

Contexte général de l'évaluation

Le Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique effectue des recherches fondamentales depuis la conception d'instruments (sol ou espace) jusqu'à l'exploitation et à l'interprétation de leurs résultats. Ses activités vont de la Recherche et Développement en amont, pour définir de nouvelles vagues d'instruments, à la réalisation et la vérification de ces instruments et la mise à disposition de données d'observations astronomiques, jusqu'aux théories et aux modèles associés. Ce type d'activité couple la recherche académique aux travaux d'ingénierie, et le LESIA a une tradition de collaboration chercheurs/ingénieurs qui transcende la distinction en corps de personnels parfois trop rigidement imposée dans le système français. Les recherches menées concernent la plupart des objets astrophysiques, mais plus particulièrement l'environnement proche de la Terre (plasma interplanétaire, Système solaire, Soleil) et les étoiles et exoplanètes, jusqu'au centre galactique. Comme il s'écoule souvent plusieurs années entre la livraison d'un instrument majeur et la production de résultats scientifiques, les « indicateurs d'activité » décrivant la production de l'unité couvriront à la fois des étapes de production d'instruments (souvent liées à des réunions clés et leur documentation associée, à l'ESA ou l'ESO), peu liées à des publications académiques, et les publications proprement dites qui suivent la mise en service d'instruments avec les colloques et revues associées. Cette dualité devra être prise en compte dans l'évaluation du LESIA pour mieux cerner les résultats du laboratoire dans son environnement international. Les activités au LESIA sont en effet en large part de dimension internationale, avec des collaborations européennes (ESA, ESO, etc.) mais aussi avec les Etats-Unis (NASA, NSF), la Russie, l'Inde, la Chine, le Japon, etc. Cela se reflète dans les publications qui font intervenir des consortia regroupant de nombreux instituts internationaux, mais aussi dans les invitations et séjours de nombreux chercheurs, ingénieurs ou professeurs étrangers.

Ses tutelles permettent au LESIA de poursuivre ses activités d'une manière très diversifiée. Participant pleinement à la politique scientifique de l'Observatoire, où le LESIA apporte dans le domaine de la recherche son expertise instrumentale (spatiale et sol), et ses compétences reconnues dans de multiples domaines (planétologie, haute résolution angulaire, physique solaire, radioastronomie, etc.), reconnue internationalement, le LESIA a aussi un engagement fort vis-à-vis de ses tutelles universitaires. Dans le paysage en évolution des universités françaises, avec les investissements d'avenir, le LESIA tient une place reconnue grâce à son engagement dans le labex ESEP (Exploration Spatiale des Environnements Planétaires) dans des collaborations tant avec l'UPMC (et le labex Plas@Par) ou Paris-Diderot (et le labex UnivEarthS). L'appartenance de l'Observatoire à l'Idex PSL (Paris-Sciences-Lettres) enrichit les collaborations locales du LESIA au sein des établissements, et aussi sa participation directe aux actions de PSL par le Labex ESEP dont PSL est l'établissement partenaire.

Le document « Résultats et Autoévaluation » présenté ici selon les lignes proposées par l'AERES fait un bilan sur les années 2007 à mi-2012 des activités du LESIA. L'équilibre des activités au LESIA se situe entre une dominante « recherche et développement » en amont des observations astrophysiques, à une dominante « exploitation des résultats d'expériences » en passant par la dominante « théorie et modélisation ». Le point d'équilibre entre ces dominantes se déplacera dans les années à venir au fur et à mesure de l'avancement d'expériences, mais la richesse du laboratoire vient de sa participation à ces trois points forts. L'implication différente des personnels techniques et scientifiques selon ces trois points rend particulièrement délicate la prévision de l'engagement du laboratoire, mais c'est un des challenges à relever au LESIA pour le prochain quinquennal.

Table des matières

Contexte général de l'évaluation	2
1. RAPPORT SCIENTIFIQUE	5
1.a Activités et Résultats	5
1.a.1 Organisation générale	5
1.a.2 Résultats scientifiques.....	6
1.a.2.1 Généralités	6
E0 Pôle Astronomie (= E1- pôle Etoile + E2 – pôle HRAA).....	8
E0.1 Interférométrie	8
E0.2 Coronographie	10
E0.3 Optique adaptative (OA)	10
E0.4 Physique stellaire et exoplanètes	12
E3. Pôle de Physique des Plasmas.....	16
E3.1 Introduction.....	16
E3.2 Extrait de 5 résultats scientifiques	17
E3.3 Autres résultats innovants	20
E3.4 Instrumentation spatiale et sol	21
E4 Pôle de Physique Solaire	23
E4.1 Formation et structuration des champs magnétiques solaires	23
E4.2 Phénomènes éruptifs et accélération de particules	26
E4.3 Perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace.....	28
E5 Pôle de Planétologie.....	30
E5.1 Les comètes.....	30
E5.2 Les Centaures et les Objets Trans-Neptuniens (OTNs).	32
E5.3 Astéroïdes	33
E5.4 Saturne et Titan.....	33
E5.5 Planètes telluriques.....	35
E5.6 Exoplanètes	36
1.b ANALYSE DES MOYENS.....	37
1.b.1 Pôle Informatique	37
1.b.2 Pôle ingénierie	38
1.b.3 Pôle Services	38
1.b.3.1 démarche qualité du LESIA	38
1.b.3.2 Service administratif	38
1.b.3.3 Service Internet, Graphisme et Animations du LESIA (SIGAL)	39
1.b.4 Tâches collectives organisées sous responsabilité de la direction	39
1.b.4.1 Communication interne	39
1.b.4.2 Organisation de colloques	39
1.b.5 Relations avec les tutelles.....	39

1.b.5.1 Observatoire de Paris.....	39
1.b.5.2 CNRS.....	40
1.b.5.3 Tutelles universitaires.....	41
1.b.6 Evolution des moyens en ressources humaines.....	42
1.b.7 Partenaires et structures collaboratives.....	42
1.b.7.1 CNES.....	42
1.b.7.2 Labex ESEP.....	43
1.b.7.3 Groupements d'Intérêt Scientifique : Phase, Motespace, JMMC.....	43
1.b.7.4 Région Ile de France : DIM ACAV.....	44
1.b.8 Enseignement.....	44
Enseignements universitaires.....	44
Encadrement des stages.....	45
Encadrements des thèses.....	46
Conclusions :.....	48
1.b.9 Rayonnement et attractivité académiques.....	48
Responsabilités institutionnelles :.....	48
Prix et distinction.....	48
1.b.10 Communication.....	49
Communication interne.....	49
Interactions avec l'environnement social, économique et culturel.....	49
1.b.11 Locaux du LESIA.....	50
Bilan des actions sur les années 2007-2012.....	50
2. Organigramme.....	51
3. Liste des publications.....	52
Annexe 1: Formation permanente.....	53
Annexe 2 : Document Hygiène et Sécurité.....	55
Annexe 3 : Démarche Qualité au LESIA.....	56
Annexe 4 : Règlement intérieur et statuts du LESIA.....	56
Annexe 5 : Liste d'acronymes.....	56
Annexe 6 : Liste de publications.....	56

1. RAPPORT SCIENTIFIQUE

1.a Activités et Résultats

1.a.1 Organisation générale

L'organisation du rapport scientifique du LESIA suivra bien naturellement celle du laboratoire. Il est donc nécessaire de décrire celle-ci pour comprendre le plan qui suivra, plutôt que dans la partie 2 avec l'organigramme comme suggéré dans le plan de l'AERES. Avec 71 chercheurs et 67 ingénieurs et techniciens permanents au 30 juin 2012, l'organisation du LESIA nécessite un dialogue permanent avec les personnels pour optimiser les activités de recherche et élaborer une stratégie admissible par tous. Trois niveaux d'organisation se complètent pour permettre la circulation de l'information, l'élaboration des décisions, et leur mise en œuvre :

- La structure statutaire du laboratoire : direction, conseil de laboratoire et commissions, dont les prérogatives sont décrites dans les statuts et règlement intérieur du LESIA ; s'y ajoute l'assemblée générale annuelle du laboratoire, rendez-vous au moins annuel d'échanges et de discussions.
- La structure en pôles scientifiques et techniques, qui assure la coordination scientifique, les discussions internes et les demandes des ressources. Des réunions incluant direction et coordinateurs de pôles (direction élargie), et l'invitation des coordinateurs au Conseil (conseil élargi) assurent la cohérence de cette organisation.
- La structure projet : pour les projets instrumentaux en cours (mais aussi pour certaines activités plus théoriques, par exemple structurée par une ANR) un projet regroupe chercheurs et ingénieurs sur une activité de durée déterminée (parfois fort longue et de périmètre variant dans le temps pour les missions spatiales)

La base naturelle des discussions scientifiques part des pôles scientifiques : ce sont donc eux, sous l'impulsion des coordinateurs de pôles, qui ont élaboré les différentes parties du rapport d'activité organisé ci-dessous selon les pôles du LESIA dans la structure antérieure à 2011 (avec la dénomination « équipe » utilisée dans ce rapport pour coïncider avec la terminologie AERES, bien que ce terme soit impropre dans un sens usuel d'entité autonome d'action scientifique).

L'organisation du LESIA a en effet évolué pendant le quadriennal en cours, partant de quatre pôles scientifiques (Astronomie, Physique des Plasmas, Physique Solaire, Planétologie) vers cinq pôles scientifiques (Haute Résolution Angulaire en Astrophysique ou HRAA, Etoile, Physique des Plasmas, Physique Solaire, Planétologie). Cette réorganisation a été l'aboutissement d'un processus de discussions internes menées entre 2010 et 2011, et a pris effet après approbation à l'unanimité en conseil de laboratoire du 17 mars 2011. Les pôles sont eux-mêmes structurés en « équipes » sur des thématiques particulières ; certaines thématiques apparaissant naturellement comme interdisciplinaires définissent des « équipes transverses », pilotées par un pôle, mais regroupant des chercheurs d'autres pôles. C'est le cas des perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace (solaire-plasmas) et des exoplanètes (HRAA-Planétologie-Plasmas-Etoile). La structuration en pôles scientifiques est souple et donc susceptible d'évoluer dans l'avenir, en fonction des effectifs et des regroupements thématiques. Elle répond à un souci d'optimisation dans la concertation entre projets et équipes, et devrait satisfaire des préoccupations soulevées dans le rapport de l'AERES précédent sur l'organisation des pôles du LESIA (avril 2009). La dynamique de groupe retrouvée au sein des pôles est un facteur important, et les relations entre pôles sont gérées par des échanges (multi-appartenance de chercheurs aux pôles) ou équipes transverses, plutôt que par des regroupements artificiels de pôles.

Les équipes transverses du LESIA, qui apparaîtront dans la partie « projet » correspondent à des thématiques prioritaires dans la discipline, et reconnues par l'Observatoire de Paris dans ses lignes structurantes entre ses différents laboratoires. Le positionnement scientifique du LESIA s'en trouve donc renforcé. Dans le cadre du bilan, par souci de simplification, les résultats sont donc présentés ici selon les quatre pôles antérieurs (2007-2010), et en regroupant les pôles HRAA et Etoile sur les années 2010-2012, la partie projet étant, elle, articulée selon la nouvelle organisation.

L'établissement d'une stratégie scientifique de laboratoire se fait en interaction avec les personnels grâce aux structures existantes :

- La stratégie scientifique est discutée lors des réunions de direction élargie organisées régulièrement (bimestrielles), avec les coordinateurs de pôles
- Des discussions scientifiques ont été régulièrement incluses dans l'ordre du jour du Conseil de Laboratoire
- L'assemblée générale annuelle est consacrée à la présentation des résultats scientifiques de l'année, par des chercheurs de différentes équipes, sous forme synthétique et accessible

La participation des ingénieurs et techniciens à la recherche au LESIA est en général transverse aux pôles scientifiques, en fonction de l'évolution des projets ou du type d'activité. Il a été créé pendant le quadriennal trois pôles techniques (Informatique, Ingénierie, Services) afin de permettre la coordination et l'interaction avec la direction du laboratoire. La possibilité pour les personnels d'être rattaché à plusieurs pôles (techniques ou scientifiques) assure la fluidité nécessaire, pour les actions transverses en particulier, mais aussi pour l'implication des ingénieurs dans les actions de recherche. En conséquence, les personnels techniques ne sont, sauf exceptions, pas affectés directement dans les pôles scientifiques, mais peuvent participer aux activités scientifiques via une co-appartenance à un pôle scientifique.

1.a.2 Résultats scientifiques

Note : les références correspondent à l'annexe 6 (Publications du LESIA), selon la nomenclature AERES (ACL = publication à comité de lecture ; ACT = communication publiée, etc.) Elles correspondent donc à des publications de membres du LESIA, sur la période considérée dans ce rapport (2007-2012)

1.a.2.1 Généralités

Les résultats détaillés sont présentés dans les parties suivantes, par pôles. Les faits structurants pour le LESIA en termes d'engagement des ressources humaines de la période 2007-2012 recouvrent plus particulièrement les grands succès des missions spatiales CoRoT, STEREO, Cassini ou Venus Express ont fourni au LESIA un retour scientifique appréciable. Par exemple, l'interprétation des données Cassini sur Saturne et Titan mettent également le LESIA en première ligne dans l'activité sur cette mission internationale. Sur le plan de l'instrumentation, la livraison de l'instrument MIRI pour le JWST, sur lequel le LESIA a contribué pour la partie optique est une étape importante pour le laboratoire. En instrumentation de haute résolution angulaire, des résultats de laboratoire sur l'interférométrie à frange noire et l'optique adaptative multi-objets préparent les techniques astronomiques de demain, pour l'E-ELT ou les interféromètres spatiaux du futur. En physique des plasmas, les observations et modèles de « plasmas poussiéreux » ont ouvert un nouveau champ d'investigations dans le domaine de la physique des plasmas interplanétaires. En physique solaire, la modélisation de la reconnexion magnétique, domaine difficile et spécialisé, est au cœur de notre compréhension de l'activité solaire, et a obtenu des progrès spectaculaires.

Ce survol très partiel (les résultats détaillés suivent) montre assez la grande étendue des recherches effectuées au LESIA. La définition d'une stratégie scientifique commune aux différents pôles du laboratoire est un challenge, qui sera présenté dans la partie projet, mais des grandes lignes se dessinent au vu des activités précédentes. En premier lieu, les résultats obtenus sont le fruit d'une activité instrumentale à long terme, menée depuis plus de dix ans : les résultats en planétologie (Cassini, Rosetta, Venus Express, Mars Express, etc.) proviennent d'instruments lancés entre 1997 et 2005, et construits bien avant, de même qu'en physique des plasmas (STEREO, Cluster, Ulysse, Wind, etc.) ou en astronomie (CoRoT). Mais beaucoup de résultats sont aussi obtenus par l'utilisation de moyens au sol existants, nationaux ou internationaux : VLT-ESO, Thémis, CFHT, etc. Cette double approche sol-espace est une des caractéristiques principales des recherches du LESIA. Elle permet aux chercheurs de développer leurs idées en dehors du cadre très contraint des développements instrumentaux, en particulier spatiaux.

Parmi les travaux du LESIA, une part significative du temps passé par les équipes a consisté en des réponses à des appels d'offres, en particulier pour les agences spatiales. La sélection sévère des projets fait que beaucoup ne sont pas retenus, et l'excellence scientifique ou la maturité technologique n'est

pas en cause dans ces échecs, car on sait bien que des aspects politiques sont très présents dans ces sélections. On citera parmi ces projets avortés :

- SMESE/DESIR (CNES)
- MIRTIS/TGO (ESA-Exomars)
- SPICES/ESA-M3
- TSSM/ESA-L
- et quelques autres...

Il faut néanmoins souligner que les travaux effectués (souvent associés à quelques publications d'ailleurs), dont la seule trace restera un document d'appel d'offres souvent de qualité exceptionnelle en tant que condensat scientifico-technique, sont le levain qui permettra, à partir des leçons retenues, de relever d'autres défis.

Les résultats obtenus sur les expériences en vol (une dizaine de satellites en opération comportent des équipements développés au LESIA), mais aussi les études menées par les co-investigateurs de nombreux autres satellites forment un ensemble de résultats de grande ampleur. Il est malaisé d'extraire de toutes ces publications quelques « faits saillants » quand de nombreux résultats méritent mention. Les recherches au LESIA couvrent un vaste domaine de thématiques ou d'objets astronomiques. C'est pourtant vers cette synthèse que vise ce document, sur la période de référence de 2007 à mi-2012.

E0 Pôle Astronomie (= E1- pôle Etoile + E2 - pôle HRAA)

Les thématiques scientifiques principales du pôle astronomie (qui recouvre les nouveaux pôles Etoile et Haute Résolution Angulaire en Astrophysique) pendant le quadriennal ont été : les noyaux actifs de galaxie, le centre galactique, la structure interne des étoiles, les étoiles en formation, les étoiles évoluées, les exoplanètes et les techniques instrumentales en haute résolution angulaire (HRA).

Les chercheurs en physique stellaire du LESIA ont consacré une grande partie de leurs ressources à l'étude de différents processus physiques à l'œuvre dans divers types d'étoiles. Ces processus sont connus pour être importants mais non ou mal modélisés. L'équipe a travaillé à tous les niveaux : l'acquisition et l'analyse de données, l'interprétation théorique des données puis modélisation et enfin validation de cette modélisation par confrontation avec les observations. Les chercheurs en HRA ont exploité les instruments disponibles, participé au développement de nouveaux et mené des R&D amont, dans les grands domaines que sont : l'interférométrie longue base, la coronographie (et plus généralement l'imagerie à haute dynamique) et l'optique adaptative.

Les activités en HRA pendant le quadriennal précédent ont été en partie structurées autour du GIS PHASE décrit dans la première partie.

E0.1 Interférométrie

L'équipe interférométrie du LESIA s'est fortement impliquée dans la conception et maintenant la réalisation de l'instrument GRAVITY du Very Large Telescope Interferometer (VLTI). Qualifié de « deuxième génération d'instrument du VLTI », ce projet a un double objectif : pallier les faiblesses des instruments actuels (en terme de sensibilité et de précision) et offrir un mode supplémentaire au VLTI, l'astrométrie. De plus, cet instrument est prévu pour fonctionner avec 4 télescopes. En sus de fournir une instrumentation de meilleure qualité, GRAVITY a pour objectif scientifique principal l'observation du centre galactique. Le but étant de mesurer par astrométrie différentielle un déplacement de l'émission des sursauts du centre galactique. De cette manière, on compte pouvoir tester les propriétés relativistes aux environs proches du trou noir super-massif. Au cours des quatre dernières années, nous avons passé les différentes étapes de ce projet, jusqu'à récemment (fin 2011) pour la revue de définition finale (FDR) signifiant le début de la phase de réalisation de l'instrument.

Les principaux cas scientifiques de GRAVITY concernent l'étude de l'environnement proche d'objets compacts, notamment au cœur de la Voie lactée et des noyaux actifs de galaxie (AGN) (imagerie des disques d'accrétion, étude d'orbites stellaires relativistes...). Afin d'approfondir l'étude de la faisabilité de ces cas scientifiques et de préparer l'exploitation des observations à venir, notre équipe a développé un outil apte au calcul d'orbites et au tracé de rayons en champ gravitationnel fort en collaboration avec Éric Gourgoulhon (LUTH) à travers la thèse de F. Vincent (*THS009*). Ceci a conduit à la publication du code GYOTO (*ACL325* ; <http://gyoto.obspm.fr/>).

De 2008 à 2011, notre équipe a publié de nombreuses images d'étoiles évoluées. Nous avons pu profiter au maximum de notre très bonne connaissance instrumentale des différents interféromètres. Le résultat de Hauboys et al. (*ACL709*) sur Bételgeuse sort du lot. A partir de données obtenues sur l'interféromètre IOTA, nous avons pu pour la première fois imager les cellules de convection à la surface de l'étoile (Fig. astro1). Nous avons pu aussi observer les déformations de la photosphère d'une étoile Mira au cours de son cycle de pulsation (*ACL737*) ou imager la couche moléculaire autour du même type d'étoiles (*ACL745*, *ACL390*).

Les mesures directes de la taille angulaire des étoiles proches par interférométrie, couplées aux mesures de parallaxe du satellite Hipparcos, permettent de déduire leur diamètre photosphérique avec une précision excellente. Cette combinaison permet de contraindre de manière extrêmement forte les modèles d'évolution. La mesure de la grande séparation astérosismique donne aussi une contrainte sur la densité de l'étoile. Connaissant son rayon, et donc son volume, la masse et la trajectoire évolutive de l'étoile peuvent être déduites avec une grande précision. La nouvelle contrainte apportée par le diamètre interférométrique apporte une précision énorme pour déduire le trajet évolutif de l'étoile dans le diagramme HR. Nous avons notamment mesuré Sirius, Procyon, 61 Cyg A&B, ϵ Oph,... qui sont des étoiles importantes à plusieurs titres pour la physique stellaire.

L'équipe d'interférométrie a travaillé les projets suivants :

L'instrument **FLUOR** est une unité de recombinaison interférométrique à fibres installée sur l'interféromètre CHARA (6 télescopes de 1 mètre sur le Mont Wilson), dans le cadre d'une collaboration avec la Georgia State University. Il a ainsi permis des avancées importantes dans l'étude des étoiles et de leur environnement, comme la découverte d'une enveloppe moléculaire autour de la plupart des céphéides, et celle de poussières chaudes dans les environnements planétaires de certaines étoiles de la séquence principale. FLUOR est maintenant engagé dans un survey des lumières exozodiacales dans le cadre de l'ANR Exozodi et trois thèses en cours au LESIA sont liées à cet instrument.

Parallèlement l'interféromètre **CHARA** se dote de nouvelles capacités, comme la possibilité de faire observer deux instruments en simultané, de stabiliser les fluctuations de phase sur chaque télescope individuel par une optique adaptative et entre les pupilles par un suiveur de franges. Pour pouvoir bénéficier de ces évolutions, une jouvence de FLUOR est en cours de finalisation. Deux caméras infrarouges dédiées à l'interférométrie (lecture rapide, fenêtrage, faible bruit) ont aussi été développées sur la base du détecteur PICNIC : l'une pour FLUOR et l'autre pour le banc PERSEE.

'**OHANA** est un projet préliminaire de grand interféromètre au Mauna Kea et un démonstrateur d'interféromètre fibré préparant un potentiel futur grand interféromètre post-VLTI. Suite au premier succès de liaison des deux télescopes Keck de 10 m par fibres optiques monomodes (Perrin et al. 2006), durant le quadriennal en cours la décision a été prise de travailler à la liaison des télescopes Gemini Nord et CFHT. Des franges ont été obtenues avec ce système (et l'intégralité des 300 m de fibres) en 2010 et 2011. Une première, en cours de publication, qui ouvre la voie à un nouveau type d'interféromètre versatile constitué de télescopes librement déplaçables.

DAMNED est une expérience de R&D qui vise à démontrer expérimentalement le principe d'un nouveau type de déphaseur achromatique utilisant un composant optique particulier, fondé sur une structure en damier dont la définition mathématique a été établie par l'équipe. Ce type de déphaseur pourrait à terme équiper une expérience d'interféromètre à frange noire (ou nulleur) comme PERSEE. La thèse en cours de D. Pickel, financée par le CNES, a conduit à tout un ensemble de résultats en accord avec les prédictions théoriques.

PERSEE est une maquette en laboratoire de la charge utile d'un interféromètre à frange noire à deux télescopes pour démontrer les performances d'annulation avec un système de cophasage actif soumis à des perturbations typiques pour une future mission spatiale. Le projet regroupe : CNES, LESIA, IAS, ONERA, OCA, TAS. Les résultats sont de premier rang mondial avec une extinction moyenne sur 100s en large bande de $8 \cdot 10^{-6}$ en présence des perturbations externes corrigées et le maintien d'une extinction polychromatique sur plusieurs heures avec une fluctuation résiduelle de l'extinction de 10^{-7} sur des poses élémentaires de 1s.

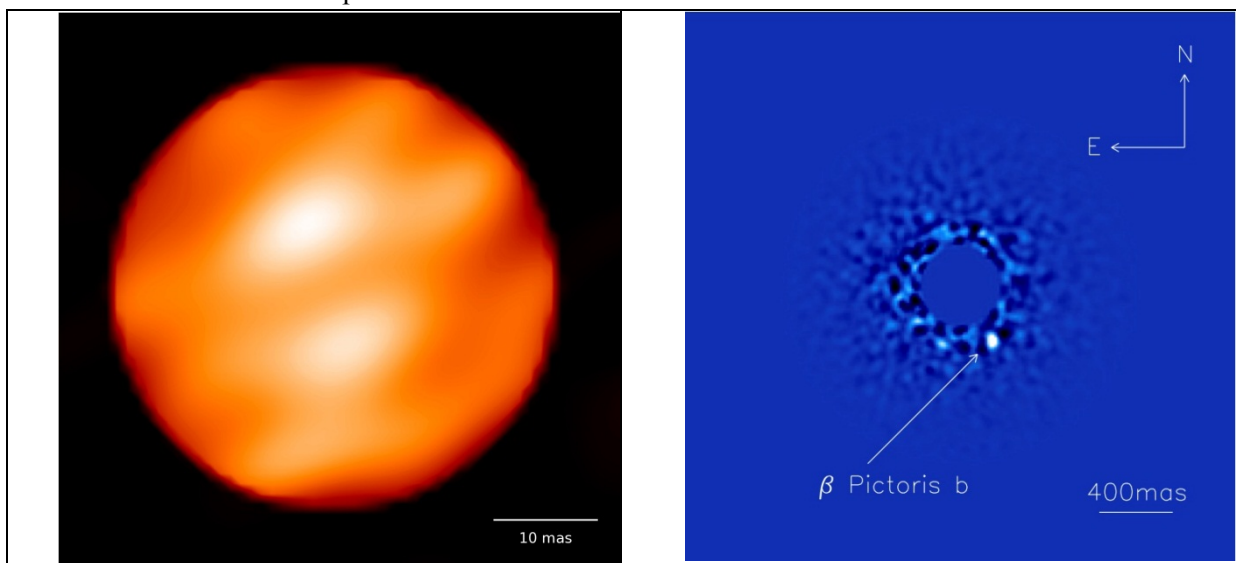


Figure astro1 : image de la surface de Bételgeuse

Figure astro2 : image du compagnon découvert en orbite autour de Beta Pic.

E0.2 Coronographie

En complément de nos propres programmes de recherche et d'analyse de compagnons de faibles masses et de disques de débris (*ACL618*, *ACL885*) l'équipe a participé entre 2009 et 2012 à la découverte (*ACL738*, *ACL739*) puis au suivi et à la redécouverte du candidat planétaire autour de l'étoile Beta Pictoris (Fig. astro2, *ACL139*; observations NACO au VLT). Ces travaux ont pu montrer que le candidat était effectivement un compagnon de masse planétaire (~9 MJ, à 8-12 UA; *ACL477*) et qu'il était responsable de la torsion du disque dans lequel il orbite (*ACL053*). Ses paramètres orbitaux ont pu être déterminés avec précision (Chauvin et al. 2012) ainsi que ses caractéristiques atmosphériques (Bonnefoy et al. 2010). Beta Pic. b est la planète imagée qui orbite la plus près de son étoile et pourrait s'être formée comme les planètes du Système solaire par accrétion de gaz sur un cœur solide.

SPHERE est un instrument pour la recherche de planètes extrasolaires qui sera installé au début de 2013 au **VLT** par un consortium européen dirigé par l'IPAG. Son objectif est la recherche et l'étude spectro-polarimétrique d'exoplanètes autour d'étoiles jeunes et proches. Le LESIA a participé depuis 2002 à cet instrument au niveau du programme scientifique, des simulations numériques, de la conception de coronographes et du système d'optique adaptative. Les coronographes de SPHERE sont essentiels pour atténuer la lumière de l'étoile et espérer détecter des planètes géantes jeunes. Ceux que nous avons conçus et testés au LESIA sont des masques de phase achromatiques qui atteignent les performances escomptées (*ACL885*). Ils sont en cours de tests finaux à Grenoble. Le LESIA était aussi en charge du détecteur fin de tip/tilt assurant la stabilité de l'image sur le coronographe. Par ailleurs, le LESIA a été en charge de la préparation du laboratoire et des outils d'assemblage, d'intégration et de tests de l'optique adaptative extrême de SPHERE. Les tests ont été menés par les ingénieurs ONERA. L'ensemble de l'optique adaptative a maintenant passé avec succès sa revue d'acceptation début 2012 et est intégré à Grenoble sur l'instrument.

Les coronographes finaux de l'instrument **MIRI**, ont été livrés et testés à chaud puis à froid et sont installés dans l'instrument MIRI qui est en cours d'acceptation par l'ESA avant envoi aux USA pour intégration sur la structure d'interface au JWST.

Enfin, pour préparer les instruments futurs, des projets de R&D ont étudié la suppression de tavelures (speckles) dans le plan focal scientifique. Le concept de la Self-Coherent Camera (*ACL435*, *ACL938*) a été développé avec le banc très haute dynamique (THD) (*ACL063*). La suppression de speckles à un niveau résiduel de quelques 10^{-8} entre 5 et $13 \lambda/D$ a été obtenue.

Dans la continuité des techniques de masquage de pupille a été développé un instrument à base de fibres monomodes et de réarrangement de pupille, appelé FIRST, ayant pour ambition d'obtenir des dynamiques de l'ordre de 10^6 à la limite de diffraction d'un télescope monolithique (Perrin et al. 2006). L'instrument vient d'obtenir sa première lumière sur le télescope Shane de 3m de l'observatoire Lick en Californie (*ACL049*).

L'équipe a enfin participé à l'étude de phase A d'EPICS, le planet finder de l'E-ELT. La contribution a porté d'une part sur l'aspect coronographie avec des études numériques et un développement en laboratoire d'un coronographe achromatique fondé sur des coronographes quatre quadrants placés en série (*ACT391*, *ACL187*). D'autre part le concept original d'un module scientifique d'EPICS a été développé, fondé sur la Self Coherent Camera pour laquelle nous avons mené des estimations de performances par simulations numériques (*ACT117*).

E0.3 Optique adaptative (OA)

Une partie conséquente de l'activité en optique adaptative a été générée par les études de l'instrumentation de l'E-ELT, une autre partie par le VLT. La dernière partie est liée au volet biomédical de l'OA. Le LESIA a participé à 3 études de phase A pour l'E-ELT concernant l'OA, qui ont chacune été finalisées autour du début 2010 :

- MICADO (PI : MPE) est un imageur grand champ dans l'infra-rouge proche pour l'E-ELT, associé au module de MCAO (OA multi-conjuguée) appelé MAORY. MICADO est aussi équipé d'une OA "classique" sur étoile naturelle de première lumière (appelée SAMI), opérationnelle dès la mise en service de MICADO, en attendant la mise en opération postérieure du module MAORY beaucoup plus critique en raison de sa complexité et de son appui sur les étoiles lasers. Le LESIA a

conduit l'étude de phase-A de ce module SAMI (ACT135). Le LESIA a réalisé les simulations numériques et les études de performances pour dimensionner le système, ainsi que les pré-études mécaniques et optiques pour l'implantation physique du module.

ATLAS (PI ONERA) est un module d'optique adaptative de type LTAO (tomographie basée sur une analyse de front d'onde multi-étoiles lasers) pour l'E-ELT. Il est pensé essentiellement pour alimenter l'instrument HARMONI avec une très bonne qualité d'image sur un petit champ. Le LESIA s'est impliqué dans les simulations numériques pour l'analyse de front d'onde sur étoile laser, le dimensionnement des analyseurs et l'étude de l'effet fratricide sur l'E-ELT (ACL445). Le LESIA avait par ailleurs la responsabilité scientifique du projet d'instrument.

EAGLE (PI LAM) est un spectrographe multi-objet infra-rouge à intégrale de champ pour l'E-ELT destiné à l'observation des galaxies primordiales, équipé de la très novatrice optique adaptative multi-objet (MOAO). Il a été proposé par un consortium franco-anglais dès 2007 à l'ESO. Le LESIA a dirigé l'étude de conception du système d'OA et a contribué aux simulations numériques des performances de l'OA permettant son dimensionnement et à l'analyse des stratégies de calibration (ACT259). Ce système de MOAO avait besoin d'un démonstrateur ciel afin de convaincre la communauté de la faisabilité du projet : c'est CANARY.

- Le LESIA est co-PI du démonstrateur CANARY, installé sur le télescope WHT aux Canaries, et développé en partenariat étroit avec l'Université de Durham. CANARY est un projet en 3 phases (dites A, B, C) de complexité croissante. CANARY a décroché une première mondiale en obtenant sur le ciel en septembre et novembre 2010 des résultats qui démontrent la faisabilité de la MOAO sur étoiles naturelles (phase A) (ACL189). Ce résultat très attendu par la communauté est fondamental pour valider le concept du futur EAGLE, en asseoir les bases, et imposer la MOAO en tant que solution viable. A partir janvier 2011, le LESIA a travaillé sur la mise à niveau de CANARY phase-B qui consiste à démontrer la MOAO sur étoiles lasers. Les premiers tests sur le ciel qui viennent d'être effectués à l'été 2012, ont été un succès. Enfin, CANARY a permis de mettre en œuvre sur le ciel une invention du LESIA développée à partir de 2006 : un nouvel analyseur de surface d'onde nommé ADONF, aux caractéristiques très linéaires, utilisant un nombre minimal de pixels et permettant un très grand nombre de points de mesures de la phase.

Avec le grand nombre de degrés de libertés en jeu dans les simulations d'un ELT, nous atteignons les limites des machines classiques en termes de temps de calcul et d'espace mémoire. Dès 2009, le LESIA s'est intéressé aux GPU pour mener les calculs lourds des simulations d'OA : ces processeurs graphiques multi-cœurs permettent un haut degré de parallélisation des calculs et une vitesse de l'ordre de 1000 fois supérieure au CPU sur des opérations comme les multiplications matricielles ou les FFTs. Un logiciel de simulation d'OA sur ELT (YOGA) tirant parti de bibliothèques spécifiques au GPU développées en interne a été initié en 2011 est en cours de finalisation. Il représente un investissement important pour les activités futures en simulations numériques.

Le LESIA a poursuivi l'exploitation scientifique de NACO, instrument du VLT à la construction duquel il avait largement contribué. Citons par exemple : étude morphologique de galaxies à $z \sim 1$ (ACL1175), caractérisation du processus d'accrétion autour du trou noir central de notre galaxie (ACL046, ACL665), étude des interactions entre les différentes structures de l'environnement proche du trou noir des noyaux actifs de galaxie (ACL180).

Dans le domaine de l'imagerie ophtalmologique, le LESIA a achevé le développement du banc d'imagerie 3D de la rétine humaine mené dans le cadre du projet Rétinopathies, couplant les techniques d'OA et de tomographie optique cohérente plein champ (ACT289). Les premières images en profondeur de rétines explantées ont été acquises. L'installation du banc à l'hôpital des XV-XX suivra l'exploitation technique et la caractérisation de l'instrument en cours au LESIA.

E0.4 Physique stellaire et exoplanètes

E0.4.1 Exoplanètes

Vingt-sept planètes ont déjà été annoncées par l'équipe exoplanètes de CoRoT : elles ont donné lieu à 43 publications principales et bien plus encore sous forme d'analyses dérivées. La plupart des planètes de CoRoT ont des orbites serrées ($a = 0.017 - 0.40$ UA), le domaine attendu pour CoRoT, mais, résultat plus intéressant, à de très grands domaines de masse ($7 M_{\text{Terre}} - 21 M_{\text{Jup}}$) et de densité ($0.22 - 7.3 \text{ g cm}^{-3}$), ce qui confirme que la formation et l'évolution planétaire ne procèdent pas d'un mécanisme universel standardisé et que la diversité est la règle. Parmi les découvertes marquantes dans lesquelles l'équipe du LESIA a été particulièrement impliquée, on trouve Corot-23b (*ACL088*) un *Jupiter* très proche de son étoile (*hot Jupiter*) et cependant sur une orbite excentrique, et surtout la découverte d'une planète de très petite taille, Corot-7 b, dont le rayon n'est que de $1.7 R_{\text{Terre}}$ (*ACL757*). D'une masse de $7.4 M_{\text{Terre}}$, Corot-7 b a été la *première planète rocheuse* découverte et dont on a pu mesurer le rayon et la masse et donc la densité, celle-ci étant pratiquement celle de la Terre. Avec une période orbitale très courte (20.5 h), sa température, très élevée ou très basse suivant l'hémisphère, en fait un monde à la physique étonnante (*ACL236, ACL293*).

E0.4.2 Relation extension des cœurs convectifs-âge stellaire et processus de transport associés

L'interprétation théorique des données du satellite CoRoT, lancé en décembre 2006 et dont le LESIA est le PI (Baglin et al., 2006¹, *ACL599*), et du satellite Kepler, successeur américain de CoRoT, ainsi que des données spectroscopiques associées obtenues avec des instruments au sol (Feros, Harps, Giraffe, Narval,...) ont permis de révéler des phénomènes jusqu'alors hors de portée. Par exemple la sismologie des géantes rouges a vu le jour grâce à CoRoT et est aujourd'hui un champ de recherche très actif et prometteur avec des applications également pour les études d'évolution galactique. Des contraintes sur les propriétés de la convection ou le phénomène Be ont été apportées. Les outils théoriques permettant l'interprétation de ces données ont été développés. Citons l'extension du code d'évolution stellaire français (CESAM). Un code d'oscillations incluant les effets de rotation a également été développé pour pouvoir étudier les oscillations d'étoiles en rotation rapide (*ACL525*).

La relation entre âge (stade d'évolution) et taille des cœurs convectifs des étoiles est cruciale pour tous les problèmes de datation et d'étude chronologique en astrophysique. Cette relation dépend de nombreux processus de transport dans l'étoile difficiles à modéliser. Nous avons étudié principalement le cœur de deux types d'étoiles: celles à la fin de la séquence principale et les étoiles Be qui sont des rotateurs très rapides. L'étude de l'étoile HD 49385 observée par CoRoT, de masse $1.3 M_{\text{sun}}$ et située à la fin de la séquence principale a permis d'établir un indicateur sismique précis du stade sous-géante, où les étoiles brûlent leur hydrogène dans une coquille autour d'un cœur d'hélium quasi-isotherme (*ACL171; ACL413*). Par ailleurs, nous avons obtenu la première preuve observationnelle de l'existence d'un cœur convectif dans une étoile évoluée de faible masse, HD 203608 (*ACL411*; voir aussi, sur l'étoile HD49933, *ACL357*). D'autres études concernent deux étoiles Be tardives HD 181231 et HD 175869 observées par CoRoT, avec d'importants résultats sur la convection, et l'influence de la turbulence engendrée par la rotation rapide de l'enveloppe radiative.

L'interprétation des données sismiques a permis de discriminer les géantes rouges qui brûlent de l'hydrogène en couches de celle qui brûlent de l'hélium dans leur cœur, alors que leurs paramètres fondamentaux de surface sont identiques (Fig. astro3). Les mesures sismiques ont permis de déterminer la vitesse de rotation en fonction de la profondeur de plusieurs géantes rouges et d'en déduire que leur cœur tourne en moyenne dix fois plus vite que leur enveloppe, grâce à l'étude des modes mixtes de pulsation présents dans ces étoiles. Ce résultat ouvre la voie à des mesures directes de la rotation interne des étoiles. Cependant la détection de géantes rouges dont le cœur tourne très lentement n'est pas expliquée à l'heure actuelle par les modèles stellaires les plus récents ayant

¹ Baglin, A.; Auvergne, M.; Barge, P.; Deleuil, M.; Catala, C.; Michel, E.; Weiss, W.; COROT Team, 2006 "Proceedings of The CoRoT Mission Pre-Launch Status – Stellar Seismology and Planet Finding" (ESA SP-1306). Editors: M. Fridlund, A. Baglin, J. Lochard and L. Conroy. ISBN 92-9092-465-9., p.33

inclus le transport de moment cinétique et dont la description est ainsi remise en cause (ACL267, ACL268, ACL073).

La convection de surface, importante pour déterminer les rayons des étoiles par exemple, est encore mal modélisée car mal comprise. En alliant les informations fournies par des simulations 3D des régions de surface stellaire à la structure évoluée (1D) de l'étoile, les chercheurs du LESIA ont déterminé des indicateurs sismiques des propriétés de la turbulence de surface stellaire. Ceci renseigne sur le transport turbulent ouvrant la porte à une modélisation plus réaliste de ce mode de transport (ACL1035, INV022).

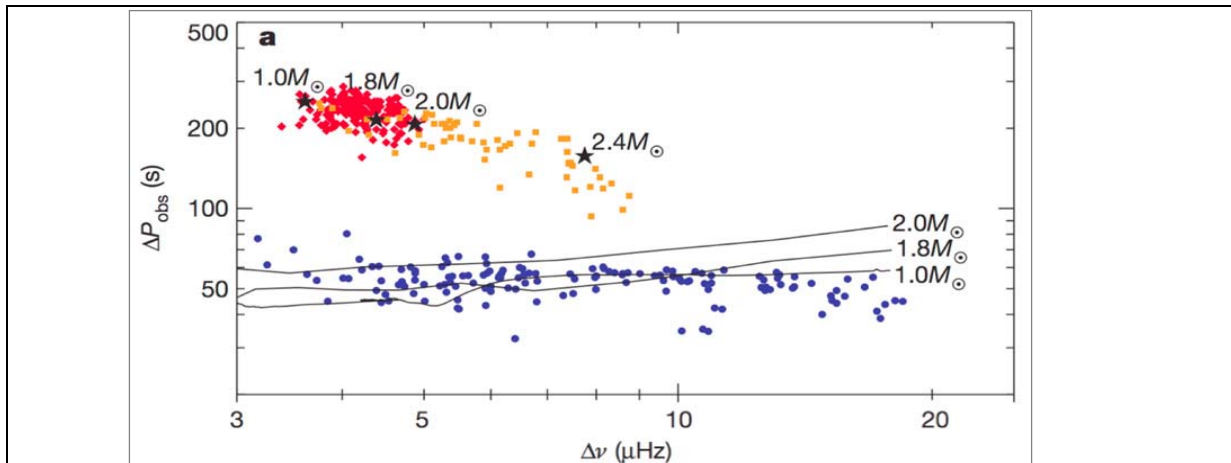


Figure astro3. Les modes de gravité des géantes rouges qui brûlent uniquement de l'hydrogène en couche ont des écarts entre les périodes de l'ordre de 50 secondes (en bleu) Les géantes rouges qui brûlent aussi leur hélium central présentent des modes dont les écarts entre les périodes vont de 100 à 300 secondes (en rouge et orange). Les moins massives d'entre elles (en rouge) brûlent sans doute lentement leur hélium central

E0.4.3 Propriétés sismiques des régions convectives de surface

Les données CoRoT ont aussi permis aux chercheurs du LESIA d'obtenir une caractérisation précise des oscillations dans des étoiles de type solaire autre que le Soleil lui-même (par exemple ACL1000, ACL602). Ceci permet de contraindre les modèles d'excitation des modes acoustiques par la convection turbulente (ACL1035, ACL881, ACL608) et de déduire les amplitudes des vitesses de surface des modes acoustiques, et enfin les amplitudes des modes eux-mêmes (ACL549). Ils ont aussi étudié l'impact de l'abondance de surface en métaux sur le forçage par la convection turbulente et montré que celle-ci contrôlait de manière importante l'amplitudes des modes acoustiques. De plus, deux spécificités de la zone de convection associée à une variation rapide de la vitesse du son, la zone d'ionisation de l'He et le bas de la zone convective, se manifestent par des variations dans la grande séparation et la seconde différence des modes d'oscillations en fonction de la fréquence. Ces variations ont été détectées pour la première fois dans l'étoile de type solaire HD 49933 (Mazumdar et al. 2012²). Leur période permet d'estimer la profondeur acoustique de ces deux zones de discontinuités.

E0.4.4 Détermination sismique des masses et rayons des étoiles

Des études théoriques et observationnelles ont également été menées pour étudier les relations d'échelle. La fréquence d'oscillation de puissance maximale dans une étoile est liée à la fréquence de coupure des oscillations (ACL126) et la grande séparation des modes de pression (qui mesure le temps de parcours d'une onde acoustique sur un diamètre stellaire) est liée à la valeur moyenne de la

² Mazumdar, A., Michel, E., et al 2012, AA 540, 31

densité de l'étoile. Ces deux paramètres permettent donc d'obtenir des contraintes sur la masse et le rayon des étoiles. Ils sont mesurés de manière automatique (ACL783). Dans les géantes rouges (ACL267) et les étoiles de la séquence principale (ACL602), une corrélation claire entre la température et la fréquence de puissance maximale a été obtenue. Pour les étoiles de la séquence principale cependant, cette relation est aussi dépendante de la masse. D'autres relations d'échelle entre les fréquences d'oscillations et des paramètres globaux d'énergie ont été identifiées pour les géantes rouges. Elles résultent probablement des propriétés de l'enveloppe de ces étoiles et de la distribution d'énergie entre les oscillations et la convection. Par exemple, l'énergie totale des oscillations est proportionnelle à l'énergie de granulation (ACL073).

E0.4.5 Caractérisation sismique de la perte de masse

L'observation avec CoRoT d'une éjection de matière d'une étoile Be (HD 49330) a permis dès 2009 de montrer le lien direct entre ces éjections et les oscillations des étoiles Be. L'étude d'autres étoiles Be avec CoRoT et la modélisation de l'étoile Be HD 49330 a permis d'identifier des modes d'oscillations gravito-inertiels excités stochastiquement (ACL273). Ces modes sont excités dans le cœur des étoiles massives mais leur amplitude est trop faible dans les étoiles en rotation lente pour être détectée même avec CoRoT (ACL551). Dans les étoiles Be, c'est probablement la rotation très rapide qui augmente l'amplitude des modes stochastiques et permet leur détection (ACL273, ACL609). Ces modes stochastiques transportent du moment angulaire du cœur de l'étoile vers la surface et sont donc sans doute à l'origine des éjections de matière de la surface des étoiles Be vers leur disque circumstellaire. Le phénomène Be semble donc avoir enfin trouvé une explication qui résout un mystère vieux de 150 ans. Ces résultats seront confirmés par de prochaines observations CoRoT d'étoiles Be.

E0.4.6 Magnétisme

Les chercheurs du LESIA étudient également les propriétés des champs magnétiques stellaires et en particulier ceux des étoiles massives et ceux des étoiles de Herbig Ae/Be et des étoiles T Tauri de masse intermédiaire (IMTT), progéniteurs des étoiles A/B de la séquence principale.

Ils sont fortement impliqués dans un grand projet MiMeS (Magnetism in Massive Stars). MiMeS s'appuie sur 3 larges programmes d'observations avec ESPaDOnS au CFHT, Narval au TBL (PI: C. Neiner) et HARPSpol à l'ESO (PI: E. Alecian) débutés à partir de 2009. Ils ont notamment pu détecter, pour la première fois avec l'instrument HARPSpol à l'ESO, des champs magnétiques dans 3 étoiles massives (ACL110). Un deuxième programme d'observation (PI E. Alecian) vient de commencer au CFHT avec ESPaDOnS, au VLT avec l'instrument CRIRES et au télescope de 3.6m de l'ESO avec HARPSpol. Le but de ce projet est de comprendre l'origine du champ magnétique des étoiles de masse intermédiaire, et en particulier tester l'hypothèse du champ fossile.

Grâce aux données spectropolarimétriques, les chercheurs du LESIA ont montré que l'occurrence et les propriétés des champs magnétiques des étoiles de Herbig correspondent à celles attendues par rapport aux étoiles Ap/Bp par la théorie du champ fossile (ACL856 ; ACL857, ACL587 ; ACL588). Ils ont ainsi démontré que les étoiles de Herbig sont les progéniteurs des étoiles Ap/Bp mais aussi que les champs magnétiques des étoiles massives sont d'origine fossile, c'est-à-dire les champs survivants d'un champ présent lors de la formation de l'étoile et piégé dans l'étoile lors de l'effondrement du nuage pré-stellaire et/ou lors de la naissance de l'enveloppe radiative.

Il a aussi été montré dans ces études que le champ magnétique a peu d'influence sur la structure stellaire interne dans le cas des rotateurs très rapides (ACL077) mais qu'il impacte cependant les rotateurs plus lents ainsi que la distribution des abondances chimiques à la surface des étoiles (ACL076). De plus, la modélisation des signatures des champs magnétiques (profils de Stokes V) dans les raies stellaires permet de contraindre l'inclinaison de l'étoile, apportant ainsi une détermination de cette quantité indépendante de la sismologie. Enfin, l'importance du magnétisme stellaire sur les magnétosphères a été abordée par l'étude de l'étoile HD 96446 qui a montré qu'aucun des deux modèles de magnétosphères actuellement en faveur dans la communauté internationale ne semble convenir (Fig. astro4, HDR002).

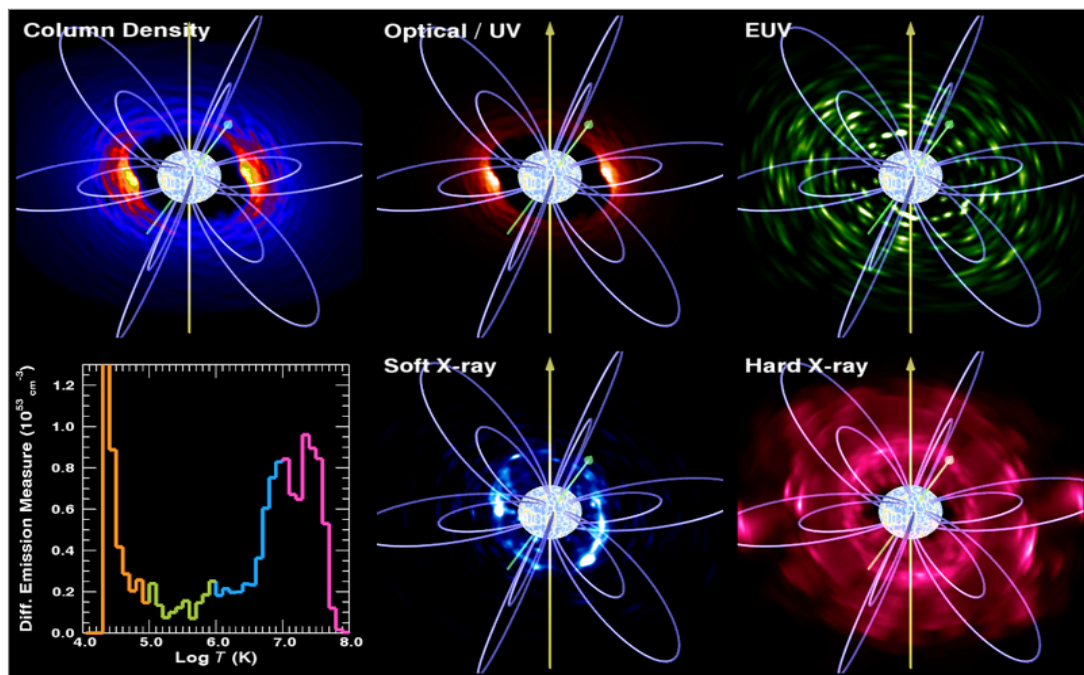


Figure astro4 : Exemple de la distribution d'émission d'une magnétosphère à différentes longueur d'ondes, calculée en utilisant le modèle hydrodynamique en champ rigide (*colonnes du milieu et de droite*). La distribution de la masse dans la magnétosphère (*en haut à gauche*) et la mesure d'émission (*en bas à gauche*) sont également montrées.

E3. Pôle de Physique des Plasmas

E3.1 Introduction

Le pôle "Plasmas" du LESIA étudie les plasmas héliosphériques en combinant les observations (spatiale et sol), la théorie, et les simulations numériques. Cette approche cohérente est appliquée au diagnostic local et à distance d'environnements variés. Plus particulièrement, nous étudions le vent solaire (expansion de la zone de transition au milieu interplanétaire, turbulence et mécanismes de transport d'énergie) et ses relations avec les autres objets du Système solaire. Par ailleurs, nous étudions les mécanismes de générations des émissions radio solaires (chocs, éjections de matière coronales), ainsi que les magnétosphères planétaires (interaction avec le vent solaire, structure et dynamique, réservoirs de plasma et physique aurorale). Les travaux théoriques sont liés à l'interprétation des observations et à la modélisation des plasmas héliosphériques et des poussières, qui sont confrontés aux simulations numériques (codes Vlasov, hybrides, particulières). Notre activité s'articule autour de deux thématiques scientifiques :

- **Vent solaire, milieu interplanétaire et plasmas hors de l'héliosphère**
- **Magnétosphères terrestre et planétaires**

Les observations spatiales concernent les ondes électrostatiques et électromagnétiques in-situ et les émissions radio en basses fréquences, sous la coupure ionosphérique. L'expertise instrumentale spatiale du pôle consiste en la conception et la réalisation de récepteurs d'ondes radio et plasmas à très faible bruit, destinés à la mesure des plasmas naturels, par spectroscopie du bruit quasi-thermique pour la détermination in-situ des densités et températures du plasma, (*ACT354* ou <http://www.lesia.obspm.fr/Spectroscopie-du-bruit-quasi.html>) et par radio-goniopolarimétrie pour l'observation des ondes radio "basses fréquences" (*ACL901* ; *OSC007*). De tels récepteurs ont été embarqués sur de nombreuses missions spatiales internationales. Parmi elles, citons Ulysse, Wind, Cassini, Cluster et STEREO. Côté « sol », les observations radio sont réalisées avec les réseaux décimétriques de Nançay et Kharkov (voir section Instrumentation).

Concernant la recherche et le développement de ces récepteurs radio, une caractéristique fondamentale du pôle Plasmas est l'existence d'une collaboration étroite entre chercheurs, ingénieurs et techniciens du LESIA, permettant une synergie indispensable entre la théorie (des antennes en plasmas) et le design/réalisation (des récepteurs), mais également pour leur exploitation scientifique.

L'archivage des données en exploitation, à travers des bases de données (CDPP, BASS2000), constitue une autre activité importante du pôle. Sur la période 2007-2012, avec trois embauches au CNAP, notre activité en matière de Service d'Observation (à travers le SO2 et le SO5 en particulier) nous permet un investissement important dans les bases de données et les préparations des opérations des missions spatiales en développement (BepiColombo et Solar Orbiter).

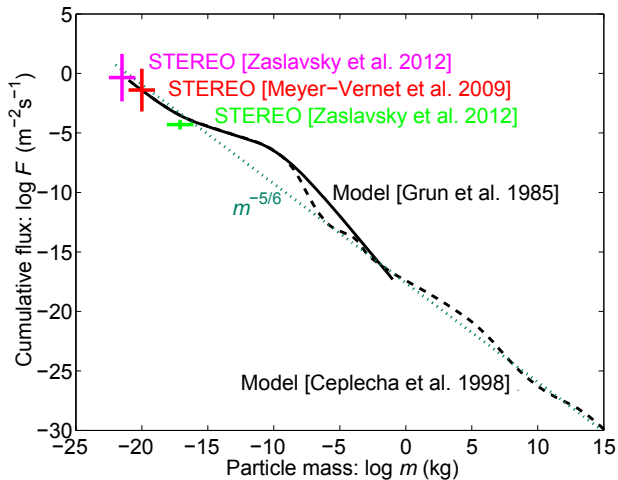
Les thématiques développées au pôle plasmas font appel à des collaborations internationales plus spécifiques (mentionnons par exemple les USA, le Japon et de nombreux pays européens). Elles ont permis la formation par la recherche de 5 étudiants en thèse en co-tutelle sur 13 thèses soutenues ou en cours depuis 2007. En 2011, un recrutement Maître de Conférence nous a permis de renforcer nos activités avec les laboratoires « plasmas » de l'UPMC. Côté recherche, cela permet de structurer nos activités (notamment par une participation au labex Plas@par) et d'améliorer la dynamique des projets de recherche transverses entre les pôles plasmas et solaire du LESIA (par exemple avec Solar Orbiter).

Enfin, le pôle plasmas est impliqué dans les équipes thématiques transverses du LESIA « perturbations héliosphériques et météo de l'espace » et « exoplanètes », dans lesquelles les activités scientifiques et l'expertise du pôle s'insèrent naturellement (voir la prospective concernant les équipes transverses).

Un éclairage particulier sur 5 activités de recherche, ainsi qu'un résumé de quelques résultats innovants obtenus ces 5 dernières années, sont présentés ci-dessous.

E3.2 Extrait de 5 résultats scientifiques

1) Détection *in-situ* de poussières dans le vent solaire et dans les environnements planétaires



Le pôle Plasmas a développé une technique permettant la détection *in-situ* des grains de poussière à l'aide des instruments radio et ondes plasma embarqués sur la plupart des sondes spatiales. Tout comme les analyseurs de poussières classiques, cette technique est fondée sur la détection des charges électriques générées lors du processus d'ionisation d'impact se produisant lorsqu'un grain de poussière percute une cible solide à grande vitesse. Cette méthode, développée et utilisée dès les années 80 avec la mission Voyager, a été fortement améliorée lors des trois dernières années en collaboration avec les ingénieurs du pôle. Ce travail a permis de bénéficier pleinement des avancées

technologiques des dernières générations d'instruments radio, en particulier des captures de formes d'ondes à haute résolution temporelle.

L'application de cette technique aux sondes STEREO a débouché sur plusieurs résultats scientifiques originaux. Nous avons tout d'abord réalisé **les premières, et à ce jour les seules, mesures *in-situ* de nano-poussières (3-15 nm) au voisinage de l'orbite terrestre à partir de l'instrument S/WAVES** (responsable PI JL Bougeret) (*ACL775*, *ACL106*). Ce résultat a permis de montrer que la distribution du flux de masse des petits corps dans le milieu interplanétaire se poursuivait avec la même loi de puissance jusqu'à des particules de taille nanométrique. Il constitue de plus une base observationnelle essentielle pour la validation de modèles de production et d'accélération de grains nanométriques dans l'héliosphère interne.

Cette découverte s'est accompagnée d'un travail de **modélisation du processus de génération du signal électrique détecté par les antennes radio lors d'un impact de poussière** sur une sonde interplanétaire (*ACL083*). L'interprétation est en effet fondée sur des modélisations numériques de l'expansion d'un nuage de plasma à l'aide de codes de type N-corps (*ACL607*). Ces simulations montrent que les sauts de potentiel observés par STEREO ne donnent pas une mesure directe du potentiel dans le nuage, trop faible, mais est le résultat de l'action du nuage sur la population de photoélectrons qui entourent le satellite.

Une étude approfondie des corrélations des signaux détectés sur les différentes antennes a permis d'étalonner l'instrument dans la gamme de taille sub-micrométrique (0.1-0.3 microns). Ce travail, bénéficiant de la grande surface de collection associée à notre technique (environ 1 m², à comparer à une surface de l'ordre de 10 cm² pour un analyseur de poussières classique) a, entre autres, permis une **mesure particulièrement précise du flux de poussières d'origine interstellaire à une unité astronomique** (*ACL106* ; *ACL011*). Ce travail bénéficie d'un soutien de l'UPMC à travers un projet Emergence (2011-2013) avec le financement d'une thèse (S. Belheouane thèse en cours).

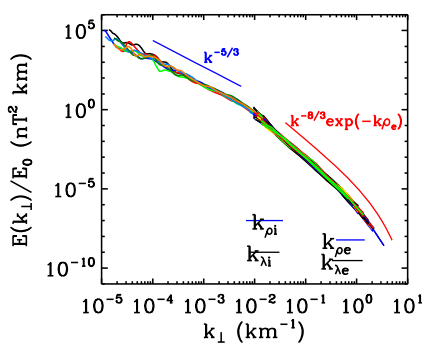
Notre technique de détection radio *in-situ* a aussi été appliquée lors du survol de Jupiter par la sonde Cassini. **Ce travail a permis de mesurer des flux de nano-poussières accélérées par les forts champs électriques de co-rotation joviens**, donnant des résultats comparables aux mesures de l'analyseur de poussières embarqué sur cette sonde (*ACL776*). Nous avons aussi collaboré à des mesures complémentaires de poussières de plus grande taille (*ACL828*; *ACL166*).

2) Expansion du vent solaire

Le vent solaire est un plasma extrêmement peu collisionnel. Ainsi, un électron du vent ne subit en moyenne qu'une seule collision avec une autre particule au cours de son voyage entre son lieu d'origine, la couronne solaire, et la Terre. Pour un proton, le nombre de collisions est encore plus petit

ce qui garantit de pouvoir parcourir la même distance sans collision. Dans ces conditions, et en l'absence d'ondes, un calcul simple indique que la température des protons dans le plan perpendiculaire au champ magnétique décroît avec le carré de la distance héliocentrique, alors que la température dans la direction parallèle au champ magnétique reste constante. A l'orbite de la Terre, les protons du vent solaire devraient alors être environ dix mille fois plus chauds parallèlement au champ magnétique que perpendiculairement à ce dernier. Une étude statistique étendue du vent solaire, menée pour différentes distances au Soleil (de 0.3 à 2.5 UA) à partir des sondes Helios et Ulysse, donne une vision globale de l'évolution des protons dans le milieu interplanétaire (ACL1209). Elle confirme, entre autre, que dans le vent dit « rapide » (> 600 km/s) à l'orbite de Mercure, la température perpendiculaire est environ le double de la température parallèle. Cet excès disparaît à l'orbite de la Terre au delà de laquelle les deux températures sont similaires. Pour résoudre ce problème, Matteini et al (ACL1209) ont démontré que le mécanisme qui limite l'anisotropie de la température des protons au delà de l'orbite de la Terre est dû à des ondes plasma engendrées par l'instabilité dite "firehose". Cette instabilité est déclenchée lorsque la différence entre température parallèle et perpendiculaire dépasse un seuil critique, dépendant des paramètres du plasma. Par contre, dans l'héliosphère interne (< 1 UA), le plasma est stable vis-à-vis des différents types d'instabilités. Comment alors expliquer que l'anisotropie n'est pas aussi forte que prévue ? Matteini et al. (ACL1209 et ACT209) suggèrent que c'est la turbulence électromagnétique, omniprésente dans le vent solaire, qui « isotropise » les ions.

3) La fin de la cascade turbulente électromagnétique dans le vent solaire.



La turbulence et sa dissipation dans les plasmas spatiaux peu collisionnels (comme le vent solaire) restent de grandes questions ouvertes, actuellement très étudiées. Un des mécanismes qui pourrait expliquer le « chauffage manquant » du vent solaire est lié au fait que la température observée ne décroît pas de manière strictement adiabatique mais avec un gradient moins important. Si la turbulence dans le vent solaire est assez bien décrite sur les échelles MHD, elle est en revanche beaucoup moins bien connue sur des échelles proches des échelles caractéristiques des ions et des électrons. Les mesures de l'instrument STAFF sur CLUSTER ont révolutionné le domaine en permettant de

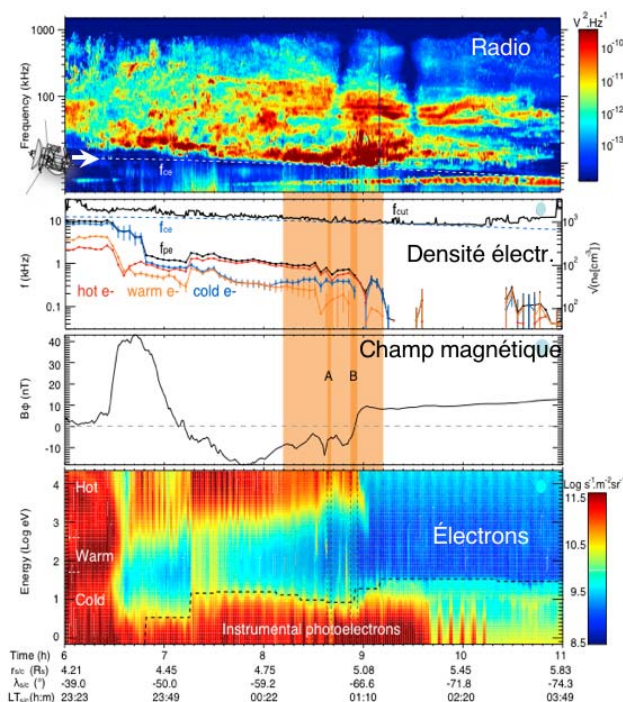
mesurer à la fois les échelles ioniques du plasma (0.1-10 Hz, ces fréquences correspondent aux échelles spatiales ~ 50 -1000 km) et les échelles électroniques (200 m -5 km), comme le rayon de giration ρ_e autour du champ magnétique. Avec les mesures de STAFF-SA, on arrive pour la première fois à résoudre le spectre magnétique turbulent dans le vent solaire jusqu'à 400 Hz, c'est-à-dire jusqu'à 200 mètres. Sur ces petites échelles, Alexandrova et al., (ACL589 et ACT011) ont obtenu une première indication du début du domaine dissipatif de la turbulence, caractérisé par un spectre exponentiel. Ce résultat crucial demande à être confirmé par une étude statistique étendue. Récemment, les mêmes auteurs ont étudié les spectres de fluctuations magnétiques mesurés par CLUSTER dans le vent solaire. Tous ces spectres peuvent être décrits par une loi générale, indépendamment de la nature du vent (lent ou rapide), et de ses propriétés macroscopiques (densité, température, champ magnétique). Ils démontrent que la cascade électromagnétique dans le vent solaire se termine donc par une dissipation sur les électrons et que le niveau de la turbulence semble être déterminé par la pression thermique et l'anisotropie de température des protons dans le vent solaire. Ces derniers résultats indiquent que les instabilités d'anisotropie peuvent jouer un rôle d'injection ou de dissipation de l'énergie turbulente sur la cassure ionique. Cela est en accord avec les conclusions de Matteini et al. (ACT680). La cascade turbulente électromagnétique directe (des échelles MHD vers les petites échelles) se termine donc à l'échelle de giration des électrons autour du champ magnétique ($\rho_e \sim 1$ km).

Notons que des simulations électrostatiques de la turbulence mettent en évidence l'existence d'une cascade inverse, de la longueur de Debye vers des échelles plus grandes (qui se rapprochent des échelles électroniques) avec génération de structures cohérentes sous forme de solitons de Langmuir (ACL206).

4) Observations et théorie des sauts de potentiels et génération des sursauts millisecondes de Jupiter

Les émissions radio magnétosphériques aurorales sont produites par des électrons d'énergie égale à quelques keV, qui doivent être accélérés dans la magnétosphère. Les processus d'accélération ne sont ni bien identifiés, ni bien compris, et leur étude peut avoir des applications dans d'autres contextes astrophysiques. Le circuit électrique Io-Jupiter est un système bien contraint (localisation, géométrie et paramètres physiques bien connus), idéal pour étudier ces processus. Il a été exploré lors de brefs passages de Voyager, Ulysse et Galileo, et le sera en profondeur par la mission JUNO. Mais ses émissions radio décimétriques sont également observées à partir du sol (Nançay, Kharkov, LOFAR) à très hautes résolutions temporelle et spectrale. Elles sont constituées en grande partie de sursauts (i) discrets, (ii) dérivant rapidement des hautes (~40 MHz) vers les basses fréquences (~10 MHz), et (iii) se produisant en trains de sursauts quasi-périodiques (quelques Hz). Nous avons proposé une théorie d'accélération des électrons à l'origine de ces sursauts par des ondes d'Alfvén excitées par Io dans le champ magnétique de Jupiter (ACL1169) qui, combiné à l'instabilité Maser-cyclotron (IMC) par lequel ces électrons émettent les ondes radio, explique l'ensemble des propriétés observées au sol (i) à (iii) et est compatible avec les observations spatiales existantes. De plus, l'analyse fine des dérives des sursauts radio révèle des brisures de pentes (dans le plan temps-fréquence) qui nous ont permis de découvrir l'existence de sauts de potentiel électrique (de 0.1 à 1 kV, aussi appelés "doubles-couches fortes") le long du tube de flux magnétique reliant Io à Jupiter (ACL1170). De telles structures n'avaient été observées qu'in-situ dans la magnétosphère terrestre ou le vent solaire, et apparaissaient (qualitativement) dans des simulations numériques du circuit Io-Jupiter. Nous les avons étudiées à distance (via les sursauts radio) et avons mesuré leur mouvement le long du champ magnétique, à la vitesse du son locale (ACL714). Enfin, incorporés à la théorie d'accélération par ondes d'Alfvén, ces doubles-couches permettent de simuler avec précision la morphologie détaillée des sursauts radio (ACL713). Notons qu'en parallèle, une analyse de la structure ultrafine de ces sursauts radio (via des observations en forme d'onde, à très haut débit) s'appuyant sur la théorie des signaux complexes nous a permis de démontrer qu'ils résultent bien d'une amplification (comme l'IMC) et non d'un signal de type "générateur non-linéaire" (ACL1255).

5) Caractérisation multi-instruments de la région source du rayonnement kilométrique de Saturne



La compréhension détaillée du processus de génération d'une émission radio est précieuse pour l'utiliser ensuite comme moyen de diagnostic du plasma à sa source (et sur son trajet). Les émissions radio aurorales planétaires sont attribuées à l'instabilité Maser-cyclotron (IMC) du fait de leur analogie avec l'émission radio aurorale terrestre. Seules les sources de cette dernière avaient été étudiées in-situ, permettant d'établir la théorie de l'IMC. En octobre 2008, la sonde Cassini a traversé pour la première fois une source du rayonnement kilométrique auroral de Saturne (SKR). Nous avons dirigé une étude détaillée des observations radio, magnétiques, et de particules thermiques et énergétiques dans cette source, et avons pu valider pour la première fois in-situ la pertinence de l'IMC sur une planète autre que la Terre (ACL482). Les auteurs ont caractérisé les analogies (e.g. plasma chaud dominant) et les différences (absence de cavité à petite échelle) avec le cas

terrestre attribuées aux différences intrinsèques entre ces deux magnétosphères. Puis les observations radio à distance et dans la source ont été analysées en détail, en identifiant les modes émis par l'IMC (X dominant, mais aussi O faible), en modélisant l'évolution de leur polarisation et de leur angle par rapport au champ magnétique au cours de la propagation hors de la source (ACL225). Dans la source, le rayonnement provient de tous les côtés à la fois. Cette analyse pose des bases solides pour l'interprétation de toutes les observations radio - à distance - de Saturne avec Cassini, et l'étude des autres rayonnements radio planétaires. Nous avons collaboré à de nombreuses études complémentaires, des courants (ACL373) et du plasma (ACL296) dans la source du SKR, de calculs théoriques du taux de croissance de l'IMC (ACL515; ACL256), d'une description contextuelle de ces observations (ACT057), et de l'identification ambiguë d'une deuxième traversée de source (ACT070).

E3.3 Autres résultats innovants

E3.3.1. Vent solaire, milieu interplanétaire

1) Concernant la structure à grande échelle du vent solaire, notre activité s'est concentrée sur la détermination des propriétés du vent rapide au cours d'un cycle solaire à partir des observations in-situ, utilisant la méthode de spectroscopie de bruit thermique (ACL957 ; ACL227). Cette technique de mesure a par ailleurs été étendue aux fonctions de distributions non thermique mesurées dans le vent solaire, à partir de nouveaux développements théoriques (ACL746) afin de mesurer le profil de la température totale des électrons en fonction de la distance héliocentrique avec une précision dix fois meilleure.

2) Dans un contexte astrophysique plus général, nous avons débuté une étude du flux d'énergie des vents stellaires (ACT341). Nous avons montré que le flux d'énergie du vent solaire, mesuré par plusieurs sondes spatiales à des positions différentes, pendant plus de trente ans, est quasiment constant et indépendant de la latitude, de la vitesse du vent et de l'activité du soleil, ce qui formalise la relation empirique entre la vitesse et la densité. Comparé à d'autres étoiles (depuis les étoiles jeunes jusqu'aux super géantes), les résultats montrent que le flux est constant pour un grand nombre d'objets, laissant supposer un processus commun à l'origine de ces vents stellaires.

3) Les flux d'électrons produits lors des éruptions solaires sont à l'origine d'intenses rayonnements électromagnétiques dans la gamme radio (0.5 - 20 MHz). Le processus physique (couplage d'ondes) à l'origine de ces émissions a été décrit à la fin des années 50. Grâce aux mesures de formes d'onde électriques de STEREO, qui permettent de mesurer simultanément les ondes électrostatiques dans une grande gamme de fréquences, nous avons pu fournir les premières preuves observationnelles de la vérification des lois de conservation d'énergie et de couplage de phase (ACL711). Des simulations cinétiques de type Vlasov dans la limite électrostatique ont par ailleurs permis (i) de déduire un seuil de déclenchement de l'instabilité dans le cas réaliste d'ondes non monochromatiques, et (ii) de montrer que l'amplitude des ondes observées est dans la limite des seuils attendus (ACL461). La force pondéromotrice, induite par la dynamique des ions et des électrons, a également été mise en évidence à partir des mesures de forme d'onde de STEREO et utilisée pour fournir un nouveau moyen de diagnostic des fluctuations de densité à des fréquences non observables par des instruments dédiés aux particules. Cette technique pourra être utilisée sur d'autres missions présentant une configuration instrumentale similaire à STEREO (ACL205).

E3.3.2 Magnétosphères terrestre et planétaires

1) Grâce à Cassini/RPWS, de nombreuses études de fond des émissions radio de Saturne ont été menées (ACL1284 ; ACL701 ; ACL455). Des variations lentes et saisonnières de la modulation de ces émissions radio associées avec un hémisphère de Saturne ont été mises en évidence (ACL701). Leur contrepartie a été retrouvée dans l'évolution des principaux marqueurs magnétosphériques. Ces études soulèvent des questions sur le lien entre la rotation d'un corps magnétisé et la dynamique de la magnétosphère associée. Elles suscitent un fort intérêt au sein de la communauté « plasmas » de Cassini (cf <http://typhon.obspm.fr/groups/saturnperiodicities/>).

2) Au-delà de l'analyse des observations radio, nous privilégions les études multi spectrales (avec par ex. la découverte d'un ovale radio conjugué magnétiquement aux aurores UV atmosphériques de

Saturne, et de l'interaction électrodynamique Saturne/Encelade), la théorie et la modélisation des émissions radio de Saturne et Jupiter (également extrapolée pour des prédictions concernant les exoplanètes – cf. équipe transverse).

3) Les observations de Cassini/RPWS nous ont également permis d'approfondir l'étude des orages atmosphériques de Saturne, via leurs éclairs, initiée avec les sondes Voyager : nous avons notamment observé leur basculement saisonnier du Sud au Nord, sondé l'ionosphère de Saturne, et découvert et interprété des effets de propagation radio « au-delà de l'horizon » via un code de tracé de rayons (thèse en cours, A.-L. Gautier).

4) L'importance de Cassini ne doit pas occulter la poursuite de l'étude des magnétosphères de Jupiter (avec par ex. le développement d'un modèle innovant de champ magnétique interne) et de la Terre (avec la découverte et l'interprétation de modulations diurnes et semi-diurnes de son rayonnement kilométrique auroral).

E3.4 Instrumentation spatiale et sol

La synergie entre les équipes technique et scientifique du pôle est un atout fort pour l'exploitation optimale des missions spatiales et confère au pôle plasmas une position internationale (PI et Co-I sur de nombreuses missions spatiales). Notre activité instrumentale spatiale sur la période 2007-2012 s'est concentrée d'une part sur la réalisation/livraison de l'instrument SORBET sur BepiColombo (ESA & JAXA) et d'autre part sur les études d'AO et sélections des missions Solar Orbiter (ESA) et Solar Probe Plus (NASA).

SORBET est un spectromètre d'ondes radio [2.5-640 kHz, 500 kHz-10.2 MHz], conçu pour l'étude de la magnétosphère de Mercure au sein du consortium d'instruments PWI (Plasma Waves Instrument) à bord de BepiColombo/MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter). La CDR (Critical Design Review) a eu lieu en avril 2010 et le modèle de vol est livré à l'agence spatiale japonaise (JAXA) fin juin 2012. SORBET est l'exemple type d'instrument ayant bénéficié d'une étroite collaboration entre les plasmiciens et électroniciens du LESIA. Le défi à relever pour embarquer sur BepiColombo était de réaliser un instrument avec des performances comparables à celles de Cassini ou STEREO (bas bruit, linéarité, 2 voies et corrélation des signaux, grande dynamique >120dB) mais avec une bien meilleure résolution spectrale et des spécifications drastiques de masse (<600g), puissance (<2W) et de résistance aux radiations et températures rencontrées à Mercure. Pour cela, des R&D de miniaturisations spécifiques (ASIC analogique) ont été réalisés.

Cet héritage a été largement exploité pour la conception et l'adaptation des récepteurs qui équiperont Solar Orbiter (ESA) et Solar Probe Plus (NASA). Ces deux missions programmées dans l'héliosphère interne (jusqu'à 50 rayons solaires pour Solar Orbiter et 9.5 Rs pour SPP) font encore partie de la prospective du pôle en ce qui concerne leur exploitation scientifique, mais la conception/réalisation des récepteurs (du kHz à ~20MHz), est déjà largement engagée au pôle Plasmas du LESIA. Pour RPW/Solar Orbiter [<http://www.lesia.obspm.fr/Solar-Orbiter.html>], dont Milan Maksimovic est le PI, l'AO paru en 2007 a permis de mettre sur pied un consortium international (France, Suède, Autriche, République Tchèque) qui s'est réuni à plusieurs reprises. La conception de l'instrument se fait en étroite collaboration avec le CNES qui en est le maître d'œuvre technique. La Preliminary Design Review (PDR) s'est tenue en mars/avril 2012. Pour SPP [<http://www.lesia.obspm.fr/Solar-Probe-Plus.html>], dont l'AO est paru en 2009, nous avons activement participé à la modélisation des antennes proposées sur FIELDS, ce qui a abouti à sa sélection définitive en septembre 2010, puis aux études de phase A en 2011 (dont faisabilité (Moncuquet, *Etude et rapport de faisabilité TNR-HFR sur SPP/FIELDS (2011). Document CNES, 2011*) et démarrage de phase B (design) en janvier 2012.

Coté « sol », outre notre implication forte au sein de la communauté LOFAR (P. Zarka est P.I. du WG Planets/Exoplanets de LOFAR <http://www.transientskp.org/>, co-PI du Consortium FLOW-LOFAR-France et de l'Action Spécifique SKA-LOFAR de l'INSU), nous avons développé et étudié le concept instrumental d'une super station LOFAR (à Nançay <http://www.obs-nancay.fr/lss/>) (ACT043) Une thèse est en cours (J. Girard, 2012). Enfin, nous complétons notre investissement instrumental dans LOFAR [30-250 MHz], par une collaboration forte avec l'Institut de Radioastronomie de Kharkov (cadre d'un PICS France-Ukraine entre autres), via le développement de récepteurs

numériques de pointe en radioastronomie sol (à Kharkov/UTR-2 [8-32 MHz]) et leur application à des observations décimétriques à haute sensibilité (*ACL548*), complémentaires des observations spatiales. Nous menons avec ces deux instruments un programme d'étude des émissions magnétosphériques de Jupiter, des éclairs d'orages de Saturne et Uranus, de sursauts solaires et stellaires, et de recherche d'exoplanètes en radio.

Au sol, toujours, la collaboration scientifique « CODALEMA » (<http://codalema.in2p3.fr/>), réunissant des laboratoires de l'IN2P3 et de l'INSU (dont le LESIA), a développé, sur le site de Nançay, grâce à un financement ANR en 2005, une collection de détecteurs couplés, destinés à étudier les propriétés de l'émission radio associée aux gerbes cosmiques d'énergie 10^{16} à 10^{18} eV (UHECR). L'instrument CODALEMA a enregistré depuis mi-2007 des centaines d'événements validés qui ont permis d'établir des propriétés fondamentales de cette émission radio :

- i) proportionnalité de l'intensité radio avec l'énergie du primaire ;
- ii) dépendance quasi-exponentielle de l'amplitude du champ électrique avec la distance à l'axe de la gerbe ;
- iii) anisotropie dans les directions d'arrivée des gerbes qui produisent un signal radio (*ACL596*);
- iv) excentrement vers l'Est de la gerbe « radio » par rapport à la gerbe de particules. Grâce à un financement par la Région « Pays de la Loire », un ensemble de 60 dipôles croisés autonomes est en cours d'implantation à Nançay, afin de tester le déclenchement sur le signal radio lui-même sans recours aux détecteurs de particules.

E4 Pôle de Physique Solaire

Les principaux thèmes de recherche du pôle solaire du LESIA concernent la génération, l'émergence et l'évolution des champs magnétiques solaires ; les instabilités éruptives et mécanismes d'accélération des particules ; la structure de la couronne, les éjections de masse coronale et le couplage de la couronne avec l'héliosphère. Pour mener à bien leur recherche, les chercheurs du pôle utilisent des données d'instruments au sol (tels que [THEMIS](#) ou le [radiohéliographe de Nançay](#)) ainsi que d'instruments spatiaux (SoHO, STEREO, ULYSSE, RHESSI, SDO, HINODE, TRACE) couplées à des développements de modèles théoriques et numériques. Les chercheurs du pôle ont un statut de CO-I sur plusieurs de ces expériences spatiales (SOHO, STEREO, RHESSI, ULYSSE et SDO).

L'activité scientifique s'articule autour de trois thématiques scientifiques :

- **Formation et structuration des champs magnétiques solaires**
- **Phénomènes éruptifs et accélération de particules**
- **Perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace (équipe transverse avec le pôle plasmas – NB la description de cette thématique complète la partie II)**

L'archivage des données en exploitation, à travers des bases de données ([BASS2000](#)), ainsi que le développement d'un site d'observations radio coordonnées (<http://secchirh.obspm.fr>) constituent d'autres activités importantes du pôle. Le pôle solaire a par ailleurs la responsabilité scientifique des observations du Radiohéliographe de Nançay (et dans un futur proche du spectrographe ORFEE). Il a participé au développement d'un système automatique mis en place en 2011 pour la distribution des données à haute résolution temporelle du Radiohéliographe (dont l'archivage complet est effectué à Nançay : une trentaine de demandes de données hors pôle solaire en moyenne par an). En partenariat avec l'IPEV, le pôle solaire est également responsable de l'exploitation des moniteurs à neutrons des Iles Kerguelen et de Terre Adélie. Il joue un rôle actif dans le développement de la base de moniteurs à neutrons NMDB à l'Université de Kiel. Le pôle solaire assure également des services de [surveillance solaire](#) en lumière visible à Meudon, et en ondes radio à Nançay.

Les thématiques développées au pôle solaire font appel à des collaborations internationales très nombreuses et régulières (USA, Pologne, Royaume Uni, Chine, Inde, Grèce, ...). Nos recherches s'appuient également sur de nombreux projets Européens (projets FP6 & FP7 : EGSO, SOTERIA, NMDB et projet de formation de thésitifs et post-docs SOLAIRE terminés et projets en cours SEPServer, HESPE, HELIO et eHEROES).

E4.1 Formation et structuration des champs magnétiques solaires

Cette équipe thématique est dédiée à l'étude des conditions physiques des couches superficielles du Soleil (photosphère, chromosphère, couronne) et de leur évolution, exception faite des éruptions solaires qui sont l'objet d'étude d'une autre équipe thématique. Dans ces couches où le plasma est de moins en moins dense au fur et à mesure que l'on s'élève, le champ magnétique joue un rôle essentiel de support et de guide de la matière. L'équipe s'intéresse tout particulièrement au diagnostic des champs magnétiques (effet Hanle, effet Zeeman), ainsi qu'au diagnostic des champs de vitesse de la matière. Nous présenterons ces activités en allant de l'observation à la simulation en passant par la modélisation, et de la photosphère à la couronne.

Diagnostiques des champs magnétiques et topologie(s) magnétique(s)

L'effet Hanle est un effet sensible au champ magnétique faible, qui se manifeste dans la polarisation formée par diffusion au bord du disque solaire. De nombreuses observations ont eu lieu à THEMIS (*ACL1210*) et à la lunette Jean Rösch du Pic-du-Midi (*ACL1204*). La modélisation fait largement intervenir les effets collisionnels, notamment les collisions dépolarisantes (Sahal-Bréchet et al., 2007, *ACL1210*). Le champ magnétique diagnostiqué est la partie faible du champ magnétique du Soleil calme. Du fait de l'absence observée de rotation du plan de polarisation, il avait été imaginé (Stenflo, 1982) que ce champ est "turbulent", c'est-à-dire de toutes directions non résolues dans l'élément de surface observé, et localisé entre les tubes de flux et observés et analysés au DPSM de THEMIS par Mein et al. (*ACL1210*). Mais l'effet Hanle n'est pas sensible à la composante verticale du champ, et l'analyse d'observations effectuées avec l'effet Zeeman, avec le polarimètre ZIMPOL

(Bommier et al., 2009) et avec le polarimètre THEMIS (*ACL137*), a montré que cette composante verticale n'est pas présente, ce qui conduit plutôt à un modèle de champ magnétique en tapis de boucles.

Les observations d'effet Zeeman sont interprétées avec le code d'inversion UNNOFIT (Bommier et al., 2007), appliquant l'algorithme de Levenberg-Marquardt à la solution théorique de Unno-Rachkovsky dans le modèle d'atmosphère de Milne-Eddington. Nous y avons ajouté la prise en compte de gradients verticaux de vitesse asymétrisant les profils (*ACL264*). Les résultats de ce code appliqué aux observations THEMIS ont été comparés avec succès aux résultats du code MELANIE, également Milne-Eddington, appliqué aux données de HINODE/SOT (*ACL453*). Une autre méthode d'inversion a été développée au laboratoire (*ACL253*), procédant par itérations entre polarisation linéaire et circulaire et permettant d'utiliser un modèle d'atmosphère plus sophistiqué. 200 cartes de régions actives obtenues par inversion UNNOFIT de données THEMIS, sont visibles dans la base de données BASS2000, site de Tarbes, et à <http://lesia.obspm.fr/perso/veronique-bommier/>. Noter qu'une cartographie magnétique a été réalisée à THEMIS en DPSM (*ACL770*).

La carte de champ magnétique photosphérique sert de condition aux limites pour la reconstruction 3D de la structure magnétique de la région active. Guo Yang (*THS005*), appliquant une extrapolation force-free non linéaire (code de Wiegmann), a mis en évidence l'existence d'un tube de flux torsadé en émergence responsable d'une éruption (*ACL452, ACL453, ACL043*). Canou et al. (*ACL631*) ont obtenu le même résultat avec des données THEMIS et d'autres codes (ceux de T. Amari) portant sur une autre région active.

De manière plus générale, nous avons montré que le champ émerge de manière torsadée (*ACL234*). Dans le cadre de la MHD résistive, nous avons développé un modèle d'émergence de tubes de flux ondulants (Pariat et al., 2004; voir aussi l'exposé didactique récent : http://www.scholarpedia.org/article/Magnetic_Flux_Emergence de Schmieder & Pariat. Ce modèle implique la reconnexion magnétique aux petites échelles pour rendre compte de la géométrie ondulée du tube de flux émergent (*ACL098*) et des multiples émissions chromosphériques (*ACL230*) dans les régions d'émergence. Nous avons développé une simulation numérique "data-driven" (code OHM de G. Aulanier) de la formation de nappes de courant induisant les reconnexions magnétiques dans ces régions (*ACL801*).

A partir des reconstructions 3D du champ magnétique, nous pouvons étudier sa topologie et faire ainsi apparaître les quasi-séparatrices (*ACL816, THS008*), zones de développement préférentiel des nappes fines de courant électrique impliquées dans le déclenchement des éruptions (*ACL344, ACL085*). Nous avons mis en évidence de telles structures lors d'éruptions (*ACL043, ACL089*), au niveau de régions sources de CMEs (*ACL153*), et sur le bord des flots de matière typiquement présents de part et d'autre des régions actives (*ACL600*). Dans ce dernier cas, nous avons pu mettre en évidence des points neutres magnétiques à l'endroit où des orages de bruit radio ont été observés, notamment par le radiohéliographe de Nançay (*ACL172, ACL142*).

De manière plus générale, nous développons une expertise unique sur l'hélicité magnétique, la quantité globale caractérisant la torsion et le cisaillement des lignes de champs dans l'atmosphère solaire. D'une part, nous avons développé une méthode permettant de mesurer le flux d'hélicité au niveau de la photosphère et de cartographier sa distribution (*ACL673, ACL1132, ACL1231*), à partir de séries temporelles de magnétogrammes. Cette méthode a été appliquée à l'étude de régions actives impliquées dans des éruptions (*ACL292, ACL312, ACL385*). D'autre part, nous avons développé une méthode nouvelle permettant de calculer l'hélicité complète de structures magnétiques 3D. On peut appliquer cette méthode aux simulations numériques aussi bien qu'aux extrapolations/reconstructions 3D réalisées à partir de cartographie (*ACL098*). Ces méthodes sont au cœur de la thèse de Kevin Dalmasse (en cours).

Diagnosics des champs de vitesse

Nous avons établi avec l'IRAP une solide collaboration sur la mesure du champ de vitesses de la matière photosphérique. Nous effectuons avec les satellites SDO et HINODE des observations à haute résolution spatiale dans le but de reconstituer les champs de vitesse horizontaux par mesure des déplacements granulaires (spécialité IRAP). Le vecteur vitesse est ensuite obtenu en y ajoutant la mesure de la composante verticale par effet Doppler (spécialité LESIA). Les mesures de déplacements

horizontaux sont faites avec le logiciel CST (Rieutord et al., 2007). Récemment, une analyse par transformée de Hilbert du déphasage des vitesses Doppler mesurées à différentes profondeurs le long du profil de la raie Fe I 5576 Å insensible au champ magnétique, a permis de mettre en évidence des ondes acoustiques énergétiques généralement ascendantes, concentrées dans les séparations intergranulaires du Soleil calme (ACL239). Dans un article où nous avons réuni les déterminations de vitesses horizontales et verticales (ACL542), nous avons pu tracer la densité spectrale d'énergie et déduire ses lois de puissance caractérisant la turbulence hydrodynamique, et évaluer l'échelle de hauteur du champ de vitesses. Nous venons d'effectuer une mesure de la rotation différentielle le long du méridien central (Roudier et al., 2012).

Champs magnétiques coronaux, Protubérances (et filaments)

La couronne solaire peut être observée devant le disque solaire uniquement en UV ou en ondes radio. Le radiohéliographe de Nançay est le seul instrument au monde permettant cette imagerie dans le domaine de fréquences 150-450 MHz correspondant à la basse et à la moyenne couronne. En utilisant la technique interférométrique de synthèse d'ouverture (ACL773), nous avons pu reconstituer des images de la couronne solaire à différentes altitudes, et mettre en évidence une structuration de la couronne : plus bas (à 445 MHz), nous voyons les couloirs sombres dans lesquels peuvent se trouver les filaments, ainsi que les trous coronaux par où s'échappe le vent solaire rapide ; plus haut (à 173 MHz), nous voyons de grandes zones plus brillantes dont les frontières coïncident avec les lignes neutres du champ magnétique photosphérique. Ces structures sont en bonne corrélation avec le champ magnétique coronal obtenu par extrapolation potentielle de magnétogrammes (ACL067). Une modélisation est en cours pour remonter à la température/densité.

Dans la couronne, la matière peut se concentrer et se refroidir en protubérances (que l'on voit sur le disque sous forme de filaments). Les CMEs se forment souvent par l'envol d'une protubérance, même en dehors des régions actives. Les protubérances sont un sujet d'études traditionnel de notre groupe. Ces dernières années, nous avons effectué de la reconstruction stéréoscopique à partir de données STEREO (ACL341, ACL694). Nous avons participé à deux articles de revue majeurs, l'un sur les paramètres physiques déduits de l'analyse spectroscopique (ACL476), l'autre sur la modélisation MHD (ACL494). En utilisant l'analyse spectroscopique à partir des données de SOHO/SUMER, Hinode/EIS, et du DPSM de la Tour solaire de Meudon, nous recherchons aussi les paramètres physiques de la cavité entourant la protubérance, où le plasma est plus ténu. Pour les protubérances elles-mêmes, nous effectuons une modélisation filamentaire ("multi-thread") du transfert de rayonnement hors-ETL dans les raies de Lyman et de Balmer de l'hydrogène, qui rend bien compte des observations et permet d'appréhender la température dans ces structures (ACL042, ACL451, ACL946). Les champs de vitesse ont aussi pu être déterminés dans une protubérance (ACL554). Nous avons par ailleurs observé que le champ magnétique s'affaiblit avant l'envol d'un filament (ACL1036). Les extrapolations linéaires du champ photosphérique donnent une bonne idée de la structure horizontale soutenant les filaments (ACL924) et le caractère magnétique, et non thermique, des bulles sous les filaments, sujet nourri actuellement des observations à haute résolution temporelle de HINODE/SOT et SDO/AIA mais très controversé (ACL129, ACL223).

Instrumentation

En instrumentation, nous travaillons sur la qualité des observations de la surface solaire, et sur l'effet des turbulences de l'atmosphère terrestre. Nous avons parmi nous un spécialiste de la théorie de la propagation de front d'onde à travers une atmosphère turbulente, et de la restauration d'images (ACL508). Récemment, en appliquant la technique de l'intégration d'un nombre arbitraire de fonctions hypergéométriques par la transformée de Mellin, nous avons obtenu une expression générale de fonctions de corrélation spatiale de quantités reliées aux fluctuations de phase de l'onde se propageant (ACL265). Cet article a été l'un des 10 meilleurs téléchargés de la revue JOSA lors de sa parution en août 2011. Molodij & Aulanier (ACL071) ont étudié la qualité d'image en fonction de la taille de champ, que l'on peut attendre d'un télescope de 4m. Ils ont montré que dans le visible, la haute qualité d'image ne pourra être assurée que sur un petit champ.

La spectro-imagerie par double passage soustractif est aussi une tradition de notre équipe. Actuellement nous construisons un prototype d'instrumentation à base de miroirs "slicer" (à tranches) que nous proposons pour le futur télescope solaire européen EST (ACT263) ainsi qu'à d'autres

instruments en projet (avec la Pologne notamment). Ce prototype sera testé à la Tour solaire de Meudon.

E4.2 Phénomènes éruptifs et accélération de particules

Cette thématique est dédiée à la compréhension des conditions de déclenchement des phénomènes éruptifs solaires (éruptions et éjections de masse coronale) ainsi qu'aux mécanismes de transformation d'énergie associés permettant d'expliquer l'éjection de quantités importantes de matière solaire et l'accélération efficace de particules énergétiques. Nous abordons ces questions via l'analyse de données provenant de multiples instruments au sol et satellitaires, couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique et via la confrontation de ces observations à des modèles théoriques et numériques que nous avons développés (modèles magnétohydrodynamiques de reconstruction et de simulation de l'évolution du champ magnétique et du plasma solaire).

Les travaux concernent:

- l'étude des propriétés de la reconnexion magnétique (mécanisme à l'origine de la plupart des phénomènes éruptifs solaires) et des instabilités MHD menant au déclenchement des éruptions et éjections de masse coronales (CMEs).
- l'étude des particules accélérées lors des éruptions solaires et en interaction avec l'atmosphère solaire (diagnostics X/gamma, radio métrique à submillimétrique) et des mécanismes d'accélération de ces particules.

Reconnexion magnétique & éruptions solaires (flares)

Notre expertise dans l'analyse et la simulation numérique magnétohydrodynamique (MHD) tridimensionnelle (3D) de la reconnexion magnétique nous a permis de mettre en évidence quelles structures 3D du champ magnétique, les quasi-séparatrices, induisaient préférentiellement des phénomènes éruptifs (*ACL1133*, *ACT1200*, *ACL1260*, *ACL153*). Nous avons révélé l'existence d'un mode particulier de la reconnexion magnétique en présence de quasi-séparatrices, la reconnexion magnétique glissante, observée au niveau de régions actives solaires (*ACL1082*, *ACL600*). Nos simulations numériques ont montré que la reconnexion glissante se développait lors d'événements variés, e.g. éruptions (*ACL767*), jets coronaux (*ACL842*), éjections de masse coronales (*ACL344*), et pouvait avoir des conséquences importantes pour l'injection des particules énergétiques dans l'héliosphère (*ACL064*).

Nous nous sommes intéressés à la physique de l'accumulation de l'énergie magnétique dans les régions actives (*ACL942*). Des observations obtenues avec les instruments de pointe de physique solaire (SoHO, TRACE, RHESSI, STEREO, Hinode, SDO) nous ont permis de localiser cette accumulation d'énergie dans les régions actives solaires (*ACL831*) et d'analyser l'évolution du flux et de la distribution des émissions électromagnétiques lors des éruptions solaires (*ACL1156*, *ACL638*, *ACL298*, *ACL043*). Afin d'expliquer l'évolution dynamique des embrillancements Ultraviolet, nous avons développé avec le code OHM (G. Aulanier) la première simulation numérique « data-driven » d'une éruption solaire (*ACL766*). Nous avons aussi utilisé le code MHD massivement parallèle en maillage adaptatif ARMS pour étudier le rôle de la reconnexion magnétique pour la génération des jets solaires (*ACL801*, *ACL528*, *ACL538*, thèse en cours de Kevin Dalmasse) permettant d'expliquer la structure hélicoïdale de ces structures, observée pour la première fois en stéréoscopie avec STEREO (Patsourakos et al. 2008).

Instabilités MHD & éjections de masse coronale (CMEs)

Un autre domaine important de notre activité concerne l'étude des phénomènes les plus géo-effectifs de l'activité solaire, les éjections de masse coronales, à partir de multiples instruments et dans différentes longueurs d'onde (*ACL1131*, *ACL1280*, *ACL1059*, *ACL210*, *ACL297*). A partir des observations du NRH, nous avons en particulier identifié la formation d'une corde de flux lors du développement d'un CME, déterminé son orientation et montré l'accord de ces résultats avec le modèle 3D développé à partir d'observations effectuées par STEREO à larges distances (*ACL210*). Nous nous sommes intéressés aux structures donnant lieu aux CMEs : les régions sigmoïdes (*ACL089*) et les filaments solaires. Nous avons analysé la dynamique de ces filaments solaires et observé comment ces structures pouvaient fusionner ou se séparer (*ACL622*, *ACL153*). Nous avons développé

la première simulation numérique MHD 3D permettant d'expliquer ces fusions/séparations via le mécanisme de reconnexion magnétique (ACL318).

Une autre série de nos simulations numériques MHD, obtenue avec le code OHM, a été dédiée à la génération des CMEs. Ces simulations nous ont permis d'analyser séparément le rôle des instabilités et celui de la reconnexion magnétique dans le déclenchement de l'éruption (ACL344). Cette simulation a servi de base pour étudier les propriétés observées d'une région active source d'une CME (ACL089), d'analyser le cisaillement des boucles coronales pré et post-éruptives (Aulanier et al. 2012, Post-Doc Miho Janvier en cours) ainsi que d'interpréter les embrillancements associés aux CMEs, tels que les « ondes » EIT (ACL298). Nous avons approfondi les mécanismes potentiels expliquant ces « ondes », qu'elles soit liées à des reconnections induites par la CME (ACL1080) ou induites par compression de la nappe de courant entourant la CME en expansion (ACL914). Ces modèles permettent aussi d'interpréter la diminution observée de l'émission UV dans des zones du disque solaire lors du départ d'une CME (ACL1205, ACL871).

Nous avons finalement produit des travaux analytiques importants revisitant et unifiant des modèles de déclenchement des CME (ACL419) en mettant en avant des critères précis d'instabilité mis en évidence dans une observation d'éruption (ACL452). Ces travaux ont permis d'avoir un nouveau regard sur les modèles de CME.

Accélération de particules dans les éruptions solaires (diagnostics X/gamma, Radio métriques à submillimétriques)

Notre expertise porte sur la caractérisation des propriétés des particules (électrons et ions) accélérées dans les éruptions solaires, particules qui portent une fraction significative de l'énergie libérée lors de l'éruption. L'étude des rayonnements montre les conditions dans lesquelles l'accélération des particules a lieu. Notre approche consiste

- à identifier les sites d'accélération des particules dans la couronne par des observations en rayons X, gamma et ondes radio ;
- à étudier l'évolution temporelle des signatures et en déduire les relations physiques entre elles et avec l'activité coronale, notamment les éruptions et éjections de masse ;
- à tracer les chemins de propagation des particules dans la couronne et vers l'espace interplanétaire ;
- à modéliser les émissions électromagnétiques afin de déduire des informations quantitatives sur les particules émettrices (budget d'énergie, rôle dans le transport d'énergie dans l'atmosphère éruptive).

Notre recherche dans cette thématique s'appuie principalement sur des observations multi-instruments : observations radio du Radiohéliographe de Nançay (voir ACL1022 pour une revue de l'apport des observations radio), observations de spectro-imagerie X/gamma (3-10000 keV) avec RHESSI, et exploitation des observations d'éruptions dans le domaine assez récent du submillimétrique (SST Brésil, KOSMA Suisse). Les observations des signatures de particules non thermiques sont complétées par l'utilisation de l'imagerie du plasma coronal et chromosphérique (SoHO, TRACE, STEREO, Hinode, SDO) (voir ACL100, pour une revue sur les éruptions solaires et les particules énergétiques associées).

Un travail important a été réalisé dans le cadre de la publication d'une monographie sur la physique solaire à haute énergie (High Energy Aspects of Solar Flares). Un des chapitres présente une revue des propriétés des ions énergétiques déduites des observations gamma et de mesures de neutrons solaires (ACL324), propriétés qui permettent de contraindre les mécanismes d'accélération. Nous avons aussi contribué de façon importante à la rédaction de deux autres chapitres dans cette même monographie : un sur l'ensemble des progrès dans la compréhension des processus d'accélération des particules dans l'atmosphère solaire (ACL333), l'autre sur l'apport des observations combinées X et radio à la compréhension des processus d'accélération et de transport des électrons dans l'atmosphère solaire (ACL329).

Nous avons développé un modèle d'accélération de particules basé sur l'hypothèse d'une accélération dans des couches de courant résultant de simulations de régions actives issues de l'évolution de systèmes "auto-organisés" (automates cellulaires) (ACL1115). Les spectres des électrons et ions énergétiques et des rayonnements X et gamma associés ont été calculés. Plusieurs

propriétés déduites des rayonnements observés peuvent être reproduites : contenus énergétiques en ions et électrons, rapport des raies gamma. Les spectres X obtenus sont cependant en moyenne trop plats par rapport aux observations. Nous avons aussi étudié le transport des électrons et des ions énergétiques dans des arches coronales, phénomène qui peut entraîner des décalages temporels entre les maxima des émissions X et des émissions de raies gamma. De tels retards ont été observés pour la première éruption gamma détectée par RHESSI (23 Juillet 2002). Nous avons interprété ces retards en terme de transport des particules et en avons déduit des paramètres des sources d'émission compatibles avec les observations d'imagerie faites avec RHESSI (ACL1116).

Nous avons par ailleurs obtenu des résultats sur les caractéristiques des régions d'accélération des électrons dans la couronne solaire (altitude et taille) en combinant les observations X et radio (sursauts de type III) aux résultats de modélisations analytiques et numériques permettant ainsi de relier les fréquences de démarrage des sursauts radio aux propriétés des électrons énergétiques (ACL290). La poursuite de ce travail sur un plus grand nombre d'événements est un des sujets d'étude mené dans le cadre du programme FP7 HESPE (post-doc Hamish Reid). Par ailleurs, la comparaison des positions des sources X et radio de sursauts à haute fréquence (300-500 MHz) traceurs de certains sites d'accélération des électrons, nous a permis de conclure que cette accélération semble se produire dans une couche de courant située au-dessus des arches coronales visibles en rayons X (Benz et al., 2011). Nous avons également tracé les structures coronales (NRH) puis interplanétaires (imageurs STEREO) associées à la propagation des faisceaux d'électrons. Ces structures sont détectées dans des régions de vent lent (ACL807).

L'autre volet de notre activité concerne les observations d'éruptions solaires dans le domaine submillimétrique (ACL1054 ; ACL725 ; ACL691 ; ACL317). Ce domaine ouvert depuis une dizaine d'années aux observations offre une nouvelle voie d'investigation pour la caractérisation des particules accélérées dans les éruptions. La combinaison d'observations radio à 210 GHz du Multi Beam Radiometer de Berne (BEMRAK), avec des images en rayons X durs et γ de RHESSI et des mesures >10 MeV avec SONG/ CORONAS-F pour une éruption de classe X (ACL1054), a révélé une co-spatialité entre le site d'émission submillimétrique et le site d'émission gamma (traceur de l'impact des ions énergétiques). Ces sources sont non co-spatiales avec les sources en X durs provenant du rayonnement de freinage des électrons relativistes. Ceci suggère qu'une fraction de l'émission radio pourrait être due à un rayonnement synchrotron de positrons créés par la désintégration de pions secondaires dans des réactions nucléaires induites par l'impact d'ions très énergétiques de plus de 200 MeV/nucléon (ACL1054). L'origine du rayonnement submillimétrique dans les phases impulsives des éruptions reste cependant à l'heure actuelle un sujet de débat. La présence d'une deuxième composante dans le spectre radio à haute fréquence semble néanmoins pouvoir être interprétée dans plusieurs cas par le rayonnement synchrotron d'électrons relativistes dans des régions compactes à fort champ magnétique (ACL691, ACL725). L'observation de la forme du spectre dans le domaine du THz (IR lointain) est nécessaire pour contraindre la part relative des électrons et des ions accélérés à de très hautes énergies dans la couronne. Des émissions submillimétriques (au dessus de 200 GHz) sont également observées dans les phases graduelles des éruptions (ACL317). Une étude récente montre que le plasma émetteur est constitué de plusieurs composantes portées à différentes températures : sources émissives optiquement mince à des températures comprises entre 1 - 16 MK et source radio chromosphérique, optiquement épaisse, dont la température est de l'ordre de 10^4 K.

E4.3 Perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace

Recherches en relations Soleil-Terre

Le pôle solaire a abordé deux grands groupes de sujets liés aux conséquences interplanétaires de l'activité solaire, par l'observation, l'interprétation théorique et la simulation numérique.

Evolution des éjections de masse dans l'espace interplanétaire

Nous étudions la liaison entre les observations coronales d'éruptions et les observations in situ de perturbations héliosphériques, entre 0,3 UA (Helios), le voisinage de la Terre (Wind, ACE) et 5 UA (Ulysses). Nous avons notamment pu tester les modèles d'expansion des structures et établir que

l'hélicité magnétique peut être utilisée comme paramètre quantifiant le taux d'érosion d'un tube de flux magnétique par reconnexion avec le champ magnétique interplanétaire (ACL871 ; ACL925, ACL926, ACL674 ACL449, ACL271, ACL1010). Nous avons également pu relier des configurations interplanétaires plus complexes à la structure détaillée de la région active mère (ACL385) ou à l'interaction entre deux nuages (ACL651) et proposé des tests observationnels pour d'autres géométries non-standard (ACL674; ACL304).

Relation entre processus dynamiques dans la couronne (éruptions, éjections de masse) et les particules de haute énergie détectées dans l'espace interplanétaire

Nous avons mené des études observationnelles (GOES, SoHO, STEREO, ACE, RH Nançay, spectrographes) sur l'origine solaire des particules de haute énergie dans l'espace interplanétaire, montrant une relation étroite avec les processus de reconfiguration magnétique dans la couronne (ACL1203; ACL767), établissant des signatures du confinement des particules accélérées au Soleil vs leur échappement dans l'espace (ACL473, ACL221). Nous avons montré que les particules atteignant la Terre se propagent le long de structures magnétiques complexes qui dévient de modèles classiques simples (ACL967; ACL807; ACL472) et sont souvent – en particulier lors d'événements importants – transitoires, dues à des éjections de masse précédentes (ACL065).

Diffusion des données

Radio Monitoring : nous avons développé un site web pour la visualisation et l'accès aux données d'instruments radio variés, incluant les spectrographes embarqués sur Wind et STEREO (PI LESIA/PPP) et les instruments solaires au sol à Nançay et Athènes. Ce site indique également la production des CMEs et est officiellement inclus dans le groupe de météorologie de l'espace qui s'est constitué autour des missions STEREO (<http://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/spaceweather.shtml>) et SOHO. Nous participons aux différentes alertes.

NMDB : nous avons participé activement au développement et à l'élargissement d'une base européenne, puis mondiale, de moniteurs à neutrons dans le cadre du projet Européen (FP7) NMDB. Nous avons développé l'interface graphique et coordonné les activités de diffusion des connaissances.

Contributions à la météorologie de l'espace

- En étroite relation avec notre recherche, nous avons mené diverses activités appliquées :
 - * Nos moniteurs à neutrons contribuent aux systèmes d'alertes en cas d'évènement à protons majeur. Leurs données servent également à la surveillance des doses de radiation des personnels de l'aviation civile (notamment en cas d'évènement à particules) dans le cadre de notre collaboration avec l'IRSN; discussions avec les utilisateurs (Air France).
- Début d'une collaboration avec l'Armée de l'Air, dans le cadre de leur projet de démonstrateur FEDOME : en coopération avec l'USN, nous fournirons des données en temps réel des instruments de Nançay (spectrographie, imagerie) et contribuons à la formation du personnel (intervenants LESIA/PPS et un collègue IRAP/Toulouse ; 10 jours en 2010). L'armée de l'air a contribué au financement du nouveau spectrographe ORFEES.
- Contacts avec des utilisateurs potentiels de données en météorologie d'espace (pôle de compétitivité AsTech, Dassault). Consultations avec la société CLS (Toulouse) autour de la prévision des événements à particules et fourniture mensuelle à CLS de prévisions du cycle solaire.
- Organisation d'une école francophone dans le cadre du programme International Space Weather Initiative (organisation LESIA/PPS, intervenants LESIA/PPS, IRAP/Toulouse, LPP, IAS, ESA/ESTEC)

E5 Pôle de Planétologie

La période 2007-2012 fut une période d'une exceptionnelle richesse dans l'exploration du Système solaire par des missions spatiales. La mission Cassini-Huygens, arrivée en 2004, a poursuivi sa moisson de résultats dans le système de Saturne, de même que les missions Mars Express autour de Mars, et Venus Express autour de Vénus. A bord de ces sondes, le LESIA est impliqué avec plusieurs CoI dans les instruments GCMS, DISR, CIRS et VIMS (Cassini-Huygens), OMEGA et PFS (Mars Express) et détient le PIship de l'instrument VIRTIS-H à bord de Venus Express. Les chercheurs du LESIA ont ainsi obtenu des résultats fondamentaux sur les atmosphères de Vénus, Mars, Saturne et Titan, et les surfaces de Vénus et Titan.

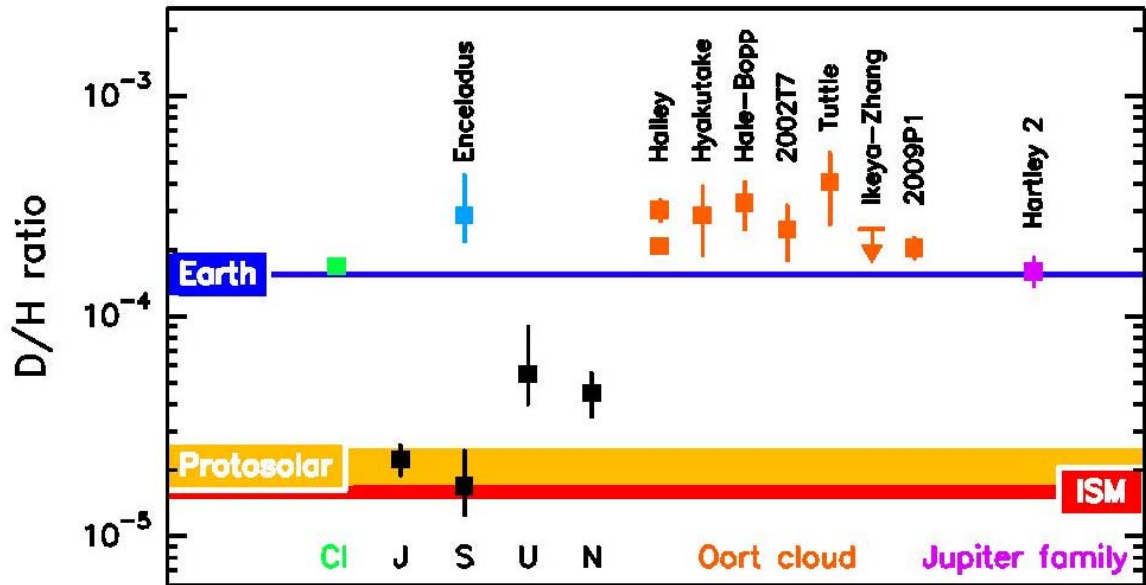
La période 2007-2012 a également vu les premiers résultats de la sonde Rosetta suite aux survols de deux astéroïdes, Steins et Lutetia. Nos équipes sont impliquées dans plusieurs instruments, VIRTIS, MIRO et OSIRIS. L'observatoire spatial Herschel a débuté sa fructueuse mission d'exploration de l'Univers millimétrique et submillimétrique en 2009. Les chercheurs du LESIA sont coresponsables de deux programmes-clés sur le temps garanti consacrés à l'étude des objets trans-neptuniens et de l'eau dans les atmosphères planétaires et cométaires, et responsables ou impliqués dans de nombreux projets obtenus sur le temps ouvert.

En symbiose avec ces missions spatiales, les chercheurs du pôle planétologie du LESIA ont obtenu de nombreux programmes d'observation, dont des *large program*, sur une large gamme de télescopes au sol, depuis le domaine visible au millimétrique, sur de grands et petits télescopes. Le pôle planétologie a également développé une expertise unique sur les applications de l'interférométrie millimétrique à la planétologie. Ces programmes sont essentiels pour appréhender la population des petits corps dans leur ensemble, et pour obtenir des premières détections sur les surfaces ou atmosphères planétaires grâce à la sensibilité unique des grands télescopes au sol.

E5.1 Les comètes

Les années 2007-2012 ont été marquées par l'explosion de la comète 17P/Holmes, le passage près du Soleil de plusieurs comètes brillantes, dont la comète 103P/Hartley 2 survolée par la mission Discovery EPOXI. Les chercheurs du LESIA ont réalisé des campagnes d'observation dans les domaines radio et infrarouge (utilisant jusqu'à 10 télescopes) dans le but de caractériser les propriétés des glaces cométaires, des poussières et du noyau. Ces travaux ont bénéficié de la mise en service du satellite Herschel (observations dans le cadre de 4 programmes sur temps garanti ou ouvert). En parallèle, le LESIA a préparé activement la mission ESA Rosetta, en développant des modèles environnementaux du noyau de 67P/Churyumov-Gerasimenko en support à l'atterrissage de Philae, l'atterrisseur de Rosetta, et des codes de transfert radiatif pour l'analyse des données MIRO (post-doctorant V. Zakharov).

Le sursaut d'activité exceptionnel de la comète Holmes a permis la mesure d'un fort enrichissement en ^{15}N dans HCN par rapport à la valeur terrestre, qui est du même ordre de grandeur que les enrichissements les plus élevés mesurés dans certaines phases de météorites primitives. Herschel a permis la première mesure du rapport D/H dans l'eau d'une comète à courte période de la famille de Jupiter, 103P/Hartley 2. La découverte d'une valeur égale à celle des océans terrestres, et deux fois plus faible que celle mesurée dans les comètes du nuage de Oort, a des implications importantes sur la physico-chimie et la dynamique du Système solaire primitif (Fig. Planet.1) et indique que les comètes ont peut-être contribué à l'eau des océans terrestres. Le rapport D/H mesuré avec Herschel dans la comète du nuage de Oort C/2009 P1 (Garradd) confirme la diversité isotopique des deux populations. Des mesures des rapports $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ et $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ ont été également acquises.



Planet.1 Le rapport D/H dans les objets du Système solaire, après les dernières mesures d'Herschel (ACL2012 et Bockelee-Morvan et al. A&A 544, L15 ; 2012)

L'observation en ondes millimétriques des comètes permet de mesurer l'abondance d'une dizaine de molécules provenant du noyau. Les observations du radical OH que nous réalisons avec le radiotélescope de Nançay (programme-clé du NRT) assurent le suivi temporel de la production en eau des comètes. Les investigations avec les satellites Odin et Herschel ont permis de contraindre l'excitation de l'eau par collisions électroniques et de mesurer l'abondance de NH_3 , le principal porteur de l'azote dans les glaces cométaires. L'étude statistique des mesures d'abondance acquises sur les comètes du nuage de Oort et de la ceinture de Kuiper montre une grande diversité chimique dans les deux populations. En mesurant en revanche des compositions identiques dans deux des fragments de la comète 73P/Schwassmann-Wachmann 3, les chercheurs du LESIA ont pu démontrer que cette diversité est originelle et non reliée à une différenciation des couches superficielles. Si la majorité des molécules observées sont libérées par le noyau, certaines peuvent être produites par la dégradation de grains organiques. L'origine de plusieurs molécules a été étudiée par interférométrie millimétrique (THS040). Une étude des cartes CO de Hale-Bopp et une réévaluation des effets d'opacité des raies infrarouge ont infirmé une production distribuée suggérée par les observations infrarouge. Par contre, l'augmentation de l'abondance de HNC, CS et H_2CO lorsque les comètes s'approchent du Soleil suggère des mécanismes alternatifs de production.

Les activités se sont diversifiées vers l'étude du rayonnement thermique des poussières et du noyau. Les observations de la comète Holmes ont permis de mesurer la masse du noyau qui s'est fragmentée, la distribution en taille et la cinématique des débris, et d'étudier comment les gaz ont été libérés par les débris. Les propriétés des poussières de la comète distante C/2006 W3 (Christensen) ont été investiguées par l'utilisation conjointe des données Herschel SPIRE et PACS. A partir d'observations Spitzer à 5-12 μm , les poussières et les grains de glaces de la comète 9P/Tempel 1 libérées par la sonde Deep Impact ont été caractérisées, notamment leur contribution au nuage de vapeur d'eau (THS004). Les observations de la comète 8P/Tuttle furent l'occasion de la première détection d'un noyau cométaire en interférométrie millimétrique; les données, combinées avec les mesures acquises

par Spitzer et le HST, montre que le noyau présente une inertie thermique très faible, en accord avec une forte porosité du matériau.

E5.2 Les Centaures et les Objets Trans-Neptuniens (OTNs).

L'étude des corps présents au delà de la limite des glaces dans le Système solaire (OTNs, Centaures et planètes naines) s'est principalement articulée à partir d'observations **VLT-ESO** (dont un *Large Program* de 500 heures), **Herschel** (dont le programme-clé *TNOs are cools*), et des campagnes d'occultation. Les études menées ont permis d'obtenir de nouvelles contraintes sur les propriétés physico-chimiques de leur surface, à la fois sur l'ensemble de ces populations, mais également d'obtenir des détails sans précédents sur la taille, la surface et l'atmosphère de plusieurs objets, connus pour être parmi les plus primitifs du Système solaire.

L'utilisation de méthodes et d'outils d'analyse évolués (méthode de réduction de données optimisée, calculs statistiques, modèles de transfert radiatif, modélisation thermique, obtention de spectres de glace en laboratoire et extraction de constantes optiques) ont permis de dresser un premier bilan statistique sur pas moins de 75 objets. Ces études ont porté sur l'élaboration de corrélations possibles entre les propriétés dynamiques, physiques et chimiques. Ces observations confirment la grande diversité des objets au sein de mêmes populations dynamiques et aussi parfois taxonomiques et que la couleur d'un objet n'est pas en soi un traceur de la glace d'eau en surface mais pourrait l'être concernant des éléments comme le méthanol ou le méthane. Nos observations ont montré que les Centaures observés à plusieurs reprises possèdent des hétérogénéités compositionnelles. Les données thermiques ont quant à elles permis de contraindre la taille et l'albédo d'une cinquantaine d'objets. Une corrélation entre les plus gros objets et les objets les plus brillants a d'ailleurs pu être confirmée à cette occasion pour la plupart des classes dynamiques. Il semblerait cependant que la distribution en albédo varie d'une classe dynamique à une autre avec une relation entre l'albédo et la distance héliocentrique. Les analyses suggèrent des surfaces à faible conductivité thermique et à grande porosité, à moins que la rugosité de surface soit très importante et biaise partiellement ces résultats.

Pour contraindre la statistique de la population des OTNs vers les faibles tailles, l'instrument à fibres Myosotis, développé dans le cadre d'une collaboration avec *National Tsing Hua University* à Taïwan et grâce à l'ANR *Beyond Neptune* est maintenant opérationnel à l'OHP et est entré en phase d'exploitation. Nous utilisons également le satellite COROT qui a révélé 15 possibles signatures de petits OTNs. Tous ces travaux apportent *in fine* des contraintes sur l'origine et l'évolution de la partie externe de notre Système solaire.

Au-delà de cette vision globale, nous avons pu approfondir nos investigations sur les plus gros objets dont des planètes naines. Grâce au développement de caméra rapide et à une douzaine de campagnes d'occultation par an, nous avons pour la première fois, déterminé la taille et la forme de 5 OTNs (Varuna, Eris, 2003 AZ84, Makemake et Quaoar) et obtenu des limites de quelques nanobar sur leur possible atmosphère. Nous avons montré en particulier qu'Eris est l'un des objets les plus brillants du Système solaire, probablement à cause d'une atmosphère épisodique actuellement gelée sur sa surface. L'utilisation de l'optique adaptative et les occultations ont permis de découpler les composantes de ces systèmes multiples, en particulier de préciser la taille et l'orbite de Charon à 10 km près. De plus, nous avons quantifié les glaces en surface, caractérisé leur état physique (dilution, température, état cristallographique, irradiation), et parfois observé leur évolution de au cours du temps. Parmi les découvertes majeures, nous pouvons noter la présence de glace d'eau sous forme cristalline sur la plupart des objets de la famille d'Hauméa, la confirmation ou la découverte d'organiques sur plusieurs objets avec des contraintes fortes sur les mécanismes de formation et d'évolution des objets du Système solaire dénués (ou presque dans le cas de Pluton) d'atmosphère. Enfin, grâce à l'utilisation de l'optique adaptative et de l'instrument NACO, nous avons également pu contraindre les caractéristiques orbitales de systèmes multiples. En ajoutant plusieurs points et cordes, nous avons effectivement affiné les paramètres orbitaux ainsi que définir ou contraindre les masses et les densités de ces corps.

Nous avons utilisé l'instrument CRIRES sur le VLT pour étudier la composition des atmosphères de Pluton et Triton, et en déduire des informations sur les interactions entre la surface glacée et l'atmosphère. Si l'on excepte les observations difficiles du méthane sur Pluton avec CSHELL/IRTF (Young et al. 1997), c'est la première fois que ces atmosphères ténues et distantes ont été observées

dans l'infrarouge. Nos observations ont permis de mesurer séparément l'abondance de CH₄ (0,5 % de l'azote), sa température moyenne (~ 90K), et d'obtenir une détection probable de CO dans l'atmosphère de Pluton (ACL230). En combinant ces observations avec l'analyse d'occultations stellaires, nous avons pu contraindre la structure thermique de la basse atmosphère de Pluton, et en particulier placer une limite supérieure (24 μm) à sa pression au sol (ACL752). Le suivi de l'évolution de l'atmosphère de Pluton par occultations montre que cette pression est maintenant stable après une forte expansion en 1990-2000. Sur Triton nous avons obtenu (i) la première mesure du méthane dans cette atmosphère depuis sa découverte par Voyager en 1989, et la mise en évidence d'une abondance accrue depuis cette époque (ii) la première détection du monoxyde de carbone (CO) gazeux (ACL488).

Toutes ces mesures contraignent fortement la manière dont les interactions surface/atmosphère déterminent les abondances des composés mineurs dans l'atmosphère. Nous avons pu ainsi montrer que la présence de CO dans ces atmosphères résulte de l'existence d'une fine couche de surface enrichie dans ce composé, alors que la forte abondance du méthane provient probablement de l'existence de zones géographiques constituées de glace de méthane quasi-pure. L'ensemble de ces études est d'importance en vue de l'arrivée prochaine (2015) de la sonde New Horizons sur Pluton.

E5.3 Astéroïdes

Durant la période 2007-2012 ont eu lieu les survols des deux cibles secondaires de la mission Rosetta, 2867 Steins et 21 Lutetia.

Steins est un objet primitif de type E peu courant et de taille modeste (4,5 km). Les instruments OSIRIS, MIRO et VIRTIS ont permis de caractériser ses propriétés de surface (forme, paramètres de rotation, albédo, composition de surface et propriétés thermiques) et sa structure interne. Les images OSIRIS montrent un cratère de 2,3 km de diamètre près du pôle sud, suffisamment gros pour détruire un objet monolithique de cette taille, ainsi qu'un bourrelet équatorial suggérant que la rotation a été beaucoup plus rapide par le passé, et une forme façonnée par effet YORP. Ceci indique une structure de type *rubble-pile*, c'est-à-dire une accumulation de débris collisionnels de petite taille. La surface apparaît très jeune, entre 150 et 400 millions d'années, ce qui suggère que Steins a été totalement resurfacé par l'impact qui a produit le gros cratère du pôle Sud (ACL471). L'albédo très élevé (0,40) est cohérent avec les astéroïdes de type E. OSIRIS montre une absorption à 0,49 μm attribuée aux sulfites, alors que VIRTIS n'identifie aucune signature en infrarouge ; ceci implique notamment une très faible abondance en fer, et est cohérent avec une composition dominée par des pyroxènes magnésiens (enstatite). Bien que la fraction observée de la surface soit très réduite, les variations de température indiquent une inertie thermique de l'ordre de 200 SI en surface (VIRTIS) et 400-800 en sub-surface (MIRO), des valeurs plus élevées que la Lune, mais en accord avec celles des NEO de taille kilométrique et indiquant des roches cohérentes (ACL232, ACL450).

Lutetia, la seconde cible, est pratiquement à l'opposé : c'est un astéroïde de grande taille (~110 km de diamètre) et de densité très élevée (3,4). Néanmoins, les spectres Rosetta suggèrent un matériau également primitif. Si l'âge moyen de la surface est élevé (3,6 milliards d'années), certaines régions jeunes et très lisses indiquent des événements géologiques récents (ACL301) : impacts localisés, glissements de terrains, activité sismique... MIRO et VIRTIS ont montré que la surface est couverte d'un épais régolite (ACL450, ACL161). Lutetia est étonnamment neutre et homogène du point de vue spectral. VIRTIS révèle en particulier que la surface est entièrement déshydratée, pauvre en fer et en matériaux organiques. Cette composition est difficile à concilier avec la forte densité mesurée par la sonde, et la nature de Lutetia reste mystérieuse (ACL006). Lutetia est probablement un vestige des planétésimaux qui ont formé les planètes du Système solaire il y a 4,5 milliards d'années.

E5.4 Saturne et Titan

Grâce au spectromètre CIRS embarqué à bord de la mission **Cassini-Huygens**, nous avons découvert une oscillation équatoriale à l'équateur de Saturne (ACL937). Celle-ci se présente sous la forme de deux courants-jets superposés et de sens opposés. En suivant son évolution sur la période 2006-2010, nous avons mis en évidence que cette oscillation se propage verticalement vers le bas et que sa période est d'environ 15 ans (ACL196). Cette structure kronienne est analogue à l'oscillation quasi-biennale terrestre ou quasi-quadiennale jovienne. Elle résulte de l'interaction entre des ondes

atmosphériques non-résolues et le vent zonal moyen, la dissipation des ondes entraînant l'accélération du vent zonal. Cette oscillation est un très bel exemple de planétologie comparée. CIRS a de plus permis de mesurer les champs d'abondance de cinq constituants chimiques dans la stratosphère de Saturne. Ces mesures ont mis en évidence de la signature d'une circulation atmosphérique de grande ampleur de l'hémisphère d'été vers l'hémisphère d'hiver (*ACL447, ACL698*).

Les observations de Saturne avec l'instrument Herschel/HIFI dans différentes raies submillimétriques de l'eau ont révélé, outre l'émission attendue de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de Saturne, de fortes absorptions. Celles-ci sont dues à l'absorption, le long de la ligne de visée, par l'eau du tore d'Encelade, un "nuage" de matière en orbite autour de Saturne et peuplé par les panaches produits par l'activité cryovolcanique du satellite. Cette observation inattendue a permis de caractériser le tore d'Encelade en termes de cinématique et d'abondance en H₂O (*ACL201*). En combinant ces mesures avec un modèle d'évolution des molécules d'eau émises par Encelade, nous avons pu estimer ce taux d'émission et montrer qu'Encelade est une source très importante d'eau pour l'atmosphère de Saturne.

Titan, le plus gros satellite de Saturne possède une atmosphère dense qui présente une chimie extrêmement riche et une dynamique marquée variant avec les saisons. Des mers, des lacs et des réseaux fluviaux sont observés à la surface. La richesse des phénomènes observés sur Titan en fait un objet particulièrement intéressant pour la planétologie comparée. Le LESIA est très actif dans l'étude de Titan et ses activités, pendant la période 2007 - 2012, ont porté sur les aspects suivants.

1. Les observations du spectromètre **Cassini/CIRS** ont permis de cartographier les abondances d'une douzaine de molécules, à la fois horizontalement (*ACL1107, ACL399, ACL119, ACL1047, ACL834, ACL026*) et verticalement jusqu'à 500 km (*ACL1270, ACL1278, ACL1047, ACL575*). Ces cartes apportent des renseignements sur les couplages entre la chimie et la dynamique dans la moyenne atmosphère de Titan. De plus, les rapports isotopiques D/H, ¹³C/¹²C, ¹⁵N/¹⁴N et ¹⁸O/¹⁶O ont été mesurés dans de nombreuses molécules et renseignent plus finement sur la chimie et son évolution sur le long terme. Des observations Herschel ont permis (i) de détecter HNC (*ACL266*), (ii) de contraindre le flux externe d'oxygène en mesurant la distribution verticale de H₂O. Du fait de la complexité des phénomènes observés dans l'atmosphère de Titan, l'interprétation des observations nécessite la modélisation de la photochimie et de ses couplages avec la dynamique. Le LESIA travaille ainsi en étroite collaboration avec les modélisateurs de la photochimie (*ACL975, ACL976*) et de la circulation générale (e.g. *ACL910*).

2. Les aérosols sont omniprésents dans l'atmosphère de Titan et impactent fortement le bilan radiatif de l'atmosphère. Les observations de CIRS ont permis de contraindre la distribution spatiale ainsi que les indices optiques des aérosols en infrarouge moyen et lointain (*ACL101, ACL576*).

3. Le spectromètre **Cassini/VIMS** a fourni le profil vertical d'extinction des aérosols de 1 à 5 µm, avec notamment une absorption à 3,3 µm due à des composés organiques complexes (*ACL611, ACL220*). Une mesure indépendante et en accord avec les autres instruments a été obtenue de l'abondance du méthane dans l'atmosphère supérieure de Titan par cette voie. Des observations en optique adaptative depuis le sol au VLT ont permis de caractériser les asymétries nord-sud et est-ouest de la brume atmosphérique (*ACL1172*).

4. **Huygens/DISR** a caractérisé l'absorption du méthane et établi le bilan radiatif de l'atmosphère (*ACL1052, ACL1053*). Une nouvelle liste de raies de CH₄ de la région 1,26-1,71 µm a été obtenue dans le cadre de l'ANR CH₄@Titan et a été appliquée à l'analyse des données à basse résolution de Cassini-Huygens et à plus haute résolution des télescopes CFHT et VLT (*ACL020, ACL027*).

5. Enfin, l'albédo de la surface dans la fenêtre à 2 µm a pu être caractérisé à partir d'observations **VLT/NACO** (*ACL1224*) et la géologie et la morphologie de Titan ont été étudiées à partir de données VIMS et RADAR (*ACT093*).

La forte implication du LESIA dans la mission Cassini l'a conduit naturellement à proposer la mission « Tandem/TSSM » soumis dans le cadre de la réponse à l'appel d'offre de missions de classe L de l'ESA en 2008 (*ACL645, ACL487*).

E5.5 Planètes telluriques

Au cours des années 2007-2012, les études sur l'atmosphère martienne ont porté sur l'analyse des données OMEGA et PFS de la mission **Mars Express** et sur l'étude des composés atmosphériques mineurs par spectroscopie infrarouge depuis le sol ou spectroscopie millimétrique hétérodyne. Nous avons ainsi étudié le cycle de l'eau martienne et montré que les études précédentes surestimaient l'abondance de l'eau de 30% environ (ACL1148, ACL1212, ACL771, ACL927, ACL992). L'étude des variations spatiales et saisonnières de H₂O₂ à partir de données sol a permis de mettre en évidence le rôle de la chimie hétérogène dans le cycle de H₂O₂ (ACL927, ACL424, ACL982). Enfin dans le domaine millimétrique, les données Herschel/HIFI ont permis une nouvelle mesure de l'abondance de O₂, qui confirme les mesures in situ de Viking (ACL458, ACL459), et des mesures uniques des vents mésosphériques avec l'IRAM (ACL899 ; ACL780).

La sonde **Venus Express**, en orbite autour de Vénus depuis le 11 avril 2006, a déjà produit de nombreux résultats. Le LESIA est fortement impliqué dans la mission comme PI de la voie haute résolution du spectro-imageur VIRTIS. Parmi les résultats les plus marquants obtenus depuis 2007, on citera (ACL005, ACL025, ACL031, ACL044, ACL056, ACL069, ACL075, ACL092, ACL167, ACL190, ACL235, ACL237, ACL260, ACL261, ACL376, ACL456, etc.):

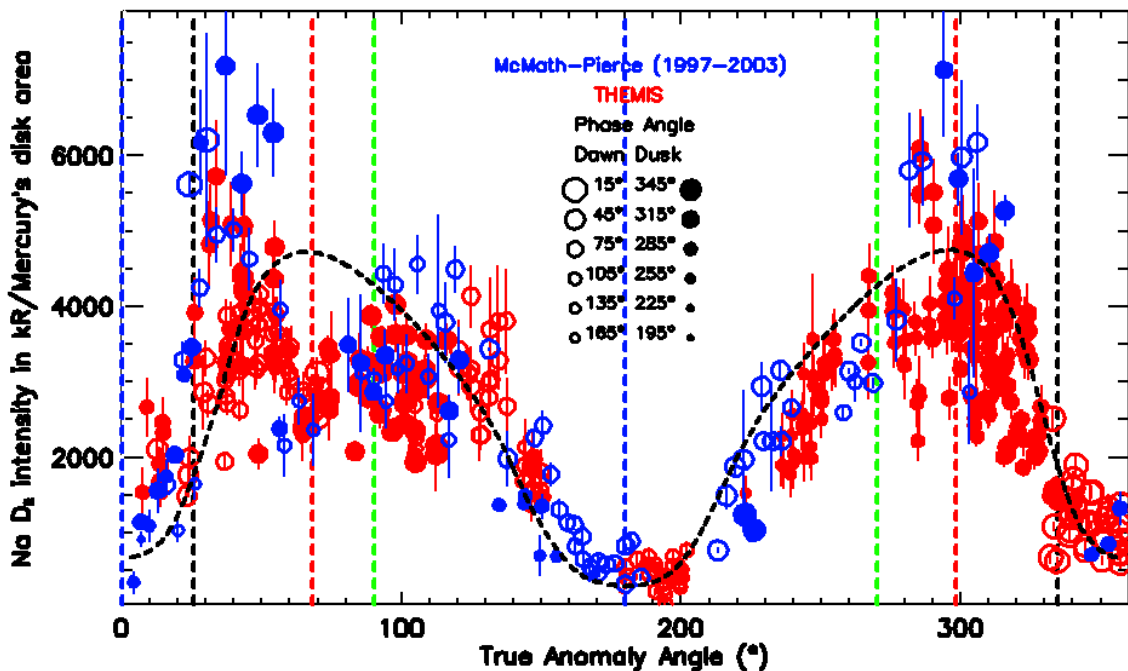
- La distribution horizontale et verticale des émissions de fluorescence, côté nuit, de O₂, OH et NO, et côté jour de CO et CO₂, qui fournit des informations précieuses sur la dynamique de la haute atmosphère de Vénus.
- La mise en évidence d'un allongement de la durée du jour depuis les années 90.
- La cartographie de CO, OCS et H₂O sous les nuages, vers 30-40 km d'altitude, mettant en évidence des variations anti-corrélées en latitude de CO et OCS liées à la circulation générale.
- Un modèle global de la structure nuageuse de Vénus, mettant en évidence des variations en latitude de l'acidité des particules nuageuses, de la taille des particules et de la base du nuage.
- La mesure de l'abondance de H₂O près de la surface et l'absence de variations en latitude.
- La mise en évidence, dans la région de Lada Terra, de variations d'émissivité de la surface à 1 µm, probablement liées à des variations de composition chimique.

Des observations au sol ont complété celles de Venus Express : mesures de vents au sommet des nuages et dans la mésosphère ; cartographie de HDO et SO₂ au sommet des nuages, montrant une forte variabilité horizontale et temporelle de SO₂ sur le disque.

Mercure est l'objet d'une très grande attention de la communauté scientifique européenne depuis la sélection du projet de mission ESA BepiColombo (LESIA, Co-PIship). L'étude de l'exosphère de Mercure permet d'identifier et de comprendre les mécanismes de fuite et de production à l'origine de sa grande variabilité à la fois temporelle et spatiale. De plus, se situant à l'interface entre la surface et la magnétosphère, l'exosphère hermiennne est un élément-clé pour la compréhension de l'origine et de l'évolution de la planète.

Le télescope **THEMIS** aux Canaries a permis d'observer l'exosphère de Mercure de manière intensive et répétée, et de mettre en évidence plusieurs résultats originaux de cette exosphère (ACL417) :

- (i) Mercure connaît des saisons avec une exosphère dont la densité varie d'un facteur 5 au cours d'une année,
- (ii) la grande dynamique de l'exosphère qui peut varier en quelques heures terrestres (quelques minutes de temps solaire sur Mercure) mettant en évidence le rôle du vent solaire,
- (iii) les mouvements et l'énergie de l'exosphère et leur dépendance en fonction de la position orbitale de Mercure qui permet de reconstituer les principaux mécanismes produisant cette exosphère.
- (iv) de découvrir la polarisation de l'exosphère de Mercure.



Mercuré : variations de l'émission de la raie Na(D) en fonction de la position orbitale

D'autre part, des campagnes d'observations sur des télescopes nocturnes (CFHT, NTT), mais de plus grand diamètre, ont permis de compléter cette étude exhaustive de l'exosphère de Sodium, par l'étude de l'exosphère de potassium et la recherche de nouvelles espèces. Ainsi, nous avons mesuré le rapport Na/K et mis en évidence pour la première fois des variations spatiales. Ces dernières suggèrent donc des mécanismes différents de production de Na et K. Nous avons une première détection marginale de l'Aluminium.

E5.6 Exoplanètes

La recherche du groupe exoplanète s'est articulée autour de deux axes principaux. Le premier est la formation planétaire dans les systèmes binaires, thème hautement d'actualité depuis quelques années. Malgré sa petite taille, notre équipe est à la pointe sur cette thématique (depuis 2007: 13 articles référés, 2 articles de revues et une revue symposium IAU). Notre résultat principal est la mise en évidence d'un mécanisme nouveau de couplage entre perturbations gravitationnelles et friction gazeuse, qui fait que l'étape la plus affectée par un compagnon stellaire est celle de l'accrétion de planétésimaux kilométriques; il semble ainsi que la formation in-situ des planètes dans les systèmes γ -Cephei ou HD196885 soit impossible. Le deuxième axe de recherche est celui de la modélisation des disques de débris. Nous avons développé plusieurs outils numériques, la plupart uniques en leur genre, pour l'étude des collisions et de la dynamique dans ces systèmes. Nos résultats ont permis de mieux comprendre le lien entre la poussière observée dans ces disques et l'immense population "cachée" qui les produit et les affecte dynamiquement: roches, planétésimaux, planètes, compagnons stellaires. Là encore, notre équipe a une position de leader sur cette thématique.

1.b ANALYSE DES MOYENS

Le nombre d'ITA permanents au laboratoire est en diminution depuis dix années, et les projets ont donc souvent recours à des CDD ou des prestataires extérieurs pour renforcer les équipes. L'embauche même de ces CDD et leur encadrement nécessite des compétences nouvelles qu'il faut acquérir. Une autre solution, déjà utilisée, consiste en des collaborations entre laboratoires du campus et au-delà, afin de trouver les compétences spécifiques qui manquent à l'occasion pour un projet particulier.

1.b.1 Pôle Informatique

Le pôle Informatique du laboratoire aussi appelé LEOPARD (ou LESIA Data Processing Center en anagramme) réunit l'ensemble des informaticiens du laboratoire répartis en trois groupes selon leur métier : analyse et diffusion des données, informatique instrumentale et administration système et réseau.

Ce dernier groupe, correspondant aux fonctions supports en informatique, constitue le GIL (groupe informatique du LESIA) qui gère les moyens informatiques au laboratoire et auquel est associée une adresse d'assistance.

Les objectifs du LEOPARD sont d'optimiser la circulation de l'information et des connaissances entre les informaticiens ainsi que l'affectation des informaticiens aux besoins du laboratoire. L'enjeu de cette démarche est de mutualiser les compétences tout en conservant l'efficacité de l'organisation en mode projet.

Les moyens mis en œuvre pour réaliser ces objectifs ont consisté à :

- favoriser la mobilité à l'intérieur du LEOPARD : par exemple, Emmanuel Grolleau, responsable de l'intégration et de tests du segment sol CoRoT a pris la responsabilité du GIL et Julien Brulé, administrateur système, développe aussi des applications GPU au groupe d'informatique instrumentale ;
- définir les profils des postes à pourvoir transversalement aux pôles scientifiques ;
- définir des groupes de compétences (ASR, calcul scientifique, documentation, contrôle-commande, SGBD, développement web) et mettre en place un serveur <<http://gil-lesia.obspm.fr/redmine/projects/leopard>> pour partager codes et expérience.

Les réalisations des informaticiens qui collaborent aux projets des pôles scientifiques apparaissent dans le bilan de ces pôles ; ce paragraphe s'attache surtout à l'informatique générale du laboratoire. Un gros effort a été fait pour centraliser l'hébergement des services (mise en œuvre de serveurs virtuels), l'administration des serveurs et des espaces disques ainsi que l'achat des logiciels.

Afin d'éviter que les personnels du GIL ne soient toujours interrompus, un jour de permanence pour la réponse aux questions et incidents a été instauré (un jour fixe pour chaque personne, 5 jours couverts dans la semaine). Le logiciel Request Tracker de gestion des incidents a été installé avec le même objectif. Cela a permis au GIL de mieux répondre aux demandes alors même que leur nombre a augmenté puisque la DIO a systématisé un premier niveau de demande passant par les laboratoires, et ce tout en améliorant les conditions de travail des membres du groupe.

L'augmentation du nombre des contractuels a permis le maintien des effectifs du LEOPARD entre janvier 2010 (26 ITA dont 6 CDD) et juillet 2012 (26 ITA dont 9 CDD).

1.b.2 Pôle ingénierie

Depuis sa création en mars 2011, le pôle ingénierie du LESIA a mis en place de nombreuses réunions métier destinées à faire le point avec les acteurs de ces métiers sur la façon dont ils imaginent l'évolution de leur activité dans le futur. Les métiers évalués dans ce cadre ont été :

- L'électronique et l'informatique embarquée
- Les métiers du bureau d'étude, de la mécanique, de la thermique et des AIT
- Les métiers de l'optique
- Les chefs de projets, acteurs majeurs de l'instrumentation au laboratoire.

L'évolution des forces au LESIA est marquée par une diminution du nombre d'ITA, conjointement à des demandes des agences toujours plus exigeantes entraînant la disparition de certaines vers la sous-traitance. Par exemple, les activités de réalisations de circuits-imprimés pour l'électronique sont depuis un certain temps déjà déléguées à des sociétés privées. En effet, le laboratoire ne peut s'équiper des machines sophistiquées nécessaires à leur réalisation au vu du nombre trop restreint d'exemplaires à réaliser. Leur câblage nécessite aussi maintenant des moyens matériels coûteux qu'il n'est pas, non plus, raisonnable d'acquérir pour les mêmes raisons. Dans cet esprit, ces métiers de réalisations glissent inexorablement vers celui de spécificateurs (cahier des charges, réponses à appels d'offres, par exemple) et de suivi de sous-traitance. Seule la recette des éléments sous-traités et leur intégration dans les systèmes font partie des activités purement techniques restant encore bien ancrées au laboratoire.

Parmi les métiers émergents, l'informatique embarquée, présente désormais dans la quasi-totalité des expériences spatiales du laboratoire, fait appel à des technologies pointues, en évolution rapide. Ce métier nécessite un relativement faible investissement en matériels mais nécessitera une politique de recrutement en ce domaine. Le renforcement du bureau d'étude est une nécessité, car les besoins d'études mécaniques et thermiques, dès le début des projets, y compris pour simplement répondre aux appels d'offres, sont récurrents pour tous les projets du LESIA, y compris les projets sol.

Par ailleurs, les agences (ESA, ASI, ESO, CNES, etc..) imposent désormais, sur leurs projets, une approche qualité qui nécessite la mise en place, au sein du laboratoire, de méthodes de travail et d'outils divers (JIRA, DOORS, BAGHERA, etc..) destinés au support de cette activité. Les ITA doivent aussi se former à ces nouvelles exigences en plus d'acquérir de nouvelles compétences techniques. Le LESIA, laboratoire pionnier dans ce domaine de la qualité, poursuit ses efforts dans la mise en place d'une démarche qualité, non seulement dans les projets instrumentaux, mais dans toutes les activités du laboratoire.

1.b.3 Pôle Services

Le pôle Services regroupe les personnels du LESIA impliqués dans les services rendus à la communauté scientifique et technique du laboratoire. Le pôle service se situe à l'interface entre les différents pôles et la direction du LESIA. Il comprend principalement le service administratif, et le SIGAL (Service Internet, Graphisme et Animations du LESIA).

1.b.3.1 démarche qualité du LESIA

La démarche qualité au LESIA a pour vocation de faciliter et fiabiliser les tâches administratives, techniques et organisationnelles au sein du laboratoire. Le service administratif étant au cœur des activités du LESIA, il est donc judicieux que ce secteur bénéficie d'un support de la part de la qualité. La contribution de la qualité dans l'administration a pour but d'améliorer les échanges avec les équipes techniques et de fluidifier les activités au sein du service, dans le but de mettre en avant les recherches scientifiques du laboratoire.

1.b.3.2 Service administratif

Le séminaire de prospective a fait ressortir le besoin de préserver un service administratif impliqué et présent au sein du laboratoire. Les problématiques actuelles liées aux fonctions support donnent lieu à des discussions au sein du service administratif, et soulèvent parfois des inquiétudes. Il est important de souligner la nécessité absolue de préserver l'ancrage humain de ces fonctions au sein du laboratoire.

1.b.3.3 Service Internet, Graphisme et Animations du LESIA (SIGAL)

Le SIGAL a été créé en 2007 pour répondre aux besoins des chercheurs dans le domaine graphique. C'est un service transverse, géré sous la responsabilité d'un membre de la direction, et regroupant des chercheurs et ITA de différents pôles, et qui répond aux demandes couvrant des réalisations de sites web, d'affiches (colloques, animations, événements, logos, etc.) ainsi que des graphiques liés aux concepts scientifiques. Une personne est affectée au service et 9 autres personnes participent à ses activités en fonction de leur disponibilité. Les demandes couvrent des réalisations de sites web, des réalisations d'affiches (colloques, animations grand public, événements au sein du LESIA, logos d'instruments etc.) ainsi que des graphiques pour expliquer des concepts scientifiques. Ce service connaît un fort succès auprès des personnels du LESIA. Un budget de 3000 € est attribué pour permettre la mise à jour des logiciels et du matériel nécessaire aux développements. Des formations spécifiques ont été organisées pour les développeurs Web. Nous avons également accueilli deux stagiaires : le premier de l'Ecole « Initiative » a réalisé un stage sur l'animation 3D illustrant la mission Marco Polo (animation présentée à l'ESA pour la phase de sélection à Cosmic Vision), la seconde stagiaire venait de l'Ecole Estienne des arts graphiques de Paris (niveau master professionnel) et à réaliser un livre illustré pour expliquer les relations soleil-terre aux adolescents.

Le bilan des activités du SIGAL a montré un accroissement des demandes de sites web pour colloques et ateliers. Le service répondra bien sûr à ces demandes dans la mesure de ses possibilités, mais en faisant de plus en plus appel aux outils mis à disposition par les laboratoires du CNRS, afin d'optimiser les ressources humaines du service.

Pour les demandes de sites web d'équipes ou de projet, le SIGAL a mis au point le plugin « Kit Spip Sigal » écrit pour permettre de créer facilement un site web aux couleurs du LESIA.

1.b.4 Tâches collectives organisées sous responsabilité de la direction

Les tâches décrites ici concernent en interaction l'administration du laboratoire (sur une base hiérarchique) et le pôle Services pour la coordination et mise en œuvre des différents intervenants.

1.b.4.1 Communication interne

La communication interne du LESIA passe par les informations de l'intranet, sous la responsabilité de l'administrateur du LESIA, mais avec l'aide pour la mise en œuvre du pôle Services : la lettre du LESIA (LESInfos) regroupe les informations hebdomadaires (appels d'offres, informations des tutelles, vie du laboratoire, etc.). Les publications sont gérées dans l'outil PUBLESLIA d'usage interne. Les formulaires (missions, etc.) sont téléchargeables sur le site, de même que le service de gestion des absences, des salles de réunion, etc.

Sous responsabilité de l'administrateur du LESIA, est effectuée la rédaction et de la mise à jour du livret d'accueil pour les nouveaux entrants au LESIA. Ce livret est destiné à s'enrichir régulièrement, puisqu'il reflète l'ensemble des services existants au sein du laboratoire. Il devra être traduit en anglais pour être diffusé aux personnes non francophones.

Par ailleurs, les réunions des conseils de laboratoire sont aussi un moment d'échange entre la direction et le personnel à travers les représentants élus et les coordinateurs des différents pôles. Le conseil se réunit quatre fois par an. Enfin, tous les ans une assemblée générale est organisée. Elle est l'occasion de faire un point sur l'actualité du laboratoire, de présenter les résultats les plus marquants de l'année écoulée et de débattre sur des sujets d'actualité.

1.b.4.2 Organisation de colloques

Sous l'initiative des équipes ou de la direction, les événements structurant la vie du laboratoire (journée des entrants, Assemblée générale, colloques scientifiques) sont organisés et mis en œuvre avec l'aide des différents pôles.

1.b.5 Relations avec les tutelles

1.b.5.1 Observatoire de Paris

L'Observatoire de Paris est la tutelle principale du LESIA. A ce titre, il assure l'hébergement du LESIA par la mise à disposition de locaux, leur entretien et leur rénovation. Institutionnellement,

cette tutelle apporte une construction particulière à l'organisation des laboratoires, ceux-ci étant à la fois départements de l'Observatoire et UMR CNRS. Ainsi, le Conseil de Laboratoire effectue les tâches à la fois du Conseil de Département prévu dans les statuts de l'Observatoire et celles d'un Conseil de Laboratoire pour le CNRS. Les différences de statuts nécessitent un compromis, réalisé dans le règlement intérieur et les statuts du département, qui doit être adapté en fonction de l'évolution des différentes tutelles : un exemple en est le statut des différents personnels permanents du LESIA (CNAP, CNRS, Université) dont le temps de travail, les obligations statutaires et les relations institutionnelles sont différentes. Une refonte du règlement intérieur est en chantier avec la Délégation Régionale du CNRS (DR5) et l'Observatoire. Aucun conflit n'est apparu récemment, le dialogue entre la DR5, l'Observatoire et les laboratoires étant réalisé dans des réunions de directoire.

L'organisation des laboratoires au sein de l'Observatoire fait qu'une grande proximité scientifique et administrative existe entre laboratoires et établissement, plus que dans des laboratoires au sein de grandes universités. L'absence de conseil scientifique du LESIA, pointée lors de la dernière évaluation, résulte de cette proximité, et de l'implication forte dans un établissement de taille moyenne comme l'Observatoire, des personnels des laboratoires.

Locaux

Actuellement, le LESIA est réparti entre 9 bâtiments sur le campus de Meudon. La situation a cependant été améliorée depuis le rapport précédent, par le regroupement d'équipes de manière plus cohérente : évolution de la situation au pôle planétologie, regroupement du pôle Etoile nouvellement constitué, déménagement du bâtiment 12 (sauf un chercheur isolé).

La gestion des locaux au LESIA est discutée dans la commission locaux, instituée par le Conseil de Laboratoire, et suivie au sein de la direction par un directeur-adjoint. Les négociations avec l'Observatoire concernent la rénovation des locaux sur le principe d'une responsabilité hôte sur les aspects rénovation/mise aux normes, et d'une contribution du laboratoire sur des locaux techniques dédiés à des expériences (salles blanches, ateliers, etc.), sur crédits propres ou contrats de diverses origines.

Interaction avec les conseils

La politique scientifique du laboratoire se construit au sein de la politique d'établissement : un principe de « subsidiarité » est appliqué, les objectifs internes au laboratoire étant gérés par le LESIA, les objectifs mutualisés avec d'autres laboratoires étant discutés avec les laboratoires concernés directement, mais aussi avec l'Observatoire, dans les réunions de directoire et le Conseil Scientifique auquel les directeurs de département participent.

1.b.5.2 CNRS

Les relations du LESIA avec le CNRS comprennent les relations avec la Délégation Régionale (Ile de France Ouest et Nord – DR5) pour les aspects administratifs courants, et avec l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS pour les demandes de moyens annuels, et les discussions de stratégie scientifique pluriannuelle. La part du budget de soutien de base annuelle venant du CNRS est plutôt affectée en priorité sur les volets scientifiques du laboratoire : accompagnement de la recherche, soutien aux équipes entre deux projets de plus grande ampleur, soutien aux étudiants en thèse (missions, colloques en particulier). La diminution drastique en 2012 du soutien de base du CNRS a donc des conséquences sérieuses sur les équilibres internes du laboratoire. En effet, même si une compensation très partielle a été obtenue via l'Observatoire, la politique interne du laboratoire s'en trouve directement affectée sur le démarrage d'actions, malgré des économies sur des frais de représentation ou de communication qu'on peut juger accessoires, mais qui participent à la fluidité des relations entre les personnels : on citera l'exemple de l'annulation du séminaire externé de prospective du LESIA, qui s'est tenu à moindres frais à Meudon.

La compensation par les crédits sur projets et les prélèvements internes (quand ils sont possibles) est illusoire : elle dépend d'une part fortement des succès, toujours irréguliers, aux différents appels

d'offres – il faut aussi rappeler que l'ANR n'autorise pas les prélèvements par les labos, les préciput étant affectés à l'établissement.

Les affectations en moyens humains sont essentiels dans la politique du laboratoire, avec une diminution observée du nombre d'ITA-CNRS ces dernières années (voir graphiques plus bas).

1.b.5.3 Tutelles universitaires

Le LESIA a pour particularité d'avoir deux tutelles universitaires parisiennes, l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) et l'Université Paris-Diderot Paris 7. Des questionnements lors des dernières évaluations sur l'intérêt des multitutelles avaient pu inquiéter en 2010 sur la pérennité et l'opportunité de telles tutelles « secondaires » (nous dirons plutôt ici « universitaires »). L'exercice pendant les années 2007-2012 de ces relations en montre tout l'intérêt pour la politique du laboratoire d'une part, mais certainement aussi pour les universités concernées qui ont apporté dans les années passées plus d'un poste par an (maître de conférence en 2010, 2011 et 2012 et ingénieur de recherche en 2011)

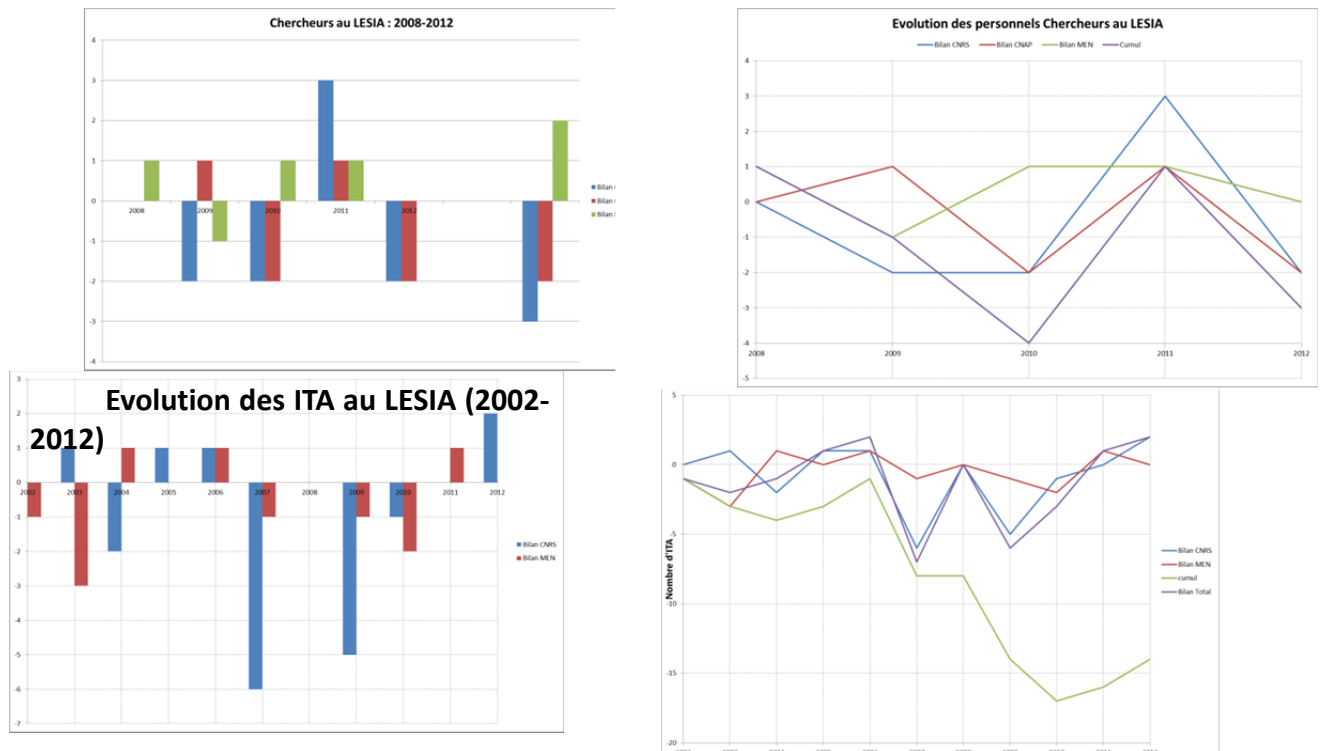
UPMC

- Enseignants chercheurs
- Thèses/monitorat
- Projets de recherche : financement de projets émergents
- Projet CEIL avec les XV-XX
- Participation à la vie universitaire : conseils d'UFR

P7

- Enseignants/chercheurs
- Thèses/monitorat
- Projets de recherche : Haute résolution angulaire, Optique adaptative pour l'ophtalmologie, planétologie
- Participation à la vie universitaire : conseil d'UFR
- HRAA et Gis PHASE
- Campus Spatial : participation à workshop, journées du Campus spatial, financement de projets émergents

1.b.6 Evolution des moyens en ressources humaines



Les diagrammes d'évolution des personnels montrent qu'au cours des quatre années 2008-2012, les effectifs d'ITA ont été en baisse de 6 personnes (4 CNRS, 2 MEN), et de 14 sur la décennie 2002-2012. En termes de chercheurs, la baisse est moins significative entre 2008-2012 (3 postes, dont 3 CNRS, 2 CNAP, mais 3 arrivées MEN).

Aujourd'hui, la politique du LESIA est prise en cisaille avec la baisse du nombre d'ITA d'un côté, et la qualité et la complexité toujours plus grandes demandées dans les projets. L'engagement de nouveaux projets en est devenue problématique et certains engagements devront être repoussés à l'avenir compte tenu de la baisse d'effectifs.

Il est à noter que la tendance a commencé à s'inverser en 2012 toutefois, grâce à un effort de l'Observatoire vers les laboratoires, dont le LESIA. Cette tendance devra être poursuivie à l'avenir pour compenser le déficit.

Le ratio des personnels permanent/temporaire reste sain à l'heure actuelle, mais on a atteint les limites de l'emploi en CDD, et il n'est pas raisonnable d'envisager une compensation sur emplois temporaires.

1.b.7 Partenaires et structures collaboratives

1.b.7.1 CNES

Le CNES est un partenaire historique du LESIA qui a participé à la création d'une politique spatiale française avec quelques rares autres laboratoires. Il reste un des laboratoires contributeurs majeurs en expériences nouvelles, et ce dans des domaines d'astrophysique allant de la physique des plasmas à l'astronomie en passant par la planétologie. Le LESIA apporte au CNES une expertise, par la renommée de ses chercheurs souvent impliqués dans ses différents conseils (Groupes spécialisés, CERES), et lors des grands séminaires de prospective spatiale où le LESIA participe à la définition d'une stratégie scientifique spatiale nationale.

1.b.7.2 Labex ESEP

Le Laboratoire d'excellence *ESEP* (Exploration Spatiale des Environnements Planétaires) dont le LESIA est coordinateur, est un réseau de laboratoires travaillant dans le domaine spatial (Ile de France et Orléans). D'un budget de 4 M€ sur 10 ans, il a été sélectionné en première vague en 2011. Ce projet de réseau permet d'initier des recherches de long terme, en mutualisant les ressources de plusieurs laboratoires, avec une forte dimension vers l'enseignement et l'accès du public à la recherche.

1. Objectif scientifique du Labex

L'étude des environnements planétaires est au cœur d'un grand nombre de questionnements scientifiques, sociétaux et philosophiques, tels que l'origine du Système solaire et de la vie, ou l'existence de mondes habitables ailleurs dans l'univers. Les objectifs scientifiques d'ESEP sont au centre de ces problématiques, en ciblant l'ensemble des approches à notre disposition pour l'étude des planètes, qu'elles soient dans le Système solaire ou au-delà : développement de nouvelles technologies pour l'observation et l'exploration des planètes du Système solaire, dans l'espace et au sol, recherche de planètes extrasolaires, expériences de laboratoire visant à comprendre l'apparition de la vie, etc.

2. Actions clés recherche

Les thématiques scientifiques se déclinent dans un contexte d'exploration spatiale instrumentale (des concepts théoriques aux spécifications techniques) selon les trois domaines suivants :

- l'étude des relations Soleil-Terre et la météorologie de l'espace
- l'exploration planétaire dans le Système solaire ;
- les observations des planètes extrasolaires

3. Action clés de formation

- insérer davantage les thématiques d'ESEP dans l'offre de formation de l'école doctorale Astronomie et Astrophysique d'Ile-de-France dont plusieurs institutions de PSL sont membres ;
- renforcer les liens entre le master OSAE (Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace) et le monde industriel, en s'appuyant sur les actions de R&D développées par ESEP ;
- renforcer les thématiques d'ESEP dans les enseignements de masters portés par les partenaires d'ESEP au sein de PSL ;
- ouvrir les enseignements en ligne aux thématiques d'ESEP.

4. Actions clés de diffusion

- Informations sur les résultats des recherches concernées à partir de supports écrits ou numériques, à destination du grand public, ou des étudiants.
- expositions publiques sur ces mêmes thèmes -

Le démarrage du LABEX fin 2011 fait que les actions débutent seulement, et concerneront surtout la partie projet. En termes de résultats obtenus on indiquera simplement la sélection du labex et le démarrage d'activités (thèse financée en 2012).

1.b.7.3 Groupements d'Intérêt Scientifique : Phase, Motespace, JMMC

Phase

Les activités en Haute Résolution Angulaire ont vu leur structuration en partie gérée autour du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) PHASE (Partenariat Haute résolution Angulaire Sol - Espace) qui regroupe les équipes du DOTA (Département d'Optique Théorique et Appliquée) à l'ONERA, du LESIA et du GEPI à l'Observatoire de Paris dans le domaine de l'instrumentation optique HRA pour les applications astronomiques et ophtalmologiques. Il a permis de mener à bien

plusieurs thèses en cotutelle et de participer à plusieurs projets d'envergure comme PERSEE, SPHERE, l'ANR MAUI et deux études de phase A d'instruments de l'European Extremely Large Telescope (E-ELT) qui sont EAGLE et ATLAS. L'élargissement à l'IPAG et au LAM est en cours dans le cadre du renouvellement de ce GIS.

Motespace

Le GIS Motespace (mise en commun des moyens d'essais spatiaux) regroupe les laboratoires LESIA, IAS (Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay) et AIM (Astrophysique Interactions Multi-échelles, CEA) pour le regroupement de moyens d'essais (salles blanches, équipements de tests) pour les expériences spatiales, afin d'optimiser les ressources instrumentales entre laboratoires.

Le démarrage du GIS a été obtenu après signature des conventions en 2010, sur la base de plusieurs réunions actuelles. L'objectif (financement commun d'expériences) est pour le moment encore à venir, après l'échec d'une demande Equipex (IAS, voie UV sur l'instrument SOLEIL), et les objectifs seront détaillés dans la partie projet.

Jean-Marie Mariotti Center (JMMC)

Le JMMC concerne le développement de logiciels d'exploitation des données interférométriques optiques pour les interféromètres du VLT principalement (VLTI et dans un proche avenir Gravity).

1.b.7.4 Région Ile de France : DIM ACAV

Le domaine d'intérêt majeur « Astronomie et Conditions d'Apparition de la Vie », piloté par l'Observatoire de Paris, offre aux laboratoires d'astrophysique de nouvelles opportunités pour des projets dans le cadre de la Région Ile de France. Le LESIA y participe dès 2012, puisqu'il a bénéficié d'un contrat doctoral débutant en 2012 en planétologie. La politique régionale a dans le passé permis au LESIA des renouvellements d'équipement d'importance (projets PERSEE et RETINOPATHIES) ; cette opportunité pourra être suivie à l'avenir pour les projets du LESIA.

1.b.8 Enseignement

La participation des personnels du LESIA à la formation par et pour la recherche passe par trois axes :

1. la participation à l'enseignement universitaire (enseignement en université, prise de responsabilité dans des formations etc.) ;
2. l'accueil de stagiaires universitaires ;
3. l'encadrement de thésitifs.

Enseignements universitaires

Les enseignements académiques sont principalement effectués par les enseignants chercheurs, les personnels du corps des astronomes. Si la majeure partie de ces cours est dispensée au sein de l'Unité de Formation et d'Enseignement (UFE) de l'Observatoire de Paris, une part non négligeable est aussi assurée dans les deux autres universités tutelles, P6 (pour un total d'environ 1 ETP, hors enseignants chercheurs de P6), P7 (total de 1/3 ETP, hors enseignants-chercheurs de P7) ainsi que dans des écoles d'ingénieurs (Sup'Optique, Ecoles des Mines de Paris). Les matières enseignées sont alors éloignées de l'astrophysique et concernent aussi les niveaux licence. Enfin des enseignements du L1 au M3 sont également dispensés à l'Université d'Orléans, avec qui le LESIA cultive de longue date des relations (Nançay, laboratoire LPC2E).

Le LESIA abrite aussi le responsable du Diplôme d'Université "Fenêtres sur l'Univers", formation en ligne de niveau L2-M1 d'astronomie-astrophysique de l'Observatoire de Paris. Treize personnels du LESIA (CNRS, Prof, MDC, moniteur, ATER, post-doc) sont tuteurs à "Fenêtres sur l'Univers".

Les formations dispensées au sein de l'UFE (et auxquelles participent activement les enseignants chercheurs et ITA du laboratoire) concernent à la fois les étudiants mais également les

formations des maîtres et le parrainage de classes de collège. Le directeur de l'UFE (J.M. Malherbe) est membre du LESIA ainsi que le responsable du Master OSAE de l'Observatoire de Paris (B. Mosser) et le responsable de l'École Doctorale d'Astronomie et Astrophysique (D. Rouan).

A Paris Diderot, on note aussi la responsabilité de la spécialité "Architecture des systèmes physiques" (niveaux M1 et M2) assurée par G. Rousset, dans la nouvelle école d'ingénieurs (EIDD) qui vient d'ouvrir en 2010.

La participation aux enseignements académiques dépasse également le cadre français. Certains chercheurs participent également à des cours dans des écoles doctorales en Europe principalement et proposent régulièrement des cours dans des écoles d'été. Enfin, il faut mentionner le développement d'enseignements niveau Master (M1 en 2012) avec l'Université d'Hanoï auquel participe le LESIA notamment à travers le labex ESEP (forte participation de B. Mosser et G. Rousset).

Encadrement des stages

L'ensemble du personnel est très impliqué dans l'encadrement de stages universitaires. Ceci inclut les stages à vocation purement scientifique mais également des stages d'élèves venant d'écoles d'ingénieur. Ces stages sont principalement à vocation instrumentale (quelques uns sont également tournés vers la communication). 174 stages ont ainsi été encadrés par les personnels du laboratoire (Figure 1) : 46 étudiants au niveau M1, 67 au niveau M2, 37 élèves ingénieurs et 76 autres (BTS, DUT, L3). Au total, cela représente 2471 semaines de formation sur la période 2007-2012.

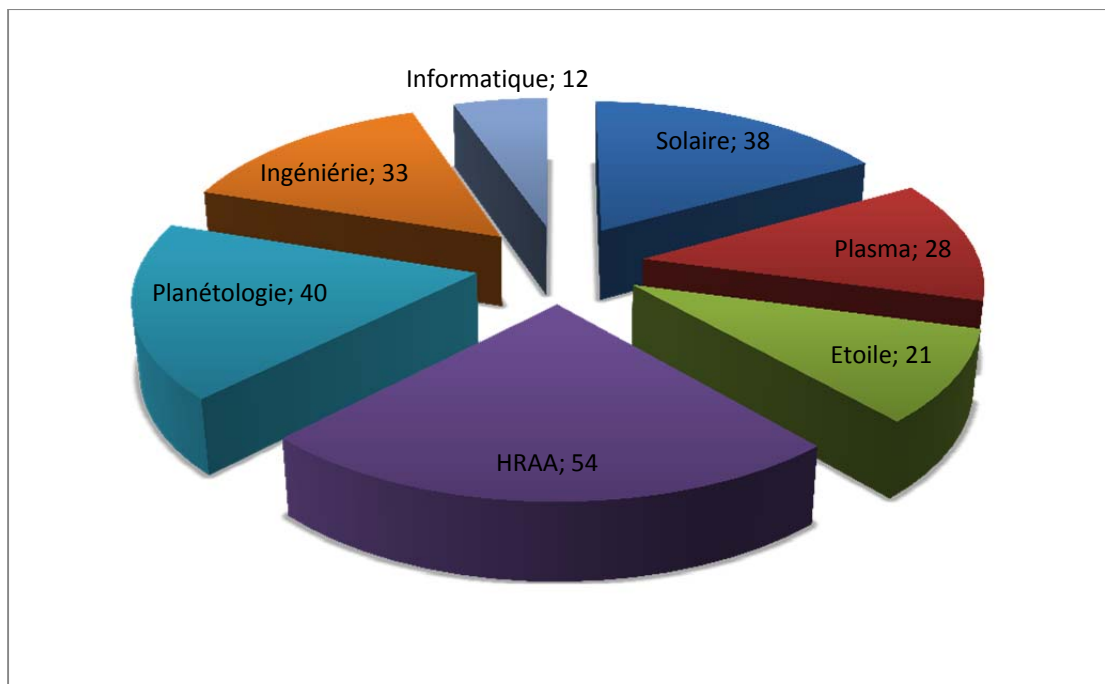


Figure 1 : Nombre de stages encadrés par les différents pôles sur la période 2007-2012

Les stagiaires proviennent principalement de nos universités de tutelle (un peu plus de 50%) mais également d'autres universités (principalement Orsay) et d'écoles d'ingénieur ou d'IUT .

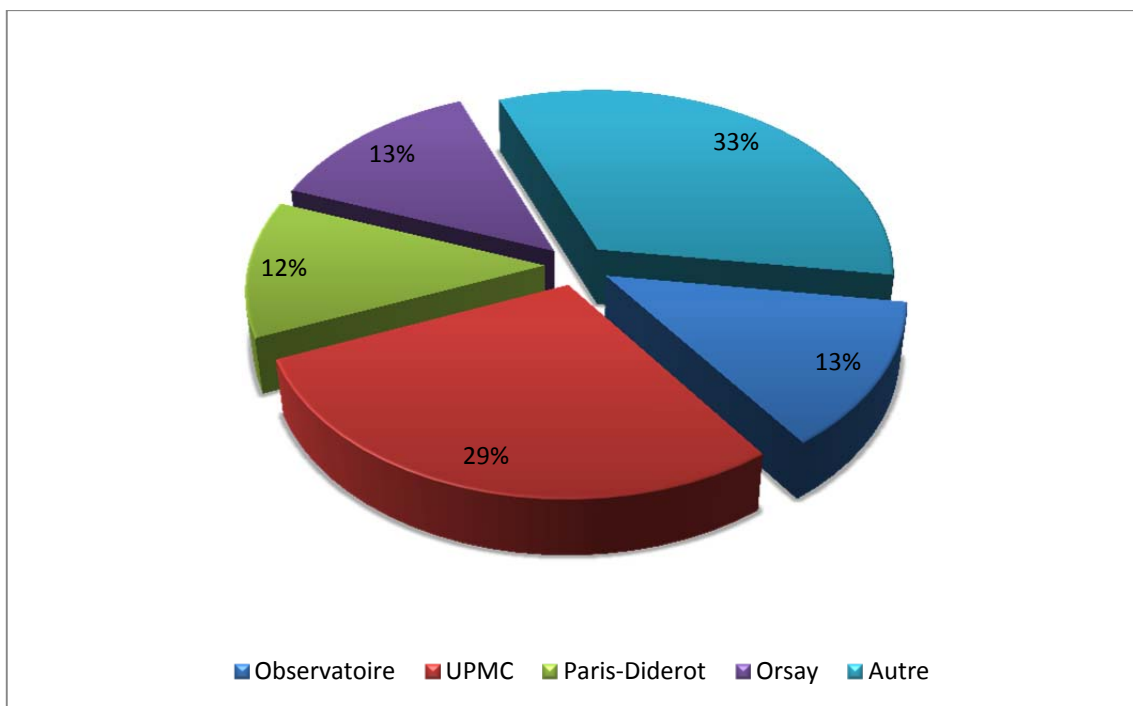


Figure 2 : Origine universitaire des stagiaires (en pourcentage du nombre total)

Encadrements des thèses

Le dernier volet de formation concerne l'encadrement de thèse. 49 thèses ont été soutenues depuis 2007. La figure 3 montre l'évolution du nombre de thèses soutenues au laboratoire depuis 2007. Le nombre de thèses en co-tutelle augmente ces dernières années. Elles sont principalement avec des universités européennes mais le nombre de co-tutelles avec des universités chinoises est en augmentation.

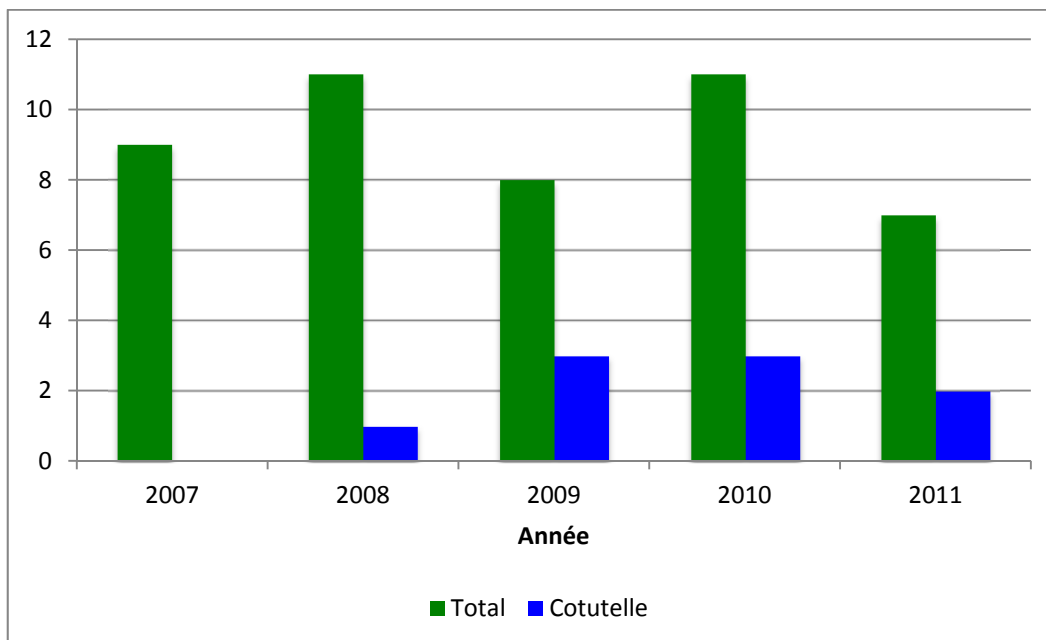


Figure 3 : Evolution du nombre de thèse soutenue au LESIA. Les colonnes bleues indiquent le nombre de thèse en co-tutelle avec une université étrangère.

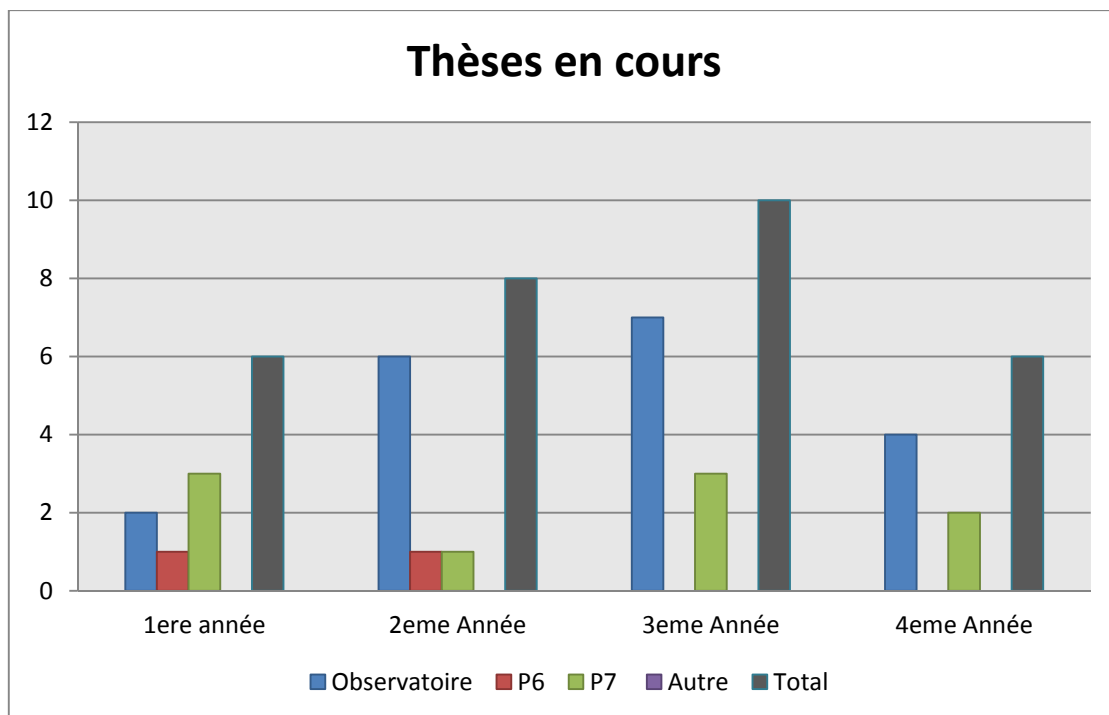


Figure 4 : Nombre de thèses en cours en juin 2012 avec l'origine universitaire des étudiants. La colonne en noire indique le nombre total de thèse par année.

La diminution du nombre de thèses au LESIA depuis 2008 (visible sur le graphique 4) suit simplement la diminution de contrats doctoraux (ou bourses) distribuées par l'Ecole Doctorale 127 (le nombre de proposition de thèse est quant à lui quasiment constant). Le nombre de contrats doctoraux via d'autres sources (ANR, contrats européens, contrats Ile-de-France, CNES) est, lui, en augmentation avec en 2012 une diversification des sources de contrats (DIM ACAV de la Région Ile de France, labex ESEP).

La répartition des thèses au sein des pôles est présentée figure 5. L'attractivité du domaine HRAA auprès des étudiants est manifeste (on note aussi 3 thèses dans ce pôle d'une durée supérieure à 3 ans produisant un léger surcroît artificiel du nombre de thèses). Le tableau suivant donne le rapport des taux d'encadrements, par pôle (avec le regroupement Astronomie = HRAA+Etoile, les nouveaux pôles étant de création récente).

Pôle	Astronomie	Plasma	Planétologie	Solaire
Taux encadrement	3,4	1	0,5	0,1

Parmi les actions incitatives qui seront à mener on notera :

- l'incitation au passage des HDR des chercheurs ;
- une priorité au niveau du laboratoire pour soutenir les équipes avec peu d'étudiants;
- un encouragement à proposer des sujets au sein de certaines équipes.

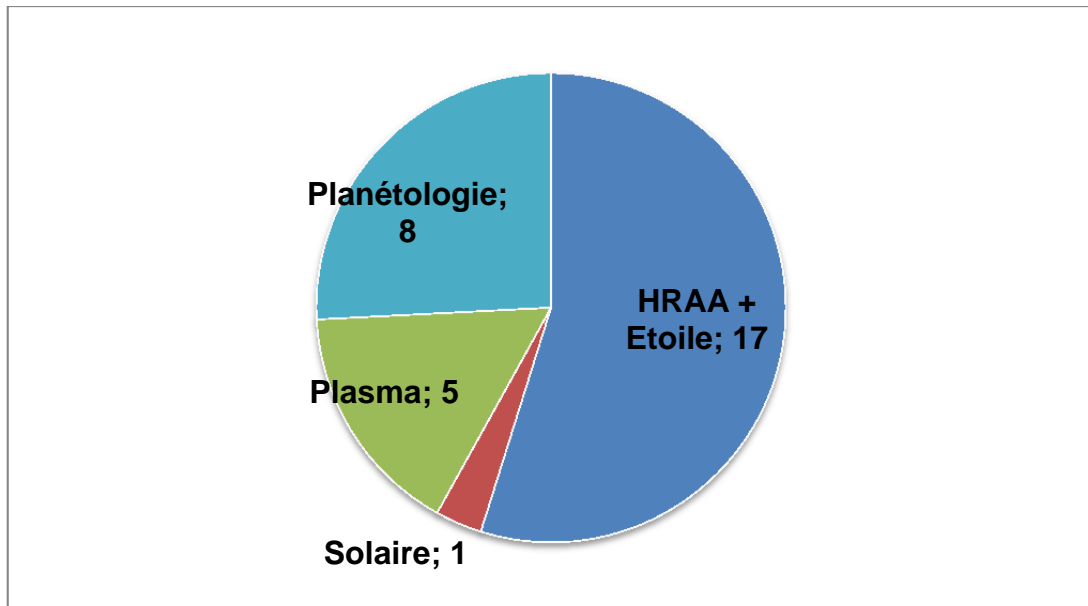


Figure 5 : Répartition des thèses en cours par pôle.

Une journée d'accueil des nouveaux entrants au LESIA est organisée chaque année depuis 2010. Les thésitifs sont conviés à cette journée au cours de laquelle leur est distribué le « manuel du nouvel arrivant ». Les étudiants sont invités à venir présenter leurs travaux lors de la demi-journée des thèses organisée chaque année par la commission « étudiants » du LESIA. Le suivi scientifique est aussi assuré par l'Ecole Doctorale lors de l'évaluation à mi-thèse.

Conclusions :

Les relations que le LESIA entretient avec les universités et écoles de la région parisienne sont le fruit de longues collaborations (datant pour la plupart d'avant la création du LESIA en 2001). Si nous promouvons les enseignements au sein de nos universités de tutelles ainsi que l'accueil des étudiants de ces universités, nous veillons à maintenir l'ouverture vers d'autres horizons universitaires (en France comme à l'étranger).

1.b.9 Rayonnement et attractivité académiques

L'implication de longue date du laboratoire dans des instruments spatiaux a permis de nouer des liens solides avec de nombreux laboratoires français et en particulier de la région parisienne. Ces collaborations se traduisent notamment par la signature du GIS Motespace et par le labex ESEP. Les équipes travaillant sur des télescopes sol ne sont pas en reste : le développement des instruments pour les très grandes infrastructures (VLT, ELT) ont conduit à de fortes collaborations avec d'autres laboratoires et avec l'ONERA. Ces collaborations se sont traduites par la création du GIS PHASE dont le pilotage est assuré par le LESIA. Ce GIS est actuellement en cours de reconduction.

Responsabilités institutionnelles :

Au niveau international, présidence, vice-présidence ou membre de comités au niveau :

- international (parmi lesquels l'IAU, ESA (SSEWG, SSAC), EGU, ESO, experts pour l'Europe ...);
- national (CoNRS, Conseil d'institut, CSAA, PNP, PNST, PNPS, CNAP, AERES, CNES);
- local : membres au CS et au CA de l'Observatoire, direction de l'UFE et de l'Ecole Doctorale Astronomie & Astrophysique (ED127);
- des universités tutelles (conseil d'UFR, groupes d'experts).

Tous les détails peuvent être retrouvés sur le lien :

<http://www.lesia.obspm.fr/-Responsabilites-institutionnelles-.html>

Prix et distinction

- Prix pour des ouvrages d'astronomie à destination du grand public (A. Dorresoundiram)

- Prix de la communication scientifique par Europlanet (T. Fouchet)
- Prix « Le monde » de la recherche universitaire : X. Haubois
- Prix URSI meilleure communication scientifique : J. Girard
- Médaille David Bates (EGU) attribuée à T. Encrenaz
- Cristal du CNRS 2011 : S. Chaintreuil
- Membre IUF : T. Fouchet, B. Sicardy
- Primes d'excellence scientifique attribuées à plusieurs chercheurs (voir tableau S2-1-3 dans les documents AERES)

Deux à trois conférences internationales sont organisées annuellement par les membres du LESIA (conférences uniques ou dans des cadres comme l'UAI ou autre)

1.b.10 Communication

Vers le grand public

Les activités vers le grand public prennent de multiples formes :

- Communiqués de presse : près d'une dizaine sont issus du laboratoire tous les ans ;
- Interviews pour tous les médias de la presse écrite et audio-visuelle ;
- Conférences directement pour le grand public (en particulier en 2007-2008 pendant l'Année Héliophysique Internationale - dont la coordination européenne et française était assurée par des chercheurs du laboratoire - et en 2009 pour l'Année Mondiale de l'Astronomie) ;
- Commissaires d'exposition, animateurs d'exposition et réalisateur d'expérience pour le grand public (Planeterrella présenté à l'émission « Incroyable expérience » (France2) + dans de multiples expositions (palais de la découverte, Trocadéro, etc.)
- Rédaction d'ouvrages pour le grand public.

Une page spécifiquement dédiée pour le grand public est maintenue sur notre site web : <http://www.lesia.obspm.fr/-Espace-Grand-public-.html>

Afin de faciliter la communication des chercheurs vers le grand public ou les membres de la communauté scientifique, un service d'aide à la réalisation graphique a été créé en 2007 (Service Internet Graphisme et Animation du LESIA). Si la majorité des demandes (plus d'une vingtaine par an) concerne des affiches de colloques, des logos pour les manip ou la réalisation de sites web, l'animation 2D, les bandes dessinées et les graphiques scientifiques font leur apparition depuis 2012. Les réalisations sont présentées sur : <https://intranetlesia.obspm.fr/-sigal-.html>.

Communication interne

La communication interne vers l'ensemble du laboratoire passe tout d'abord par notre lettre d'information hebdomadaire « LESInfos ». Si les informations émanent principalement de la direction, toute personne du laboratoire peut proposer un article (qui doit être validé par le directeur). Le second vecteur de communication est notre site web interne où les informations concernant la vie du laboratoire, l'administration et les documents pratiques ainsi que les services en ligne sont disponibles (<https://intranetlesia.obspm.fr/>). Ces deux outils sont les plus réactifs.

Interactions avec l'environnement social, économique et culturel

Outre les actions de communications à destination du grand public, l'interaction du laboratoire avec le monde socio-économique passe par des contrats avec l'industrie pour le développement de certains instruments (on peut citer par exemple THALES, l'ONERA, ...). Récemment, l'Observatoire de Paris a organisé des journées pour réunir les acteurs du monde scientifique et du monde industriel, journées auxquelles ont participé principalement les membres du pôle HRAA.

Le projet CEIL (voir détail bilan groupe Astronomie E0 page 8) est sans doute celui ayant le plus d'impact sociétal actuellement. Notons toutefois que le développement de l'axe météorologie de l'espace viendra compléter cet aspect sociétal.

1.b.11 Locaux du LESIA

Bilan des actions sur les années 2007-2012

Pendant ces années, le laboratoire a entrepris plusieurs actions pour améliorer ou développer des laboratoires d'intégration instrumentale.

- Le LESIA a déposé un dossier avec l'Observatoire de Paris lors de l'appel d'offre du CPER 2007-2013. Notre proposition de réaliser 2 salles blanches de 40 m² chacune accessibles par un sas commun a été acceptée. La livraison de ces salles (bât. 18) a été effectuée au printemps 2008. L'air de ces salles est recyclé à 75% et filtré pour respecter la classification particulière de l'air selon la norme ISO7 ; la température est maintenue à 21°C ± 1° ; le taux d'humidité est maintenu à 45% ± 5%.

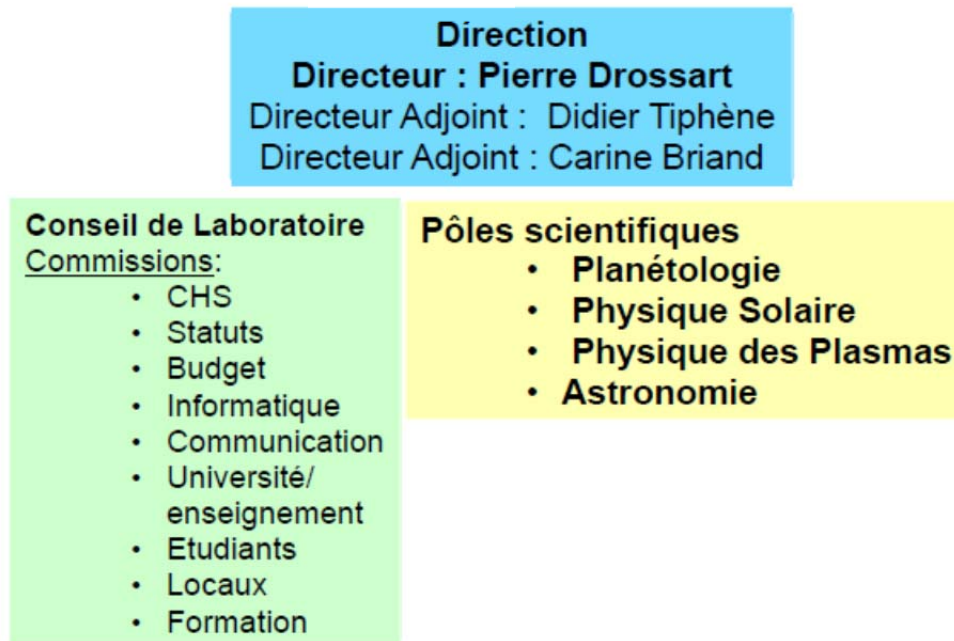
Ces deux laboratoires ont hébergé le banc optique de R&D Pegase Experiment for Research and Stabilization of Extreme Exctinctions (PERSEE) financé par le CNES et le banc optique SAXO développé pour valider la boucle adaptative de l'instrument SPHERE.

- Le LESIA avait installé une salle au bâtiment 17 en 2002 pour intégrer le modèle de vol de la case à équipement de l'instrument COROT du CNES. La machinerie du recyclage de l'air a été remplacée en 2009 et nous avons ajouté un contrôle de la température et du taux d'humidité. Cette installation a accueilli le banc d'étalonnage des détecteurs infrarouges de l'instrument Simbio-Sys de la mission BepiColombo.
- En 2009, le LESIA a transformé un laboratoire vétuste (bât. 18) en laboratoire "semi-propre" pour des développements en instrumentation d'interférométrie ; ce laboratoire a servi au développement d'OHANA (prototype d'interférométrie au sommet du Mauna Kea), FIRST (Fibered Imager foR Single Telescope) et sert aujourd'hui au développement de la ligne à retard de GRAVITY.
- Fin 2010, le LESIA a transformé un laboratoire vétuste (bât. 18) en laboratoire "semi-propre" pour offrir un laboratoire indépendant à la R&D ŒIL qui valide aujourd'hui un prototype de couplage entre l'Optique Adaptative et l'Optical Coherent Tomography plein champ pour analyser la rétine de l'œil.
- Début 2011, le LESIA a transformé un laboratoire vétuste (bât. 14) en laboratoire "semi-propre" pour le développement d'un nouveau concept d'optique adaptative ; ce démonstrateur CANARY servira pour préparer l'instrument EAGLE de l'ELT (un spectromètre multi objet avec une optique adaptative dans chaque petit champ) pour l'étude des formations de galaxies lointaines (z=0.5 à 6).
- En 2011, le LESIA a financé le remplacement de l'armoire électrique de la salle blanche du bâtiment 16 qui sert pour le stockage des puces électroniques de vol et les premières maquettes.
- Avec l'achat d'un conteneur informatique climatisé par l'Observatoire de Paris et l'installation en 2012 sur le site de Meudon, le LESIA regroupe 75% de son potentiel informatique dans ce conteneur et dans la salle annexe au bâtiment 15.

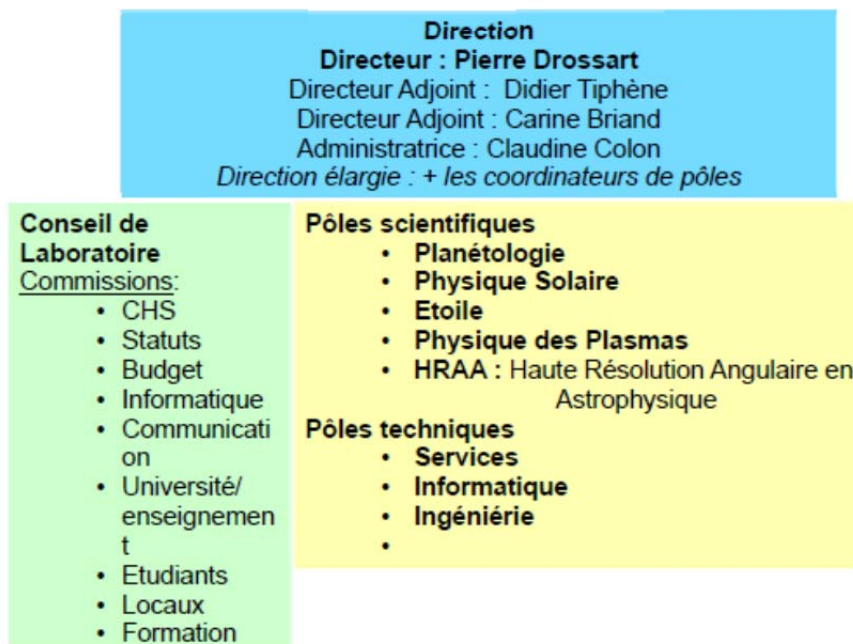
Des actions ciblées ont été menées pour regrouper les agents (chercheurs ou ITA) travaillant sur des sujets communs ; exemple, le LESIA a récupéré les bureaux au 1^e étage du bâtiment 15 pour y installer l'équipe logiciel embarqué. Cette activité est récurrente.

2. Organigramme

Organisation du LESIA (Version 2010)

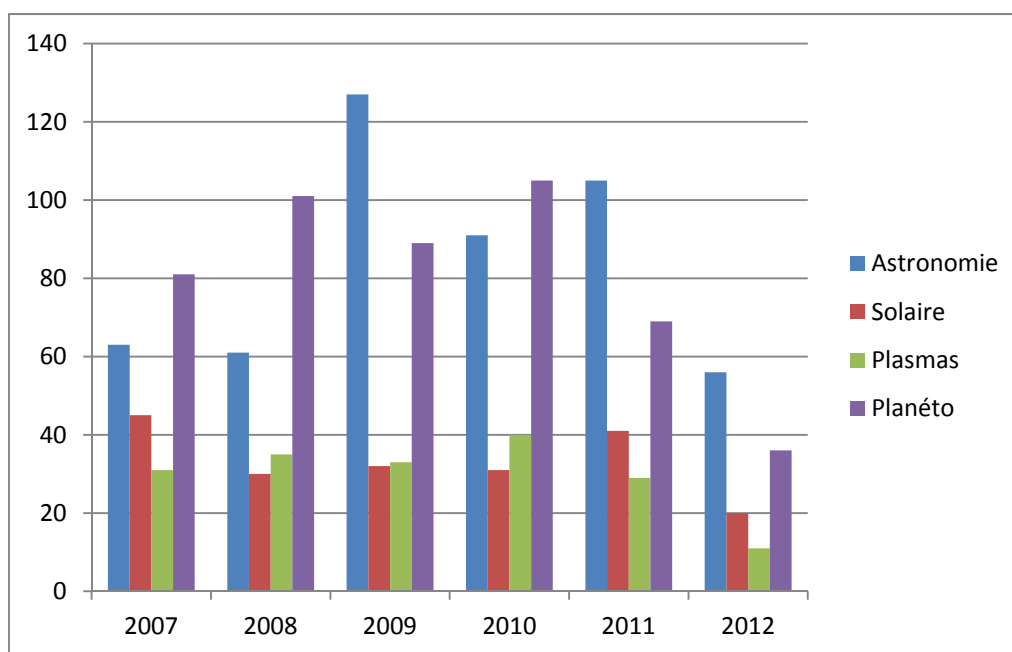


Organisation du LESIA (Version 2012)



3. Liste des publications

La production scientifique du LESIA représente en moyenne 250 publications à comité de lecture par an. Les publications sont gérées dans un outil de gestion interne au laboratoire PUBLIESIA, qui permet de valider les publications entrées par les auteurs. Des synchronisations avec les bases de données du CNRS (HAL) ou de l'Observatoire (en projet) sont également prévues. L'accès aux publications validées est disponible sur le site <http://lesia.obspm.fr/-Publications-.html> (accessible au public) ; les options de sélection plus fines sont accessibles de l'intranet du laboratoire.



Le taux de publication est grosso modo proportionnel aux effectifs des pôles ; des fluctuations d'année en année suivent les résultats de missions spatiales (Corot en 2009 pour le pôle Astronomie ou missions planétaires entre 2008-2010).

L'extraction réalisée en annexe (Annexe 6) reprend la répartition en catégories demandées par les évaluateurs :

- ACL : publications à comité de lecture
- ACT : Communications publiées
- COM : Communications non publiées
- INV : Communications invitées
- AFF : Affiches ou posters
- OV : Vulgarisation
- OSC : Ouvrages ou chapitres d'ouvrages
- AP : Autres publications

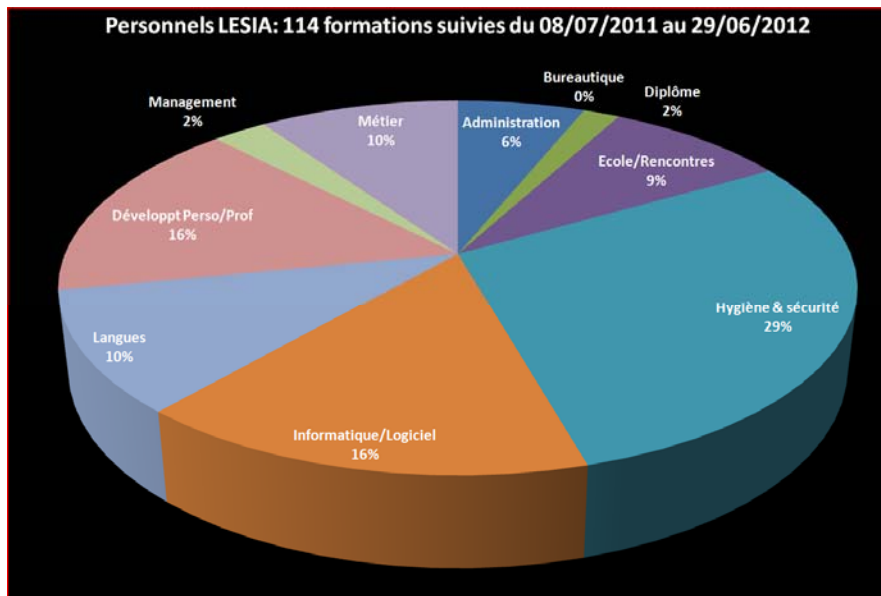
L'extraction a été effectuée en septembre 2012 – des références sur les communications publiées peuvent manquer, ainsi que les publications 2012 les plus récentes. Les références sont extraites par ordre de date, les plus récentes en premier.

Annexe 1: Formation permanente

La formation permanente est organisée sous l'égide d'une commission permanente du Conseil de Laboratoire qui comprend trois membres : un correspondant et responsable des mises en ligne sur le site, une adjointe et gestionnaire des missions et un directeur-adjoint assurant la liaison avec la direction.

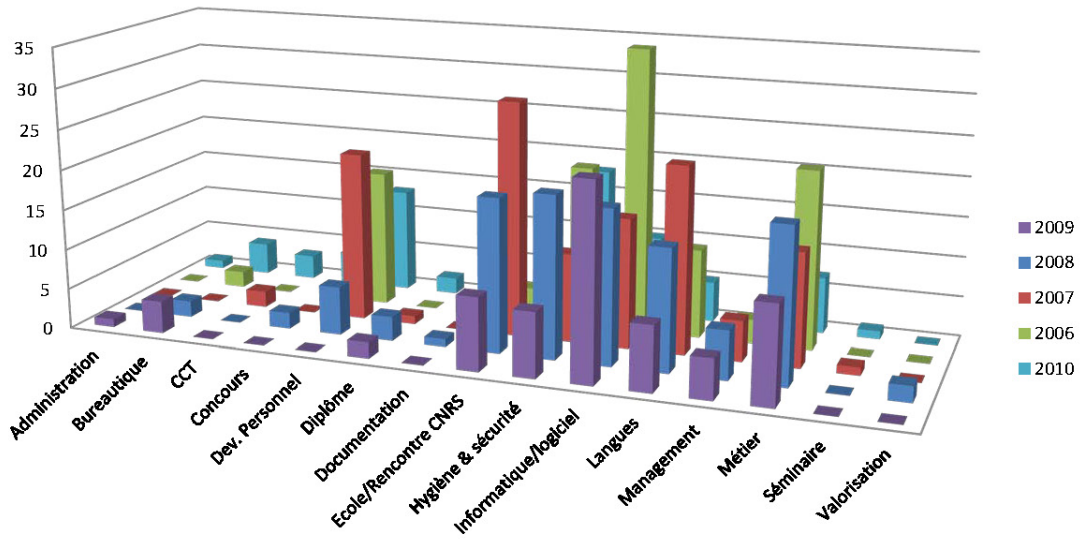
La formation permanente est en relation avec les tutelles du LESIA (CNRS et Observatoire mais aussi tutelles universitaires Paris 6 et 7). L'organisation des inscriptions en ligne sur l'administration du LESIA permet une gestion conviviale des demandes. Un point particulier sur la formation concerne les questions Hygiène et Sécurité qui sont décrites en Annexe 2. Les formations aux techniques spécifiques (par exemple Techniques & Technologies des Véhicules Spatiaux du CNES) sont proposées aux jeunes ingénieurs des projets spatiaux.

Le bilan des formations sur 2011/2012 montrent 66 formations suivies sur 18 mois :

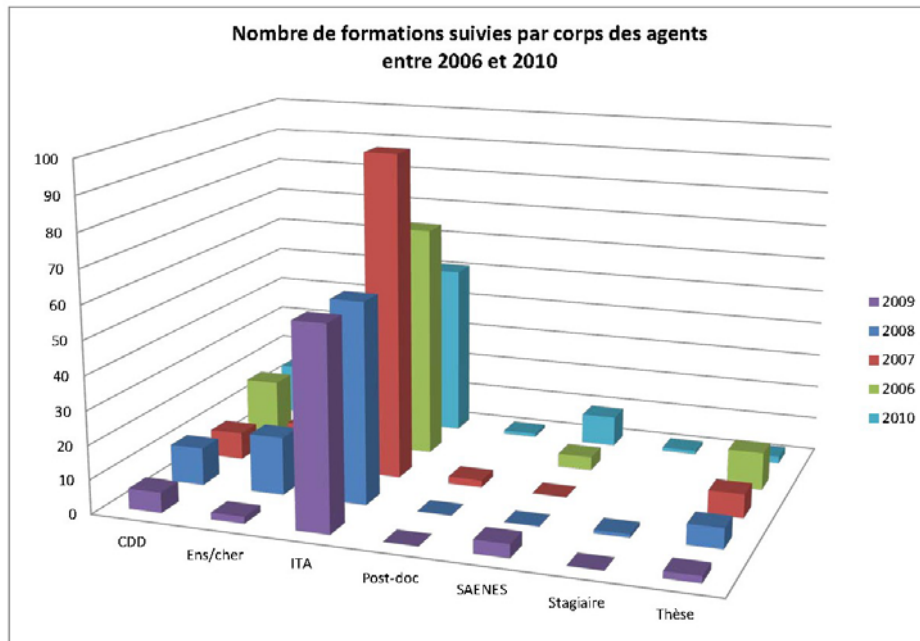


Un bilan exhaustif sur 5 ans est donné dans les diagrammes ci-dessous

**Nombre de formations suivies par nature des formations
entre 2006 et 2010**



**Nombre de formations suivies par corps des agents
entre 2006 et 2010**



Les besoins en formation sont estimés par une enquête générale au laboratoire (dernière en date en juin 2012)

Annexe 2 : Document Hygiène et Sécurité

Les questions d'Hygiène et Sécurité (H&S) s'imposent à tous dans un laboratoire, et sont sous la responsabilité directe du directeur de laboratoire. Un document mis à jour annuel, le Document Unique, est transmis aux tutelles pour compléter leur propre documentation. Il comprend trois parties

1. - Présentation générale
2. - Inventaires des risques
3. - Programme annuel d'action

Ce document est discuté lors des visites de prévention annuelle incluant les tutelles, et les actions prises sont détaillées lors de ces visites, ainsi que les accidents du travail déclarés. Ces actions sont définies en discussion constante avec les services de l'Observatoire. Parmi les actions futures, il a été décidé de mettre en ligne (intranet) les cahiers d'incidents, peu utilisés, ce qui permettra une centralisation plus facile des incidents mineurs.

Les aspects formation sont soutenus dans le domaine H&S par le LESIA (formation de secouristes, nomination d'un Agent de Prévention (AP) responsable par bâtiment (avec quelques regroupements dus à la dispersion des bureaux du LESIA).

Liste des actions menées pendant le quadriennal 2010-2013 par la commission hygiène et sécurité composée de 4 agents :

- action sur le risque laser : les lasers sont répertoriés en fonction de leur classe. Un ingénieur laser a été nommé ; des actions sont en cours pour appliquer la nouvelle réglementation ;
 - action sur le travail isolé : achat de 15 PTI qui sont à demeure dans les salles isolées ou à risque ;
- action spécifique pour les observateurs solaires qui effectuaient seul leur tâche pendant le week-end. La présence d'une personne d'astreinte est assurée pendant les activités jugées à risque ;
- identification des matériels dangereux (lasers, utilisation N₂ liquide, palans) et formation des agents
- identification des produits dangereux pour les regrouper et faciliter le contrôle et le stockage ;
- rédaction du document unique ;
- réunion annuelle avec les ingénieurs sécurité et des médecins du travail des tutelles (Observatoire de Paris et CNRS) ;
 - exercices annuel d'évacuation incendie réalisés depuis 2012 ;
- contrôle bi-annuel de la surveillance O₂ dans la salle blanche PERSEE à cause des risques N₂ liquide.
- rénovation (électricité, réseau informatique et peinture) d'une vingtaine de bureaux ; de même pour l'atelier mécanique du bâtiment 16 avec mise aux normes des sécurités électriques ; installation d'un récupérateur de vapeurs d'huile ;
 - campagne d'installation de stores (~50) dans les bureaux.

Annexe 3 : Démarche Qualité au LESIA

La démarche qualité au LESIA repose sur deux axes :

- Qualité sur la totalité du laboratoire, avec un Référent Assurance Qualité (un poste permanent est ouvert au concours en 2012)
- Qualité dans les projets spatiaux, avec le soutien de responsables assurance produit, ouverts sur des postes de consultants-prestataire

Ces deux démarches rentrent dans le cadre d'un marché INSU/BTS.

Un manuel qualité spécifique au LESIA est en cours de réalisation (fin 2012) à partir des manuels génériques

Parmi les actions en cours, on notera :

- Les processus de fabrication (atelier mécanique)
- La gestion des non conformités projets et laboratoire
- La mise en place d'un logiciel de gestion de la documentation
- La définition des interactions entre RAP/RAQ et direction

Annexe 4 : Règlement intérieur et statuts du LESIA

Voir documents en fichier séparé

Une évolution et un toilettage des documents constitutifs du LESIA (règlement intérieur et statuts) est en cours. Rappelons que les statuts du LESIA, déterminant le fonctionnement du LESIA en tant que département de l'Observatoire de Paris, sont discutés et votés en Conseil d'Administration de l'Observatoire. Le règlement intérieur définit les règles de fonctionnement interne au laboratoire et est défini au niveau du Conseil de Laboratoire Il adapte les dispositions relevant des différentes tutelles (Observatoire et CNRS en particulier), certaines règles devant être discutées. En particulier les statuts différents des personnels entraîne des disparités (volume horaire, adaptation des CET, etc.). Ces modifications sont étudiées par la Commission « statuts » du Conseil de laboratoire, et négociées avec la Délégation Régionale du CNRS (DR5) et l'Observatoire (Présidence et Conseil).

Annexe 5 : Liste d'acronymes

Voir document en fichier séparé

Annexe 6 : Liste de publications

Voir document en fichier séparé