et mesures qu'il sera amené à faire en orbite en le soumettant à des rayonnements connus et calibrés.

LA PLATEFORME

La station propose ainsi un ensemble de moyens techniques lourds implantés en salles blanches (ISO 8, ISO 7 et ISO 7 stérile, ISO 5 localement) adaptées aux exigences et contraintes importantes imposées dans le domaine du spatial.

Ces moyens de tests sont accessibles aux équipes projets de l'IAS ainsi qu'à l'ensemble de la communauté scienti ique spatiale (laboratoires nationaux, laboratoires internationaux et industriels).

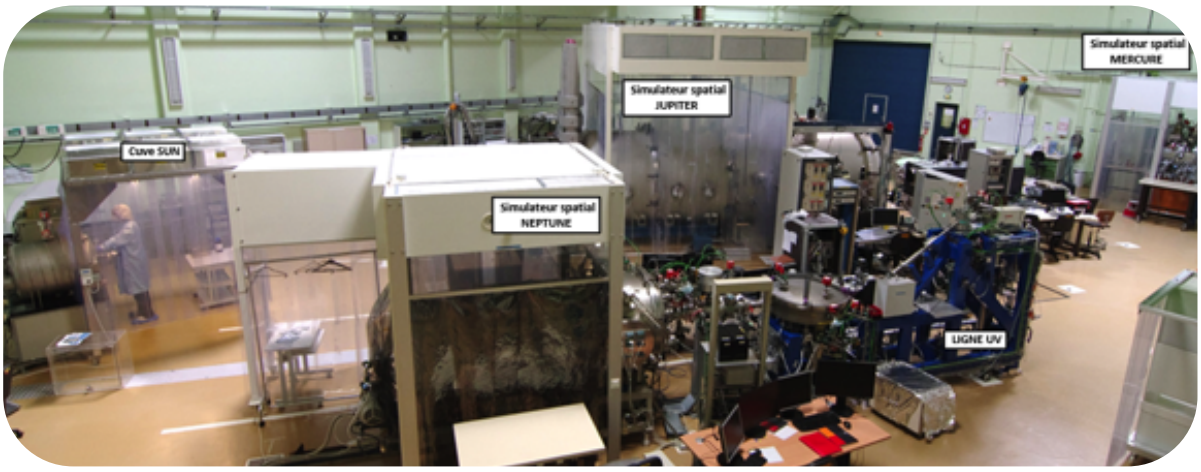

Figure 1: Le Hall CAZES (Salle propre ISO8) de la station d'étalonnage de l'IAS avec ses simulateurs spatiaux, les moyens d'essais et les flux laminaires (ISO5) qui leur sont associés.

LES MOYENS DE TEST

Leur mise en œuvre est assurée par une équipe dédiée qui intègre, teste et étalonne les sous-systèmes ou instruments spatiaux complets.

La station dispose de 7 simulateurs spatiaux dont le diamètre varie entre 0,8 et 2 m, mettant en œuvre différentes technologies : vide, fluides cryogéniques, systèmes de contrôle-commande, mesures et régulation des températures et pressions. Les enceintes, installées sous des flux laminaires assurant un très haut niveau de propreté (ISO 5, voir figure 1), permettent la réalisation des étalonnages et des cyclages thermiques avec des systèmes cryogéniques dont la température peut descendre jusqu'à -260°C, (cf. figures 2&3).

Une ligne de lumière UV (Ultra-Violet) et des bancs optiques placés face aux hublots des cuves simulent le rayonnement que l'instrument observera dans l'espace. Une installation est également dédiée à l'étuvage sous vide des sous-systèmes avant leur intégration sur les satellites ou dans les simulateurs spatiaux. Sa température peut atteindre +200°C.

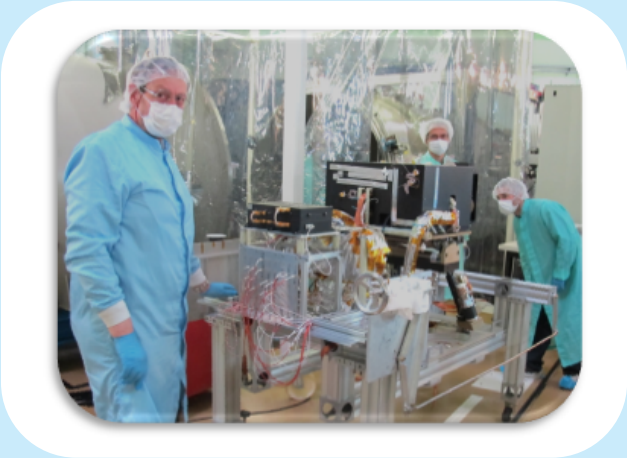

Figure 2 : Intégration de l'instrument SIMBIO-SYS de la mission BEPI-COLOMBO par les équipes STATION D'ETALONNAGE et PROJET/SIMBIO-SYS de l'IAS dans le simulateur.

Figure 3 : Simulateur MERCURE pendant les étalonnages de l'instrument MicrOméga de la mission EXOMARS.

La station met également en oeuvre des moyens de tests réservés aux essais mécaniques dans un hall dédié. Il regroupe un moyen de mesures physiques (centre de gravité et moment d'inertie) et un banc d'essais en vibrations qui permet d'exposer les sous-systèmes d'instruments aux conditions, parfois sévères, des lancements des missions spatiales (Figure 4).

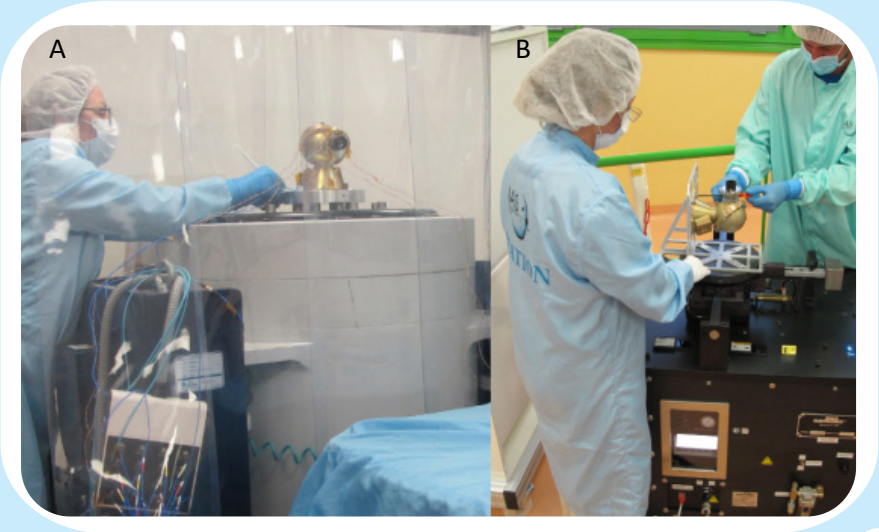

Figure 4 : Intégration sur le pot vibrant sous flux laminaire ISO5 (à gauche) et sur le moyen de mesure physique (à droite) de la source d'étalonnage (modèle de vol) de l'instrument EUCLID par les équipes STATION D'ETALONNAGE et PROJET/ EUCLID de l'IAS dans le HALL CHARRA.

Un moyen de stérilisation ainsi qu'une salle de protection planétaire (Figure 5) sont également disponibles dans ce hall.

Ces équipements sont destinés à l'intégration en environnement stérile de sous-systèmes spatiaux ou de petits instruments amenés à se poser sur des sols extraterrestres, dans le cadre des projets martiens ou tout projet incluant des prélèvements d'échantillons *in situ* (astéroïde, lune). La salle est équipée de deux postes de sécurité microbiologique (PSM ISO5 et stériles).

Figure 5 : système Sterrad, stérilisateur à basse température.

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

ASTROPHYSIQUE DE LA MATIÈRE INTERSTELLAIRE

Le fil directeur de l'équipe AMIS est l'étude du gaz et de la poussière interstellaires le long du cycle d'évolution de la matière dans les galaxies, des régions les plus diffuses aux sites de formation d'étoiles et de planètes. Cette recherche est principalement basée sur l'analyse de données obtenues avec des télescopes aussi bien terrestres que spatiaux (Planck, Herschel, VLT, HST, ALMA et dans le futur JWST, SPICA, SKA...). En plus de la mise au point d'outils de modélisation qui décrivent de façon détaillée les processus physiques étudiés, nos travaux nécessitent aussi le développement de méthodes originales de traitement du signal menées dans le cadre du centre de données spatiales de l'IAS, IDOC.

Les poussières interstellaires ont un rôle clé dans l'évolution physico-chimique du gaz des galaxies en le chauffant et en fournissant des sites de formation pour les molécules dans les nuages interstellaires, des plus abondantes comme le dihydrogène aux plus complexes.

Les poussières absorbent également une fraction importante de la lumière visible et ultraviolette émise par les étoiles et transforment cette énergie en rayonnement à plus grande longueur d'onde de l'infrarouge jusqu'au millimétrique par émission thermique. L'interprétation des observations, couplée à des modèles physiques, nous permet d'élucider comment les poussières et le gaz évoluent dans les nuages interstellaires et au travers des interfaces entre les différents milieux des nuages diffus, en passant par les nuages moléculaires dans lesquels se forment les étoiles, jusqu'aux disques proto-planétaires. De cette façon, nous sommes en mesure de sonder la formation des molécules et l'évolution des poussières dans une grande variété de régions interstellaires. Les connaissances ainsi acquises sont ensuite appliquées et confrontées aux modèles pour approfondir nos connaissances sur l'évolution du gaz et des poussières dans le disque de la Voie Lactée ainsi que dans d'autres galaxies.

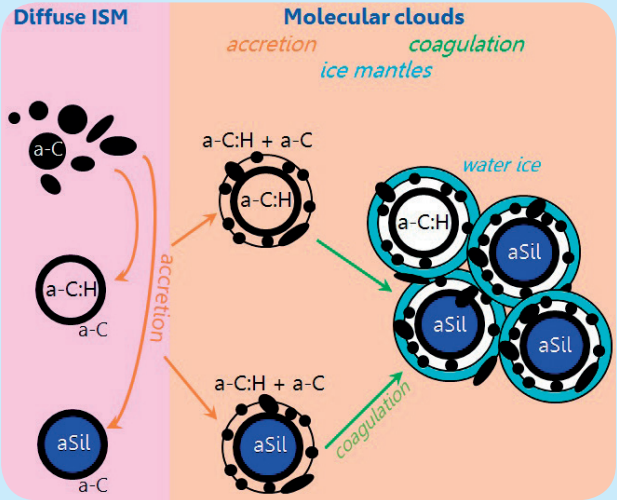

Figure 1 : Schéma illustrant l'évolution des grains par le rayonnement et les collisions dans le milieu interstellaire, des régions diffuses aux nuages denses et moléculaires. Les tailles de ces grains vont d'environ 1 à 100 nanomètres.

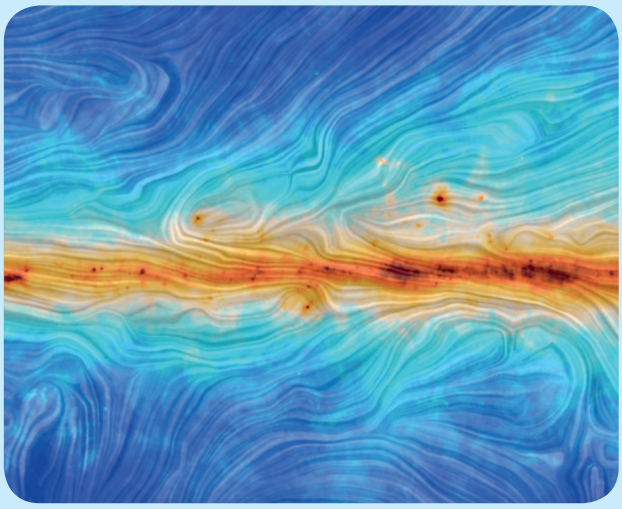

Figure 2 : Une partie de la Voie Lactée vue par le satellite Planck de l'ESA, qui montre le lien entre la poussière interstellaire (couleurs) et la structure du champ magnétique (texture en pinceau). Crédit : Collaboration ESA/Planck

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

SERVICE ELECTRONIQUE

Le service électronique développe des systèmes électroniques complexes pour la réalisation d'instruments spatiaux divers tels que des spectromètres et des imageurs.

Sa participation commence avec la définition de l'instrument jusqu'au développement et aux tests d'intégration et de qualification spatiale de celui-ci. Ainsi, nous participons aux tests environnementaux tels que le vide thermique, aux tests de compatibilité électromagnétique et aux campagnes d'étalonnage des instruments.

Particulièrement spécialisé dans le développement des électroniques centrales de pilotage des instruments, en communication directe avec le satellite, le service développe également des électroniques de proximité des détecteurs ou de pilotage de dispositifs électromécaniques. Ces électroniques intègrent de l'analogique bas bruit comme des systèmes numériques rapides avec programmation de FPGA (Field Programmable Gate Array) et traitement d'image par différents modes de compression.

Les cartes électroniques développées étant destinées à être embarquées dans des instruments, nous travaillons en collaboration permanente avec les autres services techniques liés au projet, tel que la mécanique, l'optique, la thermique et l'informatique.

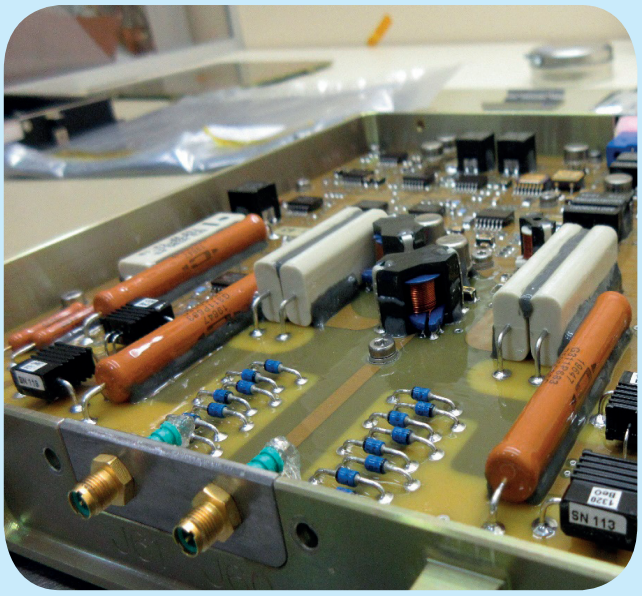

Figure 1 : Solar Orbiter : Alimentation haute tension (modèle de vol)

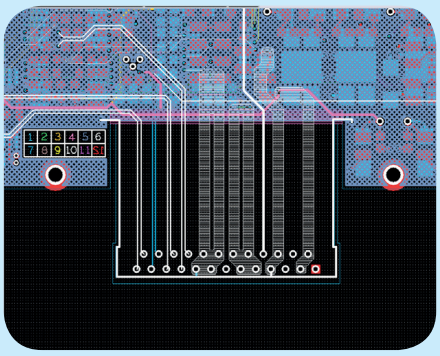

Figure 2 : Routage d'un circuit imprimé

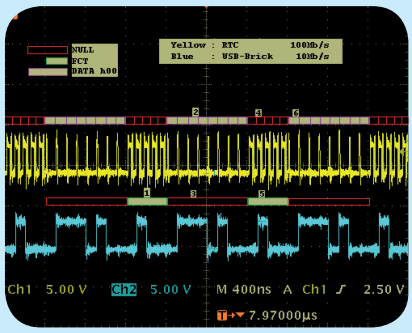

Figure 3 : Capture d'écran d'oscilloscope

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

ASTROCHIMIE ET ORIGINES

L'équipe « Astrochimie et Origines » étudie la nature et l'évolution des matériaux primitifs du Système Solaire pour déterminer leur(s) origine(s) et leur lien avec les matériaux du milieu interstellaire et du disque protosolaire.

Pour ce faire, les travaux de recherche de l'équipe se basent sur des mesures en laboratoire de deux sortes. D'une part, nous analysons la composition chimique et minéralogique des matériaux extra-terrestres primitifs mesurés *in situ* par une sonde spatiale (les poussières de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko), rapportés par des missions spatiales (des particules de poussière de la comète Wild 2 ou d'astéroïdes comme Itokawa et Ryugu), ou encore collectés sur Terre (des météorites et des poussières interplanétaires). D'autre part, nous mettons au point des expériences permettant de simuler des processus physico-chimiques intervenant dans différents environnements astrophysiques (photolyse UV et irradiations ioniques). L'ensemble de ces mesures fait intervenir des techniques de caractérisation physico-chimique par spectroscopie visible et infrarouge (incluant de la micro-imagerie et de la tomographie), spectroscopie Raman, spectrométrie de masse et microscopie électronique.

Les diagnostics spectroscopiques en particulier, sont aussi nécessaires à l'interprétation des observations des surfaces de petits corps (astéroïdes, comètes, trans-neptuniens) par les grands instruments spatiaux et les télescopes au sol.

Ces travaux reposent sur des dispositifs et montages situés aussi bien à l'IAS que sur des plateformes instrumentales nationales (synchrotrons, accélérateurs de particules), et impliquent des collaborations interdisciplinaires, nationales et internationales.

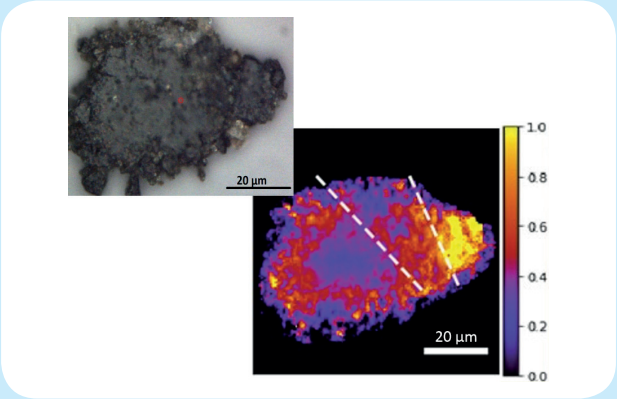

Figure 1 : Image d'un grain de la météorite Paris et cartographie obtenue par micro-spectro-imagerie infrarouge montrant la répartition de la matière organique contenue dans le grain.(Réf : Z. Dionnet et al., Meteoritics & Planetary Science 1–16, 2018)

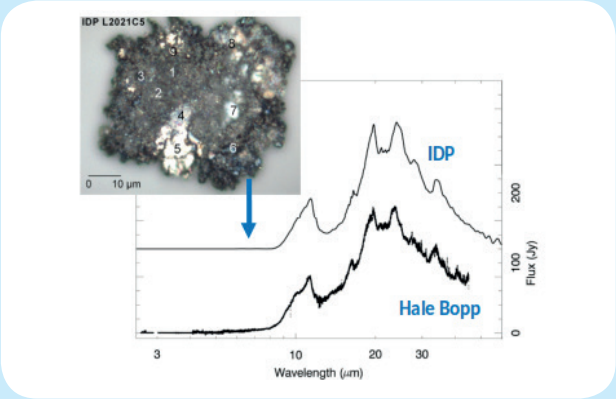

Figure 2 : Le spectre en moyen et lointain infrarouge (mesuré en laboratoire) d'un grain de poussière interplanétaire (IDP) collecté dans la haute atmosphère terrestre, comparé au spectre d'émission de la comète Hale-Bopp (mesuré par le télescope spatial ISO). (Réf : R. Brunetto et al., Icarus, 212, 896-910, 2011)

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

SERVICE MÉCANIQUE ET THERMIQUE

Le service mécanique et thermique est composé d'un bureau d'études et d'un atelier. Les missions du bureau d'études sont la conception, le développement, la réalisation, les tests, l'intégration d'instruments embarqués sur des satellites scientifiques, et l'intervention sur des expériences ballon et sol.

Figure 1 : Miroir M2 sur la voie HRI de l'instrument EUI sur la mission ESA SOLAR ORBITER. À gauche : modèle CAO ; au milieu : modèle « maillage » ; à droite : modèle simulé.

Les concepts mécano-thermiques mis en oeuvre sont variés et dépendent des spécificités des besoins scientifiques (exemples de conditions extrêmes : mission SOHO instrument GOLF +200 °C, mission PLANCK instrument HFI -273.05°C). Ils sont validés par simulation numérique, en mécanique et thermique, à l'aide de logiciels spécifiques.

Un modèle de qualification subira des tests mécaniques reproduisant les conditions de lancement (vibrations, chocs) et des tests d'environnement thermique simulant les conditions rencontrées dans l'espace (rayonnement, flux en orbite). Les résultats des tests et des simulations permettront l'optimisation des choix architecturaux.

Un modèle de vol, éventuellement un modèle de rechange, seront ensuite réalisés, testés et livrés pour intégration.

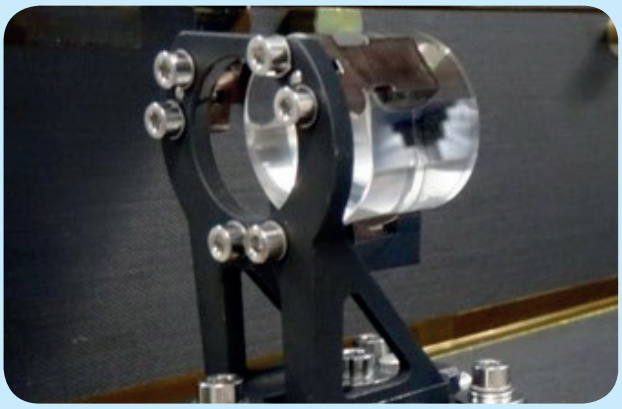

Figure 2 : Miroir M2 sur la voie HRI de l'instrument EUI sur la mission ESA SOLAR ORBITER (modèle de vol)

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

SERVICE OPTIQUE

L'optique est un constituant majeur des instruments développés à l'IAS. Les activités du service sont organisées autour des projets spatiaux. Les ingénieurs opticiens assurent les performances des instruments optiques spatiaux auprès des scientifiques. Ils sont impliqués, dès le début du projet, lors de la proposition et la conception de l'instrument. Ils interviennent ensuite dans la réalisation, l'intégration, la caractérisation et l'étalonnage de systèmes ou de sous-systèmes optiques.

Les domaines d'expertise du service couvrent les longueurs d'onde de l'extrême ultraviolet (EUV, 17 nm), visible, infrarouge jusqu'au submillimétrique (3 mm) ; les instruments réalisés sont divers dans leur taille, leur complexité et leur fonctionnement allant de la mini-caméra au grand télescope spatial en passant par le microscope, le spectromètre et le spectro-imageur.

Figure 1 : Photo du modèle de vol du réseau de diffraction dans sa monture mécanique de l'instrument SPICE, un spectromètre dans le VUV de 70 à 105 nm, embarqué sur Solar Orbiter dont le lancement a eu lieu en février 2020.

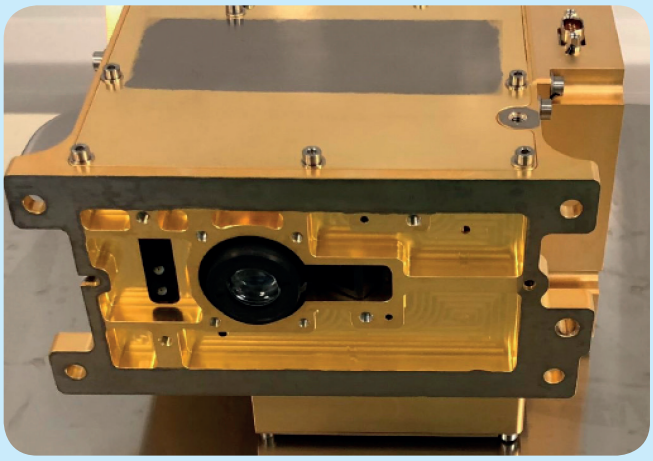

Figure 2 : Photo de l'instrument MicroMega, un spectro-imageur dans l'infrarouge (1-4 µm). Livré à l'ESA pour être monté sur le futur rover ExoMars, dont le lancement est prévu en 2022.

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr

Lancement de la sonde Solar Orbiter sur une fusée Atlas V depuis le centre spatial Kennedy en Floride, le 10 février 2020 (4:03 UTC).
© T.Appourchaux, 2020

INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE SPATIALE
Bâtiment 121
Faculté des sciences
91405 Orsay FRANCE
communication.ias@universite-paris-saclay.fr
www.ias.universite-paris-saclay.fr