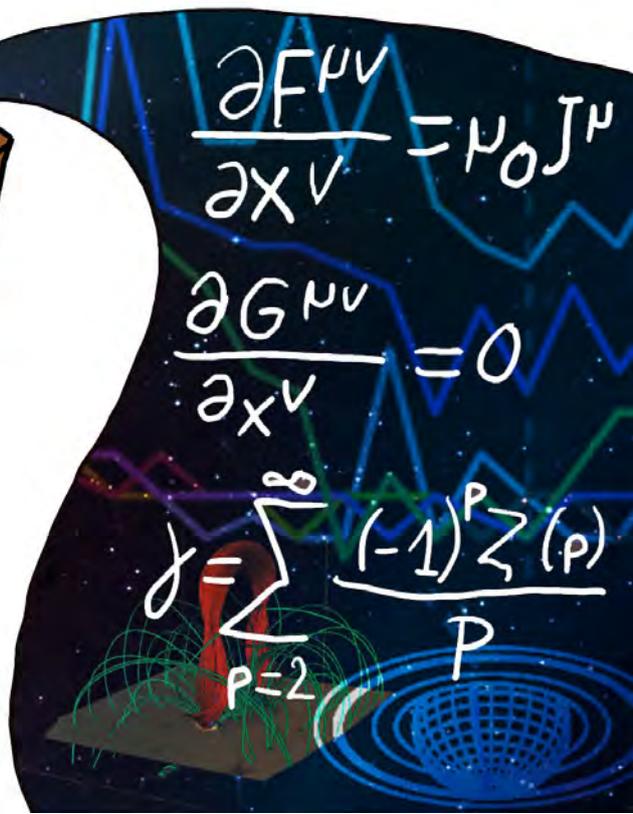
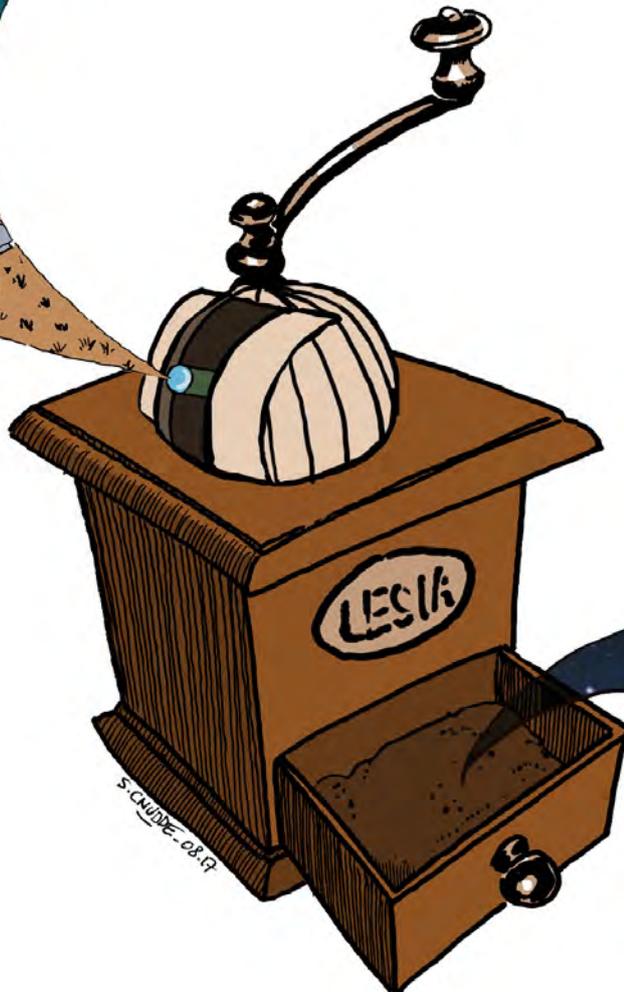


HCERES Vague D
Dossier d'autoévaluation
2017



Vague D
Campagne d'évaluation 2017 - 2018

Unité de recherche
LESIA
Dossier d'autoévaluation

Informations générales

Nom de l'unité : Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique
Acronyme : LESIA
Champ de recherche de rattachement : néant
Nom du directeur pour le contrat en cours : Pierre DROSSART
Nom du directeur pour le contrat à venir : élection par le Conseil de Département en janvier 2019

Type de demande :

Renouvellement à l'identique Restructuration Création ex nihilo

Établissements et organismes de rattachement :

Liste des établissements et organismes tutelles de l'unité de recherche pour le contrat en cours et pour le prochain contrat (tutelles).

Contrat en cours :		Prochain contrat :
- Observatoire de Paris		- Observatoire de Paris
- CNRS		- CNRS
- Université Pierre et Marie Curie		- Sorbonne Université
- Université Paris Diderot		- Université Paris-Diderot

Choix de l'évaluation interdisciplinaire de l'unité de recherche ou de l'équipe interne :

Oui Non

SOMMAIRE

Résumé	1
Summary	1
E0. PRÉSENTATION GENERALE DU LESIA	3
Présentation de l'unité	4
1. Evolution des effectifs.....	4
2. Relation avec les tutelles	6
3. Localisation du laboratoire	6
4. Le labex ESEP et les relations du LESIA avec PSL	7
5. Communication et structures de décision :	8
Bilan Scientifique et produits de recherche.....	8
Organisation générale du laboratoire	11
1. Pôles scientifiques	11
2. Pôle technique.....	12
3. Pôle administratif et budget	15
Vie du laboratoire	15
1. Actions statutaires et commissions du Conseil de Laboratoire du LESIA	16
2. Echanges avec les tutelles et partenaires.....	17
3. Formation et enseignement	17
4. Actions Nationales d'Observation	18
5. Relations avec d'autres laboratoires (national/international).....	18
Analyse SWOT du laboratoire	20
Stratégie scientifique	21
1. Grands projets	21
2. Paris Astronomical Data Center (PADC).....	22
3. EUROPLANET	22
4. Stratégie scientifique par pôles.....	23
5. Equipes transverses	23
Conclusion et perspectives stratégiques	26
E1. Pôle Etoile	28
PRÉSENTATION DU PÔLE ETOILE	28
1. Composition en équipes	28
2. Tableau des effectifs et des moyens	28
3. Profil d'activité.....	28
Bilan scientifique, produits et activités de recherche	29
1- De CoRoT à PLATO:	29
2 - Granulation et convection	30
3 - Caractérisation sismique d'ensembles d'étoiles; 'exportation' de l'information sismique à d'autres communautés/thématiques scientifiques	30
4 - Les champs magnétiques des étoiles chaudes et les nouvelles familles d'étoiles magnétiques.....	30
Faits Marquants	31
Rotation et transport de moment angulaire	31
Analyse SWOT du pôle ETOILE	32
Projet scientifique à cinq ans du pôle	32
1-Physique stellaire/sismologie: préparation PLATO (exploitation CoRoT, Kepler, K2, TESS, Gaia, ...) / thématiques concernées: Rotation, Convection, Interaction des systèmes étoile-planète(s).....	32
2-Extension du domaine d'application de l'outil sismologie à des thématiques et communautés scientifiques connexes :	34
3-Champ magnétique au-delà du visible: Etude du champ magnétique stellaire et circumstellaire	34
E2. Pôle HRAA (Haute Résolution Angulaire en Astrophysique)	36
Présentation du Pôle HRAA	36
1. Introduction	36
2. Composition en équipes	36
3. Tableau des effectifs et des moyens	36
4. Politique scientifique	37
5. Profil d'activité.....	37
6. Organisation et vie du pôle	37
Bilan Scientifique	37
1. Produits et activités de recherche du pôle	37
2. Données chiffrées	39
Faits marquants	39

Analyse SWOT du pôle HRAA	41
Projet scientifique à cinq ans du pôle	42
E3. Pôle Physique des Plasmas	45
Présentation du pôle de Physique des Plasmas	45
1. Composition en équipes	45
2. Effectifs	45
3. Profil d'activité	45
1. Produits (hors instruments)	46
Bilan scientifique	46
Faits marquants	49
Analyse SWOT du Pôle Plasmas	50
Projet à 5 ans du Pôle Plasmas	51
1. Vent solaire et milieu interplanétaire, plasmas hors héliosphère	51
2. Magnétosphères terrestre et planétaires	51
3. Prospectives spatiales et radioastronomie sol	52
E4. Pôle Physique Solaire	53
Présentation du pôle de Physique Solaire	53
1. Introduction	53
2. Composition en équipes	53
3. Tableaux des effectifs et des moyens	53
Bilan scientifique	53
1. Thème 1 : Formation et structuration des champs magnétiques solaires	54
2. Thème 2 : Phénomènes éruptifs et accélération de particules	54
3. Thème 3 : Perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace (équipe transverse)	54
4. Produits	55
Faits marquants	55
Analyse SWOT du pôle Solaire	58
Projet scientifique à cinq ans du pôle Solaire	58
E5. Pôle Planétologie	60
Présentation du Pôle Planétologie	60
1. Introduction	60
2. Composition en équipes	60
3. Tableau des effectifs et des moyens	60
4. Profil d'activité	60
Bilan scientifique et faits marquants	60
1. Science cométaire	60
2. Astéroïdes Géocroiseurs	62
3. Astéroïdes primitifs et processus d'altération de surface	62
4. Objets Transneptuniens et Centaures	62
5. Planètes naines	63
6. Planètes telluriques	63
7. Planètes géantes et satellites	63
8. Exoplanètes	64
Analyse SWOT du pôle Planétologie	65
Projet scientifique à cinq ans du pôle Planétologie	65
1. Petits corps primitifs : missions de retour d'échantillon OSIRIS-REX et HAYABUSA 2	65
2. MARS : surface et atmosphère	65
3. MERCURE/BEPICOLOMBO	66
4. JUPITER ICy moons Explorer (JUICE)	66
5. Grands observatoires au sol et dans l'espace	66
6. Exoplanètes	67
Annexe A : ACRONYMES	68
Annexe B : Références citées dans la table des faits marquants (page 15)	70
Annexe 1 : Lettres de mission	73
Annexe 2 : Liste d'équipements	80
Annexe 3 : Organigrammes	83
Annexe 4 : Liste des produits de recherche	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition H/F et pyramide des âges (tous personnels permanents et non-permanents)	5
Figure 2 : Les établissements de tutelles du LESIA	6
Figure 3 : Les IDEX/COMUE auxquels est rattaché le LESIA	6
Figure 4 : Localisation des équipes du LESIA sur le site de l'Observatoire à Meudon	7
Figure 5 : Répartition des publications entre pôles scientifiques	8
Figure 6 : <i>Organigramme général du LESIA</i>	11
Figure 7 : Relations entre pôles et équipes transverses	12
Figure 8 : <i>Organigramme du pôle technique</i>	13
Figure 9 : Interactions du pôle technique avec les pôles scientifiques. En trait plein, les projets en développement ou en exploitation, en pointillés la R&T	14
Figure 10 : Répartition par domaine et par pôle des projets du LESIA exprimés en ETP : en plus foncé les personnels BAP C (instrumentation), en plus clair l'informatique (BAP E et F)	15
Figure 11 : <i>Administration et budget du LESIA</i>	15
Figure 12 : Mesure sismique de la rotation du coeur des géantes rouges montrant le ralentissement au cours de l'évolution	32
Figure 13. <i>Images du disque d'AU Mic, obtenues avec HST/STIS et SPHERE/IRDIS entre 2010 et 2014 (fov = 13''x1.5''). Les structures qui s'écartent du plan médian sont notées de A à E. Le déplacement est visible entre 2010 et 2014.</i>	40
Figure 14. Gauche : Image résolue dans le visible de la photosphère de Bételgeuse. Droite : Carte du taux de polarisation en bande R. Cercle en pointillés rouges : taille de la photosphère mesurée par interférométrie en IR. Cercle jaune : taille de la coquille partielle de poussière (3 rayons stellaires)	40
Figure 15. Résultats obtenus sur l'étoile S2 au centre galactique : visibilités et clôtures de phase.	41
Figure 16 Observations des nanopoussières par Stereo	49
Figure 17 Modèle de vortex (distribution du courant à gauche) dont les caractéristiques sont compatibles avec les mesures in situ du champ magnétique enregistrées par la sonde Wind (profils temporels à droite)	49
Figure 18 : Combinaison de simulations ExPRES/SERPE et des observations des sondes Voyager et Cassini	50
Figure 19 : Hélicitogrammes 3D appliqués à trois types de données, modèle théorique, simulation numérique et reconstruction du champ magnétique observée d'une région active solaire éruptive.	56
Figure 20 : Exemple d'une corde magnétique torsadée dans la couronne solaire (en noir), au moment où la partie la plus élevée de sa ligne de champ axiale (en jaune) passe le seuil d'instabilité de la corde, à l'altitude du plan en vert	56
Figure 21 : Comparaison de la distribution du champ magnétique (niveau de gris) et des courants électriques (points orange et bleue) mesurée à partir des données HMI/SDO avec l'émission X (isolignes jaunes, vertes et cyan) observée avec RHESSI lors d'une éruption solaire de classe X.	57
Figure 22 Diagnostic multi-instruments et multi longueurs d'onde de l'accélération de particules énergétiques lors d'une éjection de masse coronale. Données du satellite GOES et du San Vito Solar Observatory (flux X et radio du bas), du NRH (images radio centrales), ainsi que de NDA et de WAVES/WIND (spectres radio du haut)	57
Figure 23 : <i>Changement de la pente spectrale du noyau de la comète 67P entre deux observations espacées d'un an. La diminution de la pente spectrale indique un enrichissement superficiel en glace d'eau proche du périhélie (E5-16)</i>	61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Evolution annuelle des personnels sur la période 2007-2017	4
Tableau 2: <i>Tableau synthétique des effectifs</i>	4
Tableau 3 : Produits de la recherche (détails dans l'Annexe 4)	9
Tableau 4 : Sélection de faits marquants scientifiques du LESIA	10
Tableau 5 : Relations du LESIA avec les laboratoires en France	19
Tableau 6 : <i>relations internationales du LESIA</i>	19
Tableau 7 : <i>Analyse SWOT du laboratoire</i>	20
Tableau 8 - <i>Effectifs du pôle Etoile</i>	28
Tableau 9 Moyens du pôle Etoile (2012-17)- Cf Annexe 4	28
Tableau 10 : <i>Analyse SWOT du pôle Etoile</i>	32
Tableau 11 -Effectifs en personnel permanent au 09/2017	36
Tableau 12 - Effectifs en personnel temporaire au 07/2017	36
Tableau 13 - <i>Analyse SWOT du pôle HRAA</i>	41
Tableau 14 - <i>Effectifs du pôle plasma en juin 2017</i>	45
Tableau 15 - <i>Produits et activités de recherche</i>	46
Tableau 16 - <i>Analyse SWOT du pôle plasma</i>	50
Tableau 17 - <i>Effectifs</i>	53
Tableau 18 - <i>Moyens sur la période 2012-2017</i>	53
Tableau 19 Produits et activités de recherche (par ordre alphabétique)	55
Tableau 20 - <i>Analyse SWOT du pôle Solaire</i>	58
Tableau 21 - <i>Effectifs du Pôle Planétologie</i>	60
Tableau 22 - <i>Analyse SWOT du pôle Planétologie</i>	65

Résumé

Héritier du laboratoire spatial de l'Observatoire de 1963 spécialisé en physique des plasmas, et irrigué des apports successifs en planétologie, astronomie infrarouge, physique stellaire et solaire, le LESIA compte parmi les premiers laboratoires d'instrumentation spatiale et sol dans le domaine de l'astrophysique. Le LESIA a produit dans le dernier quinquennal de multiples résultats avec de nombreux instruments sur les plus grands télescopes (CFHT, VLT, VLTI) et sondes spatiales (STEREO, Rosetta, Mars & Venus Express, COROT, etc.). Ces résultats récents (SPHERE/VLT, Gravity/VLTI, Rosetta, Cassini, Juno), ainsi que ceux, remarquables, en simulation magnétohydrodynamique du Soleil ou du milieu interplanétaire, confirment la forte dynamique du laboratoire. Le LESIA compte 134 permanents (chercheurs et ingénieurs à parts égales), 280 publications par an, des contributions dans les principaux organes de la recherche en France et en Europe. La structure du laboratoire et la combinaison des équipes chercheurs/ingénieurs est particulièrement importante pour un laboratoire d'instrumentation, et contribue à la qualité des réalisations. L'implication dans les projets futurs est très contrainte par les grandes missions des agences internationales, et un positionnement dans les missions M4/ESA est attendu prochainement qui définira pour partie l'engagement du LESIA. En même temps, une politique active de soutien à la R&D et aux projets innovants permet de garder au laboratoire l'agilité nécessaire pour s'insérer dans de nouveaux projets (nanosatellites, calculateurs temps réel pour l'optique adaptative, futurs instruments). Un apport important à cette stratégie provient du soutien du laboratoire d'excellence ESEP coordonné par le LESIA. Le LESIA est déjà engagé dans le prochain quinquennal avec plusieurs projets au long cours, et saura s'adapter aux futures opportunités dont certaines à l'ESA seront décidées dès la fin 2017. Le LESIA présente aujourd'hui une dynamique reposant sur les projets livrés ou en construction, qui alimenteront la production scientifique des prochaines années, et sur ses capacités à développer de nouveaux projets. L'esprit du laboratoire, qui résulte de la combinaison entre un savoir-faire instrumental et des avancées scientifiques à long terme trouvera largement à s'épanouir dans le contexte de l'astrophysique des prochaines années.

Summary

LESIA is one of the first rank laboratory in space and ground-based instrumentation in Astrophysics. In heritage of the first space laboratory in Paris Observatory in 1963 in Plasma Physics, it accreted successively teams in Planetology, Stellar and Solar Physics. In the last five years, many results were obtained from LESIA instrumentation in the large telescopes in the world (CFHT, VLT, VLTI) as well as space missions (STEREO, Rosetta, Mars & Venus Express, COROT, etc.). The structure of the laboratory and the parity research scientists/engineers is essential for this kind of laboratory, and contributes to the quality of the results. Recent results (SPHERE/VLT, Gravity/VLTI, Rosetta, Cassini, Juno) confirm this dynamics, together with numerical simulations having produced first rank results in MHD on the Sun. LESIA has 134 permanent positions (research scientists and engineers, equally), 280 refereed publications per year, and contributes to many science organization in France and outside. The involvement in future projects is constraint by the large missions of international agencies. Nevertheless, a proactive politics for support of R&D and innovative projects allows LESIA to keep the needed agility to postulate to new projects, as nanosatellites, RTC calculators for adaptive optics or future instruments. An important input in this strategy comes from the support of the Laboratoire d'Excellence ESEP, acting under LESIA coordination. LESIA is already engaged for the next quinquennial program in several projects, and will adapt to the selection by ESE of a new M4 mission at the end of 2017. LESIA presents today a dynamics, supported by previously delivered or under construction instruments, which will feed the scientific production for several years, as well as its capacity to develop new projects. The essence of the laboratory results from a combination between an instrumental know-how and scientific vision in the long term. LESIA will have many opportunities to expand in the context of the astrophysics of the future years.



EO. PRÉSENTATION GENERALE DU LESIA

Le Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique, créé en 2002 lors de la restructuration des départements de l'Observatoire à partir de la réunion de différents laboratoires en physique spatiale, solaire et cométaire, est spécialisé dans la conception, la réalisation, l'exploitation d'instruments sol et espace, ainsi que dans la modélisation des observations astrophysiques ainsi obtenues. La large couverture en objets astrophysiques étudiés (Soleil, étoiles, planètes et petits corps, plasmas, exoplanètes, avec quelques incursions vers les galaxies ou objets compacts et diverses applications), ainsi que l'implication dans toutes les étapes de la conception à l'exploitation instrumentales tant au sol que dans l'espace donne au LESIA des compétences uniques et recherchées au niveau national ou international.

Le LESIA est l'héritier de filières de recherche prestigieuses à l'Observatoire de Paris :

- Techniques spatiales : plus de cinquante ans de recherches spatiales avec la fondation par Jean-Louis Steinberg (1963) de la recherche spatiale à l'Observatoire de Paris
- Planétologie spatiale : Michel Combes et Daniel Gautier (1975)
- Astronomie infrarouge et de l'optique adaptative sous l'impulsion de Pierre Léna (décennie 1980 et suivantes)
- Astronomie stellaire, avec la mission Corot menée à l'instigation d'Annie Baglin (1990-2016)
- Astronomie solaire fondée à Meudon par Jules Janssen (depuis 1876 !).

Cet héritage oblige à un constant renouvellement des techniques pour poursuivre les recherches à leur plus haut niveau, et aussi à faire évoluer les domaines de compétence que font vivre les membres du LESIA.

Les questions astrophysiques abordées sont nombreuses au LESIA et seront détaillées dans les sections suivantes, mais la démarche est au départ de chaque nouvelle expérience la même, celle du physicien : quel instrument permettra d'obtenir la réponse à telle ou telle question scientifique, et comment combiner les ressources dans et hors du laboratoire pour mener à bien cette nouvelle expérience et en tirer des découvertes en astrophysique.

La structuration même du laboratoire et sa sociologie, équilibrée entre chercheurs et ingénieurs/techniciens, permettent cette synergie nécessaire dans toute démarche de physique expérimentale moderne. La longue période de développement entre conception et exploitation des instruments structure fortement le laboratoire. La prospective est donc très contrainte par les projets en cours ou soumis à sélection, le défi étant de garder assez de ressources pour préparer par des actions de Recherche et Développement les projets futurs, et en laissant de l'espace pour les petits projets, riches en inventivité.

Aujourd'hui, l'unité du laboratoire et son originalité, son essence pourrait-on dire, se trouve, par-delà les spécificités des pôles, dans la synergie entre développements instrumentaux et objectifs scientifiques. Cette synergie, qu'on retrouve dans les équipes intégrées par projets associant scientifiques, ingénieurs et techniciens, ne se limite pas à la chaîne <spécifications scientifiques => spécifications techniques => réalisation technique => dépouillements et interprétation> mais fait intervenir des boucles d'itération entre les étapes, permettant les optimisations des instrumentations avant leur réalisation. Même si le LESIA dispose de compétences instrumentales uniques dans quelques domaines (récepteurs radios spatiaux, calculateurs temps réel pour l'optique adaptative, etc.), le savoir-faire en intégration système est l'une des grandes richesses du laboratoire, reconnue au niveau international où le LESIA est recherché comme partenaire. La production scientifique au niveau de l'interprétation théorique n'est pas en reste, dans les spécialités qui seront présentées tout au long du document : turbulence plasma, hélicité magnétique en magnétohydrodynamique pour l'interprétation du magnétisme solaire, sismologie stellaire, transfert radiatif planétaire, pour n'en citer qu'une partie.



Présentation de l'unité

Nota : Le plan suit ici, dans la mesure du possible, le schéma proposé par le HCERES, le descriptif de l'organisation générale est donné dans la partie suivante.

1. Evolution des effectifs

L'effectif total du laboratoire comprend environ 250 personnes en incluant tous les personnels, y compris visiteurs longue durée, prestataires et apprentis, avec 134 permanents (à égalité entre chercheurs et ITA) qui forment l'ossature de l'encadrement des activités scientifiques et techniques du LESIA.

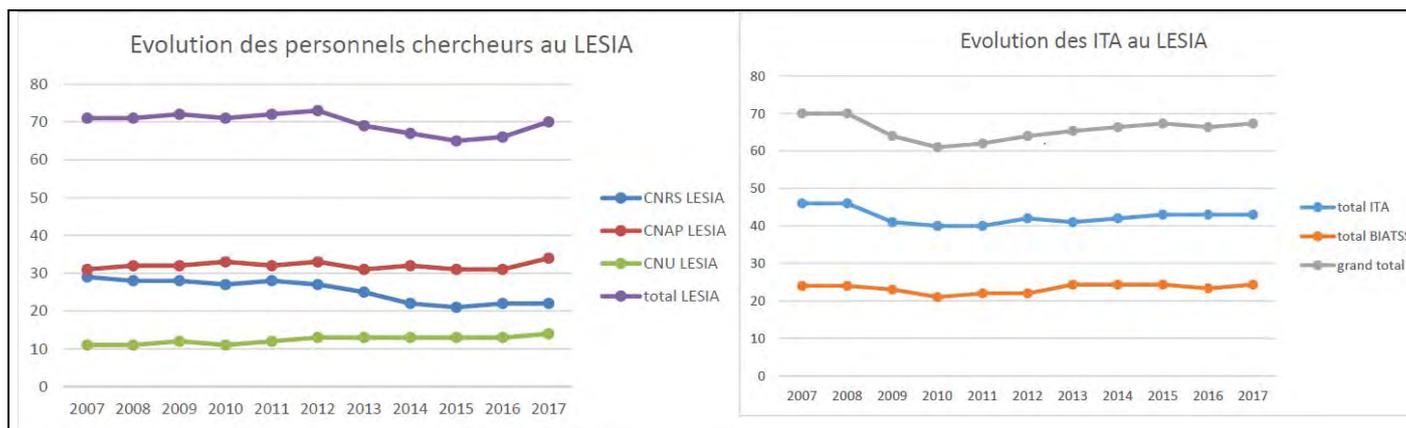


Tableau 1 : Evolution annuelle des personnels sur la période 2007-2017

Les variations annuelles sur la période 2007-2017 (Tableau 1) indiquent un maintien des effectifs tant ITA que chercheurs, avec cependant une baisse tendancielle du ratio CNRS vs CNAP et CNU côté chercheurs qui affecte la partie « recherche » en ETP du laboratoire. Le tableau général des effectifs ne présente pas de menace majeure sur le laboratoire dans le prochain quinquennal, en termes de pyramide des âges, mais un recrutement annuel moyen de l'ordre de deux chercheurs/an et de un ITA/an sera nécessaire pour maintenir les effectifs en fin de période quinquennale. Cependant, certaines activités dans les pôles scientifiques seront plus affectées par les départs prévisibles, et demanderont des actions lors du prochain quinquennal (voir analyse SWOT ci-dessous). L'évolution future (Tableau 2) laisse prévoir une baisse d'effectifs chercheurs qu'une augmentation maîtrisée du nombre de post-docs peut permettre de compenser, au prix d'une évolution du management des projets, reposant sur moins de permanents. Côté ITA, les menaces identifiées concernent plutôt des fragilités (un ou deux postes sur certaines activités, à la merci d'une mobilité ou d'un départ) que le montant global des ETP.

Personnel	CNRS	CNAP	CNU	Post-Doctorants	Doctorants	ITA	CDD
2013	25	31	13	15	30	65	19
2017	22	34	14	19	31	67	17
2023-permanents ¹	17	30	12			61	
2023-non permanents				20 à 25	Env. 30		Env. 20

Tableau 2 : Tableau synthétique des effectifs

¹ Date de départ en retraite estimée à 67 ans selon la limite d'âge actualisée de la fonction publique. Prévisions sans tenir compte de futurs recrutements



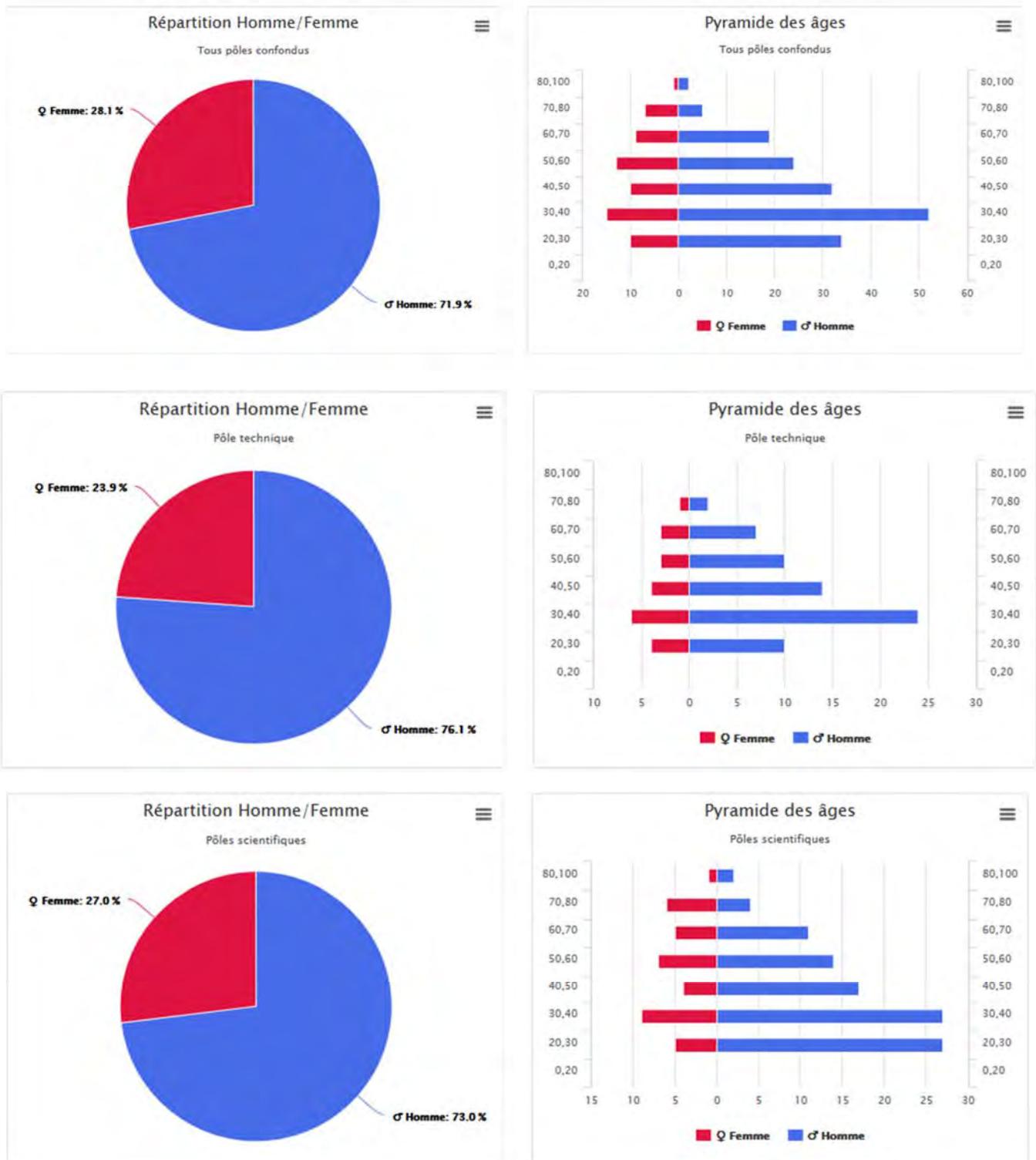


Figure 1 : Répartition H/F et pyramide des âges (tous personnels permanents et non-permanents)

La répartition en parité (30%/70% en répartition F/H), qui subit les tendances lourdes de la discipline, doit être améliorée, mais les moyens d'évolution au niveau du laboratoire sont faibles ; on notera cependant que le vivier des personnels postulant aux différents postes est aujourd'hui suffisamment paritaire pour permettre cette évolution. Le nombre de doctorants s'établit depuis plusieurs années autour de 30, soit une dizaine de nouvelles thèses par an ; cet équilibre, maintenu dans un contexte parfois tendu sur les contrats doctoraux en Ile-de-France, traduit l'attractivité du LESIA pour les nouveaux doctorants.



2. Relation avec les tutelles



Figure 2 : Les établissements de tutelles du LESIA



Figure 3 : Les IDEX/COMUE auxquels est rattaché le LESIA

Les documents statutaires du laboratoire et de ses établissements de tutelle établissent le fonctionnement du LESIA, à la fois département de l'Observatoire de Paris (régi par le décret 85-715 du 10/7/1985 et le règlement intérieur de l'Observatoire en date du 24/2/2017) et UMR du CNRS, avec ses tutelles universitaires UPMC et Paris-Diderot. Le règlement intérieur du laboratoire établit les règles de fonctionnement, en particulier le partage entre département/UMR : le conseil de laboratoire fait office à la fois de conseil de département et d'UMR, les prérogatives étant dans certains cas différentes, en particulier pour l'élection du directeur par le conseil de département. Le règlement intérieur du LESIA, récemment mis à jour (juillet 2017), a été soumis à toutes les tutelles pour validation. La convention de site PSL/CNRS signée à l'été 2017 reprend pour l'essentiel les dispositions des règlements intérieurs d'UMR CNRS. Le rôle du conseil de laboratoire s'exerce aussi au travers des diverses commissions qui permettent un dialogue de terrain avec la direction et les interlocuteurs clés des différents domaines ciblés (la liste des commissions est donnée dans la figure 6 avec l'organigramme général du laboratoire, et une partie de leurs activités est décrite dans la partie « Vie du laboratoire » ci-dessous). Intermédiaire entre la direction et le conseil de laboratoire, la direction élargie, dont le rôle est décrit dans le règlement intérieur, compte avec la direction les coordinateurs des pôles et débat des projets et des questions stratégiques du laboratoire, sur une base trimestrielle.

La question de la mise en place d'un conseil scientifique de laboratoire ressort régulièrement dans les discussions de prospective ou d'évaluation par le HCERES, et est discutée en interne à chaque séminaire de prospective. La proximité avec les instances de l'Observatoire rend compliquée l'interaction de trop nombreux conseils. La participation du LESIA aux conseils d'établissement, et en particulier au conseil scientifique (CS), nécessite en effet une coordination scientifique forte, assurée par un dialogue permanent entre CS, direction du LESIA et conseil de laboratoire, qu'un conseil scientifique de laboratoire pourrait rendre difficile. La structuration actuelle a été confirmée par le dernier séminaire de prospective du LESIA. Un effort est fait pour inclure des présentations scientifiques dans l'ordre du jour du conseil de laboratoire depuis plusieurs années. L'assemblée générale annuelle est également l'occasion de présenter au laboratoire la stratégie scientifique et son évolution.

Les relations avec les tutelles universitaires sont menées habituellement dans les conseils des UFR de Physique des deux établissements (UPMC et Paris-Diderot), ou pour les programmes importants avec les vice-présidences Recherche des établissements. Les personnels permanents du LESIA avec les deux universités sont au nombre de cinq pour chacune des deux universités concernées. L'implication du laboratoire va cependant bien au-delà de ses personnels, avec l'implication dans les séminaires ou actions de communication, les projets communs à plusieurs laboratoires, avec côté UPMC les relations du labex ESEP et du labex Plas@Par, côté Paris-Diderot avec le campus spatial et l'EIDD.

3. Localisation du laboratoire

Le LESIA est réparti sur dix bâtiments du site de Meudon. Même si la gestion administrative multi-bâtiments est rendue parfois un peu complexe, elle n'est pas considérée par les personnels comme un point bloquant. Le laboratoire poursuit une stratégie de regroupement des équipes visant à réduire leur dispersion et le nombre de bâtiments occupés. Beaucoup de relations passent en effet aujourd'hui par voie électronique, et nécessitent moins

de déplacements ; la gestion est répartie sur les deux principaux bâtiments (14 et 16). Une difficulté relève de la vétusté des bâtiments que le plan pluriannuel d'investissement de l'hébergeur (Observatoire de Paris) ne pourra améliorer que lentement, avec des travaux de réaménagement de bureaux très lents à mettre en œuvre. L'implication du LESIA pour le suivi des demandes se fait via la commission locaux dans les comités de site de l'Observatoire, un plan de regroupement des équipes autour de l'optique adaptative pour l'ELT étant encore seulement partiellement réalisé.

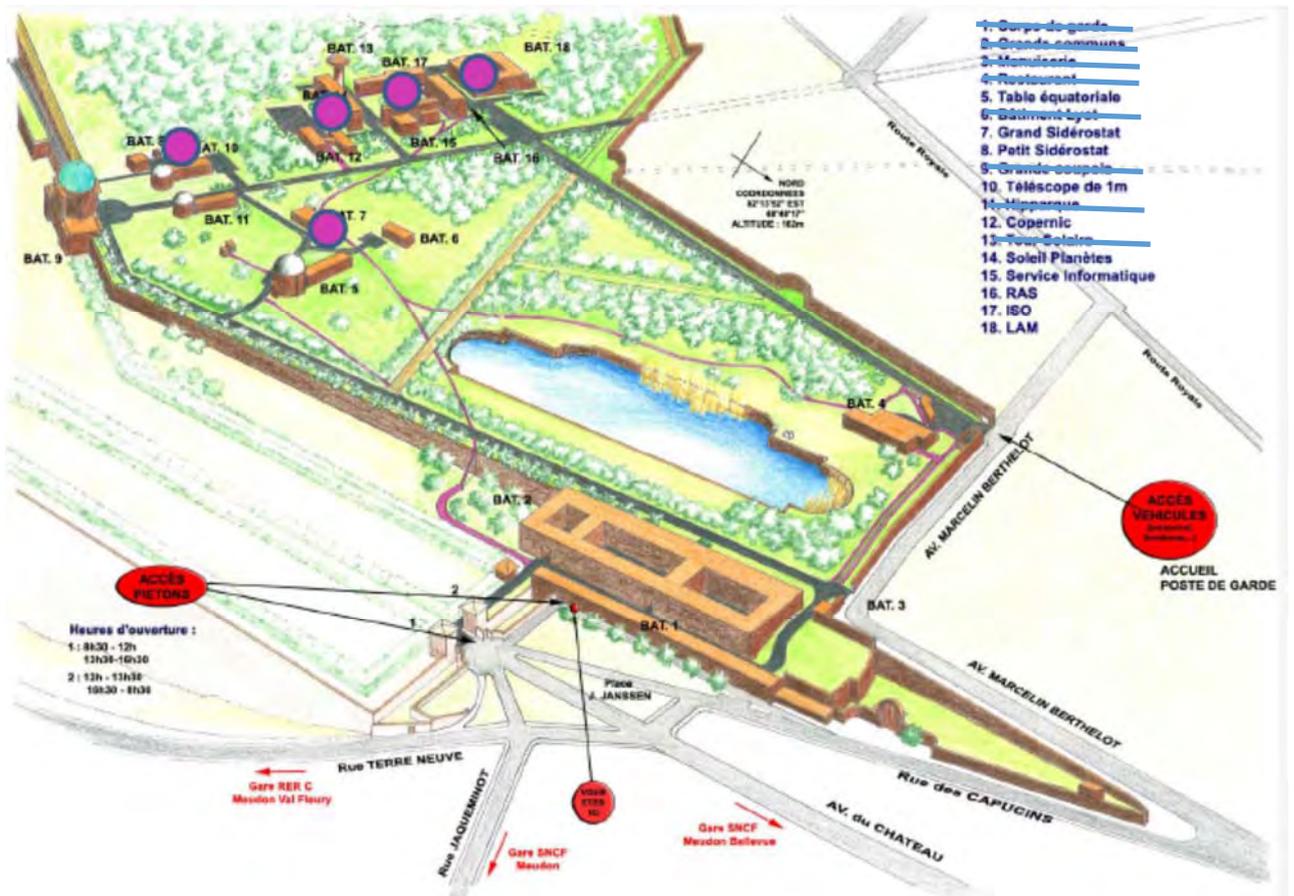


Figure 4 : Localisation des équipes du LESIA sur le site de l'Observatoire à Meudon

4. Le labex ESEP et les relations du LESIA avec PSL



Le Laboratoire d'Excellence ESEP (www.esep.pro) a été créé en 2010 et est porté par l'IDEX PSL, l'Observatoire de Paris en étant l'établissement porteur, et le LESIA le laboratoire coordinateur. P. Drossart est le directeur du labex. Construit comme un réseau de laboratoires impliqués dans la recherche spatiale (neuf laboratoires d'Ile-de-France et d'Orléans), son objectif premier de recherche est l'implication sur l'instrumentation spatiale, et l'amélioration de maturité technologique de prototypes en vue de futures missions. L'implication forte du LESIA dans ESEP a permis des bénéfices en termes de contrats doctoraux, post-doctoraux ou CDD dans les domaines d'activité du labex, ainsi qu'une visibilité parmi les actions structurantes de PSL, qui comprend 178 unités de recherche, mais seulement 16 labex. L'action clé portée par PSL depuis 2014 concerne la création d'un campus spatial (CCERES : cceres.univ-psl.fr) dédié au développement de projets de nanosatellites. Le LESIA s'y est fortement impliqué, en créant des synergies avec d'autres laboratoires, ce qui a permis l'avancement du projet de nanosatellite PICSAT du LESIA décrit plus bas. Dans les années à venir, il est proposé d'inclure le labex ESEP dans une Ecole universitaire de recherche dirigée par l'Observatoire de Paris (EUREQA) pour pérenniser ces activités spatiales en coordination avec les campus spatiaux d'autres sites parisiens.



5. Communication et structures de décision

Selon les statuts de l'Observatoire et le règlement intérieur du laboratoire, la direction est statutairement en charge de la conduite des activités du laboratoire. Les instances comprennent également la « direction élargie » incluant en plus de la direction, les coordinateurs de pôles scientifiques, technique et administration, qui est régulièrement informée des actions en cours. Le conseil de laboratoire, qui se réunit de 4 à 6 fois par an, comporte dans sa formation élargie comme invités les coordinateurs de pôles, mais aussi des représentants des tutelles. L'assemblée générale annuelle permet enfin à la direction de présenter à l'ensemble des personnels et de discuter les actions en cours, le bilan des projets par pôles et les éléments nouveaux des tutelles.

La question du choix de l'engagement du LESIA dans de nouveaux projets de grande ampleur est un problème central de la stratégie du laboratoire. La prospective du laboratoire, effectuée à chaque quinquennal (dernièrement en séminaire de prospective du 18 au 20 janvier 2017) permet de faire un tour d'horizon des projets envisagés par les équipes. L'implication du laboratoire est évaluée par le directeur technique en fonction des engagements en cours et une série d'options est alors présentée par la direction.

Les processus de définition de nouvelles missions au sein des agences sont sujets à des fluctuations, retards, annulations qui compliquent l'établissement des plans de charge prévisionnels. Une marge d'aléas est donc toujours gardée pour permettre la réactivité du LESIA à des opportunités nouvelles, l'insertion de petits projets, ou la montée en puissance d'actions de Recherche et Développement, en particulier en coordination avec le CNES.

Bilan scientifique et produits de recherche

Le bilan scientifique qui est présenté par les pôles dans les parties suivantes n'est pas répété ici. Seuls les aspects impliquant l'ensemble du laboratoire, ou les travaux transverses entre pôles sont soulignés ici, en particulier ceux des équipes transverses.

La liste des productions et activités scientifiques est détaillée dans l'annexe 4. Le LESIA a un taux de publications en revue à comité de lecture d'environ 280 à 300 par an.

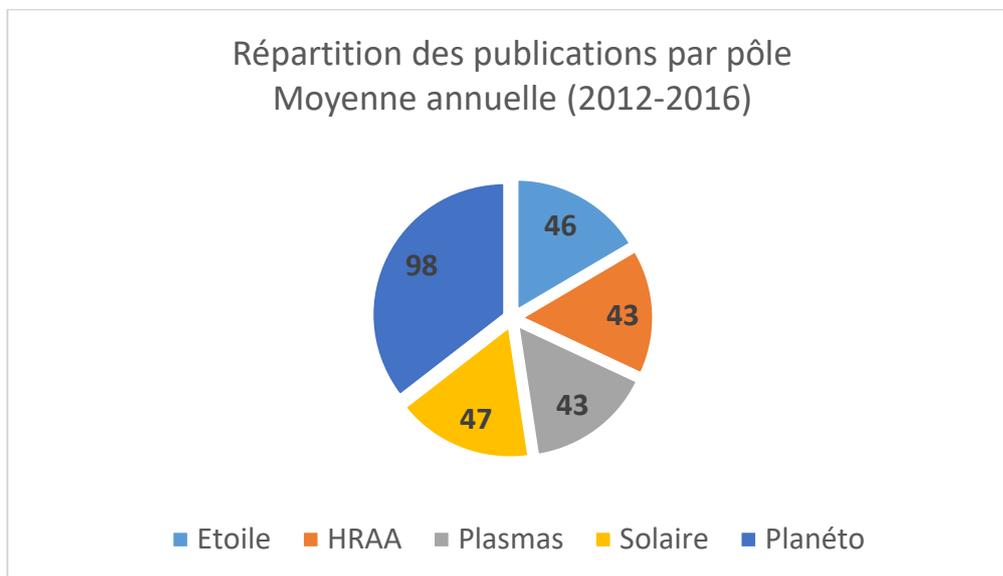


Figure 5 : Répartition des publications entre pôles scientifiques

Les produits de la recherche, décrits en détail pôle par pôle dans l'annexe 4 et dans le tableau « Données du contrat en cours » sont résumés dans le tableau ci-dessous. La production scientifique du LESIA appelle deux remarques :

- 1) En tenant compte du nombre de chercheurs par pôle, la répartition des publications est équilibrée, chaque pôle présentant des critères d'excellence remarquables, ce que montrera aussi le tableau des faits marquants. Cet équilibre scientifique entre pôles est garant de la stabilité des structures du laboratoire : le



succès aux contrats (ANR, Europe, etc.) permet aussi à chacun des pôles de contribuer au financement des activités du laboratoire via les répartitions des « overheads ».

- 2) La production ne se limite pas aux publications scientifiques, mais comprend également la fourniture d'instruments, des développements logiciels pour ces instruments, ainsi que des participations à expertise : le bilan du laboratoire doit aussi inclure ces éléments pour être complet.

PRODUITS DE LA RECHERCHE						
Equipes	TOTAL	E1	E2	E3	E4	E5
Effectifs recherche (permanents + post-docs +émérites)	97	15	21	16	14	31
Publications à comité de lecture (code ACL) EXTRACTION TOTALE 2012-mi 2017	1425	236	226	219	239	504
Publications à comité de lecture (code ACL) EXTRACTION 20% (cette annexe)	271	41	47	49	47	87
Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	24	2	2	5	1	14
Editions d'actes de colloques	3	1	0	1	1	0
Direction scientifique d'ouvrages	6	0	0	0	0	6
Développements instrumentaux et méthodologiques	18	2	8	2	3	3
Produits et outils informatiques, bases de données	47	7	7	4	10	19
Produits des activités didactiques	14	3	0	2	4	5
Produits destinés au grand public	163	8	17	22	86	30
ACTIVITES DE RECHERCHE ET INDICES DE RECONNAISSANCE						
Activités éditoriales	16	0	13	1	1	1
Activités d'évaluation	116	17	12	9	26	52
Activités d'expertise scientifique	10	1	4	1	2	2
Organisation de colloques/congrès	65	10	13	25	9	8
Post-docs et chercheurs accueillis	82	6	17	19	16	24
Interactions avec les acteurs socio- économiques	11	0	5	0	2	4
Contrats de recherche financés par des institutions publiques	56	5	19	11	14	7
Indices de reconnaissance (prix, distinctions)	29	5	4	1	10	9
Invitations colloques	206	24	12	32	41	97

Tableau 3 : Produits de la recherche (détails dans l'Annexe 4)

Les produits et activités de recherche sont détaillés dans l'annexe 4 et dans les présentations des pôles et ne sont pas répétés ici. Les faits marquants listés dans le tableau ci-dessous sont décrits en détail dans les parties des pôles scientifiques et ne seront donc pas répétés non plus. Ils couvrent tous les domaines d'activité du LESIA et concernent tant des actions de R&D que d'archivage de données acquises, à tous les stades de développement des différents projets. Chacun des pôles du LESIA présente un bilan en réalisations scientifiques de premier plan au niveau international, et contribue au rayonnement du laboratoire.



Pôle		Intitulé	Instruments, modèles	Réf. Interne	Références listées dans l'annexe B ²
E1 ETOILE	E1_1	•COROT Legacy Data and Legacy Book	COROT	E1-Bilan-1.	E1-1
	E1_2	Rotation et transport de moment angulaire	COROT, Kepler	E1_Bilan-3.	E1-2, E1-3, E1-4, E1-5, E1-6
E2 Haute Résolution Angulaire en Astrophysique	E2_1	•Démonstrateurs LTAO/MOAO	CANARY	E2-Bilan-3.	E2-1,E2-2
	E2_2	•Disques d'accrétions sur Au Microscopii •Image de la surface de Bételgeuse •Noyau actif de galaxie (NGC1068)	SPHERE/VLT	E2-Bilan-3.	E2-3, E2-4,E2-5
	E2_3	•Observations de Sgr A*	Gravity/VLTI	E2-Bilan-3.	E2, 6
E3 Physique des Plasmas	E3_1	Détection des nano-poussières par les récepteurs radio sur STEREO et Cassini	Stereo, Cassini	E3-Produits-3.	E3-1, E3-2
	E3_2	Turbulence « forte » dans le vent solaire	simulation numérique	E3-Produits-3.	E3-2, E3-4
	E3_3	Détection des émissions radio de Jupiter liées à Ganymède et Europe	Voyager Cassini, Nançay (NDA)	E3-Produits-3.	E3-5
E4 Physique Solaire	E4_1	•Hélicité magnétique dans les régions actives solaires	Modélisation analytique MHD, HDMI/SDO	E4-Bilan-5.	E4-1, E4-2
	E4_2	•Seuil de déclenchement des éruptions solaire	simulation numérique, CINES, MESOPSL	E4-Bilan-5.	E4-3
	E4_3	•Electrons énergétiques et courants électriques dans l'atmosphère solaire	HMI/SDO, RHESSI	E4-Bilan-5.	E4-4
	E4_4	•Observations radio et particules énergétiques dans l'espace interplanétaire	Nançay, Wind/Waves	E4-Bilan-5.	E4-5
E5 Planétologie	E5_1	•Observations du noyau et de la coma de la comète 67/P	Rosetta (VIRTIS, OSIRIS, etc.)	E5-Bilan-1.	E5-1 à E5-26
	E5_2	•Caractérisation physique des centaures et objets transneptuniens	VLT, Herschel	E5-Bilan-4.	E5-39, E5-40, E5-41
	E5_3	•Anneaux du centaure Chariklo observés par occultation stellaire	Occultations stellaires	E5-Bilan-4.	E-42, E-43
	E5_4	•Observations de Titan et Saturne	Cassini (CIRS, VIMS)	E5-Bilan-7.	E5-52 à E5-62

Tableau 4 : Sélection de faits marquants scientifiques du LESIA

Dans cette partie de bilan scientifique du laboratoire, on insistera ici sur le bilan scientifique des deux équipes transverses créées en 2012, qui est dispersé dans les présentations des pôles impliqués. Afin d'en souligner l'importance en tant qu'activité transverse, on insistera ici sur l'importance de l'implication croisée entre pôles :

1) Equipe transverse « Exoplanètes » Fait marquant E2_2

L'équipe transverse « Exoplanètes » a pour objectif de promouvoir au sein du LESIA un axe de recherche original, réunissant des chercheurs de différents pôles impliqués sur cette thématique (HRAA, Etoile, Planétologie, Plasmas). Elle travaille en étroite collaboration avec l'action fédératrice exoplanètes de l'Observatoire de Paris, et avec l'Initiative de recherche de PSL « Origine et conditions d'apparition de la vie ». Même si le nombre de publications « trans-pôles » impliquant des chercheurs simultanément des deux pôles, reste modeste, les travaux de cette équipe ont permis de démarrer plusieurs actions notables qui permettent au LESIA de bâtir une expertise dans le domaine de la modélisation des atmosphères

² Les références de cette table sont listées en Annexe B en mode simplifié– les références complètes des articles cités dans le texte sont listées en Annexe 4



exoplanétaires. Vers l'extérieur, l'équipe est très impliquée dans l'action fédératrice de l'Observatoire sur les exoplanètes, ainsi que dans l'IRIS OCAV de PSL. L'implication en instrumentation sur SPHERE et la préparation de MICADO bénéficient des apports de cette structure. Les implications dans les instruments sol et espace (PLATO, LOFAR, VLT, VLTi, ARIEL) sont nombreuses et assurent un espace de développement pour cette équipe.

2) Equipe transverse « Météorologie de l'espace » Fait marquant E4_4

L'équipe transverse réunit des personnels des pôles plasmas et solaire ; l'objectif premier de cette structure est la préparation dans la mission spatiale Solar Orbiter où le LESIA est présent sur deux instruments, maintenant livrés, RPW et STIX. Le soutien sol à Solar Orbiter est également dans les objectifs de l'équipe. L'interaction avec l'action fédératrice ESTERS de l'Observatoire est également dans les actions de l'équipe, facilitée par la présence au LESIA de la coordinatrice d'ESTERS. Si les publications communes impliquant les deux pôles sont encore peu nombreuses, l'équipe a cependant pleinement montré son utilité tant en interne, en permettant le dialogue entre pôles, qu'en externe avec les structures de l'Observatoire et au-delà.

Organisation générale du laboratoire

L'organisation générale comprend la direction décrite ci-dessus et les services directement rattachés (Hygiène, Sécurité et Conditions de Travail, Qualité, labex ESEP), les pôles scientifiques, technique et administration, et le Conseil de Laboratoire en charge des prérogatives selon le règlement intérieur du LESIA.

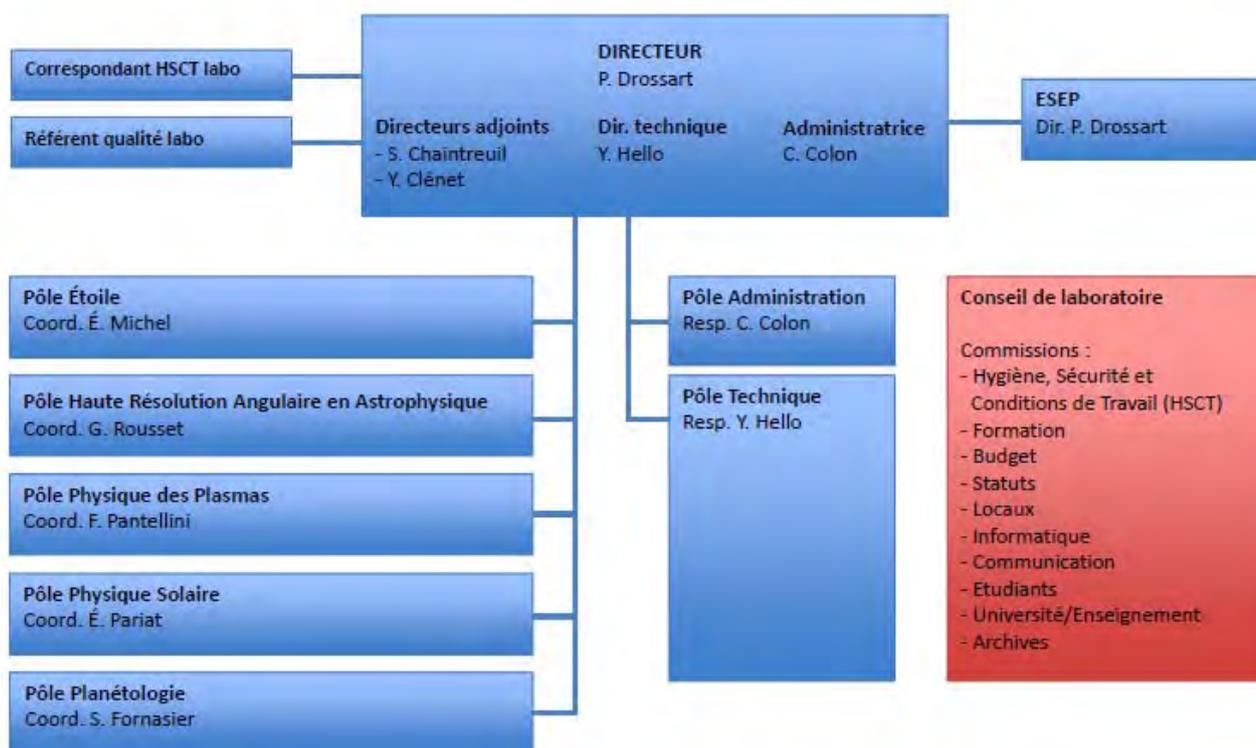


Figure 6 : *Organigramme général du LESIA*

1. Pôles scientifiques

L'organisation scientifique du LESIA se fait en cinq pôles (équivalent aux équipes au sens du HCERES) et quatre équipes transverses décrites ci-dessous, qui couvrent tous les champs scientifiques abordés au laboratoire. La structuration en cinq pôles scientifiques, décidée en 2011 a été confirmée lors du séminaire de prospective scientifique du LESIA en 2017 comme la plus adéquate aux objectifs affichés. Chaque pôle est suivi par un coordinateur, chargé des relations avec la direction par exemple pour les demandes annuelles de moyens, les

discussions sur la stratégie scientifique du laboratoire, les demandes de recrutement, etc. Les coordinateurs de pôles font partie du conseil de direction élargie décrit dans le règlement intérieur. Aux pôles scientifiques sont rattachées des équipes transverses, communes à plusieurs pôles (scientifiques ou technique) qui affichent un intérêt vers des thématiques nouvelles, ou en développement ou pluridisciplinaires.

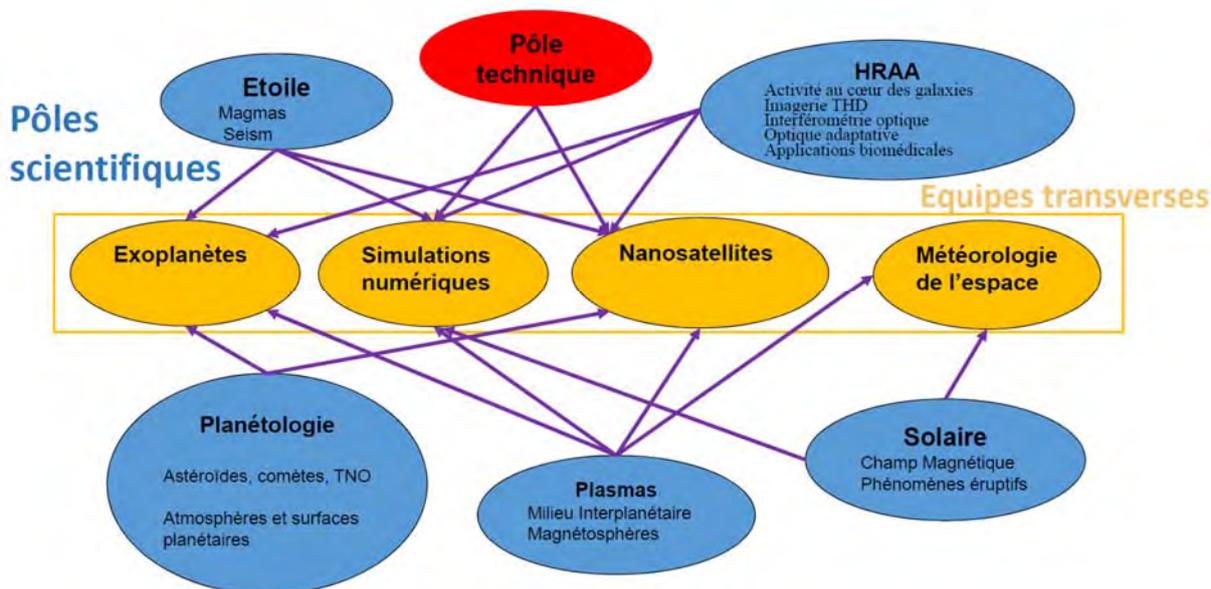


Figure 7 : Relations entre pôles et équipes transverses

2. Pôle technique

L'une des clés du succès du LESIA tient aux liens forts entre les scientifiques et les ingénieurs et techniciens. La crainte de perdre ces liens a longtemps retardé la structuration des personnels techniques. Ce fut fait début 2014 ; le pôle technique dirigé par un directeur technique a été créé et s'est révélé un succès. Son organisation en structure matricielle projets/services a prouvé son efficacité pour répondre aux objectifs techniques du laboratoire :

- Réaliser les projets en cours,
- Prévoir les recherches en amont pour anticiper les évolutions métiers par des actions de R&T ;
- Répondre aux appels d'offre pour préparer les projets futurs ;
- Participer à l'élaboration de la stratégie instrumentale du laboratoire.

Le pôle technique du LESIA regroupe tous les ingénieurs et techniciens du laboratoire hors administration. Il comporte environ 70 permanents et CDD essentiellement dans l'instrumentation et l'informatique. Le directeur technique gère le plan de charge technique du laboratoire à l'aide d'outils lui permettant de suivre finement les besoins des projets et les affectations des agents. Le directeur technique fait partie de l'équipe de direction et est invité aux conseils de laboratoires en vertu du règlement intérieur. Afin de répondre facilement et efficacement aux demandes instrumentales des scientifiques du laboratoire, le pôle technique est structuré en services métiers.

Ce type de regroupement a l'avantage de capitaliser le savoir-faire technique du LESIA acquis depuis de nombreuses années, d'aider à prioriser les embauches d'ingénieurs & techniciens et, enfin, de maîtriser la charge de travail du personnel tout en aidant à définir la stratégie instrumentale du LESIA.



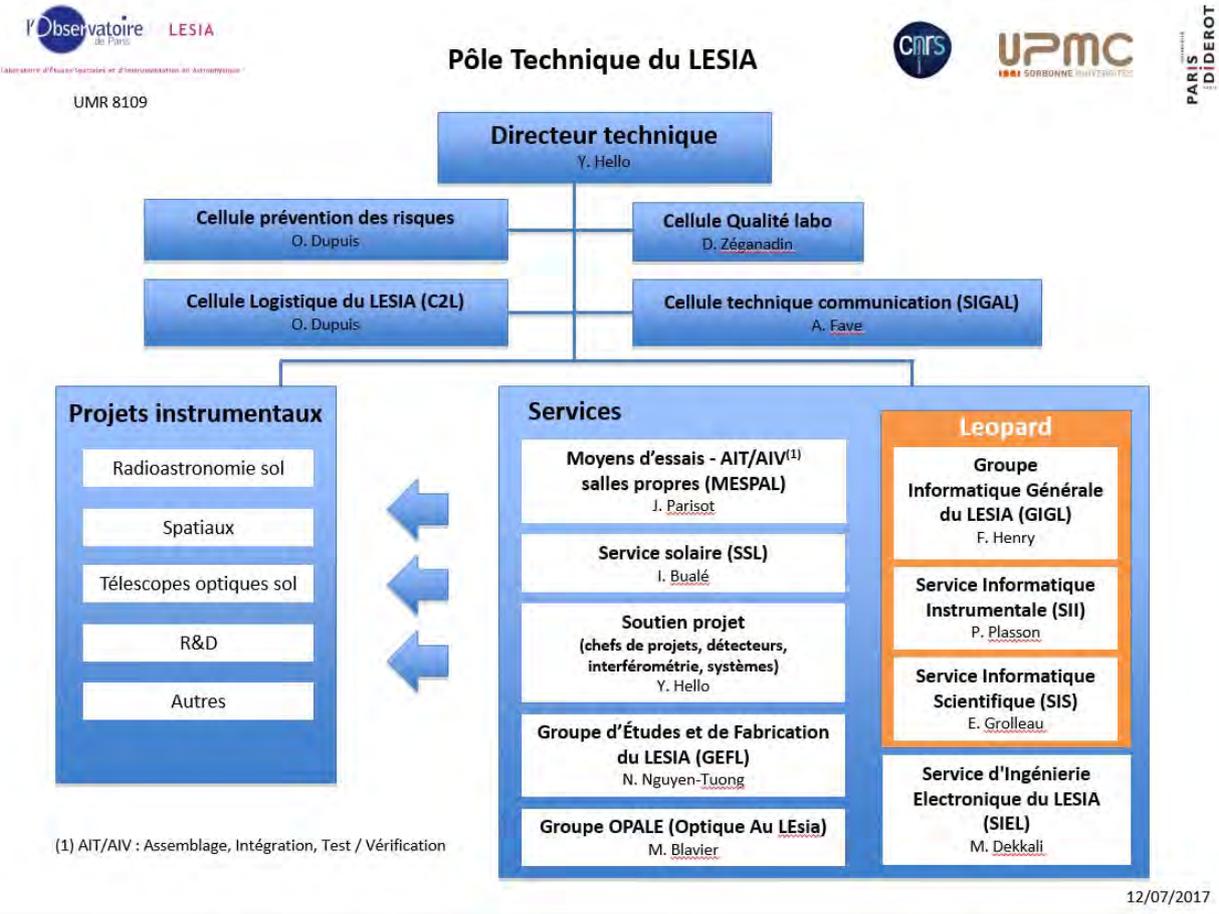


Figure 8 : Organigramme du pôle technique

Ces axes métiers répondent soit directement aux thématiques de recherche du laboratoire soit aux besoins transverses de réalisation ou d'exploitation :

- Le service national d'observation de l'INSU pour la surveillance solaire (en regroupement sur recommandation du PNST dans le cadre de l'ANO6) est installé à l'Observatoire depuis des dizaines d'années et géré par le LESIA. Il a lui aussi été structuré en service, le SSL (Service Solaire du LESIA). Il est très lié aux activités de l'équipe transverse sur la météorologie de l'espace en particulier.
- OPALE (Optique au LESIA) regroupe les activités en optique dans une démarche d'échange et de regroupement entre équipes techniques travaillant dans le domaine, et permet de nouveaux développements comme l'optique intégrée interférométrique.
- Le SIEL (Service d'ingénierie électronique du LESIA) regroupe l'électronique radiofréquence pour l'étude des plasmas et l'électronique pour les instruments. Il permet de développer de nouveaux axes instrumentaux, comme l'électronique numérique à base de FPGA par exemple.
- Le SPL (Soutien projet du LESIA) regroupe les chefs de projets et ingénieurs système.
- Le MESPAL regroupe les moyens d'essais, salles propres, AIT/AIV ; le LESIA a voulu valoriser les moyens existants et accroître ses capacités pour répondre aux demandes de moyens de tests en interne et avec nos partenaires. L'attractivité de ce service est forte, y compris pour des laboratoires extérieurs qui ont pu y faire les campagnes de tests en environnement spatial (TARANIS pour APC, LATMOS, LPC2E). De nouveaux moyens sont en cours d'installation pour 2018 avec un redéploiement dans de nouveaux locaux de la cuve principale de tests (SIMENOM) avec ses environnements de tests.



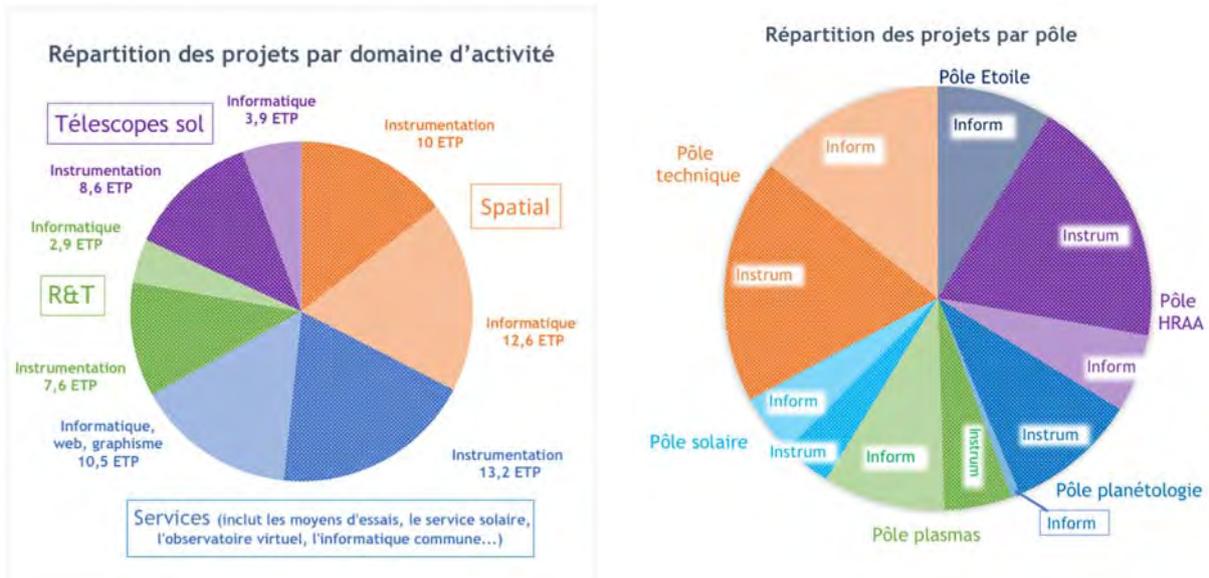


Figure 10 : Répartition par domaine et par pôle des projets du LESIA exprimés en ETP : en plus foncé les personnels BAP C (instrumentation), en plus clair l'informatique (BAP E et F)

3. Pôle administratif et budget

Le pôle administratif a une organisation centralisée autour de l'administratrice, avec quelques spécialisations parmi les gestionnaires (dossiers RH, feuilles de temps). En 2016, le LESIA a traité 1313 missions (1089 CNRS et 224 Observatoire), 10 contrats au CNRS (4 européens, 5 ANR, 1 région Ile-de-France) et 19 à l'Observatoire (6 européens, 2 ANR, 2 ANR via PSL, 2 PSL, 3 région, 1 DGA, 1 Fondation, 1 Institut de France, 1 IRIS OCAV/PSL). La part du budget due à la dotation de base n'est que de 10% environ du budget annuel, les contrats (CNES, Europe, ANR, Région, etc.) constituant la plus grande partie, avec le CNES en premier contributeur. La part des ressources propres par rapport aux contrats est un élément clé de la stratégie du laboratoire en matière budgétaire, grâce à la redistribution des « overheads » dans le budget du laboratoire selon les quotas autorisés. C'est aussi une source d'incertitude, car la sélection ou non d'un projet dépend de multiples facteurs, la stratégie volontariste du laboratoire n'en étant qu'un parmi d'autres. La communication interne entre direction et pôles permet d'ajuster la politique scientifique, budgétaire et en ressources humaines, dans un effort permanent de concertation et d'adaptation.



Figure 11 : Administration et budget du LESIA

Vie du laboratoire

Le LESIA est par construction à la fois un département de l'Observatoire, sa tutelle hébergente, et une unité mixte de recherche CNRS/Universités. Le règlement intérieur, récemment mis à jour, régit le fonctionnement de



l'unité. Le conseil de laboratoire, à la fois conseil d'UMR et conseil de département se réunit 4 à 6 fois par an. C'est le lieu privilégié d'échange entre la direction et le personnel sur la vie du laboratoire : projets scientifiques, budget, personnel, etc. Le conseil met en place des commissions pour informer et conseiller la direction, certaines statutaires, les autres en fonction des besoins (voir liste en figure 6).

1. Actions statutaires et commissions du conseil de laboratoire du LESIA

Les différentes commissions, nommées par le conseil de laboratoire (voir figure 6), sont en charge de suivre l'activité du laboratoire en liaison avec la direction, et rapportent devant le conseil de laboratoire sur tous les aspects de la vie du laboratoire. On mentionnera ici en particulier :

- Hygiène, Sécurité et Conditions de Travail : ces aspects couverts par les agents de prévention sous l'autorité du directeur sont en charge du recueil des questions de sécurité et de la rédaction du document unique annuel. Les modes de communication sont effectués par l'outil intranet du LESIA qui est le mode principal de communication au sein du laboratoire (documentation, nouvelles, lettre hebdomadaire, etc.). La question de la prévention des risques psycho-sociaux est abordée à différents niveaux, en particulier lors de l'accueil des entrants à l'automne et suivie directement par la direction.
- Qualité : les aspects qualité sont au cœur de l'activité d'instrumentation et sous l'impulsion de l'ingénieur qualité du LESIA couvrent l'ensemble des activités administratives, techniques ou scientifiques.
- Formation : sous l'impulsion de la responsable des formations du laboratoire, le plan de formation de l'unité est établi annuellement et suivi de près tout au long de l'année, avec une discussion annuelle en conseil de laboratoire.
- Déontologie scientifique : les tutelles du LESIA attachent à juste titre une vigilance renforcée sur les questions de déontologie ; ces aspects sont évoqués avec les personnels (journée des entrants, assemblée générale, etc.) et l'information est disponible sur l'intranet du LESIA pour communiquer la documentation disponible sur le sujet, la direction restant l'interlocuteur de premier rang sur ces questions, pour orienter vers les responsables des tutelles.
- Communication interne : l'intranet du laboratoire est l'outil mis au point par le service informatique du laboratoire qui permet la communication des informations au sein du laboratoire pour fédérer les différentes équipes et les informer de l'avancement des projets. Constamment en évolution et mis à jour, cet outil est un élément essentiel de la politique du laboratoire, au quotidien comme pour la prospective. Un élément important de communication d'informations à tous les personnels du laboratoire est la lettre hebdomadaire du LESIA (LESINFOS) : c'est l'outil privilégié pour diffuser les informations des différentes tutelles, nouvelles du laboratoire, appels d'offres, etc.
- Communication externe : en liaison avec les services des différentes tutelles et tout particulièrement l'Observatoire, le correspondant communication, en liaison avec la responsable du site internet du LESIA, effectue la mise au point de communiqués et la rédaction de textes à l'usage externe, relayés par la communication interne. Le site web institutionnel du laboratoire est, pour la visibilité du laboratoire, un outil très précieux ; sa mise à jour est effectuée par projet et comprend les informations générales sur la vie du laboratoire (liste des thèses en cours, offres d'emploi, accès aux bases de données et descriptif général des projets, entre autres).
- Gestion électronique de documentation (GED) : Depuis plusieurs années, le LESIA a préparé la mise en place d'un système commun de gestion électronique de documents (GED) qui permette d'organiser, gérer et mettre à disposition la documentation technique des différents projets développés au LESIA, mais également tous les documents hors projet, liés au fonctionnement du laboratoire. Afin de partager les coûts et d'optimiser la maintenance d'un tel outil, le projet a été mutualisé au niveau de l'Observatoire de Paris entre le LESIA, le GEPI, l'IMCCE et les services communs de l'Observatoire. Le logiciel choisi est COTRANET. Testé et validé durant le premier semestre 2017, l'outil est déployé au sein du LESIA par le GIGL et la CQL. Sa mise en exploitation progressive est prévue dans le courant de l'automne 2017.
- Archives et patrimoine : La gestion des archives fait partie des tâches relevant du laboratoire selon l'article L 211-4 du code du patrimoine. Elle est gérée au LESIA par la commission du conseil de laboratoire « Archives et patrimoine » en relation avec le service des archives de l'Observatoire. Ses missions



comportent, en plus des questions relatives aux archives du laboratoire, les actions de pédagogie auprès des personnels, l'élaboration du plan de classement et le stockage dans les locaux du laboratoire.

- **Vie étudiante** : en liaison avec la direction, la commission étudiants du conseil de laboratoire propose et rapporte sur tous les aspects concernant les étudiants du LESIA (journée des thèses, relations avec l'école doctorale, etc.)

2. Echanges avec les tutelles et partenaires

C'est le conseil de laboratoire qui structure l'unité, selon le règlement intérieur. Des membres désignés des tutelles sont invités au conseil dans sa formation élargie. La participation du LESIA à la politique scientifique des tutelles s'effectue via les différentes instances où le directeur du LESIA (ou son représentant) est présent.

- Conseils d'établissement de l'Observatoire de Paris :
 - conseil scientifique
 - conseil d'administration
 - CPE
 - PADC (Paris-Astronomical Data Center), observatoire virtuel de l'Observatoire de Paris
- Conseils d'UFR : le directeur est invité aux séances du conseil élargi de l'UFR de physique à l'UPMC et à Paris-Diderot
- Labex ESEP : le LESIA comme laboratoire coordinateur du laboratoire d'excellence ESEP est très impliqué dans les activités scientifiques du labex tournées vers la recherche instrumentale amont en ingénierie spatiale.
- Avec le CNES
 - participation aux comités inter-organismes,
 - prospective scientifique,
 - échanges avec les groupes thématiques et visites annuelles des thématiciens,
 - expertise projet dans certaines expériences.
- Avec les agences spatiales internationales (NASA, ESA)
 - comités de conseil (Advisory structure) de la NASA et l'ESA,
 - Solar System Exobiology Working Group, Astrophysics Working Group, Space Science Advisory Council, etc.
- Autres instances : le LESIA est également représenté dans différentes instances nationales ou régionales (CSAA, ASHRA, Jean-Marie Mariotti Center, BASS 2000, DIM ACAV de la région Ile-de-France, réseau d'infrastructures de recherche en construction). La création en cours d'une fédération de recherche autour des laboratoires impliqués sur Nançay (laboratoire LPC2E d'Orléans et laboratoires de l'Observatoire de Paris) doit permettre une communication renforcée sur les actions entre Nançay et Orléans.

3. Formation et enseignement

Le LESIA est fortement impliqué, via ses personnels, dans les actions de formation et d'enseignement à l'Observatoire et dans ses universités de tutelles. En particulier, des membres du LESIA sont :

- Responsable de l'Unité de formation et d'enseignement (UFE) de l'Observatoire,
- Responsables de filières d'enseignement (CPES de PSL, Filière numérique),
- Responsables de plusieurs diplômes (Master 1, Master OSAE, Master Planétologie et Exploration Spatiale, Diplôme d'Université) et auteurs de plusieurs MOOCs et FOAD.

Le bilan d'activité étant inscrit dans les documents HCERES de l'UFE et des UFR de physique de l'UPMC et Paris-Diderot, seuls les grands axes en seront rappelés ici.

- 1) **Universités** : les enseignants-chercheurs sont bien statutairement impliqués dans les enseignements de leur UFR de rattachement ; d'autres activités d'heures complémentaires sont cependant également fournies, y compris par les personnels ingénieurs (en particulier à l'École d'ingénieurs Denis Diderot).

2) CNAP : les membres CNAP du LESIA assurent leur mission d'enseignement au sein de l'UFE ou des établissements de tutelle.

3) USTH : le LESIA participe fortement à la collaboration sur le master de l'Université des sciences et techniques de Hanoï dont l'Observatoire est partenaire : plusieurs enseignants chercheurs participent annuellement aux cours de l'USTH sur une période d'une semaine, et le LESIA contribue à la gestion des relations de l'Observatoire avec l'USTH.

4) Labex ESEP : la formation en ligne (SESP : <http://sesp.esep.pro>) comporte l'implication de nombreux chercheurs du LESIA pour la mise à disposition de cours dans les différents domaines couverts (planètes, milieu interplanétaire, exoplanètes en particulier).

5) Stages universitaires (L3, M1, M2) : une cinquantaine de stages sont encadrés par an au LESIA à tous niveaux.

6) Ecoles d'été : des écoles d'été sont organisées régulièrement par des chercheurs du LESIA (dernière en date : risques naturels spatiaux à l'Observatoire de Paris, fin août 2017).

4. Actions nationales d'observation

Les personnels du LESIA sont impliqués également dans de nombreuses Actions nationales d'observation (ANO), en premier lieu les astronomes ou astronomes-adjoints, mais également les chercheurs CNRS ou les IT. L'Observatoire de Paris est statutairement responsable des actions nationales devant l'INSU, le LESIA étant impliqué dans le suivi régulier et l'évolution de ces actions. Les tâches de service sont par définition au service de la communauté, mais constituent pour les projets un appoint substantiel en termes d'organisation de projet - par exemple dans l'étalonnage des expériences sol ou espace. Plusieurs services du LESIA sont impliqués dans ces ANO dont la liste détaillée est donnée en annexe 4, en particulier le Service d'observation solaire en charge des observations du Soleil et des bases de données associées aux observations.

5. Relations avec d'autres laboratoires (national/international)

La vie scientifique du laboratoire se définit aussi et même surtout, par ses relations multiples avec les autres laboratoires. La carte des relations du LESIA avec les autres laboratoires signe en effet l'activité scientifique de recherche, et est au cœur de la définition des futurs projets. On citera par cercles successifs :

- Laboratoires de l'Observatoire de Paris
- Région Ile-de-France
- Laboratoires nationaux
- Laboratoires étrangers

Les tableaux suivants dressent un bilan de ces relations très riches, dont le détail apparaîtra au fil des descriptions du bilan scientifique des différents pôles.



Relations du LESIA avec les laboratoires de l'Observatoire de Paris

	USN	GEPI	LERMA	IMCCE	LUTH	SYRTE	LPP	APC
Instrumentation	LOFAR, NENUFAR, Orféus, NRH	SPHERE, ELT-MICADO, ELT-MOSAIC, CANARY	Rosetta, JUICE				Solar Orbiter	LISA ?
Thématiques	Relations Soleil-Terre	Etoiles, Exoplanètes, Extragalactique	Milieu Interstellaire, Comètes	Planètes et exoplanètes, astéroïdes, SSA	Exoplanètes	Systèmes de référence, rotation	Relations Soleil-Terre	Gravitation
Relations Institutionnelles	ESEP, PADC	GIS Phase	ESEP, Plas@Par	ESEP, PADC, Europlanet	PADC		ESEP/EUREQA	

Relations du LESIA avec les laboratoires d'Ile de France (hors OP)

	IAS	AIM	LATMOS	LPC2E	LMD	LISA	IAP	ONERA
Instrumentation	MIRI, Solar Orbiter, JUICE	MIRI, Solar Orbiter, ARIEL	Supercam, MARBL	Solar Orbiter, Solar Probe				Optique Adaptative, THD, Interférométrie
Thématiques	Planétologie, Physique Solaire, Astrophysique	Planétologie, Astrophysique, Physique Solaire	Planétologie	Plasmas, relations Soleil-Terre (SSA)	Planétologie, Météorologie	Chimie Planétaire	Exoplanètes	
Relations Institutionnelles	MOTESPACE /PARADISE	MOTESPACE/P ARADISE	ESEP	ESEP	ESEP	ESEP	ESEP	GIS PHASE

Relations du LESIA avec les laboratoires en France

	IPAG	IRAP	CRAL	LAM	OCA	LAB
Instrumentation	SPHERE, MICADO	Solar Orbiter, Supercam		Plato, CANARY		ALMA, Supercam
Thématiques			Optique Adaptative, Interférométrie	Optique Adaptative	Planétologie, Sismologie stellaire, THD	Planétologie
Relations Institutionnelles	GIS-Phase	Bass2000, CDP	JMMC	GIS Phase	JMMC	

Tableau 5 : relations du LESIA avec les laboratoires en France



Tableau 6 : relations internationales du LESIA



Analyse SWOT du laboratoire

	FORCES	FAIBLESSES
Contexte interne	Fo1. Investissement dans des grands projets au niveau international Fo2. Forte cohésion des équipes projets recherche/technologie Fo3. Structure mutualisée en matrice du pôle technique Fo4. Forte attractivité (doctorants, candidatures chercheur et post-docs) Fo5. Indicateurs (publications, programmes, prix)	Fa1. Incertitudes sur le plan de charge du laboratoire liées à la sélection des projets Fa2. Faiblesse numérique de certaines spécialités techniques en ressources humaines qui demanderaient à être renforcées
	OPPORTUNITÉS	MENACES
Contexte externe	Op1. Nouvelles missions en cours de sélection (ESA, NASA, autres) Op2. Nouvelles technologies (nanosatellites, etc.) Op3. Implication dans le labex ESEP (suivi d'un projet d'EUR en cours ou d'actions similaires au sein de PSL si non sélectionné)	Me1. Diminution prévisible d'effectifs dans certaines équipes scientifiques Me2. Difficultés de recrutement ITA Me3. Contrôle des ratios permanents/temporaires Me4. Complexification des relations avec les tutelles (contexte IdF) Me5. Non renouvellement PSL

Tableau 7 : *Analyse SWOT du laboratoire*

Les faiblesses et menaces identifiées devront être abordées lors du prochain quinquennal pour adapter le LESIA à son environnement :

- Les incertitudes sur le plan de charge proviennent des processus de décision complexes et comprenant de longues phases d'étude des agences spatiales sur les missions futures. Elles seront à gérer en fonction des possibilités et opportunités nouvelles (missions, y compris à court temps de développement comme les nanosatellites, collaborations nouvelles, etc.) ; certaines options ont déjà pu être discutées en interne, et il appartiendra au LESIA de se positionner sur celles-ci selon les opportunités.
- La fragilité numérique dans certaines branches techniques demande là aussi beaucoup de réactivité au laboratoire en cas de départs non anticipés. La solution que retient une entreprise performante de dupliquer les services critiques n'est malheureusement pas envisageable dans le contexte actuel de la fonction publique, et ce point risque malheureusement de devoir, comme dans la plupart des laboratoires, être traité lors d'urgences manifestes, en avertissant les tutelles pour obtenir leur soutien.
- Concernant la diminution d'effectifs chercheurs, certains choix ont été anticipés, comme le report de toute implication majeure dans le domaine de l'astronomie solaire optique sol, en renforçant au contraire les activités en radioastronomie solaire et en simulation numérique (présentes dans deux équipes transverses). Une évolution de la structuration du laboratoire sera probablement nécessaire dans le prochain quinquennal et devra se préparer, comme en 2012, par une discussion interne en profondeur.
- La difficulté de recrutement des ITA, liée au contrôle du ratio permanents/temporaires se traduit au LESIA par des difficultés d'anticipation, les remplacements étant (au mieux) effectués après les départs. Seule une volonté des tutelles de permettre les remplacements anticipés permettraient de pallier cette menace, la situation actuelle (remplacement par CDD pendant 1 à 3 ans, voire plus) n'étant que partielle.
- Sur la complexification des relations avec les tutelles, avec des demandes de rapports multiples ces dernières années, on ne peut malheureusement au niveau d'un laboratoire que subir une évolution générale. Il faut cependant alerter nos tutelles sur le poids très pesant sur l'administration du laboratoire des structures emboîtées.
- Le non renouvellement de PSL par le CGI nécessiterait au niveau de l'établissement une révision drastique de la stratégie organisationnelle, où le LESIA devrait s'investir fortement en tant que structure spatiale.



Stratégie scientifique

La stratégie scientifique du LESIA découle de son savoir-faire, de ses compétences et des opportunités de la discipline. Laboratoire de recherche fondamentale, tourné vers l'instrumentation scientifique, sol et espace, le LESIA suit des projets instrumentaux de la conception à partir de la définition des spécifications scientifiques et techniques, jusqu'à l'exploitation, l'interprétation et la mise à disposition des données dans les bases de données. La recherche instrumentale n'est donc pas l'objectif premier du laboratoire, mais bien un moyen vers de nouvelles avancées scientifiques. Une partie des activités scientifiques du LESIA est d'ailleurs tournée vers la modélisation, la théorie et la simulation : ces activités théoriques sont mises en synergie avec les développements instrumentaux pour adapter les spécifications techniques et scientifiques dans un processus itératif vertueux. Un exemple parmi d'autres est, en physique des plasmas, les mesures de densité/température du plasma par les mesures de bruit thermique inventées au laboratoire.

La forte inertie des organismes internationaux pour les grands projets (ELT, missions spatiales) donne la possibilité d'une structuration à long terme des activités. Cependant, le risque de voir l'activité bridée par des choix technologiques dépassés nécessite une vigilance constante, pour des activités de R&D. Dans le domaine de l'instrumentation spatiale, le labex ESEP est un appui important vers un renouvellement des activités d'instrumentation.

La stratégie scientifique du LESIA spécifique à chacun des pôles sera décrite dans la partie « Equipes » du rapport. Sont présentés ici les aspects généraux du laboratoire qui concernent la stratégie globale - en particulier l'implication chercheurs/ITA qui est arbitrée par la direction, ainsi que les aspects transverses communs à plusieurs pôles. L'étendue scientifique du laboratoire ne se résume pas à ses grands projets, mais les projets menés par des équipes restreintes bénéficient de l'effet d'entraînement (et des retours en prélèvements de gestion par exemple sur les contrats CNES) ; les différents axes présentés par pôles relèveront suffisamment ces points. L'effet structurant des grands projets est essentiel pour le laboratoire et c'est pourquoi on y insistera tout particulièrement dans ce chapitre.

1. Grands projets

Les grands projets concernent une large partie de l'implication en ETP du laboratoire et sont donc extrêmement structurants pour le LESIA, tant en chercheurs qu'en ITA. Leur durée, souvent longue, constitue également un élément fondamental de la stratégie du laboratoire, qui s'engage bien au-delà d'un contrat quinquennal. Les projets déjà engagés sont les suivants :

1. Bepi Colombo est la mission ESA vers Mercure, prévue pour un lancement en 2018. Les activités du LESIA, qui est impliqué sur plusieurs instruments (MMO et MPO) sur la période quinquennale 2019-2023 consisteront principalement en une préparation des observations, puisque l'arrivée à Mercure n'est prévue qu'en 2025.
2. ELT/MICADO : la construction de l'optique adaptative pour l'ELT sur l'instrument de première lumière MICADO est de la responsabilité du LESIA, au niveau Co-I. Les aspects d'ingénierie système, qualité et réalisation impactent donc fortement le LESIA pour les prochaines années (2019-2023), la mise en service étant attendue en 2025 environ. A noter qu'au-delà de MICADO, le laboratoire est impliqué dans plusieurs projets liés à l'ELT. On pourra citer CANARY, démonstrateur de l'optique adaptative multi-objet qui sera déployé dans l'instrument ELT/MOSAIC, ainsi que la recherche sur les calculateurs temps-réel menée grâce à des projets ANR et européens, et positionnant le LESIA au premier rang des laboratoires susceptibles de développer ces sous-systèmes pour les instruments de l'ELT.
3. Solar Orbiter (ESA/M1) : la livraison en 2017 de l'instrument RPW à l'ESA voit l'achèvement de la phase de réalisation de cet instrument à responsabilité LESIA (P.I. Milan Maksimovic). Les prochaines années verront la préparation des observations et du segment sol, puis les observations dans l'espace avec un lancement prévu en 2019. Le recrutement d'un chercheur CNAP en 2016 sur ce domaine permet de renforcer l'équipe. Le LESIA est également impliqué dans le développement logiciel de traitement de l'instrument STIX et l'accès aux données solaires en rayons X.
4. SUPERCAM (NASA/Mars Science Laboratory 2020) : le LESIA est en charge, dans un consortium dirigé par l'IRAP, de la construction du spectromètre en proche infrarouge IRS. Une forte participation en ingénierie système est également fournie par le LESIA pour le module dit « Mast Unit » reliant la tête optique



du module martien à l'instrument. La livraison de l'instrument est prévue en 2018 pour un lancement de mission en 2020.

5. JWST (NASA/ESA) : l'exploitation des données du James Webb Space Telescope constituera un axe fort de la recherche au LESIA du prochain quinquennal : une implication en temps garanti est assurée dans l'instrument MIRI après la fourniture par le LESIA du coronographe. Cependant, la préparation de demandes d'observations en temps ouvert est déjà en cours, principalement entre les pôles planétologie et HRAA sur différentes thématiques.

6. PLATO (ESA/M3) : le LESIA est impliqué sur cette mission ESA de classe moyenne pour la fourniture des logiciels de vol et la préparation des observations. Prévue pour un lancement en 2026, la période 2019-2023 verra la livraison des packages (logiciels, participation au segment sol) requis pour le LESIA.

7. Futures missions spatiales : l'ESA doit sélectionner en novembre 2017 une mission M4 parmi trois en concurrence. Le LESIA est présent sur deux d'entre elles, THOR et ARIEL.

- THOR : étude de la turbulence dans le vent solaire, avec implication du LESIA dans les radiorécepteurs haute performance.
- ARIEL : étude de la spectroscopie de transit d'exoplanètes, avec implication du LESIA prévue dans les phases AIT (assemblage, intégration, tests) et calibration du spectromètre, en liaison avec l'IAS/Orsay et AIM/Saclay.

La disponibilité des équipes sera différente selon que l'une ou l'autre (voire aucune) des missions sera sélectionnée par l'ESA. Selon les résultats attendus en novembre de cette sélection M4, plusieurs participations à projets seront envisageables, et pour certaines déjà engagées au niveau de la R&D.

- Participation à une mission NASA/New Frontiers vers Vénus
- Participation à mission M5/ESA
- Mission d'opportunité (MMX/JAXA, mission chinoise, etc.)
- R&D sur missions futures (M6/ESA, NASA/LUVOIR, etc.) pour une implication sur une filière de polarimétrie UV avec applications en physique stellaire
- Implication plus ou moins poussée sur des projets de nanosatellites

Enfin, suite au succès de l'instrument GRAVITY, une réflexion est menée sur une implication du LESIA dans l'expérience LISA de l'ESA pour la détection dans l'espace d'ondes gravitationnelles : des discussions sont menées avec le laboratoire APC pour délimiter un périmètre de compétences où le LESIA pourrait apporter son savoir-faire (moyens d'essais, étalonnages, logiciels de vol, etc.)

2. Paris Astronomical Data Center (PADC)

Le LESIA est fortement impliqué dans ce service de l'Observatoire : physique solaire, Europlanet (voir ci-dessous) et bases de données planétaires. PADC est une action phare de l'Observatoire de Paris, labellisée en Centre d'Expertise Régional de l'INSU en 2013. Il a pris la suite d'actions antérieures depuis 2002 (Plan pluri-formation Observatoire virtuel, Axe prioritaire VO-Paris Data Centre en 2008). Le LESIA est impliqué principalement dans les thématiques planétologie, héliophysique, étoiles & univers lointain. L'implication du LESIA n'est pas uniquement dans l'alimentation en données, mais également dans la direction de PADC, dans l'élaboration du standard de diffusion de données en planétologie (EPN-TAP), ainsi qu'au soutien à la mise en œuvre de bases de données par le biais de l'implication d'ITA dans les projets. Les chercheurs et ITA permanents du LESIA contribuent à PADC à hauteur de 5,5 ETP.

3. EUROPLANET

Le LESIA a une forte participation dans l'Infrastructure de recherche Europlanet 2020 (EPN2020-RI) qui, depuis sa création en 2004 (sous FP6, puis FP7 et Horizon 2020), bénéficie d'un soutien substantiel de la Commission européenne (10 millions d'euros en 2015). Il s'agit d'un projet complexe, d'envergure, qui inclut 33 bénéficiaires et 22 partenaires de 17 pays européens et d'autres pays associés (www.europlanet-2020-ri.eu). EPN2020-RI est une plateforme qui permet à la communauté planétaire européenne de se rencontrer (notamment via le congrès annuel EPSC), discuter, distribuer et partager des données et des résultats, imaginer et proposer des programmes et en

général favoriser l'organisation de la communauté planétaire pour mieux répondre aux défis technologiques et scientifiques actuels. Le LESIA est représenté à plusieurs niveaux importants de ce projet, depuis la coordination, le comité exécutif et le conseil jusqu'à la gestion et la mise en place du module VESPA qui offre la possibilité d'accéder à des données et des services liés aux sciences planétaires via un Planetary Science Virtual Observatory (<http://vespa.obspm.fr>), en passant par la dissémination des connaissances et l'organisation de la conférence EPSC (<http://www.epsc2017.eu/>).

4. Stratégie scientifique par pôles

La stratégie scientifique des pôles du LESIA est détaillée dans les chapitres suivants et n'est pas répétée ici.

La stratégie scientifique définie dans chaque pôle doit trouver son épanouissement dans la politique générale du laboratoire, ce qui suppose une coordination, en particulier pour la mise à disposition de ressources humaines et le soutien du LESIA aux demandes de moyens. Cette coordination est assurée par les rencontres régulières en direction élargie qui permettent une circulation de l'information entre pôles et direction, ainsi bien entendu que les instances réglementaires du laboratoire (conseil de laboratoire, assemblée générale). Une part importante de la coordination s'effectue aussi via les équipes transverses qui ont des contacts structurels avec les tutelles comme décrit ci-dessous.

5. Equipes transverses

Les équipes transverses ont été retenues lors de l'assemblée générale de prospective du LESIA pour favoriser les échanges entre pôles, sur des questions interdisciplinaires ou techniques relevant de plusieurs pôles. Les équipes ET1 (exoplanètes) et ET2 (météorologie de l'espace) ont été créés en 2014. Leur bilan est donc inclus dans les descriptions du bilan scientifique des pôles. Les équipes ET3 (simulations numériques) et ET4 (nanosatellites) sont de création récente en 2017 pour impliquer le LESIA dans des thématiques en plein développement.

En premier lieu, les équipes transverses jouent un rôle de coordination des activités de recherche entre pôles, dans les domaines où le cloisonnement en pôles distincts pourrait être contreproductif. Les équipes transverses ont aussi un rôle de lien avec les structures des tutelles ayant également ce type d'axes fédérateurs multidisciplinaires : à l'Observatoire, en pilotage avec le Conseil scientifique (axe ESTERS, Exoplanètes, Calcul haute performance), et dans PSL avec les initiatives de recherche (IRIS/OCAV en particulier). Ces relations LESIA/Observatoire/PSL permettent d'initier des échanges pluridisciplinaires performants dans un environnement ouvert vers des équipes extérieures.

Equipe transverse n° 1 Exoplanètes et origine des systèmes planétaires

Effectif : 38 pers.

L'équipe fédère des membres répartis au sein de 4 pôles du LESIA (HRAA, plasmas, étoile et planétologie) et rassemble une grande variété de compétences, en instrumentation, analyse de données, et modélisation. Elle s'articule avec plusieurs autres groupes transverses sur la même thématique, mais couvrant des périmètres plus larges (axe transverse pour l'Observatoire, IRIS-OCAV pour PSL).

A court terme, la perspective scientifique repose en grande partie sur l'exploitation d'instruments existants dans la réalisation desquels le LESIA a été fortement impliqué : VLT/SPHERE bien sûr (encore 2-3 ans de temps garanti à exploiter après 2017), mais aussi un programme spécifique exoplanètes pour VLTI/GRAVITY et l'étude de l'environnement de B Pic b par le nanosatellite PicSat lancé cette année.

Les recherches s'étendront aux disques de débris, un sujet sur lequel le potentiel de synergies au sein de l'équipe est important. Le recrutement récent d'un chercheur expert en modélisation auto-cohérente des disques est un atout, notamment pour l'analyse de données SPHERE (connections planètes-disques) et CHARA/FLUOR (surveys des exozodis).

La préparation scientifique des missions spatiales à venir est un autre axe de développement. Pour PLATO par exemple, la contribution « exoplanètes » du LESIA se concentrera sur la compréhension des étoiles-hôtes (âge, paramètres fondamentaux) et de leurs environnements, grâce aux données d'astérosismologie et des observations complémentaires au sol en HRA et/ou à haute dynamique afin de préciser les interactions avec les systèmes



planétaires et de fournir des conditions aux limites plus précises aux modèles. PLATO doit voler en 2026, mais les méthodologies pourront être testées avec les données des satellites CHEOPS et TESS qui seront disponibles dès 2019. Cette approche sera étendue à la compréhension des atmosphères d'exoplanètes, avec l'arrivée attendue de données JWST (notamment MIRI) et à plus long terme la préparation scientifique d'ARIEL (lancement prévu 2026) si elle est retenue comme mission M4 par l'ESA.

Equipe transverse n° 2 : Perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace

Effectif : 8 pers.

Cette thématique transverse met en avant les interconnexions entre le Soleil et l'héliosphère, en particulier avec la Terre. Il s'agit d'étudier le système couplé pour comprendre les mécanismes physiques par lesquels l'activité et le vent solaires affectent les environnements spatiaux de la Terre et des planètes. Les activités humaines peuvent être concernées au travers des perturbations du champ magnétique terrestre par les éjections de masse, l'impact des rayonnements UV et X sur l'atmosphère et l'interaction des particules solaires de haute énergie avec les équipements spatiaux, l'ionosphère et l'atmosphère de la Terre. Ces phénomènes sont à l'origine de la météorologie de l'espace.

Le LESIA conduit des recherches sur la propagation héliosphérique des éjections de masse et sur l'origine des particules de haute énergie qui s'échappent dans l'espace. Il utilise des observations in situ (Wind, ACE, SoHO, STEREO, moniteurs à neutrons - collaboration IPEV) et de télédétection (télescope Hubble, instruments radio de Nançay - collaboration USN) et des simulations numériques. Ces recherches aboutissent aussi au développement de méthodes de prévision en météorologie de l'espace. Des produits de données sont fournis à l'aviation civile et l'armée de l'air. Par ailleurs, des membres du LESIA jouent un rôle actif dans les discussions nationales (CNES météorologie de l'espace, DGAC définition d'événements extrêmes affectant potentiellement l'aviation civile) et internationales (WMO, UN COPUOS, Space Weather Working Team européen). Ils participent activement à deux sur trois programmes de recherche du conseil européen dédiés à la météorologie de l'espace (FLARECAST, HESPERIA). Ils sont d'autre part actifs dans l'axe transverse ESTERS (Environnement spatial de la Terre : recherche & surveillance) de l'Observatoire de Paris, qui anime des activités de recherche, développe de l'enseignement (entre autres participation à l'élaboration de la maquette du master Géosciences menée par l'ENS, incluant un axe météorologie de l'espace) et mène des discussions de prospective et des collaborations avec des organismes extérieurs à la recherche concernés par la météorologie de l'espace.

L'avènement des missions Solar Orbiter et Parker Solar Probe structurera les activités futures de la communauté scientifique en physique solaire et relations Soleil-Terre. D'autres activités spatiales du LESIA, comme la participation à THOR et Alfvén, si ces missions sont sélectionnées, renforceront la compréhension des relations vent solaire-magnétosphère. La mission nano-satellite CIRCUS doit ouvrir la voie à une couverture spatiale étendue de l'ionosphère et de son couplage avec l'activité solaire. Ses données pourront servir pour des modèles temps réel.

Sur Solar Orbiter le LESIA est PI du spectrographe radio (RPW) et Co-I du spectro-imageur en rayons X (STIX). Il a la responsabilité scientifique d'instruments de soutien au sol (ondes radio, lumière visible et particules de haute énergie) et gère la base de données BASS2000. En particulier, une approche commune est en développement sur l'archivage, la diffusion et l'analyse des données entre ces instruments. Par ailleurs, les activités en météorologie de l'espace seront développées en cherchant une coopération étroite avec les utilisateurs. L'entrée de la France dans le volet météorologie de l'espace du programme Space Situational Awareness de l'ESA est une preuve significative d'un intérêt croissant où les instruments d'observation, les bases de données et les travaux de simulation des pôles plasma et physique solaire du LESIA seront des atouts.

Equipe transverse n° 3 : Simulations numériques en astrophysique (SNA)

Effectif : 18 pers. (chercheurs et ingénieurs)

Les thématiques scientifiques abordées par les simulations numériques au LESIA concernent tous les pôles scientifiques (cf prospectives des pôles). Les travaux de simulations numériques menés au LESIA ont pour objectifs principaux de 1) préparer les futures observations des missions spatiales (e.g. PLATO, Solar Orbiter) et des grands instruments au sol (e.g. ELT), 2) préparer l'exploitation et l'interprétation des observations actuelles (e.g., GRAVITY) et futures, et 3) réaliser des études purement théoriques de divers processus et phénomènes

astrophysiques, qui pourront éventuellement guider le processus de définition de futurs concepts de missions spatiales.

Au total, le LESIA compte une quinzaine de codes numériques qui sont couramment utilisés et dont une dizaine sont des codes maison développés au sein même du LESIA. Cinq codes développés et/ou utilisés sont massivement parallèles et tournent sur des centres de calculs nationaux (CINES, IDRIS, avec environ 29 Mh obtenues depuis 2013). Six codes tournent régulièrement sur l'équipement d'excellence MESOPL (~1700 cœurs, 922 kh obtenues depuis 2013) et TYCHO (grappe de calcul de l'Observatoire de Paris) et le reste sur des machines locales du laboratoire. En plus de posséder une expertise dans le développement de code et le calcul haute performance, le nombre de publications associées (45) aux simulations numériques met en évidence l'expertise et la productivité scientifique du laboratoire.

L'objectif de l'équipe transverse SNA est de fédérer et d'augmenter la visibilité des recherches basées sur la simulation numérique. Au vu de la diversité des thématiques scientifiques abordées, l'équipe transverse n'a pas vocation à développer des axes de recherches scientifiques particuliers (voir la prospective des pôles). En revanche, la diversité des physiques abordées (hydrodynamique, magnétohydrodynamique, relativité générale, optique adaptative, physique des plasmas, physique atomique) et les diverses solutions numériques utilisées sont un atout fort du LESIA. Leur mise en commun au sein de l'équipe transverse a pour but de favoriser la diffusion des expertises et compétences acquises au sein des pôles, tant d'un point de vue scientifique que technique. Cette équipe transverse SNA permettra aussi de définir des besoins en formation propre au calcul scientifique (ex : visualisation, logiciel de gestion de version pour le développement, etc...). Enfin l'équipe transverse participe au comité de pilotage de l'action fédératrice sur le développement numérique et le calcul de l'Observatoire de Paris, via un représentant de l'équipe SNA. A travers ce représentant, l'équipe SNA contribuera lors du prochain quinquennal à la définition des formations proposées par l'action fédératrice à partir d'octobre 2017, sous forme d'ateliers dispensés par des ingénieurs en calcul scientifique de l'Observatoire de Paris, et qui seront donc d'un intérêt certain pour l'équipe transverse.

Equipe transverse n° 4 : Nanosatellites

Effectif : 29 pers. (chercheurs et ingénieurs)

Le développement fulgurant, particulièrement aux Etats-Unis, de filières de nanosatellites, a simplifié l'accès à l'espace qui devient possible pour des petites expériences d'établissements de taille moyenne. La plupart des projets concernent des projets pédagogiques ou technologiques. Dans le prolongement de ces succès, les chercheurs souhaitent aussi pouvoir bénéficier de ce nouveau type d'accès à l'espace. L'idée est que le coût raisonnable de ces missions permet des objectifs risqués, mais offrant des retours scientifiques et technologiques uniques. Contrairement aux missions spatiales classiques, les CubeSats permettent :

- Des développements rapides, de l'ordre de 2 à 5 ans.
- Un coût de lancement relativement faible (pour une mission spatiale), autorisant l'échec, suivi d'une nouvelle tentative. De plus, l'intérêt des industriels dans ce domaine amène à penser que le coût des plateformes va continuer de baisser.
- Une adaptabilité du projet, nécessitant des compétences similaires aux grandes missions, mais permettant une flexibilité qui tire parti et entretient l'expertise du personnel qualifié entre deux grands programmes.

Les CubeSats offrent au LESIA une opportunité pour mobiliser les ingénieurs et les chercheurs sur des projets à court terme, qui peuvent facilement s'insérer entre des missions prioritaires. De plus, il offre une exposition médiatique certaine, avec à la clef des résultats scientifiques d'importance, même limités à des problématiques spécifiques (ionosphère, étoiles brillantes, etc.).

Les CubeSats nécessitent une maîtrise technique et technologique du spatial qui requiert une implication très en amont des ingénieurs dans le cahier des charges du projet. Tout n'est pas faisable. En revanche, de multiples domaines astrophysiques peuvent bénéficier de cette technologie. Pour n'en citer que trois, qui appartiennent à des pôles différents au sein du laboratoire :

- la science des exoplanètes, avec les méthodes de détection par transit.
- La physique des plasmas, avec l'étude des hautes couches de l'ionosphère terrestre.
- La planétologie, avec la possibilité de navigation interplanétaire.

L'équipe transverse a pour but de mettre en rapport les astronomes et les ingénieurs, pour faciliter la communication et le partage d'idées. L'objectif est de privilégier les projets réalistes et d'avoir une approche concertée au niveau du laboratoire. Chaque projet peut ainsi se reposer sur les technologies développées par d'autres projets. De même, les projets peuvent aussi être conçus de façon à développer des techniques incrémentales vers des missions plus ambitieuses. L'équipe transverse a donc aussi pour but la coordination des efforts dans le domaine des nanosatellites.

Avec le lancement de PICSAT fin 2017, le laboratoire souhaite être moteur dans un avenir où les CubeSats seront vus comme des outils d'observations astrophysiques à part entière, en compléments de l'observation au sol et des grosses missions spatiales. Cela passera aussi par une évolution plus générale du système national, qui commence timidement à avoir lieu, avec l'apparition de multiples campus spatiaux (ex : C2ERES) et avec l'implication du CNES.

Conclusion et perspectives stratégiques

L'insertion du LESIA dans plusieurs des projets majeurs de la discipline au niveau international lui assure une activité de premier rang dans la période quinquennale à venir. Les évolutions et adaptations du laboratoire ont été abordées dans la discussion des points SWOT plus haut, seuls les grands équilibres étant abordés ici.

La question des équilibres entre d'une part les budgets de ressources propres et sur projets, d'autre part entre personnels permanents et temporaires (CDD ou post-docs) est au cœur de l'évolution des unités de recherche en France, dont le système hybride présente une efficacité et une attractivité certaines, au prix d'une complexification du système de la recherche assez effrayante. La politique du laboratoire est contrainte par celle de ses tutelles, mais ne s'y réduit pourtant pas, grâce au levier que constituent les différentes approches entre établissements de recherche (CNRS), grandes universités (UPMC et Paris-Diderot) et grand établissement (Observatoire). L'évolution dans les COMUE/IDEX est particulièrement lourde en Ile-de-France, mais présente là aussi des opportunités que le LESIA compte saisir, par une implication forte dans l'EUR déposée par l'Observatoire de Paris (EUREQA) si elle est sélectionnée.

Le LESIA se trouve début septembre 2017 à une période charnière dans la définition de son activité dans le prochain quinquennal, puisque trois événements majeurs sont attendus d'ici la fin 2017, après la rédaction de ce rapport :

- Sélection du projet d'Ecole Universitaire de Recherche du Programme d'Investissement d'Avenir EUREQA où le LESIA est fortement impliqué via le labex ESEP
- Sélection d'une mission M4 par l'ESA (le LESIA est présent sur deux des trois missions en compétition, THOR et ARIEL)
- Lancement attendu du premier nanosatellite du LESIA, PICSAT.

Selon les résultats de ces sélections, la stratégie du laboratoire devra être adaptée. Des plans ont bien sûr été anticipés pour s'y adapter, mais la disponibilité en plan de charge IT, par exemple pour les moyens en R&D ou de futurs projets nanosatellites, dépendra fortement de ces sélections.

L'implication du laboratoire dans des thématiques innovantes, comme les nanosatellites ou la météorologie de l'espace ne s'est pas faite sans mal, d'autant que le soutien du CNES sur ces thématiques d'avenir n'est que tout récent. Il s'agit pourtant d'un secteur en plein développement où le LESIA voit son expertise reconnue. En ce qui concerne la météorologie de l'espace, la fusion programmée des actions nationales d'observations ANO6 (spectrohéliographe de Meudon, Radiohéliographe de Nançay, service Cycle, Eruptions et rayonnement cosmique au LESIA) doit donner une nouvelle impulsion à ces actions, dans le cadre de la mise en place par l'Organisation de l'aviation civile internationale d'un service opérationnel de prévisions en météorologie de l'espace.

Le LESIA, avec ses équipes performantes, est un creuset des nouvelles idées de recherche et de projets. Il a la capacité à tirer les leçons des processus de sélection des projets proposés par ses équipes, et dispose ainsi de tous les atouts pour continuer à être un des acteurs majeurs de la recherche en astrophysique en France et à l'international.

E1. Pôle Etoile

PRÉSENTATION DU PÔLE ETOILE

1. Composition en équipes

Membres du pôle Etoile (voir tableau 8) : 14 chercheurs (dont 4 post-docs)+5 thésitifs+7 chercheurs associés (au 01/04/2017). Globalement, le ratio F/M est de 8/16.

Equipes : Etoile regroupe deux équipes et participe à l'équipe transverse exoplanètes.

- **SEISM** : Sismologie pour l'Étude des Intérieurs Stellaires et leur Modélisation (coord. E. Michel)
- **MagMaS** : Magnétisme et Etoiles Massives (coord. C. Neiner)
- **Equipe transverse 1 : Exoplanètes et origine des systèmes planétaires** (coord. V. Coudé du Foresto)

Sur la période écoulée, le nombre de permanents a décliné (de 13 à 11) suite à 4 départs (3 retraites et 1 mobilité) et 2 arrivées (1 recrutement et 1 mobilité). Les départs ont été compensés dans l'équipe SEISM et la transmission interne a été bien opérée à l'occasion du passage de CoRoT à PLATO. Pour l'équipe MagMaS, dont l'effectif en permanents est passé de 4 à 1, cette réduction conjoncturelle est atténuée par une forte participation de chercheurs associés et la perspective imminente d'une arrivée par mobilité. La répartition actuelle (ratio F/M=5/6) et la distribution en âge semblent équilibrées et ne présagent pas de problème à moyen terme. Le pôle Etoile accueille actuellement 3 post-doctorants et 5 doctorants (~2 débuts de thèse par an ces dernières années, une situation bien meilleure qu'avant 2013, grâce notamment à un effort et une implication forte dans l'offre d'enseignement en physique stellaire). Enfin, le pôle compte actuellement 5 chercheurs associés, soit membres d'autres institutions, soit doctorants ayant soutenu depuis moins d'un an.

2. Tableau des effectifs et des moyens

Personnel	CNRS	CNAP	CNU	Post-Doc.	Doctorants	Total
Nombre 01/01/12	7	4	2	0	0	13
Nombre 30/06/17	3	6	2	3	5	19
Recherche	3 ETP	3 ETP	1 ETP	3 ETP	4 ETP	14 ETP
Enseignement, communication	-	1 ETP	1 ETP	-	1 ETP	3 ETP
Appui communauté ANO	-	2 ETP	-	-	-	2 ETP

Tableau 8 - Effectifs du pôle Etoile

CNES/CoRoT
CNES/PLATO
FP7/SpacelInn
PNPS
ANR : IDEE, Imagine, ESRR

Tableau 9 - Moyens du pôle Etoile (2012-17) - cf annexe 4

3. Profil d'activité

L'activité du pôle Etoile couvre les trois principales missions fixées à nos établissements.

a) Activité de recherche - Thématique scientifique et principaux axes de recherche

Thématique centrale : Physique des étoiles - structure interne, évolution, interaction environnement...

Dans cette thématique fédératrice, notre activité suit des axes de recherche qui concernent tous des questions clés de la physique stellaire à l'heure actuelle.

- **Rotation** : description théorique et modélisation, transport de moment angulaire/évolution, rotation (rapide)/pulsation



- **Convection** : description théorique, simulations numériques 3D, interaction convection/pulsation
- **champ magnétique stellaire** : origine, interaction avec l'évolution, l'environnement et la structure interne des étoiles.
- **Interaction des systèmes étoiles-planètes**

b) Appui à la communauté scientifique - Implication dans les grandes collaborations et projets internationaux - participation aux instances nationales

Les équipes du pôle Etoile, soutenues par les équipes du pôle technique du LESIA, ont traditionnellement une forte implication dans les projets spatiaux ou sol d'envergure internationale, notamment dans le cadre des services d'observation labélisés par l'INSU. Elles interviennent fréquemment à un haut niveau de responsabilité dans ces collaborations. Pour la période 2012-17, parmi les principales implications : CoRoT (PI, coord. programme stellaire, resp. traitement des données,...), PLATO (resp. WP120 PLATO Stellar Science, resp. WP320 Data Processing Algorithms, resp. logiciels vols,...), projet Arago présenté aux appels ESA/M4 et M5 (PI, chef de projet, resp. ingénierie système, assurance produit et qualité,...), Pollux (PI, resp. logiciel), projet européen Spaceln (resp. WP3 Data handling and archiving), également PIs ou co-PIs de grandes collaborations internationales MiMeS, BinaMlcS, BRITepol et LIFE.

Les équipes du pôle Etoile participent également à la vie de la communauté scientifique par leur implication dans nos instances nationales (période 2012-17 : 3 membres du CNAP, dont un président, 1 membre (président) de la section 17 du CNRS, 3 membres du PNPS, dont une présidente, 1 membre du groupe Astro du CNES, 1 membre de l'AWG de l'ESA).

c) Enseignement et communication (voir annexe 4 pour liste détaillée)

Avec 4 ETP permanents (+~1 ETP doctorant), le pôle Etoile a une forte activité d'enseignement à divers niveaux et dans des cadres variés : M1, M2, DU, FSU (formation à distance), formation des maîtres, dans le cadre de l'UFE de l'Observatoire de Paris avec des responsabilités (resp. master OSAE, resp. M1 , ...), également L1, L2 à UPMC, ... Le pôle accueille régulièrement 5 à 6 stagiaires L3-M1-M2-école d'ingénieurs par an.

Les membres du pôle ont également une activité soutenue de communication scientifique (cf annexe-4). Le pôle Etoile a notamment participé à l'organisation de l'exposition « Découvrir de nouveaux mondes. La mission CoRoT » au musée de l'Air et de l'Espace (juin-déc. 2013).

Bilan scientifique, produits et activités de recherche ³

1- De CoRoT à PLATO

Le bilan scientifique de la période nous semble bien illustré par la sélection suivante:

Le LESIA et le pôle Etoile en particulier ont joué un rôle leader dans la préparation et l'exploitation de la mission CoRoT, première mission spatiale d'envergure dédiée à la sismologie stellaire et la détection d'exoplanètes (lancement 2006, PI A. Baglin). L'année 2012 a vu la fin des opérations en vol, après près de 6 ans d'observation, soit le double du programme initial. Alors que les données collectées continuent d'irriguer une forte activité scientifique (44 publications avec CoRoT dans le titre en 2016, source ADS), la période 2013-16 a permis d'effectuer un retraitement global des données CoRoT, mettant à profit l'expérience acquise sur l'instrument et les ~150000 étoiles observées (données disponibles au CDS). Ce traitement, l'archivage définitif des données ainsi que les principaux résultats scientifiques ont été décrits dans le CoRoT Legacy Book [E1-6]. Un communiqué de presse a été émis par l'INSU, l'Observatoire, le CNES et un article a été publié dans l'Astronomie [E1-4].

En parallèle à cette activité visant à pérenniser et valoriser l'impact des données CoRoT dans les années à venir, le pôle Etoile a également été fortement impliqué dans la préparation de PLATO sélectionnée comme mission ESA/M3 en 2014, et dans le travail préparatoire à l'adoption en juin 2017 (~10 chercheurs du pôle impliqués au 01/01/17, dont 6 au titre des SNO PLATO). PLATO, en tant que mission de seconde génération, permettra d'étendre

³ Les références (E1-ACL...) sont données dans l'annexe 4. Les références aux faits marquants (E1-n) sont en annexe B

considérablement le programme entamé par CoRoT et Kepler, notamment en termes d'exoplanètes comparables à la Terre et plus généralement de systèmes étoiles-planètes. PLATO observera des systèmes relativement proches, permettant la caractérisation sismique des étoiles hôtes en masse, rayon et stade évolutif. Ces étoiles seront par ailleurs bien caractérisées avec Gaia et aisément accessibles à l'analyse spectroscopique à haute résolution.

Nous sommes impliqués à de nombreux niveaux, parmi lesquels notamment la responsabilité du PSM/Plato Stellar Science qui a la tâche de définir les algorithmes de caractérisation sismique des étoiles hôtes (~100 scientifiques de 14 pays, ..., répartis en 42 groupes de travail, resp. M.-J. Goupil) et également la responsabilité du DPA (Digital Processing Algorithm) qui a la tâche de spécifier les algorithmes de traitement bord/sol (~20 scientifiques de 6 pays différents, répartis en une douzaine de groupes de travail).

2 - Granulation et convection

Les données CoRoT ont aussi mis en évidence la signature photométrique de la granulation dans un nombre très important d'étoiles, allant de la séquence principale jusqu'à la phase géante rouge. Elles ont révélé l'existence d'une relation d'échelle universelle entre le temps caractéristique de la granulation (τ_{eff}) et la fréquence du pic en amplitude des oscillations de type solaire (ν_{max}).

Ces observations ont motivé un travail théorique qui a conduit à proposer un modèle simplifié de la granulation stellaire [E1-ACL33]. Ce modèle a ensuite été appliqué à un jeu de simulations hydrodynamique 3D d'étoiles allant de la séquence principale jusqu'à la branche des géantes rouges [E1-ACL32]. Ces calculs théoriques prédisent que le temps caractéristique τ_{eff} varie comme l'inverse du produit $\nu_{\text{max}} M_a$ où M_a est le nombre de Mach turbulent, i.e. le rapport entre la vitesse des éléments turbulents et la vitesse du son (à la photosphère).

Ce travail permet d'expliquer la loi d'échelle identifiée par les observations CoRoT et Kepler et donc le lien entre les propriétés de la granulation et les oscillations de type solaire. Il montre également que le nombre de Mach turbulent contrôle au second ordre les caractéristiques de la granulation stellaire. Ces travaux révèlent enfin que ce type d'observations fournit une mesure du nombre de Mach turbulent (M_a) qui peut être utilisée comme contrainte sur les modèles de convection stellaire, complémentaire à celle que l'on obtenait jusqu'à présent avec les seules oscillations.

3 - Caractérisation sismique d'ensembles d'étoiles ; « exportation » de l'information sismique à d'autres communautés/thématiques scientifiques

Les données CoRoT puis Kepler ont montré que les spectres de pulsation de milliers d'étoiles sous-géantes et géantes rouges observées peuvent être caractérisés au premier ordre avec quelques paramètres, les indices sismiques, qui à leur tour caractérisent ces étoiles en masse rayon. Cette possibilité de caractériser sismiquement des populations importantes d'étoiles a immédiatement intéressé la communauté scientifique galactique, et des liens forts se sont créés entre les équipes chargées d'effectuer les grands relevés spectroscopiques qui accompagnent la mission Gaia et les équipes de sismologues stellaires [E1-ACL22, E1-ACL18]. Il est maintenant courant d'utiliser itérativement les données spectroscopiques et sismiques pour affiner la caractérisation des étoiles en T_{eff} , $\log g$, masse, rayon, ou composition chimique [E1-ACL27, E1-ACL24, E1-ACL10]. Durant la période considérée, notre connaissance des spectres d'oscillation des étoiles évoluées a fortement progressé avec la compréhension de la structure générale des modes mixtes [E1-ACL28, E1-ACL08] qui caractérisent le cœur et donc le stade évolutif de l'étoile.

Dans ce contexte, l'équipe SEISM a développé une base d'indices sismiques stellaires (SSI, ssi.lesia.obspm.fr, ouverte en 2016) qui met à disposition de la communauté scientifique des indices sismiques et des paramètres caractérisant la granulation pour ~20000 étoiles CoRoT et Kepler.

Ces données mises à disposition dans SSI permettent, via des lois d'échelle [E1-ACL30] et des outils mis à disposition dans le portail astéro-héliosismique « The Seismic Plus » (développé par l'équipe SEISM entre 2013-2016) d'obtenir des estimations de masses, rayon et stade évolutif pour des milliers de géantes rouges [E1-2].

4 - Les champs magnétiques des étoiles chaudes et les nouvelles familles d'étoiles magnétiques

L'étude des champs magnétiques des étoiles chaudes a progressé très rapidement ces dernières années grâce à de grands programmes d'observations entrepris avec les spectropolarimètres ESPaDOnS au CFHT, Narval au TBL et

HarpsPol à l'ESO, qui ont permis la découverte de nombreuses étoiles chaudes magnétiques [ex : E1-ACL36, E1-ACL16, E1-ACL19]. Par ailleurs, durant la période écoulée, notre équipe a eu une implication forte dans le projet de mission spatiale Arago (PI C. Neiner) visant à obtenir une spectropolarimétrie haute résolution dans l'UV et le visible. Ce projet mené au sein d'un consortium européen, a été proposé en 2016 à l'ESA/M5. Il n'a pas été retenu mais une étude R&D CNES a été menée au LESIA pour un spectropolarimètre couvrant le domaine UV et visible 119-888 nm en haute résolution (25 000 en UV et 50 000 en visible). Cette étude pourra servir dans le cadre de futurs projets.

Les grands programmes MiMeS (Magnetism in Massive Stars ; [E1-7]) et BRITepol [E1-5] ont permis de montrer que ~10% des étoiles chaudes possèdent des champs magnétiques supérieurs à ~300 G, stables, généralement dipolaires. Ils sont d'origine fossile [E1-7], i.e. descendants du champ magnétique présent dans le nuage moléculaire d'origine, éventuellement amplifié par une dynamo initiale (lorsque l'étoile était complètement radiative). Le champ magnétique a des effets importants sur l'étoile : il produit des sur- ou sous-abondances chimiques à la surface qui peuvent être étudiées par la modélisation précise des atmosphères stellaires (ex : [E1-ACL06]), il inhibe le mélange à l'intérieur de l'étoile [E1-ACL36] et il rigidifie et ralentit la rotation stellaire [E1-ACL36]. De plus, lorsqu'il est suffisamment fort comparé au vent stellaire, il peut confiner celui-ci dans une magnétosphère autour de l'étoile [E1-ACL41], détectable via son émission Halpha ou infrarouge [E1-ACL21].

Le grand programme BinaMICS (Binarity and Magnetic Interactions in various classes of Stars ; [E1-ACL19]) a ensuite montré que la fraction d'étoiles magnétiques dans les binaires chaudes à courte période orbitale était significativement inférieure (~2%) à celle des étoiles simples (~10%). Ceci pourrait être dû aux conditions de formation stellaire, puisqu'il semble plus difficile de former une binaire dans un environnement magnétisé. Malgré tout, quelques étoiles binaires chaudes magnétiques ont été détectées (ex: [E1-ACL03, E1-ACL26]).

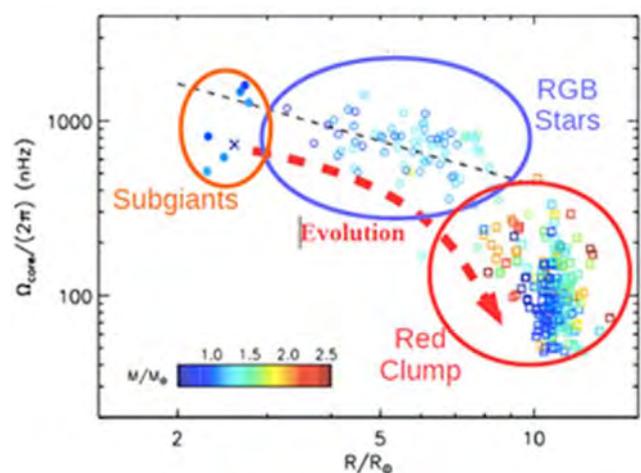
Par ailleurs, la mesure des champs « ultra-faibles » (< quelques Gauss) dans des étoiles chaudes a été effectuée. Deux premiers exemples (Vega et Sirius) avaient déjà été découverts par nos collègues de l'IRAP. Nous avons montré que ces champs ultra-faibles semblent être assez courants. En particulier ces champs ont été détectés dans toutes les étoiles Am étudiées avec une suffisamment grande précision [E1-ACL04, E1-ACL05] mais également dans des étoiles delta Scuti [E1-ACL20], révélant ainsi de nouvelles familles d'étoiles chaudes magnétiques.

Faits Marquants ⁴

Rotation et transport de moment angulaire

Parmi les résultats scientifiques du pôle, un temps fort de la période écoulée concerne la mesure sismique de la rotation du cœur de plusieurs milliers de géantes rouges, le constat que les mécanismes évoqués jusqu'à présent (même les non-standards) ne permettent pas de produire le transport de moment angulaire nécessaire pour expliquer la faible rotation du cœur des géantes rouges. Nous avons été impliqués dans plusieurs aspects des travaux qui ont conduit à ces résultats. Tout d'abord, observationnellement, le pôle a joué un rôle leader dans l'analyse et la mesure sismique de la rotation de plusieurs milliers de géantes rouges [E1-2]. Ensuite, dans le cadre d'une collaboration avec l'IAS visant à implémenter dans le code CESTAM les processus tenus pour responsables du transport de moment angulaire, il a pu être montré que ces processus étaient insuffisants pour expliquer les observations [E1-3]. Enfin, de nouveaux processus ont été étudiés et proposés, comme le transport de moment angulaire par les modes de pulsation [E1-4, E1-5, E1-6], processus qui pourraient expliquer, du moins en partie, le comportement observé. Cette question

reste néanmoins ouverte et constitue une nouvelle question majeure de l'évolution stellaire à l'heure actuelle.



⁴ Références aux faits marquants en ANNEXE B

Figure 12 : Mesure sismique de la rotation du coeur des géantes rouges montrant le ralentissement au cours de l'évolution

Analyse SWOT du pôle ETOILE

	FORCES	FAIBLESSES
Contexte interne	Fo6. Forte cohérence thématique et complémentarité théorie/ observation/ modélisation/ instrumentation Fo7. Responsabilités dans grands projets passés et à venir : CoRoT, PLATO, Arago, Pollux - visibilité internationale	Fa3. Forte diminution du nombre de permanents dans l'équipe MagMaS
Contexte externe	OPPORTUNITÉS	MENACES
	Op4. Richesse des données CoRoT et Kepler qui nourrissent toujours l'activité scientifique et perspective de nouvelles données : K2, TESS, PLATO Op5. Gaia et grands surveys spectroscopiques qui permettront de mieux connaître les étoiles pulsantes étudiées. Op6. Applications sismiques à domaines connexes : exoplanètes, populations galactique,... Op7. Spectropolarimètres IR Spirou et CRIRES+	Me6. Pas de menace spécifique identifiée

Tableau 10 : Analyse SWOT du pôle Etoile

Comme le montre le tableau 4, les opportunités scientifiques sont nombreuses pour le pôle Etoile dans les 5 années à venir, en termes de nouvelles données sismiques ou spectropolarimétriques (Op1, Op4), de données connexes qui enrichiront les applications possibles (Op2) et d'extension du domaine d'application (Op3). Il n'y a pas de menace identifiée pour la période à venir. Concernant la forte diminution du nombre de permanents dans l'équipe MagMaS (Fa1) qui ne doit pas entraver la forte dynamique associée à la thématique spectropolarimétrique, elle est en partie compensée par un nombre important de chercheurs associés et par l'arrivée en mobilité de Richard Monnier confirmée au 1^{er} septembre 2017 (Professeur UPMC).

Projet scientifique à cinq ans du pôle

L'activité scientifique du Pôle Etoile sera développée en s'appuyant sur les expertises (Fo6) et la visibilité internationale (Fo7) du pôle, suivant les trois grands axes décrits ci-après.

1- Physique stellaire/sismologie : préparation PLATO (exploitation CoRoT, Kepler, K2, TESS, Gaia, ...) / thématiques concernées : rotation, convection, interaction des systèmes étoile-planète(s)

La sismologie est aujourd'hui un outil incontournable pour la physique stellaire. Sous l'impulsion de la préparation PLATO (lancement 2026-27), l'activité suivant cet axe va encore s'intensifier pour les équipes du pôle Etoile dans les prochaines cinq années.

Ce travail s'appuiera sur l'exploitation (qui continue) des données CoRoT, Kepler, mais aussi des données qu'apporte la mission K2 (extension Kepler) et de celles qu'apportera la mission TESS (lancement 2017). Par ailleurs, l'arrivée des données Gaia va ouvrir des perspectives nouvelles pour l'utilisation de ces données sismiques (DR2 en 2018 et DR3 en 2020).

Notre contribution à la préparation PLATO comptera des contributions spécifiques au projet instrumental, comme la thèse qui vient de débuter au pôle Etoile (V. Marciori, PSL/Univ. São Paulo, oct. 2016) sur « l'étude des algorithmes de calibration et de correction bord et sol des données PLATO » ou comme l'élaboration des grilles de

modèles stellaires et des outils qui permettront la caractérisation sismique des étoiles hôtes en masse, rayon et stade évolutif (post-doc. de Morgan Deal qui vient de démarrer). Cette activité irriguera également plusieurs thématiques scientifiques du pôle indiquées ci-dessous.

Rotation et transport de moment angulaire

L'équipe a de forts atouts dans ce domaine, tant pour l'analyse et la mesure de la rotation interne des étoiles que pour la modélisation théorique du transport de moment angulaire. Les travaux engagés vont être étendus à un plus grand nombre d'étoiles et de modèles stellaires. Dans cette perspective, nous allons bénéficier de l'arrivée au pôle Etoile de Rhita M. Ouazzani (post-doc CNES 2017-19) qui a commencé à étendre ces mesures aux étoiles γ -Dor, représentatives des étoiles de masse intermédiaire (1.5-1.7 M_{sol}) sur la séquence principale. L'apport de ces travaux sera considérable pour la compréhension des mécanismes responsables du transport de moment angulaire au fil de l'évolution. En effet, pour les masses considérées, il sera désormais possible de suivre l'évolution du profil de rotation interne depuis la phase de séquence principale jusqu'à celle de géante rouge.

Par ailleurs, nos travaux de modélisation des pulsations d'étoiles en rotation rapide vont permettre d'étendre l'interprétation sismique à des étoiles de séquences principales de masses plus élevés (1.6-2.5 M_{sol}), les δ Scuti. Le principal frein à cette étude a été la difficulté d'établir la correspondance entre modes théoriques et pulsation observée (identification des modes). Or nos travaux théoriques [E1-ACL01] ainsi que notre analyse des données CoRoT [E1-3] révèlent des régularités dans les fréquences, liées à la densité moyenne de l'étoile. Par ailleurs, les calculs de visibilité multi-couleurs permettront, à terme, l'identification de modes individuels [E1-ACL31,E1-ACL01]. Ces calculs seront rendus plus réalistes par l'inclusion d'effets non-adiabatiques de surface et des méthodes d'identification spectroscopique seront développées. K. Bouchaud (thèse financée par l'ANR ESRR, arrivée prévue au LESIA en 2018) appliquera ces méthodes à diverses cibles stellaires choisies, qui permettront de mieux comprendre et interpréter les pulsations de delta Scuti.

Convection et turbulence

Les modèles d'évolution stellaire reposent sur des descriptions très approximatives des mécanismes de transport. Ces lacunes se reflètent sur la différence entre fréquences théoriques et observées qui augmente avec la fréquence. La majorité des modèles utilisés négligent notamment la pression turbulente qui s'ajoute à la pression du gaz. Son importance relative croît à la surface des étoiles dont elle modifie la structure. Par ailleurs, les formulations utilisées dans les modèles reposent sur une approche purement locale de la convection turbulente qui est par essence un phénomène non-local.

Les simulations hydrodynamiques 3D des couches superficielles des étoiles constituent actuellement les approches les plus réalistes. Toutefois, ces simulations lourdes et difficiles à mettre en œuvre ne permettent pas la modélisation de la globalité de l'étoile, ni de son évolution dans le temps. Elles peuvent cependant être couplées avec les modèles 1D d'intérieur stellaire pour résoudre le problème de la modélisation des couches de surface tout en bénéficiant des intérêts des modèles 1D, en particulier la versatilité des options physiques disponibles. Ce procédé consiste à remplacer les couches superficielles des modèles 1D de structure stellaire par la stratification des couches de surface issues des simulations 3D. Il s'agit de modèles dits raccordés (ou « patched » en anglais) qui améliorent significativement l'accord entre fréquences observées et fréquences théoriques [E1-ACL23].

Il s'agit donc à terme d'implémenter dans les codes de structure et d'évolution stellaire (comme CESTAM) une prescription réaliste des couches de surfaces établie sur une grille de simulation 3D (qui doit être étendue, notamment en composition chimique). Les fréquences et amplitudes des modèles « hybrides » ainsi construits pourront être directement comparées aux observations.

Interaction de systèmes étoiles-planètes

CoRoT et Kepler ont confirmé l'intérêt d'observations de photométrie rapide de haute précision et de longue durée pour la détection d'exoplanètes comme pour la sismologie stellaire. Ils ont également montré que la caractérisation des exoplanètes, en termes de rayon et de masse, est ultimement limitée par l'incertitude sur la masse et le rayon de l'étoile hôte et que cette limitation peut être levée par l'analyse sismique. Au-delà de cette convergence d'intérêts pratiques, CoRoT et Kepler ont révélé une très grande variété de systèmes et soulevé des questions

nouvelles concernant les interactions physiques étoiles-planètes. L'influence de l'étoile sur la formation et la structure planétaire, via les effets de marée, l'irradiation ou l'activité magnétique, constitue un champ d'étude nouveau et prometteur dans la perspective de la recherche des conditions d'apparition de la vie en dehors du système solaire. De même, on a pu s'interroger sur le lien entre la métallicité de l'enveloppe stellaire et le processus de formation planétaire, mais également sur le rôle que pourrait jouer des Jupiter chauds dans la perte de masse des étoiles dans les phases de branche des géantes rouges. Ces questions restent bien sûr ouvertes, car les données observationnelles existantes ne permettent pas de les aborder de manière très poussée, mais les données PLATO permettront de mener à bien ces études.

Il est donc temps de commencer à considérer et modéliser les systèmes étoiles-planètes dans leur ensemble. Dans cette perspective, les travaux de modélisation des interactions étoiles-planètes ont commencé [E1-1]. Nous souhaitons développer ce lien entre notre activité de modélisation stellaire et la modélisation planétaire. Ce travail pourra bénéficier de l'expertise présente au sein de l'équipe transverse exoplanètes du LESIA et de collaborations avec d'autres équipes du projet PLATO.

La magnéto-sismologie des étoiles chaudes

Grâce à K2 et à la constellation de nano-satellites BRITE, nous allons étendre nos travaux de sismologie des étoiles chaudes. Brite observe en deux couleurs des étoiles très brillantes permettant un suivi multi-technique au sol (polarimétrie, interférométrie,...). Nous faisons partie de la BRITE Executive Science Team au titre de notre leadership du suivi spectro-polarimétrique au sol (BRITEpol) des cibles BRITE. Par ailleurs, nous sommes en charge des Working Groups étoiles Be et étoiles magnétiques de TESS, ainsi que du WorkPackage étoiles magnétiques et variables rotationnelles de PLATO. Ces satellites vont nous permettre d'adresser les prochaines questions concernant la sismologie des étoiles chaudes et, en particulier, les profils de rotation interne de ces objets et l'impact du champ magnétique. En effet, la découverte d'une quinzaine d'étoiles pulsantes magnétiques de type O, B, A et F ouvre la voie à la magnéto-astérosismologie. Il s'agit de combiner des études spectro-polarimétrique et sismique, pour obtenir des informations à la fois sur le champ magnétique et les pulsations stellaires, ce qui permet de contraindre les modèles de structure interne bien plus précisément que la sismologie seule. Pour certaines de ces étoiles, nous avons déjà effectuées l'étude spectropolarimétrique ou sismique, mais rarement les deux, faute d'intersection entre les cibles spectropolarimétriques (brillantes) et sismiques (faibles). Les missions en cours et à venir vont permettre de régler ce problème. Il s'agira alors de développer les outils pour exploiter ces données simultanément.

2- Extension du domaine d'application de l'outil sismologie à des thématiques et communautés scientifiques connexes

Nous voulons continuer notre effort d'application de l'outil sismologie à d'autres thématiques et notamment à l'étude des populations galactiques. Les masses, rayons et stades évolutifs estimés sismiquement sont désormais couramment utilisés en Archéologie Galactique et les distances estimées sismiquement sont utilisées pour vérifier les premières parallaxes Gaia. Ce travail pourra être mené en collaboration avec l'équipe Gaia du GEPI à l'Observatoire de Paris et avec l'équipe d'Andréa Miglio (University of Birmingham) qui a été pionnière sur ce sujet.

Nous projetons de maintenir le portail astéro-hélio-sismique Seismic Plus (et la base de données SSI). Nous avons fait en 2017 une demande de labélisation de SNO dans ce sens.

Nous envisageons également de nouveaux développements à ces infrastructures électroniques et aux utilisations couplées avec les données Gaia, en collaboration avec l'équipe Gaia du GEPI et Andréa Miglio (University of Birmingham). Ce projet pourrait bénéficier d'un nouveau programme européen (Helas IA) présélectionné en 2016 (first stage) et qui vient d'être soumis en mars 2017 (second stage).

3- Champ magnétique au-delà du visible : étude du champ magnétique stellaire et circumstellaire

Evolution stellaire et champs magnétiques

Les études spectro-polarimétriques de ces dernières années nous ont permis de comprendre l'origine des champs magnétiques des étoiles chaudes avant et sur la séquence principale (SP). Comment ces champs magnétiques évoluent-ils, et comment influencent-ils l'évolution de l'étoile après la SP, sont les questions que nous nous posons

à présent. Dans le nouveau grand programme LIFE (the Large Impact of magnetic Field on the Evolution of hot stars ; 2016-2020), nous recherchons des étoiles chaudes magnétiques évoluées pour les comparer aux étoiles de SP. En particulier nous souhaitons tester si le flux magnétique est conservé durant l'évolution stellaire. Cette hypothèse implique que le champ magnétique mesuré à la surface de l'étoile décroît (en R^2) au fur et à mesure que le rayon de l'étoile augmente et qu'elle devient une supergéante. Des processus supplémentaires de décroissance ou d'augmentation du champ magnétique pourraient également être à l'œuvre. Par exemple, lorsqu'une étoile chaude évolue, des zones convectives se développent dans son enveloppe radiative, où des champs dynamos pourraient voir le jour et interagir avec le champ fossile.

Environnement circumstellaire avec Spirou et CRIRES+ en infrarouge (IR)

Les études spectropolarimétriques récentes ont mis en évidence la présence d'une magnétosphère autour des étoiles chaudes magnétiques. Le spectropolarimètre IR SPIROU sera installé au CFHT fin 2017 tandis que CRIRES+ (CRIRES amélioré et avec polarimétrie) sera installé à l'ESO en 2018. Ces deux nouveaux instruments permettront, pour la première fois, d'obtenir des mesures spectropolarimétriques IR et ainsi d'étudier les magnétosphères des étoiles chaudes en détail. Ces spectropolarimètres IR pourront aussi être utilisés pour étudier d'autres sortes d'environnements circumstellaires et en particulier les disques de décréation des étoiles Be. Ceci permettra notamment de tester la théorie selon laquelle il pourrait y avoir des champs magnétiques produits dans les disques de certaines étoiles Be (appelés les analogues γ Cas).

Environnement circumstellaire avec Arago et Pollux en ultraviolet (UV)

Nous allons poursuivre nos efforts pour développer la spectropolarimétrie spatiale UV qui seule permettra de caractériser le champ magnétique dans l'environnement des étoiles et d'établir le lien avec les effets du champ magnétique observés à leur surface. Actuellement, un spectropolarimètre UV (Pollux) couvrant le domaine 90-400 nm en très haute résolution (120000), à PI-ship LESIA également, est étudié (Phase 0) par le CNES et plusieurs laboratoires français et européens. A terme, il pourrait trouver sa place dans un futur projet spatial, comme le LUVOIR, grand observatoire de 15 mètres de diamètre considéré dans le cadre du Decadal Survey 2020 de la NASA.

E2. Pôle HRAA (Haute résolution angulaire en astrophysique)

Présentation du pôle HRAA

1. Introduction

Le pôle HRAA a été créé en 2011 dans le cadre de la préparation du contrat quinquennal actuel. Dans ses activités, il s'appuie sur une démarche de pionnier et une longue tradition d'innovation dans le domaine de la haute résolution angulaire (HRA). Cette thématique a été démarrée par le Professeur Pierre Léna de Paris 7 dès les années 80. Depuis plus de trente-cinq ans, les chercheurs et ingénieurs du LESIA ont conçu, développé et installé sur le ciel de nombreux instruments à la pointe de ces techniques, comme par exemple le premier prototype d'optique adaptative (OA) pour l'astronomie IR COME-ON (1990), le premier recombineur en proche IR du VLTI VINCI (2001), la première OA du VLT NAOS (2002) et le coronographe de phase à 4 quadrants de MIRI du JWST (2010).

2. Composition en équipes

Le pôle est structuré en cinq équipes qui sont :

- Optique adaptative,
- Imagerie très haute dynamique,
- Interférométrie optique,
- Activité au cœur des galaxies,
- Applications biomédicales.

Le pôle coordonne l'équipe transverse « Exoplanètes et origine des systèmes planétaires » et participe aux deux équipes transverses « Nanosatellites » et « Simulations numériques en astrophysique ».

3. Tableau des effectifs et des moyens

Le pôle HRAA regroupe actuellement une quarantaine de personnes. Il est constitué de 16 chercheurs. Sur ses projets, il rassemble en rattachement secondaire 10 ingénieurs permanents à plein temps et finance 4 ingénieurs en CDD. Sur la période du contrat, il a accueilli entre 8 et 12 doctorants et entre 2 et 7 post-doctorants chaque année. Trois recrutements de jeunes chercheurs ont été possibles durant le contrat : R. Galicher (Paris 7, 2012), F. Vincent (CNRS, 2016) et E. Huby (CNAP, 2017).

CNRS	CNAP	EC P7	Emérites	Ingénieurs ⁵
5	5	3	2	10

Tableau 11 - Effectifs en personnel permanent en septembre 2017

Doctorants	Post-doctorants	CDD	Visiteurs
10	6	6	1

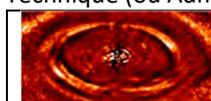
Tableau 12 - Effectifs en personnel temporaire en juillet 2017

Les ressources financières du pôle proviennent essentiellement des projets (voir l'annexe 4) :

- de conception et construction d'instruments : SPHERE, GRAVITY, MICADO et MOSAIC avec des fonds ESO, CNRS/INSU et Observatoire de Paris,
- de R&D instrumentale : FP7 et H2020, ERC, ANR, CNRS/INSU, CNES, Région IdF, Labex ESEP, PSL*, Observatoire de Paris, AS-HRA et Paris Diderot,
- astrophysiques et observationnels : ERC, ANR, PNCG, PNHE, PNPS, PNP et PNGRAM.

Moyens financiers : voir la partie générale.

⁵ La participation d'ingénieurs au pôle HRAA correspond à une « appartenance secondaire », les ITA étant en priorité rattachés au pôle Technique (ou Administratif)



4. Politique scientifique

Les objectifs scientifiques du pôle HRAA portent sur la R&D, la construction, la mise en opération et l'exploitation d'instruments innovants pour les programmes astrophysiques allant des planètes extrasolaires aux galaxies ultralumineuses. Les thématiques de recherche portent sur les techniques instrumentales que sont l'OA, l'imagerie à très haute dynamique (THD) et l'interférométrie optique (IO) longue base, et sur les programmes astrophysiques que sont la caractérisation des planètes et disques extrasolaires, les étoiles évoluées, l'échelle des distances des céphéides, la caractérisation du trou noir au Centre galactique, la formation intense d'étoiles dans les galaxies ultralumineuses et les noyaux actifs de galaxies. Dans ces programmes, le pôle développe aussi des outils de modélisation des objets d'intérêt permettant une interprétation fine des observations en s'appuyant sur des simulations numériques. Ces recherches s'appuient sur des innovations en instrumentation comme l'OA multi-objet (MOAO), la coronagraphie à masque de phase, la suppression de speckles pour la THD, le masquage de pupille, le filtrage spatial par fibre monomode en interférométrie et le suivi de frange. Ces recherches exploitent les grands instruments disponibles dans la communauté. A noter que le pôle mène aussi une action de valorisation dans le domaine biomédical des techniques HRA.

5. Profil d'activité

Le profil d'activité du pôle HRAA se répartit sur les trois missions suivantes.

1- L'activité scientifique représente l'activité principale du pôle à plus de 85%.

2- Une partie de l'activité de valorisation et transfert est faite dans le cadre du développement des techniques de HRA, dans le contexte du calcul haute performance (HPC) et de l'optique intégrée avec des industriels, et dans le domaine biomédical à travers des collaborations avec l'hôpital des Quinze-Vingts et IBENS. L'autre partie est consacrée à des expertises faites par les chercheurs, principalement pour des agences comme l'INSU, l'ANR, l'HCERES et l'UE, et des revues scientifiques et à de nombreuses actions de diffusion de la culture scientifique (voir annexe 4).

3- L'appui à la communauté se traduit par les enseignements universitaires effectués au-delà des services des EC et des personnels CNAP, une implication forte dans les instances régionales et nationales comme l'INSU, l'AS-HRA, le JMMC, le GIS PHASE et les conseils de l'Observatoire, débouchant sur des contributions à l'établissement de la stratégie scientifique nationale comme pour la prospective de l'INSU.

6. Organisation et vie du pôle

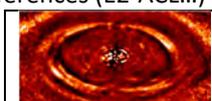
Les personnels sont répartis sur trois bâtiments du site de Meudon : bâtiment 6 qui a été déménagé au bâtiment 12A depuis l'été 2016, bâtiments 5 et 17. La vie du pôle est ponctuée par des réunions plénières de concertation en fonction des sujets, de l'ordre de 4 par an. Une journée scientifique du pôle est programmée à l'automne de chaque année, après l'arrivée des nouveaux doctorants, permettant des échanges sur les avancées de la recherche effectuée et des projets. Des séminaires sont aussi programmés à travers l'invitation d'intervenants extérieurs. Enfin, les déjeuners mensuels du pôle sont l'occasion d'échanges informels et de présentation des travaux des doctorants.

Bilan Scientifique⁶

1. Produits et activités de recherche du pôle

En optique adaptative (OA), le pôle est très impliqué dans les développements liés au projet du télescope extrêmement grand européen (ELT) de l'ESO, officiellement lancé en 2014. La période a ainsi vu l'aboutissement de la démonstration sur le ciel du concept clef de Multi-Object Adaptive Optics (MOAO) par l'instrument CANARY, associant des étoiles guides naturelles et lasers ainsi que des miroirs adaptatifs en boucles fermées et ouvertes (E2-2). Ces résultats assoient la faisabilité de l'OA pour MOSAIC, le spectrographe multi-objets de l'ELT (PI GEPI). Sa phase A a été lancée début 2016, pour une durée de 2 ans, avec pour objectif la définition d'un design conceptuel de l'instrument. Nous en coordonnons l'étude de l'OA en partenariat avec l'université de Durham (GB), l'ONERA et le LAM (E2-ACT10). Mais le projet majeur pour l'équipe est notre contribution à l'instrument MICADO, imageur proche IR de première lumière de l'ELT (PI MPE, Allemagne), dont la phase B est lancée depuis fin 2015 jusqu'à fin 2018.

⁶ Les références (E2-ACL...) sont données dans l'annexe 4. Les références aux faits marquants (E2-n) sont en annexe B



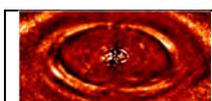
Nous sommes Col de l'instrument et responsables de la réalisation de l'OA de première lumière sur étoile naturelle (Single Conjugate Adaptive Optics ou SCAO) et du mode coronagraphique (E2-ACT3). Nous collaborons pour la SCAO avec les équipes italiennes de MAORY à Arcetri et Bologne. En interne, nous menons dans ce cadre des activités de prototypage, en particulier pour l'analyseur à pyramide. Pour tous ces projets, les simulations numériques de l'OA à l'échelle des ELT sont cruciales. Nous avons mené le développement du code COMPASS qui permet un calcul à haute performance (HPC) par la parallélisation sur les accélérateurs matériels que sont les GPU (E2.ACT20). Ce travail a aussi débouché sur le projet H2020 HPC Green Flash (GF) porté par l'équipe, avec deux industriels Microgate et PLDA et l'université de Durham. Démarré en 2015, GF débouchera en 2018 sur le prototypage d'architectures de calculateur temps réel (RTC) pour les OA de l'ELT à base de technologies GPU, FPGA et ARM (E2-ACT6).

SPHERE a pour objectif la caractérisation spectrale de planètes géantes jeunes (et par extension des systèmes planétaires) depuis le sol au VLT en imagerie THD grâce à un survey de plusieurs centaines d'étoiles (260 nuits de temps garanti). Le projet a regroupé plusieurs instituts européens sous le PI-ship de l'IPAG et le LESIA en a été un des acteurs majeurs. Depuis la mise en service de SPHERE en 2014, nous sommes très fortement impliqués dans le développement de la réduction des données (SpeCal), sur les opérations (observations et réductions des données GTO) et sur l'exploitation astrophysique (E2.3, E2-ACL11). Pour l'interprétation des données, le pôle HRAA collabore avec le pôle planétologie pour le développement du code ExoREM (E2-ACL14). Par ailleurs un programme de R&D vise à améliorer notre compréhension des limites ultimes de l'imagerie THD. Le banc THD a été développé dans ce but (E2-ACL28) et a permis d'atteindre des contrastes entre planète et étoile de 10^{-7} à 10^{-8} sur de larges bandes spectrales (E2-ACL5).

En collaboration avec le MPE (PI) et des laboratoires européens, le LESIA a développé depuis 2005 GRAVITY, un instrument de deuxième génération pour le VLTI. Cet instrument cryogénique alliant optique guidée monomode et OA permet l'observation interférométrique simultanée de deux sources avec quatre télescopes du VLT, au choix les 8,2m de diamètre ou les 1,8m. Le LESIA a fourni plusieurs sous-systèmes critiques de l'instrument. Le cas scientifique principal concerne l'étude de la gravitation en champ fort à travers l'observation de matériau en orbite autour du trou noir au centre de la galaxie, le test de la théorie du trou noir et la mesure de ses caractéristiques. On attend également un impact majeur de cet instrument dans de nombreux domaines d'astrophysique HRA, par exemple la spectro-imagerie des objets jeunes et des surfaces stellaires ainsi que la détection astrométrique des exoplanètes (E2-6). En prévision de l'interprétation des données GRAVITY sur le centre galactique (E2-ACL32), le code de simulation d'observation en champ gravitationnel fort, GYOTO, a permis l'étude des effets relativistes au centre galactique à l'aide de simulations d'observations d'orbites d'étoiles par GRAVITY (E2-ACL7). Nous avons aussi développé un logiciel de reconstruction de carte de raies à partir de données de spectro-imagerie qui a démontré la présence d'hydrogène moléculaire très chaud dans le parsec central de la galaxie (E2-ACL4). Enfin, l'étude des pulsations de la supergéante rouge GCIRS 7 nous a permis d'affiner la datation de l'amas stellaire nucléaire (E2-ACL30).

Le laboratoire est fortement impliqué dans le développement des techniques issues des télécommunications pour l'astronomie. Le recombineur de GRAVITY, par exemple, est une optique intégrée développée originellement pour les télécommunications, et adaptée ensuite pour l'interférométrie stellaire. Nous avons aussi développé la modulation temporelle (via des cristaux LiNbO3) pour l'instrument FIRST sur Subaru. FIRST est une évolution du classique masquage de pupille avec filtrage par fibre monomode et réarrangement de pupille non redondant (E2-ACL42). Enfin, nous sommes engagés vers l'utilisation de ces nouvelles techniques (appelées "astrophotonique") pour des applications spatiales (ERC Lithium). C'est ainsi que nous avons défini et construit le nanosatellite PICSAT sur la base de fibres optiques monomodes alliant une démonstration technologique et l'objectif astrophysique de photométrie du transit de B Pic à l'automne 2017 (E2-ACT11).

L'observation des Céphéides présente un intérêt considérable du double point de vue de la physique stellaire et de l'estimation des distances cosmologiques. Le LESIA est engagé dans un ambitieux programme d'observation de Céphéides avec les interféromètres CHARA, VLTI, ainsi que plusieurs autres instruments au sol et dans l'espace (VLT, HST, Herschel) (E2-ACL3 & 40). En effet, la résolution angulaire très élevée des grands interféromètres CHARA et VLTI permet de mesurer directement la variation de taille angulaire des Céphéides au cours de leur cycle de pulsation. Par la combinaison de la vitesse radiale (obtenue par spectroscopie) et des diamètres angulaires interférométriques, il est possible de déduire quasi-géométriquement la distance de l'étoile et d'étalonner la célèbre relation période-luminosité (P-L). Un autre programme observationnel porte sur les étoiles évoluées comme L2 Pup et Bételgeuse, combinant plusieurs instruments et domaines de longueur d'onde (E2-ACL18).



Le LESIA mène un programme d'étude à haute précision de la polarisation au cœur des AGN (E2-5) avec la collaboration du LUTH et des experts des AGN et quasars de l'Observatoire de Strasbourg. Cette collaboration vise d'une part à améliorer des outils de simulation du transfert radiatif incluant les effets de polarisation, dans un milieu représentatif d'un AGN et d'autre part à confronter des observations HRA des objets les plus proches, dans le proche IR, aux résultats de ces simulations. Notre équipe a développé un code de transfert radiatif, suivant une approche particulièrement adaptée à la modélisation de l'émission IR et incluant les effets de polarisation : MontAGN (E2-ACT7). Ce modèle a été validé en menant une campagne de tests de comparaison avec le modèle existant à l'Observatoire de Strasbourg utilisé par une large communauté. L'exploitation du code MontAGN débute.

Enfin, le LESIA a poursuivi son activité de valorisation dans le domaine biomédical des techniques HRA de l'astronomie. Le banc prototype d'imagerie 3D par tomographie optique cohérente (OCT) et OA a été utilisé pour l'imagerie en profondeur de plusieurs tissus ex-vivo. Ce travail se fait avec la collaboration de l'Hôpital des Quinze-Vingts, l'IBENS et l'Institut Langevin. L'équipe a co-organisé la première conférence « Adaptive Optics and Wavefront Control in Microscopy and Ophthalmology » à Paris.

2. Données chiffrées

Sur la période, 21 thèses de doctorat ont été soutenues et 3 HDR. Le pôle est ou a été leader des ANR SAM, COMPASS et UnlockCepheids, de l'ERC Lithium, du projet H2020 Green Flash et du DIM ACAV Région Ile-de-France. Il participe aux ANR GIPSE et à l'ERC CepBin. Le pôle est PI de FIRST et coPI de CANARY, col de GRAVITY, SPHERE et MICADO. Il est impliqué dans le programme OPTICON sur FP7 et H2020. Le banc THD est fortement soutenu par le CNES depuis plusieurs années et par PSL*.

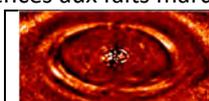
Cf ANNEXE 4 pour un descriptif complet des activités

Faits marquants ⁷

Dans sa configuration finale, l'instrument CANARY intègre quatre analyseurs de front d'onde sur étoiles guides naturelles et quatre sur étoiles lasers Rayleigh focalisées à 21km d'altitude, deux étages de correction avec deux miroirs déformables et un miroir de pointage. Il a permis de valider sur le ciel la maîtrise de la complexité d'un tel système d'OA et le contrôle par tomographie pour l'OA grand champ, et de quantifier les performances atteintes en fonction des conditions d'observation dans diverses configurations comme un contrôle en boucle ouverte pure (E2-1) ou un couplage du contrôle en boucle ouverte sur le deuxième étage avec un contrôle en boucle fermée sur le premier reproduisant le cas qui sera rencontré pour l'ELT (E2-2). Ainsi ont été validés pour la première fois sur le ciel, l'OA par tomographie laser (LTAO) et la MOAO.

L'étoile AU Microscopii est une étoile jeune (~20 Ma) de faible masse entourée d'un disque de poussières, signe d'un système planétaire en formation. Les observations de SPHERE en août 2014 ont mis en évidence de nouvelles structures en forme d'ondulations sur la partie sud-est du disque et se développant « au-dessus » du plan médian. Grâce à des observations antérieures du HST/STIS en 2010 et 2011, nous avons pu confirmer la présence de ces mêmes structures, mais à une distance plus proche de l'étoile trahissant un déplacement vers l'extérieur du disque. La mesure des vitesses indique que les structures les plus éloignées se déplacent plus rapidement, atteignant une vitesse supérieure à la vitesse de libération du système (E2-3). Un tel phénomène n'avait jamais été observé auparavant. D'après les images, ces structures devraient être issues d'un point en orbite autour de l'étoile, potentiellement une planète. Le vent stellaire intense de cette étoile active doit jouer un rôle clé.

⁷ Références aux faits marquants en ANNEXE B



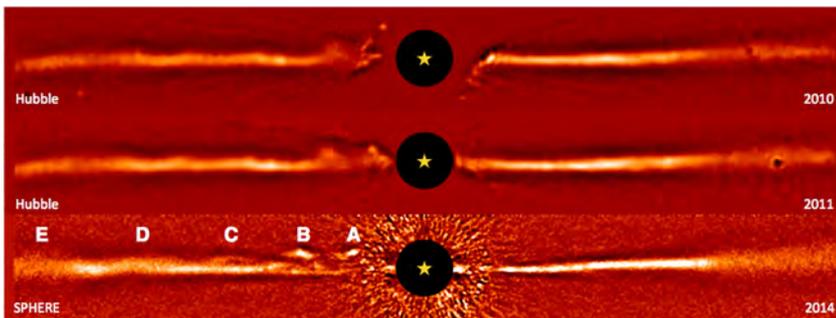


Figure 13. Images du disque d'AU Mic, obtenues avec HST/STIS et SPHERE/IRDIS entre 2010 et 2014 (fov = 13''x1.5''). Les structures qui s'écartent du plan médian sont notées de A à E. Le déplacement est visible entre 2010 et 2014.

Une équipe menée par le LESIA a obtenu en 2016, grâce à l'instrument SPHERE, la première image de la surface visible d'une étoile autre que le Soleil : la supergéante rouge Bételgeuse de taille de plus de 700 fois celle du Soleil (E2-4). Bételgeuse perd de la matière à un taux de plusieurs fois la masse de la Terre chaque année, enrichissant ainsi le milieu environnant en éléments chimiques. Le processus physique permettant à la matière d'être éjectée de la surface de l'étoile reste mal compris. La surface de Bételgeuse, observée avec SPHERE/ZIMPOL en visible, apparaît irrégulière, entourée de panaches gazeux (Figure 14, gauche) (E2-4). Ces asymétries indiquent que la perte de masse de ce type d'étoile est certainement liée à la présence de forts mouvements convectifs à leur surface. ZIMPOL a également mesuré la polarisation de la lumière (Figure 14, droite), une propriété liée à la diffusion de la lumière par la poussière entourant l'étoile. La carte du taux de polarisation montre une coquille de poussière incomplète et asymétrique à une altitude de 3 fois le rayon de l'étoile.

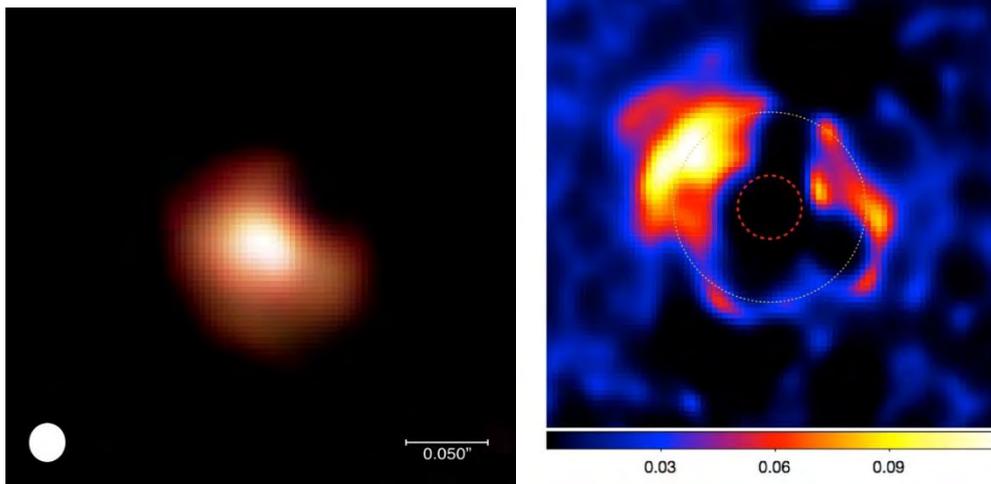
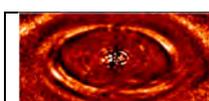


Figure 14. Gauche : image résolue dans le visible de la photosphère de Bételgeuse. Droite : carte du taux de polarisation en bande R. Cercle en pointillés rouges : taille de la photosphère mesurée par interférométrie en IR. Cercle jaune : taille de la coquille partielle de poussière (3 rayons stellaires).

Dans le cadre de la vérification scientifique de SPHERE, nous avons observé le cœur de NGC 1068, l'archétype des noyaux actifs proches, de sorte à bénéficier de capacités inédites : la THD, la HRA et l'imagerie de polarisation, pour étudier la structure de l'environnement immédiat du noyau. La soustraction de la composante centrosymétrique, centrée sur la position du noyau et dominée par l'émission diffusée de l'objet central, à la carte d'angle de polarisation permet d'augmenter le contraste et de mettre en évidence des zones dans lesquelles la lumière n'est pas polarisée par le même effet. Cette opération fait apparaître un motif très particulier au plus près du noyau, que nous interprétons comme la signature d'un tore de matière relativement étendu entourant la source la plus centrale. Les caractéristiques de ce tore sont compatibles avec des estimations obtenues en comparant des modèles de dynamique du gaz à des observations multi-spectrales (E2-5).

GRAVITY a été installé à l'Observatoire du Cerro Paranal au cours de l'été 2015 et a vu sa première lumière avant la fin de l'année. Le suivi de franges sur des sources de magnitude $m_K \approx 10$ a permis l'observation d'objets plus faibles que $m_K \approx 15$, notamment le trou noir supermassif au centre de la galaxie Sgr A*, avec une magnitude limite actuelle de $m_K \approx 17$ pour des temps de pose de plus d'une minute (E2-6). Ce sont les premières franges de l'histoire



de l'interférométrie astronomique sur des sources aussi faibles. Outre ces performances de sensibilité, des précisions sur la visibilité jusqu'à mieux que 0,25 % et des précisions sur la phase spectro-différentielle meilleures que 0,5°, correspondant à une précision astrométrique différentielle meilleure que 10 microsecondes d'angle (μs), ont pu être démontrées. Les premières franges sur le centre galactique ont été obtenues le 17 mai 2016 à l'occasion de la première nuit à 4 télescopes de 8 m. Le suiveur de frange était asservi sur GCIRS 16C, de magnitude environ $m_K=10$. La Figure 15 montre les visibilités obtenues sur S2 ($m_K=14,2$, poses de 60 secondes) ainsi que les clôtures de phase. Les visibilités étant proches de 1 et les clôtures de 0, on en déduit que cette source n'est pas binaire (excluant un compagnon plus brillant que $\Delta m_K=3$) et qu'elle peut par conséquent être utilisée comme référence de phase et comme masse test pour l'exploration des effets relativistes sur son orbite. Le rapport signal-sur-bruit étant suffisamment grand, GRAVITY a pu observer un sursaut de $m_K=15$ en septembre 2016.

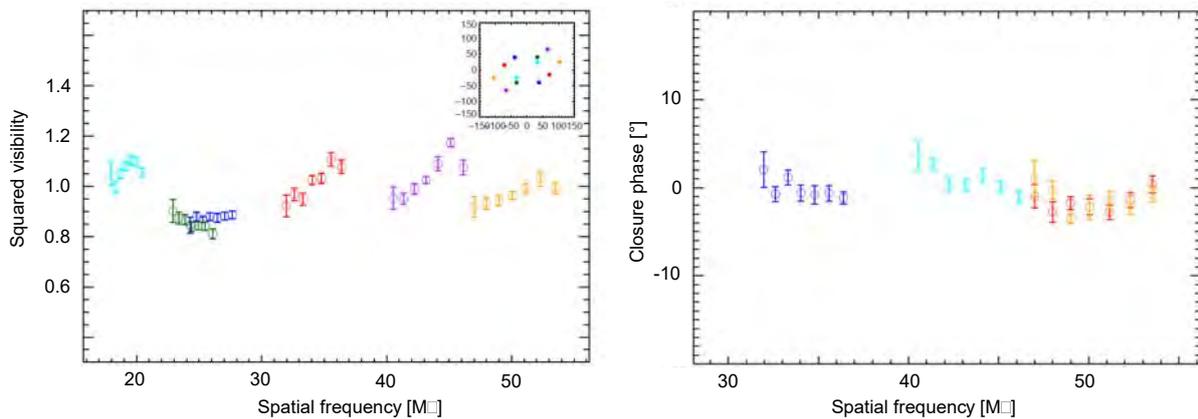
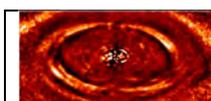


Figure 15. Résultats obtenus sur l'étoile S2 au centre galactique : visibilités et clôtures de phase

Analyse SWOT du pôle HRAA

FORCES	FAIBLESSES
Fo8. Interdisciplinarité instrumentation - astrophysique Fo9. Visibilité nationale et internationale Fo10. Rôle majeur dans JWST, SPHERE, GRAVITY, MICADO Fo11. Activités de R&D maintenues à un haut niveau : FIRST, THD, CANARY, Green Flash Fo12. Collaborations internationales : MPE, Durham University, ESO, Bologna Fo13. Collaboration avec des PME et des industriels : PLDA, Microgate, ALPAO, iXBlue Fo14. Financements diversifiés : UE, ANR, INSU, CNES, région IdF, PSL*	Fa4. Disponibilité des IT LESIA réduite pour les grands projets et la R&D du pôle Fa5. Risque de dispersion dans de nombreux projets Fa6. Implication dans l'exploitation astrophysique parfois trop limitée sur les instruments construits Fa7. Parité à améliorer
OPPORTUNITÉS	MENACES
Op8. Participation à l'instrumentation pour l'ELT Op9. 3 ^{ème} génération du VLT et VLTI Op10. Exploitation sur GTO et au-delà des instruments JWST, SPHERE et GRAVITY Op11. Contexte Observatoire, PSL*, Labex ESEP... Op12. Projets européens Green Flash et Lithium, valorisation dans contexte HPC et nanosatellites Op13. Excellents jeunes chercheurs candidats au CNRS et au CNAP pour rejoindre le pôle	Me7. Faiblesse de la coordination de l'OA sur le plan national Me8. Départ des ingénieurs en CDD en fin de projet avec perte de compétences Me9. Phase de transition pour les applications biomédicales Me10. Incertitude pesant sur l'abondement de la ligne TGIR ESO

Tableau 13 - Analyse SWOT du pôle HRAA

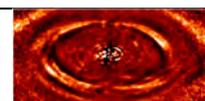


En nous appuyant sur nos forces, nous devons saisir les opportunités pour maintenir les activités de recherche du pôle HRAA au plus haut niveau. Les priorités du pôle sont l'instrumentation pour l'ELT et l'exploitation des instruments SPHERE, GRAVITY et JWST, tout en maintenant une activité de R&D préparant l'avenir. En fonction de l'évolution des moyens ITA au LESIA et des recrutements, le pôle pourra saisir de nouvelles opportunités au-delà de l'instrument MICADO et des R&D déjà lancés.

Projet scientifique à cinq ans du pôle

L'instrumentation pour l'ELT constituera un élément majeur de l'activité du pôle HRAA pour la période à venir. Elle concernera en premier lieu l'instrument MICADO. Responsables SCAO et coronographe (E2-ACT3 & 14), nous allons poursuivre notre prototypage (pyramide, RTC, vortex) pour aboutir au design préliminaire de ces sous-systèmes en octobre 2018, à leur design final en octobre 2020, avant d'en lancer la fabrication et les intégrations et tests. D'autre part, nous serons impliqués dans l'instrument MOSAIC. Si les contours exacts de cet instrument restent à ce jour dépendants des arbitrages pour tenir compte de l'enveloppe budgétaire disponible, notre implication s'inscrit dans la poursuite de nos activités sur la MOAO et le HPC. Le début de la phase B de l'instrument est envisageable à partir de fin 2018. Ces projets ELT seront par ailleurs le moteur d'activités de R&D. Un premier axe de R&D est le HPC pour la simulation des OA à l'échelle des ELT et pour leurs RTC. Notre objectif est d'identifier d'ici la fin de Green Flash, fin 2018 (E2-ACT6), un instrument d'OA qui accueillera le prototype développé pour une validation ciel et une évaluation des performances dans des conditions réelles. Avec un soutien de l'INSU, une valorisation potentielle de cette R&D est la définition des standards ESO pour les RTC des instruments ELT. Ce savoir-faire unique sur les techniques de HPC pour l'instrumentation devrait être valorisé dans les années à venir à travers des collaborations dans différents domaines. Un deuxième axe de R&D concerne l'instrument CANARY. Nous allons y terminer l'expérience d'analyse de front d'onde sur spot allongé avec étoile laser sodium (E2-ACT27), menée en collaboration avec l'Université de Durham et l'ESO. Nous discutons d'autre part avec ces partenaires, l'Observatoire d'Arcetri et l'Université de Rome d'une prochaine expérience sur étoile laser sodium avec refocalisation dynamique et analyseur pyramide. CANARY est reconnu comme une plateforme européenne pour la R&D en OA dans le programme H2020 OPTICON.

La thématique des exoplanètes et des systèmes planétaires a fortement progressé ces 4 dernières années et nous nous orientons vers une phase de caractérisation fine de ces objets, que ce soit au niveau des atmosphères ou de la morphologie des disques circumstellaires. Avec les instruments SPHERE et JWST, nous prolongerons nos programmes d'observations de systèmes jeunes afin d'étudier les parties externes de ces systèmes (planètes et disques à quelques UA) (E2-ACL13). SPHERE fournit des images inégalées en termes de résolution spatiale, et JWST/MIRI ouvrira le domaine du moyen IR (E2-ACL15) qui apparaît crucial pour mieux contraindre les paramètres des atmosphères des géantes jeunes. Nous participerons à la caractérisation de planètes géantes jeunes (nouvellement détectées) grâce au modèle d'atmosphère ExoREM développé en collaboration avec le pôle planétologie. Par ailleurs, nous nous intéressons au possible upgrade instrumental de SPHERE, en cours de discussion. A court terme, le lancement du nanosatellite PICSAT nous permettra de tester cette nouvelle plateforme pour le transit de planètes de type B Pictoris b (E2-ACT22). L'astrométrie micro-seconde d'angle à double champ permise par GRAVITY ouvre la voie à la découverte de planètes de masse terrestre orbitant autour d'étoiles binaires de faible masse. Le mode coronographique de MICADO se concentrera encore sur les objets jeunes mais en ciblant des séparations angulaires plus courtes ($<0.1-0.2''$), donc potentiellement des planètes géantes plus proches pour les étoiles à proximité ou des systèmes plus lointains inaccessible avec SPHERE. A plus long terme, nous nous intéressons à la détection et à la caractérisation des planètes « matures » donc froides et faibles (contraste $<10^{-9}$). Dans le cadre spatial, nous menons ainsi une R&D soutenue fortement par le CNES, qui se prolongera pour développer à terme la correction de phase et d'amplitude achromatique, et ainsi atteindre des THD compatibles avec la détection de planètes matures (E2-ACT18). Nous participerons à la préparation de la mission WFIRST (voie coronographique) en fournissant des simulations de performances (E2-ACL39). Cette mission de démonstration permettra à la communauté THD de se préparer aux missions de plus grandes envergures (LUVOIR, HABEX...). Elle offrira des données uniques dans le visible dans le cas de planètes géantes, pour tester nos modèles d'atmosphères et se préparer à la caractérisation des atmosphères de planètes telluriques. Au sol sur l'ELT, l'instrument PCS nécessitera lui aussi une R&D importante (que nous avons aussi démarrée) et une réflexion conceptuelle, en valorisant nos activités SPHERE : coronographie, simulations, AIT, pointage, RTC. PCS sera complémentaire au spatial en apportant une résolution angulaire et spectrale plus élevée et une extension vers le proche IR.



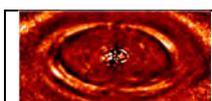
Dans le domaine des étoiles évoluées, nous prévoyons d'exploiter les possibilités remarquables apportées par les instruments GRAVITY et MATISSE. De par notre forte implication dans GRAVITY, nous disposons des compétences pour utiliser l'instrument au meilleur de ses capacités. Combinés à l'OA (SPHERE) et à l'interféromètre ALMA, nous disposons d'une suite d'outils complémentaires pour comprendre les dernières phases de l'existence des étoiles. L'équipe du LESIA a développé de nombreuses collaborations nationales et internationales pour compléter ses compétences (modélisation). Par ces observations (E2-ACL9), nous cherchons à élucider le mécanisme de perte de masse. Au-delà des étoiles évoluées, la palette d'application de GRAVITY à la physique stellaire et aux exoplanètes est particulièrement riche. Les capacités de spectro-astrométrie à une résolution spectrale de $R=4000$ permettent par exemple de résoudre la dynamique de l'enveloppe des étoiles massives comme Eta Carinae, ou encore le cœur des binaires X massives (Vel X-1, SS 433...).

Dans le domaine de l'échelle des distances des Céphéides, le programme de recherche financé par l'ANR "UnlockCepheids" va prendre une ampleur considérable grâce à l'apport des parallaxes GAIA. La compétition est intense au niveau international, mais notre compétence unique en interférométrie optique nous donne un avantage stratégique essentiel (E2-ACL40). Le recrutement récent permis par le financement ANR nous donne la force de frappe nécessaire pour être pleinement acteurs de la révolution apportée par GAIA sur l'échelle des distances avec les céphéides galactiques. Le développement des résultats obtenus à l'échelle extragalactique dans le groupe local sera réalisé à partir de 2017-2018 grâce au financement de l'ERC "CepBin" dont nous sommes partenaires.

L'étude du Centre galactique et de son environnement sera abordée avec GRAVITY et JWST/MIRI. Concernant GRAVITY, nous sommes impliqués dans le suivi des sursauts de rayonnement de Sgr A*, observés de façon journalière en IR proche et dans les rayons X et dont l'origine est encore mal comprise. D'autre part, si ces sursauts prennent naissance assez près du trou noir, nous pourrions les utiliser pour sonder pour la première fois les propriétés de l'espace-temps à son voisinage immédiat. Le code GYOTO permettra de mener à bien ces différentes études. Nous sommes aussi impliqués dans l'étude des étoiles les plus proches de Sgr A*. Ainsi, l'étoile S2, qui s'approche à environ 2000 fois le rayon de Schwarzschild du trou noir, est affectée d'effets relativistes que GRAVITY pourra mettre pour la première fois en évidence (E2-ACT1). Il pourrait aussi découvrir de nouvelles étoiles faibles encore plus près de Sgr A*, qui seraient des sondes d'autant plus efficaces des propriétés du trou noir (E2-ACL26). Concernant JWST/MIRI, l'objectif est de détecter pour la première fois une contrepartie de Sgr A* dans le moyen IR. Une telle découverte apportera de nouvelles contraintes sur le modèle des sursauts de Sgr A* ainsi que sur le processus d'accrétion sur le trou noir. Un autre objectif concerne l'étude du milieu interstellaire autour de Sgr A* et son interaction avec les étoiles du parsec central.

Dans la continuité de GRAVITY sera développée la thématique de la gravitation en champ fort autour d'un trou noir supermassif, en particulier à partir de l'interprétation de données interférométriques. Le pôle HRAA est ainsi d'ores et déjà impliqué dans la prospective scientifique de l'interféromètre à très grandes lignes de base Event Horizon Telescope (EHT) (E2-ACL12), qui va permettre dans les mois qui viennent de produire une image en longueur d'onde millimétrique de Sgr A*. Le LESIA s'intéresse aussi à une implication dans l'interféromètre LISA qui permettra dans les années 2035 de sonder les propriétés de trous noirs supermassifs, en suivant l'émission d'ondes gravitationnelles associée à la capture d'un objet compact de masse stellaire (de façon similaire à GRAVITY utilisant le mouvement des sursauts de rayonnement pour sonder les abords de Sgr A*). Ces études théoriques seront accompagnées d'un développement instrumental : le pôle compte mettre à profit l'expérience acquise dans le projet de nanosatellite PICSAT pour proposer de développer un projet de réseau de nanosatellites pour la détection d'ondes gravitationnelles.

Mieux comprendre la physique de l'environnement proche de l'objet central des noyaux actifs de galaxie, et la façon dont celui-ci est alimenté en matière, sont deux enjeux majeurs. Nous projetons de compléter les observations de NGC 1068 (en utilisant le diagnostic polarimétrique couplé à la HRA et la stabilité instrumentale de SPHERE (E2-5)) par un programme plus large visant à caractériser d'autres régions centrales d'AGN proches. Pour aller plus loin, il est nécessaire de comparer l'ensemble de ces données à des modèles de transfert radiatif. Le code MontAGN permet aujourd'hui d'obtenir des résultats très prometteurs sur des régions de tailles variables (de la centaine de rayons de Schwarzschild à la centaine de parsecs), couplées radiativement afin de prendre en compte tous les effets de multidiffusion nécessaires à une évaluation précise de la polarisation, tant en termes de spectres qu'en termes d'images dont la résolution peut être aussi fine que voulue. Un travail d'optimisation de l'algorithme pour maximiser l'efficacité de calcul afin de mener de larges campagnes de simulation va être initié. Il est aussi



critique de maintenir un lien direct entre le travail de simulation et l'aspect observationnel, afin d'adapter au mieux la définition des observables et l'optimisation du protocole expérimental aux paramètres de la simulation. Le mode coronographique de MIRI devrait également être pris en compte pour l'étude de l'environnement d'AGN proches.

Le JWST, qui sera lancé en 2018, sera le télescope le plus sensible pour fournir des spectres continus sur toute la gamme spectrale IR proche et moyen (1 - 28 μm). Ce domaine spectral permet l'observation de régions, d'une part essentiellement transparentes au rayonnement, et d'autre part où la poussière chaude émet. Enfin ce domaine est extrêmement riche en diagnostics qui sont complémentaires de ceux trouvés à d'autres longueurs d'onde : il contient des raies d'émission et d'absorption de nombreux atomes, ions et molécules. Un axe de recherche est le domaine de la formation intense d'étoiles dans les galaxies externes, en se concentrant particulièrement sur le Super Stellar Cluster (SSC), qui jouent un rôle majeur dans l'évolution structurelle et chimique des galaxies. L'utilisation de MIRI sera au cœur de ce programme, mais les spectres de NIRSpec (IFU) devraient également donner accès à un ensemble unique de diagnostics stellaires d'absorption / émission qui ne sont pas accessibles depuis le sol, et permettront de caractériser les populations stellaires sur des échelles de quelques pc.

Enfin pour les applications au domaine biomédical, les résultats du banc couplant l'OCT et l'OA pour l'imagerie de la rétine seront à publier rapidement, et la perspective d'un passage à l'in-vivo devra être analysée avec nos partenaires de l'hôpital des Quinze-Vingts. De nouvelles orientations des activités sont aussi possibles, en particulier vers la correction du front d'onde en microscopie, principalement pour l'imagerie en profondeur dans les tissus biologiques diffusants. Par la création des perturbations dans l'échantillon lui-même, de forts effets anisoplanétiques sont prévisibles et de nouvelles techniques d'analyse de front d'onde et de conjugaison du miroir déformable sont à explorer. Des collaborations seront à construire avec l'IBENS et/ou l'IMNC à Orsay sur ces sujets.

E3. Pôle physique des plasmas

Présentation du pôle de physique des plasmas

1. Composition en équipes

Le pôle plasma recouvre deux grands thèmes de recherche qui sont « Vent solaire et milieu interplanétaire, plasmas hors héliosphère » et « Magnétosphères terrestre et planétaires ». Ces deux grands thèmes, qui sont déclinés en six sous-thèmes dans la partie bilan ci-dessous, couvrent de l'ordre de 90 % de l'activité scientifique du pôle. Le pôle plasma est également impliqué dans les deux thématiques transverses du LESIA qui sont « Exoplanètes et origine des systèmes planétaires » et « Perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace ».

2. Effectifs

Depuis 2013 nous constatons une légère baisse des effectifs avec 12 chercheurs permanents en juin 2017 contre 13 en janvier 2012. En juin 2017, le détail des effectifs du pôle est résumé dans le tableau ci-dessous. Le tableau n'inclut pas les ingénieurs et les postdocs travaillant pour l'instrument RPW de Solar Orbiter.

Chercheurs (CNAP+CNRS)	Enseignants chercheurs	Postdocs	Doctorants	Émérites et visiteurs
7+4	1	2	3	6

Tableau 14 - Effectifs du pôle plasma en juin 2017

Les moyens complémentaires, en dehors des moyens généraux du laboratoire et de l'Observatoire, les contrats CNES liés à l'instrumentation, les programmes nationaux (PNST, PNP) et autres programmes couvrant la période 2012-2017 sont listés dans le chapitre 2.7 de l'Annexe 4.

3. Profil d'activité

La principale activité (> 50 % du temps) des chercheurs du pôle est consacrée à la recherche dans les domaines mentionnés dans l'introduction. La majorité des chercheurs qui le composent (7 sur 12) est issue du corps des astronomes et des astronomes adjoints (CNAP), avec des obligations d'enseignement et de service dans les Services Nationaux d'Observation (SNO). Les enseignements dispensés sont très divers, de l'intervention dans des écoles en passant par des cours ou des TD en licence ou master, jusqu'aux cours pour doctorants et à l'encadrement de stages (généralement de licence ou master) avec aussi de nombreuses interventions auprès du grand public (cf annexe 4). Les services d'observations (définis par l'INSU) sont pour la plupart liés à la conception/réalisation/calibration de récepteurs radio (sol ou espace) sur lesquels nous sommes PI ou Co-PI (eg. Solar Orbiter, BepiColombo, LOFAR, etc) mais également à la mise à disposition de données. Soulignons que les quatre chercheurs CNRS et le MdC du pôle sont tous fortement impliqués dans la réalisation des instruments ainsi que dans l'exploitation/distribution des données qu'ils produisent. Plusieurs chercheurs du pôle occupent (ou ont occupé) des fonctions dans des instances d'expertise scientifique ou d'évaluation (PNST, CNAP, CNRS, AERES, CSAA/INSU) et/ou participent, via les conseils, à la vie du laboratoire et de l'Observatoire.

Cf ANNEXE 4 pour un descriptif complet

1. Produits (hors instruments)

Type	Nom	Objectif	Référence/contact
Base de données	APIS	Spectro-imagérie d'aurores planétaires	apis.obspm.fr (L. Lamy)
Base de données	MASER	Données et outils au standard OV	maser.lesia.obspm.fr
Code	Extension de MPI-AMRVAC	Magnétosphères planétaires en rotation	Thèse L. Griton (en cours)
Code	ARTEMIS-P	Tracé de rayons dans une magnétosphère	Thèse Gautier 2013
Code	ExPRES	Simulation des émissions radio Cyclotron-Maser planétaires	maser.obspm.fr/serpe/

Tableau 15 - *Produits et activités de recherche*

Bilan scientifique⁸

Six sujets, issus des deux grands thèmes de recherche du pôle, ont été considérés représentatifs pour la période 2012-2017.

Les structures héliosphériques à grande échelle

Les structures à grande échelle présentées ici sont le vent solaire à l'échelle de l'unité astronomique et les magnétosphères des planètes magnétisées. Concernant le vent solaire, nous avons montré en 2014 par des simulations de type Monte Carlo que le flux de chaleur est essentiellement de type non-collisionnel, contrairement à ce que des mesures dans le vent solaire semblaient faussement indiquer [E3-ACL25]. En parallèle, en 2012, en partie dans le cadre du projet européen SHOCK (programme FP7), nous avons initié des simulations magnétohydrodynamiques de l'interaction du vent solaire avec une planète magnétisée. Nous avons d'abord traité le cas relativement simple de Mercure (E3-ACL13, E3-ACL015) avec l'objectif de préparer un outil pour le retour scientifique de l'orbiteur MMO-BepiColombo, avant de progresser vers le cas des magnétosphères en rotation (thèse de L. Griton), notamment pour faciliter l'interprétation des observations des aurores d'Uranus et des variations des périodes magnétosphériques de Saturne (E3-ACL28, E3-ACL52). Dans le domaine de l'observation radio, l'interféromètre LOFAR a permis l'obtention de la première image radio (à 150MHz) des ceintures de radiation de Jupiter (E3-ACL1). La combinaison des observations du réseau décimétrique de Nançay et des sondes Voyager, Cassini et Juno révèle la détection des émissions radio induites par les satellites de Jupiter, notamment les faibles émissions de Ganymède et Europe (thèse de C. Louis). Enfin, dans l'équipe, depuis longtemps, nous développons la méthode dite de « bruit quasi-thermique » (QTN) pour exploiter les récepteurs radio embarqués sur des sondes et obtenir in situ les paramètres macroscopiques du plasma. Ainsi la thèse de M. Martinovic a porté sur la mesure de la température des électrons dans le vent solaire (E3-ACL6) avec les antennes (non adaptées pour le QTN) de STEREO, alors que les antennes de Cassini ont permis des mesures précises de la densité et de la température des électrons dans la magnétosphère de Saturne, montrant, entre autre, l'existence d'une structure en cloche de l'échelle de hauteur entre les orbites de Dione et Rhéa (E3-ACL39).

⁸ Les références (E3-ACL...) sont données dans l'annexe 4. Les références aux faits marquants (E3-n) sont en annexe B



Turbulence dans le vent solaire et les magnétosphères planétaires

Le vent solaire et différentes régions des magnétosphères planétaires sont turbulents. Grâce aux mesures de Cluster, on a pu observer dans le vent solaire le spectre magnétique entre les échelles fluides (10^4 km) et les échelles sub-électroniques (<1km) avec deux domaines quasi-universels en $-k^{-5/3}$ dans le domaine MHD et $-k^{-2.8}$ sur les échelles sub-ioniques, [E3-ACL41; E3-ACL33]. La nature quasi-universelle du spectre aux petites échelles est confirmée par les observations de Cassini dans la magnétosphère de Saturne [E3-ACL32]. Aux petites échelles le spectre des fluctuations électriques suit une loi de puissance $-k^{-0.8}$ [E3-ACL54]. La différence entre les spectres magnétiques et électriques s'explique par l'effet Hall (découplage des ions du fluide des électrons). Entre les deux domaines spectraux en loi de puissance, autour des échelles ioniques, on observe une variabilité des spectres. On a montré que ce domaine variable est peuplé d'ondes Alfvén ion cyclotron et de structures non-linéaires, de type vortex d'Alfvén (thèse S. Lion) [E3-ACL5], solitons, chocs et couches de courant [E3-ACL8].

Ondes et couplage d'ondes

Deux types d'étude ont été menés ces dernières années :

- (1) le rôle des ondes whistlers pour la diffusion angulaire des électrons suprathermiques (« strahl »),
- (2) les mécanismes d'émission des ondes électromagnétiques lors de sursauts solaires et autour des planètes (Jupiter, Saturne et Mercure en particulier).

De par leur fréquence et polarisation, les ondes whistlers sont susceptibles d'interagir avec les électrons du vent solaire. Grâce à l'instrument STAFF/Cluster, turbulence et ondes polarisées ont pu être séparées, montrant ainsi que dans le vent lent ces whistlers sont reliés à l'instabilité de flux de chaleur [E3-ACL24]. Une analyse des fonctions de distribution des électrons a de plus confirmé le rôle privilégié que pourraient jouer ces ondes dans les processus de diffusion des électrons suprathermiques [E3-ACL2].

Concernant les émissions radio, les études portent tout d'abord sur les mécanismes d'émission dans le milieu interplanétaire (simulations Vlasov-électrostatiques ainsi que PIC électromagnétiques et analyse de données STEREO E3-ACL19), et autour de Jupiter (via l'analyse des données de Cassini - polarisation et direction d'arrivée des ondes et du réseau décimétrique de Nançay - analyse des diagrammes temps-fréquences à très haute résolution -E3-ACL29, E3-ACL45).

Les caractéristiques statistiques des émissions de Type III vues par STEREO ont été détaillées dans E3-ACL22 et E3-ACL23 (thèse de V. Krupar) et la distribution en énergie des ondes de Langmuir associées à ces émissions dans E3-ACL49 (thèse de S. Vidojevic).

Aurores planétaires

L'étude comparée des aurores planétaires des planètes géantes a reposé sur des observations combinées radio (spatiales et sol), UV, in situ et des simulations. En particulier, le rayonnement kilométrique auroral de Saturne à différentes longueurs d'ondes ont permis d'étudier :

- (i) sa modulation rotationnelle après l'équinoxe [e.g. E3-ACL52],
- (ii) son association avec les aurores observées simultanément aux longueurs d'onde UV et IR [E3-ACL37, E3-ACL4], ou
- (iii) avec les systèmes de courants alignés couplant la magnétosphère à l'ionosphère [E3-ACL48].

Une étude statistique multi-points (Cassini/RPWS, Galileo/PWS, Réseau décimétrique de Nançay) a caractérisé le contrôle du vent solaire sur l'occurrence et la dynamique des émissions décimétriques non-induites par Io [E3-ACL44, E3-ACL21]. La préparation de la mission Juice a permis de caractériser l'impact d'émissions décimétriques joviennes sur les mesures de radar prévues sur la même gamme spectrale [E3-ACL42].

La re-détection des aurores UV d'Uranus, pour la première fois depuis leur découverte en 1986 par Voyager 2, a permis une étude unique de la magnétosphère asymétrique d'Uranus [E3-ACL46, E3-ACL18], avec les premières images instantanées de ces émissions près de l'équinoxe.

Des travaux plus généraux ont concerné le développement d'outils de diagnostic des électrons précipités dans les aurores UV [E3-ACL31, E3-ACL35] et la création d'un service de données de spectro-imagerie aurorale planétaires labellisé par l'INSU en 2016 [E3-ACL10].

Les poussières

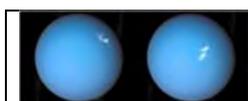
La découverte par notre équipe, avec STEREO/WAVES, d'une nouvelle population de poussières interplanétaires - des nanoparticules accélérées à plus de 300 km/s, a ouvert un nouveau champ de recherches dans lequel s'est investie une partie importante de notre groupe (thèse S. Belheouan). Nous avons expliqué quantitativement le signal produit par les nanopoussières sur les antennes de STEREO [E3-ACL47, E3-ACL51], et montré qu'un instrument indépendant - Cassini/RPWS - détecte un flux similaire [E3-ACL30], levant ainsi toute ambiguïté sur l'origine du signal. Six ans de mesures STEREO ont mis en évidence une relation du flux de ces particules avec les périodes de la planète Mercure et avec les éjections de masse coronale solaire [E3-ACL11]. A partir des données de Cassini entre la Terre et Jupiter, nous avons montré [E3-ACL14] que le flux de nanopoussières varie avec la distance au Soleil en accord avec la théorie [E3-ACL26], et que des observations attribuées précédemment à une éjection par Jupiter ont en réalité une origine dans le système solaire interne. Finalement, nous avons déterminé les fréquences à utiliser pour la détection de ces particules plus près du Soleil avec les projets Solar Orbiter et Parker Solar Probe, et montré [E3-ACL7] que les nanopoussières réagissent aux perturbations locales du vent solaire comme prévu par la théorie [E3-ACL12].

Transitoires astrophysiques

L'étude observationnelle et théorique des plasmas du Système solaire nous a donné des outils applicables à des objets astrophysiques plus distants, que nous étudions avec les plus grands radiotélescopes au sol (UTR-2, LOFAR). Nous nous sommes focalisés sur l'étude des transitoires astrophysiques dans le plan temps-fréquence, et notamment la caractérisation des sursauts « millisecondes » de la magnétosphère de Jupiter [E3-ACL29], la détection depuis le sol des éclairs d'orages de Saturne, l'étude de leur durée, spectre, énergie [E3-ACL36, E3-ACL50] et de leur propagation sub-ionosphérique (thèse A.-L. Gautier), l'étude de pulsars en basses fréquences [E3-ACL40, E3-ACL20, E3-ACL3], et la recherche en aveugle de transitoires astrophysiques [E3-ACL16, E3-ACL9]. Nous avons publié des travaux théoriques pionniers sur la détection radio d'exoplanètes [E3-ACL38, E3-ACL17 et références incluses] et tentons d'en détecter les signaux avec tous les grands radiotélescopes existants (UTR-2, GMRT, LOFAR) (thèse de I. Vasylieva) et en construction (NenuFAR, SKA) avec, pour l'heure, des détections préliminaires non encore confirmées (comme toutes les équipes travaillant sur ce sujet).

La combinaison de nos expertises sur les pulsars et la physique des émissions radio (exo)planétaires nous a permis de développer une théorie originale de l'émission des mystérieux Fast Radio Burst découverts en 2007 [E3-ACL27]. Cette théorie quantitative et prédictive requiert une énergie émise 10^{10} fois plus faible que ses concurrentes, et ses scénarii d'application sont variés.

Pour développer en France les capacités d'étude des transitoires radio astrophysiques, nous avons développé et dirigeons la construction à Nançay du radiotélescope basses fréquences géant NenuFAR, à la fois instrument autonome, extension de LOFAR et « éclaircur » de SKA [E3-ACL43, thèse J. Girard], soutenu par une communauté nationale de 60 chercheurs (+collaborateurs étrangers) fédérée via des ateliers et écoles nationaux.



Faits marquants ⁹

Parmi les nombreux résultats scientifiques précédemment décrits en voici trois représentatifs de l'activité du pôle.

Détection des nano-poussières par les récepteurs radio sur STEREO et Cassini

Les données des récepteurs radio sur STEREO et Cassini ont apporté un éclairage nouveau sur les nano-poussières interplanétaires. Cassini entre la Terre et Jupiter a permis de montrer que leur flux décroît avec la distance au Soleil comme prévu par les modèles de dynamique [E3-1], tandis que six ans de mesures STEREO ont montré une relation de leur flux avec les périodes orbitales et de rotation de Mercure et Vénus ainsi qu'avec les éjections de masse coronales [E3-2].

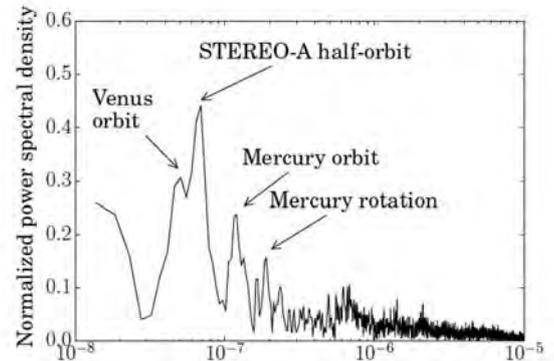


Figure 16 : Observations des nanopoussières par STEREO

Turbulence « forte » dans le vent solaire

La nature de la turbulence plasma dans le vent solaire reste une question ouverte. On a pu mettre en évidence que la phase finale de cascade de type Kolmogorov des fluctuations de champ magnétique dans le vent solaire rapide est peuplée par des structures cohérentes énergétiques en forme de vortex d'Alfvén et de couches de courant [E3-3]. Dans le vent lent, en plus de ces structures, on observe aussi des solitons magnéto-sonores et des vortex compressibles [E3-4]. Ces résultats indiquent que la turbulence dans le vent solaire est potentiellement de nature dite « forte ».

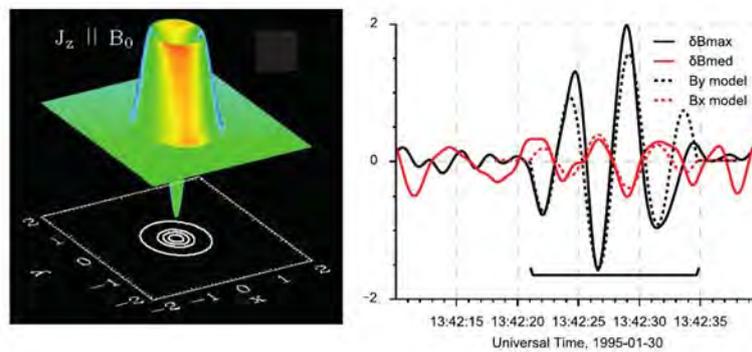


Figure 17 : Modèle de vortex (distribution du courant à gauche) dont les caractéristiques sont compatibles avec les mesures in situ du champ magnétique enregistrées par la sonde Wind (profils temporels à droite)

Détection des émissions radio de Jupiter liées à Ganymède et Europe

Les émissions radio dues aux deux satellites de Jupiter, Europe et Ganymède, sont bien plus faibles que celles déjà connues du satellite Io. La combinaison de simulations ExpRES/SERPE et des observations des sondes Voyager et Cassini (figure ci-contre), ainsi qu'une étude statistique des données du réseau décimétrique de Nançay, ont permis leur détection [E3-5].

⁹ Références aux faits marquants en ANNEXE B



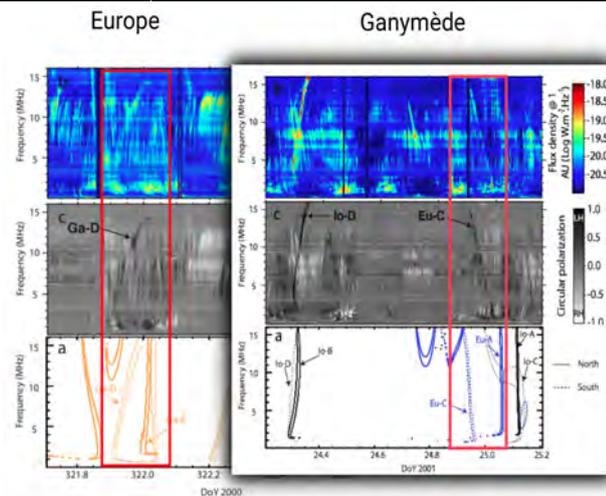
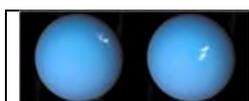


Figure 18 : Combinaison de simulations EXPRES/SERPE et des observations des sondes Voyager et Cassini

Analyse SWOT du Pôle Plasmas

	FORCES	FAIBLESSES
Contexte interne	<p>a) Pôle dans 2 axes transverses (et dans les 2 nouvelles équipes transverses)</p> <p>b) Expertise dans tous les domaines de la physique des plasmas spatiaux (théorie, analyse des données, simulations)</p> <p>c) Liens solides avec les pôles solaire et planétologie</p> <p>d) Ouverture aux plasmas de labo (notamment dans le cadre du labex <u>plas@par</u>)</p> <p>e) Compétences reconnues en mesures du plasma via la technique du bruit quasi-thermique (QTN) et la détection des poussières par des récepteurs radio.</p> <p>f) Compétences en simulations des plasmas sur toutes les échelles spatiales et temporelles.</p>	<p>a) Petites équipes sur plusieurs thématiques → risques de disparition ou de ralentissement de l'activité dans des thématiques anciennes en cas d'élargissement à de nouvelles thématiques (e.g. radio sol, nouveaux types de simulations, etc.)</p> <p>b) Diminution progressive du nombre de chercheurs permanents au sein du pôle.</p>
	OPPORTUNITÉS	MENACES
Contexte externe	<p>a) Instrumentation : PI sur Solar Orbiter, PI sur NenuFAR, PI du réseau décimétrique de Nançay, CoPI sur BepiColombo MMO, lead-Col sur Parker Solar Probe, participation à JUICE. Projets de nanosats CIRCUS + NOIRE.</p> <p>b) Observations : PI sur plusieurs programmes d'observation (HST, LOFAR)</p> <p>c) Équipe porteuse de nombreux projets spatiaux et sol → synergies sol-espace (notamment Juno).</p> <p>d) Le pôle a su préserver une bonne attractivité coté doctorants et stagiaires</p>	<p>a) Plusieurs missions (Cassini, STEREO, Cluster, WIND) en fin de vie</p> <p>b) JUNO est la seule mission d'exploration d'une magnétosphère extraterrestre jusqu'en 2024 (avant Bepi-Colombo et Juice dans ~8 ans)</p> <p>c) Incertitudes concernant la participation française à SKA.</p>

Tableau 16 - Analyse SWOT du pôle plasma



Projet à 5 ans du Pôle Plasmas

1. Vent solaire et milieu interplanétaire, plasmas hors héliosphère

- Avec un lancement de Solar Orbiter (SO) prévu en février 2019, les cinq prochaines années verront l'aboutissement des importants investissements humains du laboratoire sur l'instrument RPW. L'analyse des données de cet instrument ainsi que de celles de l'instrument FIELDS, qui lui est similaire, sur la mission Parker Solar Probe (PSP - lancement août 2018) devraient permettre de fortes percées dans la compréhension de la formation du vent solaire, de son accélération ainsi que de transferts d'énergie qui le gouvernent. Les thématiques suivantes seront abordées par ces deux missions.
- Turbulence : L'influence du champ magnétique aux échelles d'injection de l'énergie à grande échelle sera étudiée, particulièrement avec l'analyse des données de la mission HELIOS en préparation à SO et PSP. Le niveau global de la turbulence augmentant en s'approchant du Soleil, il sera possible d'étudier beaucoup plus facilement le rôle des structures cohérentes dans la dissipation de l'énergie turbulente et de déterminer les échelles caractéristiques de ces processus notamment aux échelles électroniques. Ces études bénéficieront également d'une poursuite de l'analyse d'observations similaires avec missions actuelles comme CLUSTER ou bien MMS.
- Électrons du vent solaire : Le rôle fondamental des électrons du strahl qui transportent l'essentiel du flux de chaleur et qui pourraient être les indicateurs d'une accélération du vent solaire par un champ du type thermo-électrique ambipolaire, constitue un des enjeux des missions SO et PSP. Sur PSP la possibilité de mesure de ces électrons à partir des spectres de bruit quasi-thermique, en collaboration avec le Space Sciences Laboratory de l'Université de Berkeley (PI de l'instrument FIELDS) sera étudiée, de même que sera implémentée la détermination des densité et températures de l'ensemble de la distribution électronique. Par ailleurs le rôle des ondes whistlers du milieu interplanétaire dans la régulation de strahl et de son flux de chaleur, ainsi que les conditions d'apparition des ondes Alfvén ion-cyclotron et leur interaction avec les ions seront étudiées à la fois grâce aux observations et à des simulations hybrides.
- Études des émissions électromagnétiques liées aux éruptions solaires : Elles se poursuivront tout d'abord via des simulations numériques électrostatiques et électromagnétiques pour déterminer l'efficacité des transferts d'énergie, analyser l'influence des fluctuations de densité dans le milieu sur le développement des instabilités et préparer des expérimentations de laboratoire. En parallèle, les instruments RPW et FIELDS permettront de mesurer, pour la première fois dans le vent solaire, ces fluctuations de densité à haute cadence temporelle de même que les formes d'ondes magnétiques jusqu'à des fréquences donnant accès aux mécanismes de conversion des ondes de Langmuir électrostatiques en ondes radio électromagnétiques qui sont habituellement détectées.
- Poussières interplanétaires : Les mesures des instruments RPW et FIELDS devraient permettre de déterminer la région source dans l'héliosphère interne des nano-poussières qui ont été détectées pour la première fois avec STEREO. Ces mesures seront faites jusqu'à 0.3 UA par Solar Orbiter et 10 rayons solaires de notre étoile par Parker Solar Probe.

2. Magnétosphères terrestre et planétaires

- Exploration des magnétosphères de Jupiter, de Saturne et de leurs satellites : La fin de la mission Cassini autour de Saturne (avec une plongée dans l'atmosphère en sept. 2017) combinée à l'arrivée en orbite de la mission Juno à Jupiter (depuis août 2016), missions dans lesquelles nous sommes fortement impliqués, offriront un cadre exceptionnel d'étude comparée des observations in situ sur des orbites polaires, depuis les régions aurorales. Ces données permettront de confirmer et caractériser le mécanisme d'émission des ondes radio aurorales de ces planètes et leur association avec la chaîne globale de processus auroraux (transfert d'énergie par accélération de particules et dissipation sous la forme d'ondes électromagnétiques à différentes longueurs d'ondes). Plus particulièrement JUNO explore pour la première fois, avec des mesures in-situ, les régions sources de l'émission radio aurorale de Jupiter. Ceci permettra de comparer le développement de l'instabilité maser-cyclotron sur Jupiter, la Terre et Saturne. Nous sommes responsables de la collaboration *Juno Ground Radio* (observations radio décimétrique sol en soutien à la mission) et du réseau décimétrique de Nançay (qui en fait partie), sur lequel a été installé en 2016 un récepteur numérique permettant des observations à très haute résolution spectrale et temporelle pour l'étude de la microphysique des émissions radio de Jupiter.

La contribution scientifique au développement de l'instrument RPWI de la sonde JUICE de l'ESA se poursuit de manière nominale et devrait aboutir dans les cinq ans à venir. Concernant la science de JUICE, une thèse en cours sur des observations radio joviennes et des simulations des émissions décimétriques induites par les satellites galiléens a déjà fourni des résultats prometteurs, dont la détection d'émissions associées à Europe et Ganymède.



- Simulations MHD des magnétosphères en rotation rapide : En 2012 nous avons commencé l'adaptation du code MPI-AMRVAC pour la simulation de l'interaction du vent solaire avec une magnétosphère planétaire, avec comme objectif d'aider à l'interprétation des observations in situ par diverses sondes spatiales. Une première version du code a été validée en 2014 pour le cas des magnétosphères des planètes qui tournent lentement (Mercure, Terre). Nous travaillons actuellement sur une version applicable au cas des magnétosphères en rotation rapide (cas des planètes géantes) et prévoyons la fin de la phase de validation du concept et de la phase de test courant 2018. Nous serons alors une des rares équipes dans le monde à pouvoir réaliser des simulations de magnétosphères en rotation rapide. Nous travaillons à rendre les sorties des simulations compatibles avec l'intégration dans un système d'observatoire virtuel.

3. Prospectives spatiales et radioastronomie sol

Le pôle plasmas est fortement impliqué dans la préparation à la fois de missions spatiales futures et dans l'instrumentation associée d'instruments de radioastronomie sol du futur.

- Dans la thématique Vent solaire, la sélection de la mission THOR est espérée en 2017. Ce projet permettra d'étudier la dissipation turbulente dans le vent solaire en disposant, pour la première fois, de données ondes et particules aux mêmes cadences temporelles de mesure.
- Au-delà de THOR, le pôle participe également à la mission Alfvén d'étude des zones aurorales terrestres. Cette mission a été présélectionnée dans le cadre M5 de l'ESA. A plus long terme les missions du type de Farside (radioastronomie depuis la face cachée de la Lune) et Uranus pathfinder (ESA/NASA) présentent un intérêt majeur.
- Au-delà des grandes missions spatiales auxquelles le pôle participe historiquement, un intérêt croissant de la communauté scientifique se manifeste actuellement pour des missions s'appuyant sur des Cubesats ou Nanosats. Dans ce cadre, la mission CIRCUS pour la météorologie de l'espace est portée par le pôle. Elle devrait permettre l'étude de la relation de couplage entre activité solaire et thermosphère terrestre. A plus long terme, la mission NOIRE, actuellement en phase 0 au CNES, devrait permettre de tester un concept d'interférométrie radio avec une constellation de CubeSat.
- Côté radioastronomie sol, la recette de l'instrument NenuFAR est en cours, avec un début d'exploitation scientifique prévu pour 2017 et une inauguration en 2018. Ce grand radiotélescope basses fréquences permettra notamment la recherche de transitoires astrophysiques et d'exoplanètes en radio, avec en ligne de mire l'exploitation scientifique de SKA, notamment via un programme « Stars, Planets & Civilizations ».

E4. Pôle physique solaire

Présentation du pôle de physique solaire

1. Introduction

Le pôle de physique solaire (PPS) du LESIA s'inscrit dans l'héritage de J. Janssen, fondateur du site de Meudon de l'Observatoire de Paris. Les principaux thèmes de recherche du PPS sont liés à l'existence et aux conséquences de la présence de champ magnétique dans l'atmosphère du Soleil : l'activité solaire et son impact sur l'héliosphère. Le PPS produit, exploite et distribue des données d'observations du Soleil, à distance et couvrant l'ensemble du spectre électromagnétique (Gamma, X, UV, Visible, Radio), ainsi que in-situ pour les particules émises par le Soleil. Ces travaux observationnels sont couplés de manière synergique avec des travaux théoriques et numériques visant à interpréter et modéliser les mécanismes physiques à la source de ces émissions. Le PPS est source d'une importante production scientifique avec un taux de publications élevé.

Dans le cadre de ses recherches en météorologie de l'espace, le PPS est un acteur majeur au niveau français et européen et est en contact direct avec la société civile à travers des collaborations avec l'armée française, l'aviation civile et l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

2. Composition en équipes

Le PPS se compose de deux équipes

- Formation et structuration des champs magnétiques solaires
- Phénomènes éruptifs et accélération de particules

Il participe également à l'équipe transverse du LESIA « Perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace » et à la nouvelle équipe transverse « Simulations numériques en astrophysique ».

3. Tableaux des effectifs et des moyens

	CNRS	CNAP	Doctorants	Post-Doctorants	Emérites	IT associées ¹⁰
Actuel	4	6	1	3	1	~ 15
2012-2017	-	-	4	14	2	-

Tableau 17 - Effectifs

METEOSPACE (DGA)	Fond Recherche AXA	HELISOL (ANR JCJC)	ORME (ANR/DGA)
eHeroes (UE - FP7)	HESPERIA (UE-H2020)	FLARECAST (UE-H2020)	SEPServer (UE - FP7)
HESPE (UE - FP7)	SOTERIA (UE - FP7)	Labex ESEP	Labex Plas@Par
DIM-ACAV	CINES & IDRIS (alloc. temps de calcul HPC)	CNES	PNST / INSU

Tableau 18 - Moyens sur la période 2012-2017

Bilan scientifique¹¹

L'activité scientifique du pôle de physique solaire (PPS) s'articule autour de trois axes scientifiques ayant une très forte continuité thématique.

¹⁰ La participation d'ingénieurs au pôle HRAA correspond à une « appartenance secondaire », les ITA étant en priorité rattachés au pôle Technique (ou Administratif)

¹¹ Les références (E4-ACL...) sont données dans l'annexe 4. Les références aux faits marquants (E4-n) sont en annexe B

1. Thème 1 : Formation et structuration des champs magnétiques solaires

Cet axe est dédié, d'une part, au développement de techniques de mesure des vecteurs champ magnétique et vitesse, ainsi que des propriétés thermodynamiques de l'atmosphère solaire, à partir de mesures spectrales et spectropolarimétriques [E4-ACL41 ; E4-ACL45], d'autre part, à l'analyse de ces champs magnétiques pour en extraire l'information pertinente pour l'étude de la dynamique solaire. Différentes régions de la surface solaire sont étudiées : les régions actives, où se produisent les éruptions, ainsi que, en dehors, les régions dites "calmes".

Dans les régions "calmes", un algorithme d'inversion des données spectropolarimétriques capable de prendre en compte des tubes de flux non résolus a été développé [E4-ACL45]. Le PPS a étudié les mouvements des granules, y compris lorsqu'ils se fragmentent, en lien avec le réseau magnétique qui dessine les supergranules [E4-ACL31 ; E4-ACL36 ; E4-ACL46]. Enfin, le PPS a continué à étudier les propriétés des filaments et protubérances solaires [E4-ACL07 ; E4-ACL16 ; E4-ACL19 ; E4-ACL40].

Dans les régions actives solaires, à partir d'observations et de simulations magnétohydrodynamiques (MHD), le PPS a mis en avant la manière dont sont injectés les courants électriques [E4-ACL31 ; E4-ACL38]. L'étude de la structuration 3D du champ magnétique s'effectue d'une part avec des nouvelles méthodes d'étude de la topologie magnétique [E4-ACL02 ; E4-ACL04], de l'énergie [E4-ACL10] et d'estimation de l'hélicité magnétique [E4-ACL01 ; E4-ACL15 ; E4-ACL22]. Le PPS a mis en avant la propriété quasi-unique de conservation de cette quantité dans le cadre du paradigme MHD [E4-ACL26].

2. Thème 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 coronales (CME) - ainsi qu'aux mécanismes de transformation d'énergie associés permettant d'expliquer l'éjection de quantités importantes de matière solaire, le chauffage du plasma lors des éruptions et l'accélération efficace de particules énergétiques.

De nombreux travaux numériques MHD ont porté sur des études paramétriques de critères d'instabilité et de dynamique de jets coronaux [E4-ACL27 ; E4-ACL38] et de CMEs [E4-ACL23 ; E4-ACL33 ; E4-ACL39], impliquant le mécanisme de reconnexion magnétique. Ces études ont été menées à l'aide de codes numériques MHD, en particulier ARMS et OHM-MPI. Les études sur les processus de reconnexion magnétique glissante dans les éruptions et sur la modélisation des éruptions [E4-ACL09 ; E4-ACL13 ; E4-ACL17 ; E4-ACL32] ont été poursuivies. Les émissions observées (en particulier en UV avec SDO et X avec RHESSI) lors des éruptions ont été comparées pour différents événements aux résultats des simulations numériques [E4-ACL25 ; E4-ACL34].

Plusieurs travaux ont porté sur les caractéristiques des régions d'accélération et d'interaction des particules dans l'atmosphère solaire et les caractéristiques des structures magnétiques où ont lieu les émissions de ces particules [E4-ACL03]. La combinaison de cartes de champ magnétique vectoriel et de cartes de densité de courants électriques photosphériques déduites des observations de SDO/HMI et des observations X de RHESSI a permis d'établir un lien entre sites d'interaction des électrons énergétiques et densités de courants électriques verticaux [E4-ACL21 ; E4-ACL28].

Un autre domaine important de notre activité concerne l'étude de la propagation des faisceaux d'électrons à partir de la région active vers la couronne [E4-ACL06 ; E4-ACL11 ; E4-ACL47]. Nous avons également étudié le développement des éjections de masse coronale et des chocs associés à partir d'observation multi longueurs d'ondes et en particulier d'observations en imagerie radio du NRH [E4-ACL18 ; E4-ACL35 ; E4-ACL43]. Ces observations permettent en particulier de suivre l'évolution de sites d'accélération des électrons en liaison avec l'évolution du tube de flux torsadé associé au CME.

3. Thème 3 : Perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace (équipe transverse)

Les principales perturbations de l'héliosphère par l'activité solaire sont les éjections de masse et les particules de haute énergie. Pour développer une vue globale des structures magnétiques éjectées, des mesures de nombreux nuages magnétiques ont été synthétisées en un modèle générique 3D des structures et des ondes de choc qu'elles engendrent [E4-ACL30, E4-ACL44]. Ces structures sont aussi déterminantes pour la propagation des particules relativistes, en créant des parcours qui dévient fortement de la spirale de Parker classique [E4-ACL05].



L'origine des particules solaires de haute énergie a été étudiée de deux façons : des études statistiques montrent une contribution significative des éruptions et des éjections de masse [E4-ACL12]. Les études de cas pointent vers la restructuration magnétique de la couronne pour les particules relativistes [E4-ACL20].

En météorologie de l'espace, il a été montré que le temps de parcours interplanétaire d'une éjection de masse peut être estimé à partir des signatures X et radio émises lors de leur départ du Soleil [E4-ACL24]. Pour caractériser les événements solaires extrêmes, la déduction, à partir des simulations numériques, d'une limite supérieure de l'énergie qui peut être libérée lors d'une éruption [E4-ACL17] est une information clef.

4. Produits

Pour mener à bien leur recherche, les chercheurs du pôle de physique solaire (PPS) utilisent des données d'instruments au sol (THEMIS, instruments radio de Nançay, ...) ainsi que d'instruments spatiaux (SoHO, STEREO, RHESSI, SDO, HINODE, IRIS) couplées à des développements de modèles théoriques et codes numériques (ARMS, OHM-MPI, TOPO, UNNOFIT, XTAT) fonctionnant sur plusieurs centres de calcul de haute performance français (CINES, IDRIS) et sur le mésocentre de calcul MesoPSL. Des développements instrumentaux sont effectués sur le spectro S4I (DPSM à micro-miroir), dans le cadre du projet METEOSPACE (collaboration DGA & Obs. Cote d'Azur) et des développements logiciels sont faits pour l'instrument STIX sur la future mission Solar Orbiter (ESA).

Le PPS a par ailleurs la responsabilité scientifique des observations de surveillance solaire en optique du spectrohéliographe de Meudon, dont la jouvence est en finalisation avec la nouvelle camera SpectroCam et dans le domaine radio, du Radiohéliographe de Nançay (NRH) et spectrographe ORFEES. L'archivage des données, à travers les bases de données (BASS2000), le site d'observations radio coordonnées (Radiomonitoring) et la base de moniteurs à neutrons (NMDB) constituent d'autres activités importantes du pôle. Le PPS est également responsable de l'exploitation des moniteurs à neutrons des Iles Kerguelen et de Terre Adélie. Finalement, le PPS génère des produits à valeur ajoutée disponibles à la communauté à travers l'observatoire virtuel HELIO/PADC et l'action en météorologie de l'espace CERCLe.

Instruments Principal ou co-investigateur		Instruments Science Co-I		Instruments exploités		Base de données		Logiciels	
1	ORFEES	1	AIA/SDO (NASA)	1	HMI/SDO (NASA)	1	BASS2000	1	ARMS
2	METEOSPACE	2	RHESSI (NASA)	2	HINODE (JAXA)	2	Base moniteurs à neutron (NMDB)	2	OHM-MPI
3	Moniteurs à neutrons	3	SoHO (ESA)	3	IRIS (NASA)	3	HELIO/PADC	3	TOPO
4	Radiohéliographe de Nançay (NRH)	4	STEREO (NASA)	4	Télescope THEMIS	4	Heliophysics Feature Cat.	4	UNNOFIT
5	S4I (Tour Solaire de Meudon)					5	Radiomonitoring	5	XTAT
6	Spectrohéliographe de Meudon / SpectroCam								
7	STIX/ Solar Orbiter (ESA)								

Tableau 19 - Produits et activités de recherche (par ordre alphabétique)

Faits marquants¹²

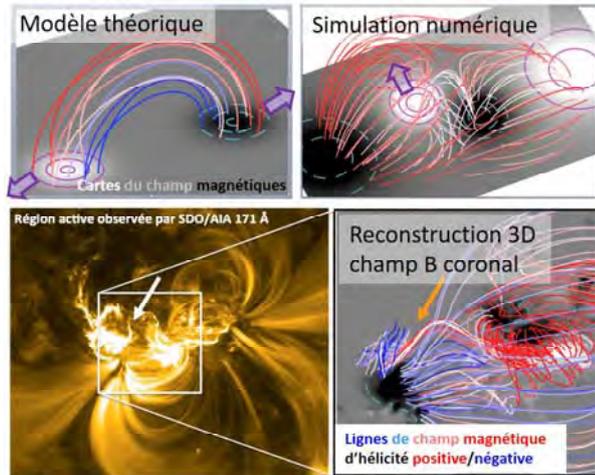
Hélicitigrammes 3D : distribution de l'hélicité magnétique dans les régions actives solaires

L'hélicité magnétique, qui mesure l'entortillement des lignes de champ magnétique, est une des rares quantités invariantes en MHD, paradigme adapté à l'étude des champs magnétiques solaires, ces derniers étant les moteurs de l'activité solaire. Les travaux théoriques et appliqués aux observations [E4-1, E4-2] ont pour la première

¹² Références aux faits marquants en ANNEXE B

fois permis la représentation 3D du flux de cette quantité au sein des régions actives : les hélicitogrammes 3D (figure 9). Cet outil permet désormais de représenter de manière pertinente et concise les structures d'intérêt pouvant directement être impliquées dans les éruptions solaires. Cet outil innovant va permettre d'améliorer notre compréhension de l'éruptivité solaire.

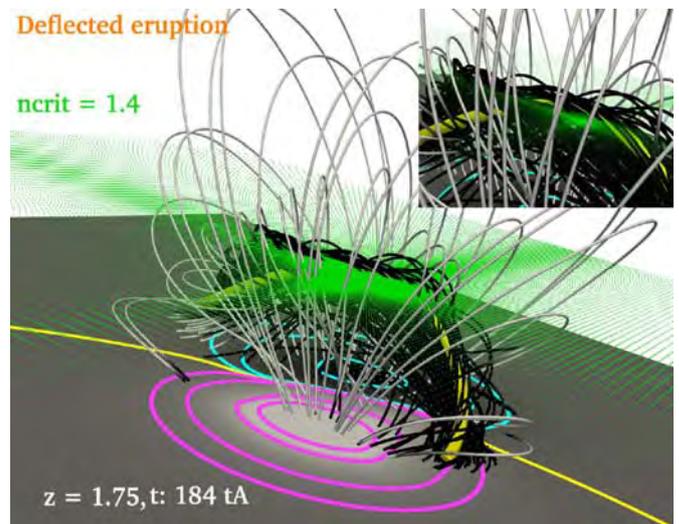
Figure 19 : Hélicitogrammes 3D appliqués à trois types de données, modèle théorique, simulation numérique et reconstruction du champ magnétique observée d'une région active solaire éruptive.



Un critère unique sur le seuil de déclenchement des éruptions solaires

Une série de simulations MHD 3D avec le code OHM du LESIA a été effectuée sur le calculateur de MESOPSL (figure 10). L'objectif était de réaliser une étude paramétrique inédite sur l'identification de la nature et des valeurs que peuvent prendre le seuil de déclenchement des éjections de masses coronales. Les résultats de [E4-3] montrent sans équivoque (1) que la nature du seuil est unique, telle que prédite par le modèle analytique et (2) que la valeur de ce seuil est tout aussi unique, quelles que soient les propriétés intrinsèques des cordes magnétiques torsadées dans la couronne solaire et quel que soit le détail des mouvements de matière à la surface du Soleil. Ce résultat original ouvre de nouvelles perspectives en termes de prévision du déclenchement des éruptions solaires.

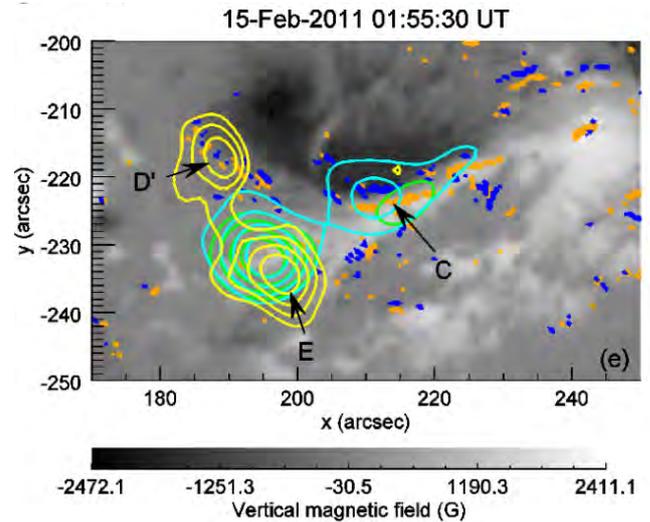
Figure 20 : Exemple d'une corde magnétique torsadée dans la couronne solaire (en noir), au moment où la partie la plus élevée de sa ligne de champ axiale (en jaune) passe le seuil d'instabilité de la corde, à l'altitude du plan en vert



Electrons énergétiques et courants électriques dans l'atmosphère solaire

La combinaison des données de l'instrument HMI/SDO et du satellite de spectro-imagerie X/γ RHESSI a permis d'étudier pour la première fois l'évolution temporelle des courants électriques au cours d'une éruption solaire, et de relier l'évolution temporelle et spatiale des courants à celle des émissions X observées avec RHESSI. L'étude [E4-4] (figure 11) a permis de mettre en évidence le lien entre régions d'accélération des électrons et rubans de courants électriques photosphériques (qui tracent les couches de courant dans la couronne). Ces résultats s'interprètent dans le contexte de reconnexions magnétiques se produisant de façon préférentielle dans les couches de courant et responsables de l'accélération d'électrons.

Figure 21 : Comparaison de la distribution du champ magnétique (niveau de gris) et des courants électriques (points orange et bleue) mesurée à partir des données HMI/SDO avec l'émission X (isolignes jaunes, vertes et cyan) observée avec RHESSI lors d'une éruption solaire de classe X.



Observations radio et particules énergétiques dans l'espace interplanétaire

Au cours des processus éruptifs au Soleil, des particules peuvent être accélérées à de hautes énergies, s'échapper du Soleil et atteindre l'environnement spatial de la Terre. En combinant l'imagerie (Radiohéliographe de Nançay) et la spectrographie (Réseau décimétrique Nançay, expérience Wind/WAVES) - observations montrées dans la fig. 12 - avec les mesures in situ depuis les missions STEREO et SoHO, nous avons pu montrer que même lors d'un événement solaire simple différents sites et processus d'accélération sont à l'œuvre. Ils sont reliés à la reconnexion magnétique en aval de l'éjection de masse, entre le flanc de l'éjection de masse et la couronne ambiante et à une onde de choc. Ils injectent des électrons énergétiques dans un grand volume de l'héliosphère, englobant environ 140° en longitude héliographique. Ces larges injections de particules avaient été observés par la mission STEREO et ne sont actuellement pas comprises. Les observations radio montrent que ces particules peuvent ne pas être accélérées par un processus unique, qui arroserait un grand volume d'espace, mais par différents processus localisés autour d'une éjection de masse, mis en jeu simultanément ou successivement.

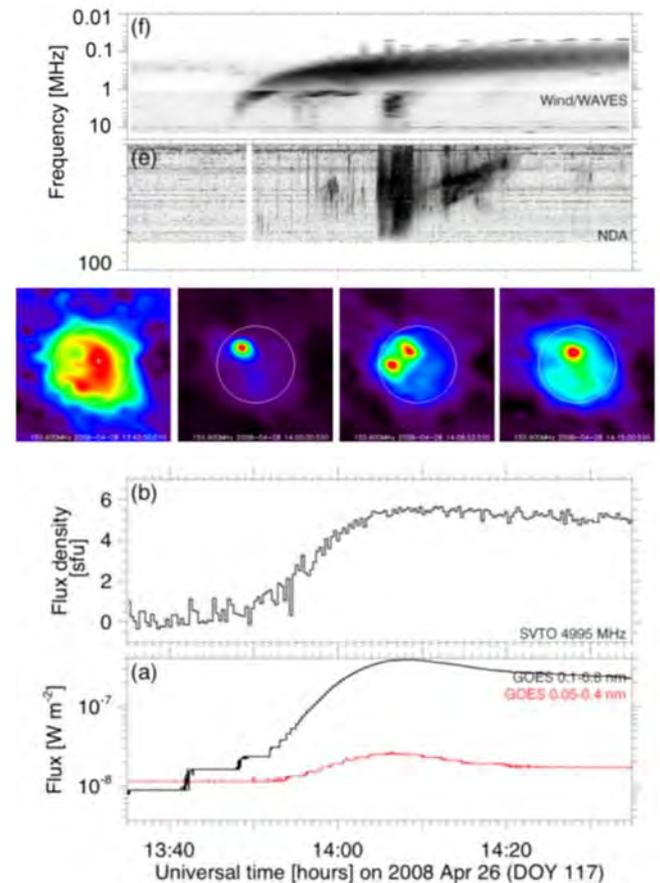


Figure 22 : Diagnostic multi-instruments et multi longueurs d'onde de l'accélération de particules énergétiques lors d'une éjection de masse coronale.

Données du satellite GOES et du San Vito Solar Observatory (flux X et radio du bas), du NRH (images radio centrales), ainsi que de NDA et de WAVES/WIND (spectres radio du haut).



Analyse SWOT du pôle solaire

	FORCES	FAIBLESSES
Contexte interne	Fo1. Expertise reconnue en production, distribution et analyse de données d'observations solaires : radio, optique, X, particules énergétiques, UV Fo2. Expertise reconnue en théorie et modélisation numérique MHD Fo3. Rôle envers la société civile (collab. IPEV, aviation civile, Armée française) Fo4. Important nombre de publications (-5/an/chercheur permanent)	Fa1. Faible nombre de chercheurs permanents Fa2. Perte de capacité en recherche instrumentale solaire sol Fa3. Absence de R&D en instrumentation spatiale solaire
Contexte externe	OPPORTUNITÉS	MENACES
	Op14. Domaine de la météorologie de l'espace en plein développement (axe dédié du CR européen dans le cadre de H2020, rentrée de la France dans la SSA sur le volet Space Weather, ouverture d'un service par l'OACI) Op15. Lancement de Solar Orbiter	Me11. Plusieurs départs de chercheurs permanents lors du prochain plan quinquennal Me12. Diminution de l'Enseignement de la physique solaire

Tableau 20 - Analyse SWOT du pôle Solaire

Projet scientifique à cinq ans du pôle solaire

L'évolution du pôle de physique solaire (PPS) est en partie marquée par l'évolution inquiétante, voire critique du nombre de chercheurs constituant le pôle. En sus de 5 départs ayant eu lieu les cinq années passées, cinq nouveaux départs de chercheurs sont prévus d'ici 2023. Cette diminution est à comparer avec un taux de recrutement de l'ordre de 1 chercheur/5 ans. Cette évolution va poursuivre le mouvement entamé depuis quelques années de perte d'expertise en développement optique. Il entraîne l'abandon progressif de l'implication du LESIA sur des futures instrumentations solaires optique ou radio sol et spatial. Dans cette perspective, à l'échelle de 2023, seuls 4-5 chercheurs statutaires constitueraient l'ensemble de la physique solaire à l'Observatoire de Paris avec le risque de disparition de cette activité historique emblématique pour l'Observatoire.

D'ici là, les activités vont continuer à se recentrer autour des réussites du pôle solaire dans les activités détaillées dans la partie bilans, plus particulièrement en modélisation MHD, en observations radio et hautes énergies et les activités de recherches tournées vers la météorologie de l'espace (production, stockage et distribution de données de surveillance solaire). Les grands axes qui structureront l'activité du pôle solaire sont :

- Mission Solar Orbiter (ESA) : le PPS sera à la pointe de l'exploitation de cet instrument dont le lancement est prévu en Octobre 2018. Le pôle solaire est avant tout impliqué sur l'instrument STIX d'imagerie X, pour lequel il dispose d'un Co-I ship. Le PPS contribue à la préparation et à l'exploitation scientifique : participation au développement de logiciels de traitement de données en spectroscopie et en imagerie, ainsi qu'à des outils d'accès aux données. Une très forte synergie entre cet instrument, qui diagnostique l'accélération de particules énergétiques, existera avec les instruments radio-sol que le PPS exploite (ORFEES & NRH) et les données de détection de particules (moniteurs à neutrons) ainsi qu'avec l'exploitation de RPW. Le pôle solaire est aussi Co-I scientifique de l'instrument d'imagerie UV, EUI et du détecteur à particule énergétique, EPD. Au final le pôle solaire exploitera la totalité des instruments de Solar Orbiter, aussi bien ceux de mesure à distance que ceux in-situ, en relation directe avec les modèles analytiques et numériques développés au sein du pôle.

- Recherche en météorologie de l'espace (en liaison avec l'équipe transverse ET2 : perturbations héliosphériques et météorologie de l'espace) : avec le retour de la France dans le programme Space Situational Awareness (SSA) de l'ESA, sur l'axe météorologie de l'espace, avec l'intention de l'Organisation internationale de l'aviation civile (OACI), d'ouvrir en 2018 une activité opérationnelle de météo de l'espace, et finalement avec l'augmentation des appels de la commission européenne dédiés à la météorologie de l'espace (le PPS contribue actuellement à 2 des 3 projets sélectionnés), le PPS continuera à avoir un rôle moteur en France et en Europe dans le cadre de la météorologie de l'espace.



En particulier, le pôle solaire continuera à produire, distribuer et exploiter des données d'observations solaires, élément de base de la surveillance de l'activité solaire : données optiques basse cadence temporelle avec le spectrohéliographe de Meudon, optique haute cadence avec le projet METEOSPACE, radio avec le NRH et ORFEES. L'accès à ces données sera facilité et le PPS fournira des produits à valeur ajoutée grâce à ces services dédiés : BASS2000 et le service d'Observatoire virtuel HELIO, Radiomonitoring, CERCLe/SIEVERT, en partenariat avec les acteurs de la société civile (armée, aviation civile, ...). Une réorganisation et un rassemblement de certains de ces services au sein d'un plus grand service dédié à la surveillance solaire est souhaité par le pôle de physique solaire, qui souhaite y jouer un rôle moteur.

Ces travaux seront complétés par des travaux théoriques et simulations numériques (études de marqueurs de l'éruptivité, simulations dirigées par les données, ...) dont l'objectif sera tourné vers une amélioration de nos capacités de prévision de l'activité solaire avec une visée quantitative. Ces travaux se feront en lien avec l'équipe transverse ET3 : Simulations numériques en astrophysique.

- Participation à des projets d'observations innovantes : le pôle solaire continuera à s'associer à des projets nouveaux et innovants d'étude de l'activité solaire. En particulier, le pôle solaire est associé à des projets de magnétographie coronale (e.g. instrument sol DKIST) exploitant l'effet Hanle, d'imagerie directe X (projet NASA FOXSI), d'imagerie UV de la couronne étendue (projet NASA COSIE), de missions spatiales aux points L1 & L5.

- Recherches en physique solaire fondamentale : afin de poursuivre les capacités du pôle solaire à s'ouvrir à de nouvelles problématiques porteuses en physique solaire allant au-delà du cadre de la météorologie de l'espace et du programme scientifique de Solar Orbiter, le pôle solaire poursuivra une part mesurée de ses activités de recherches sur des thématiques fondamentales de physique solaire, telles que la spectroscopie et spectro-polarimétrie solaire, la topologie magnétique, la problématique du chauffage coronal, les processus physiques d'accélération des particules solaires et les modes d'émissions électromagnétiques liés, le transport et la propagation des particules énergétiques et des structures magnétiques, etc.

E5. Pôle planétologie

Présentation du pôle planétologie

1. Introduction

Le pôle de planétologie comprend 25 chercheurs, se répartissant à parts à peu près égales entre le CNRS, le CNAP et l'Université (UPMC, UPD, UVSQ), 9 doctorants et 6 post-docs.

2. Composition en équipes

Le pôle est structuré en deux équipes thématiques :

- Astéroïdes, comètes et objets trans-neptuniens
- Atmosphères et surfaces planétaires

Il participe aussi à l'équipe transverse *Exoplanètes et origine des systèmes planétaires*

3. Tableau des effectifs et des moyens

Chercheurs	Enseignants chercheurs	Doctorants	Post-docs / Visiteurs
8 + 1 émérite	15 (7 universitaires + 8 CNAP) + 1 émérite	9 au 30 juin 2017	6 post-docs, 1 visiteur longue durée

Tableau 21 - Effectifs du pôle planétologie

Moyens : ERC- Advanced Grant « Lucky Star (2015-2020) ; ANR e-PYTHEAS ; projets européens EuroVénus NEOSHIELD/NEOSHIELD 2.

4. Profil d'activité

Cf annexe 4.

Bilan scientifique et faits marquants¹³

1. Science cométaire

Mission ROSETTA : le pôle a été très fortement impliqué dans la mission de l'ESA Rosetta. Lancée le 2 mars 2004, la mission a fait un périple de 10 ans dans le système solaire interne avant de se mettre en orbite autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko (67P) en août 2014. Pour la première fois dans l'histoire de l'exploration spatiale, Rosetta a posé un atterrisseur, Philae, sur une surface cométaire. Rosetta a suivi sa cible pendant plus de 2 ans et demi permettant ainsi d'étudier le noyau, l'activité cométaire et leur évolution au cours du temps. Nous avons été fortement impliqués dans l'élaboration des programmes d'observation, dans la planification des opérations et dans l'analyse et l'exploitation des données de 3 instruments : le spectro-imageur VIRTIS, dont la voie à haute résolution a été développée et réalisée au LESIA, le système d'imagerie OSIRIS et l'instrument micro-onde MIRO.

VIRTIS est un spectro-imageur à deux voies : une voie VIRTIS-M de spectro-imagerie visible et infrarouge, donnant des observations spatiales et spectrales couvrant le domaine 0.25-5.05 μm ; et une voie VIRTIS-H de spectroscopie haute résolution (R~1300-3000) dans le domaine 2-5 μm . Outre la fourniture et le monitoring de la voie à haute résolution, le LESIA avait la responsabilité des aspects opérationnels concernant VIRTIS-H (définition et préparation des séquences d'observation) et celle des calculs géométriques et d'une partie de l'archive ESA pour les deux voies (formatage et logiciel d'accès aux données). Sur le plan scientifique, le LESIA est impliqué dans l'analyse des observations des deux canaux (~20 publications à comité de lecture). Les résultats concernent d'abord la composition du noyau : identification des matériaux organiques (E5-1), répartition et état physique de la glace (taille

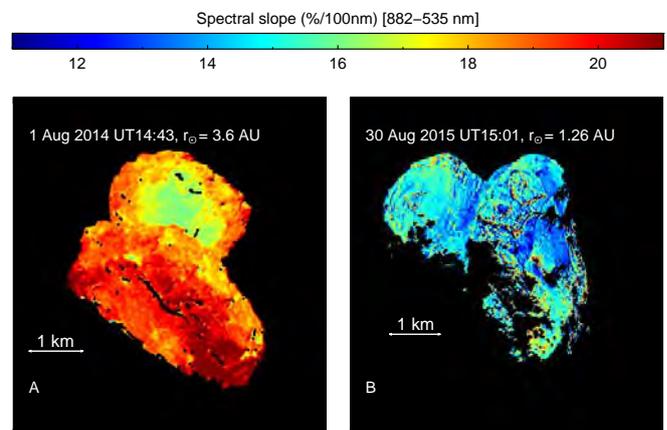
¹³ Les références (E5-ACL...) sont données dans l'annexe 4. Les références aux faits marquants (E5-n) sont en annexe B

de grains, E5-2 ; cycle diurne de la glace H₂O, E5-3) ; première détection de la glace de CO₂ (E5-4). Puis la répartition des gaz dans la coma (E5-5) et l'identification des régions sources : point subsolaire pour H₂O, hémisphère sud pour le CO₂, zone d'érosion beaucoup plus importante où les glaces affleurent plus facilement ; la mise en évidence d'une forte augmentation des abondances relative du CO₂, CH₄ et OCS au périhélie associée à des surfaces faiblement différenciées en volatiles dans l'hémisphère sud (E5-6). Enfin, les propriétés physiques des poussières dans la coma calme, les jets et « outbursts ». Finalement, des simulations de matériaux analogues en laboratoire permettent d'identifier les acides carboxyliques dans la poussière organique (E5-7) et démontrent la présence de sulfures de fer en grains submillimétriques mélangés à la poussière (E5-8).

OSIRIS : le système d'imagerie OSIRIS, composé de 2 caméras à grand champ de vue (WAC) et à haute résolution spatiale (NAC) opérant de 250nm à 1000nm, a obtenu plus de 80000 images de la comète 67P. Le LESIA a 2 co-investigateurs et plusieurs collaborateurs sur l'instrument et assure les calibrations photométriques en vol d'OSIRIS et la coordination du groupe de travail chargé d'étudier la composition et les propriétés photométriques du noyau de la comète. Nous avons participé à plus de 70 publications à comité de lecture. OSIRIS a révélé la complexité de la comète à niveau morphologique avec une grande diversité de structures géologiques (terrains consolidés, lisses, fragiles, puits, éboulements, dunes, ..) qui résultent des phénomènes d'érosion, d'effondrement et de redéposition du matériel (E5-9, E5-10, E5-11). L'étude des stratifications a montré que le noyau est un objet binaire (E5-12). Nous sommes les leaders au sein de l'équipe Osiris pour l'étude des couleurs, de la réflectance, de la composition et des propriétés photométriques du noyau de la comète 67P. La comète a un faible albédo, une porosité très élevée et une composition de surface hétérogène, avec 3 types de terrains différents identifiés sur les 2 lobes du noyau (E5-13, E5-14). L'hétérogénéité de surface en termes de couleurs et d'albédo est vue jusqu'à l'échelle décimétrique (E5-15). L'analyse de 2 ans d'observations a mis en évidence des variations de couleurs saisonnières (fig. 18) et même diurnes à la surface du noyau, ainsi que la formation de dépôts de givre proches des ombres, qui subliment très rapidement, sur des échelles de temps de quelques minutes, une fois illuminés par le Soleil (E5-16).

Plusieurs parcelles brillantes ont été observées sur le noyau, mettant ainsi en évidence l'exposition directe de glace d'eau mélangée aux poussières cométaires (E5-17, E5-18, E5-16). Plusieurs changements morphologiques ainsi que le lien direct entre l'effondrement d'une falaise et un sursaut d'activité ont été observés (E5-19, E5-20, E5-21).

Figure 23 : *Changement de la pente spectrale du noyau de la comète 67P entre deux observations espacées d'un an. La diminution de la pente spectrale indique un enrichissement superficiel en glace d'eau proche du périhélie (E5-16)*



MIRO : l'instrument MIRO était destiné à l'observation spectroscopique de différentes transitions moléculaires comme H₂O, CO, CH₃OH (3 raies), NH₃, H₂¹⁷O et H₂¹⁸O. L'instrument a fonctionné en quasi continu pendant les 2 ans d'observation de la comète, fournissant près de un million de spectres et 100 millions de mesures du continuum. Les observations de MIRO ont permis de mesurer l'inertie thermique des premières couches sous la surface du noyau (E5-22, E5-23), de cartographier sa température notamment dans la nuit polaire et de suivre l'évolution du dégazage des 4 molécules H₂O, CH₃OH, NH₃ et CO de juin 2014 à septembre 2016 (E5-24, E5-25). Il a ainsi été possible de suivre l'évolution saisonnière de l'activité globale d'une comète sur une demi-orbite (1.2 à 4 UA du Soleil) et plus de trois ordres de grandeur de niveau d'activité et de montrer une variation saisonnière des abondances relative des molécules (E5-26).

Comète C/2014 Q2 (Lovejoy) : cette comète a été observée en janvier 2015 à l'IRAM. Ces observations ont permis la mesure de rapports isotopiques (E5-27) et de l'abondance de plus de 21 molécules dont les premières

identifications dans une comète des molécules d'alcool éthylique et de glycolaldehyde (le plus simple des sucres) (E5-28).

Observations HERSCHEL : des mesures du rapport D/H dans l'eau cométaire ont été réalisées. Les valeurs proches de la valeur terrestre mesurées dans les comètes 45P (E5-29) et C/2009P1 (Garradd) (E5-30) indiquent une diversité isotopique pour les comètes provenant du nuage de Oort et de la ceinture de Kuiper, ainsi qu'une importante déficience en HCl dans les comètes par rapport à l'abondance Cl/O solaire (E5-31).

2. Astéroïdes géocroiseurs

Depuis 2012, le LESIA est impliqué dans le projet européen NEOshield (financé FP7/H2020), dédié aux développements scientifiques et technologiques nécessaires pour prévenir le risque d'impact des astéroïdes géocroiseurs avec la Terre. Dans le consortium NEOshield-1 (1/2012-5/2015), mobilisant 13 instituts de recherche et entreprises en Europe, Etats-Unis et Russie, le LESIA a eu la responsabilité d'étudier les propriétés physiques et dynamiques des géocroiseurs, fondamentales à connaître pour un fonctionnement efficace d'une mission spatiale de reconnaissance/mitigation, d'identifier l'instrumentation optimale pour équiper ces missions et d'établir un plan d'action au niveau international pour une réaction globale efficace en cas de menace réelle. Nous avons été invités à publier nos résultats dans deux articles de revue (E5-32, E5-33).

Dans le consortium NEOshield-2 (3/2015-9/2017), composé de 11 instituts de recherche et entreprises européens, le LESIA a la responsabilité de nouvelles observations sur les télescopes au sol, dédiées notamment à la caractérisation des propriétés physiques des géocroiseurs de petite taille (< 300m), encore très méconnues. Dans ce cadre, nous dirigeons un programme de 30 nuits en temps garanti au télescope ESO-NTT et nous coordonnons les observations menées par les autres partenaires du consortium. Nous travaillons sur les propriétés physiques globales de la population des géocroiseurs (E5-34), ainsi qu'à l'étude détaillée d'objets avec un intérêt spécifique, comme les cibles de missions spatiales (E5-35).

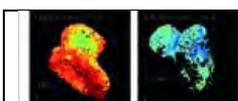
3. Astéroïdes primitifs et processus d'altération de surface

Notre équipe est fortement investie sur l'étude et la caractérisation des surfaces primitives. Nous avons étudié le processus d'altération aqueuse sur un échantillon de 600 spectres d'astéroïdes primitifs. Ce processus est très important pour comprendre la composition et l'évolution chimique et physique du Système solaire primordial, car il est dû à l'eau liquide. Nos résultats montrent que le processus agit sur la majorité des astéroïdes de type C, qu'il y a un fort lien entre astéroïdes hydratés et météorites CM2, que le pourcentage d'astéroïdes hydratés augmente avec leur dimension et que la région d'altération aqueuse se situe entre 2,3 et 3,1 UA, soit plus proche du Soleil que ce que l'on croyait précédemment (E5-36). Nous avons également étudié les processus d'altération de surface qui sont encore mal compris pour les objets primitifs, grâce à des observations de familles primitives d'âges très différentes (E5-37) et grâce à des expériences d'irradiation de chondrites carbonées. Ce travail de laboratoire a permis de mettre en évidence une corrélation entre la dose d'irradiation (le temps d'exposition à l'altération spatiale, donc l'âge des surfaces) et la composition initiale des objets primitifs (faible albédo) : nous avons donc maintenant une équation liant les observations d'astéroïdes aux résultats de laboratoire qui permet de comprendre comment la surface réagit à l'altération spatiale (E5-38).

4. Objets transneptuniens et centaures

Observations Herschel : nous nous sommes fortement investis sur un Key Program sur le temps ouvert d'Herschel, intitulé « TNOs are cool » (7 co-investigateurs et 1 co-Principal Investigateur au LESIA), qui visait à déterminer les tailles, albédos et propriétés de surface d'un échantillon d'environ 130 objets transneptuniens. Parmi les résultats principaux (une douzaine de publications dont E5-39, E5-40, E5-41), figure la mise en évidence de :

- (i) une grande diversité d'albédos, de 3 % à 100 %, avec une valeur moyenne de ~10 %
- (ii) une corrélation couleur-albédo, qui suggère que l'origine des couleurs est liée à la région de formation
- (iii) des inerties thermiques très faibles et de fortes rugosités de surface
- (iv) une décroissance spectrale de l'émissivité au-delà de 200 microns.



Occultations stellaires : depuis des années, le groupe « occultation » explore le monde des Objets Trans-Neptuniens (OTNs) *via* les occultations stellaires. Le groupe organise un réseau d'une centaine d'observateurs, en collaboration avec le Brésil, l'Espagne et Taïwan. Ceci permet l'obtention de précisions kilométriques sur les tailles des OTNs, la détection d'atmosphères jusqu'au nanobar et la découverte d'anneaux autour de ces corps. Parmi les faits marquant, une occultation observée en 2013 a permis la découverte de deux anneaux étroits (quelques km), très denses et fortement confinés, autour du Centaure Chariklo (diamètre ~240 km, voir E5-42, E5-43). Cette découverte est une grande surprise car seules les planètes géantes étaient jusqu'alors connues pour avoir des anneaux.

5. Planètes naines

Cérès : un résultat majeur obtenu avec Herschel a été la détection de vapeur d'eau autour de la planète naine Cérès (E5-44), provenant de deux sources situées à des latitudes moyennes. Il s'agit de la première détection de vapeur d'eau autour d'un astéroïde. La mission DAWN a par la suite détecté la glace d'eau à la surface de Cérès, ainsi que des brumes de poussières libérées par la sublimation de l'eau.

Pluton : l'étude de l'atmosphère de Pluton utilisant les occultations a fourni les profils de densité, pression et température de la surface de Pluton (pression ~10 μ bar) jusqu'à une altitude de 260 km (pression ~0.1 μ bar) entre 2012 et 2016. Les précisions obtenues sont comparables, voire de qualité supérieure à celles de la mission NASA *New Horizons* en juillet 2015. Ainsi, le groupe a révélé des ondes de gravité forcées par la sublimation de l'azote à la surface de Pluton (E5-45), processus confirmé par *New Horizons*. La quinzaine d'occultations observées entre 2002 et 2016 a permis par ailleurs de montrer que l'atmosphère de Pluton a connu une expansion spectaculaire d'un facteur trois depuis 1988 (E5-46), suivi d'une *diminution* de la pression à partir de 2016, peut-être la prémisse d'une condensation de l'atmosphère au cours du siècle à venir (E5-47).

6. Planètes telluriques

Mercury/BepiColombo : le LESIA a plusieurs Co-Is et le Co-PI de l'instrument SIMBIO-SYS. Le laboratoire a la charge du développement du plan focal de la voie instrumentale VIHI, un spectro-imageur de toute dernière génération destiné à équiper la sonde BepiColombo. En février 2013, le LESIA a livré le boîtier électronique de VIHI, après 9 ans de développement. En parallèle, des activités scientifiques en support des instruments PHEBUS et SIMBIO-SYS ont été menées : des observations sur 8 années avec le télescope THEMIS ont permis de caractériser l'évolution du Sodium exosphérique de Mercure et donné lieu à une dizaine de publications ; l'analyse des données de la sonde MESSENGER a permis de caractériser les dépôts pyroclastiques et le volcanisme explosif de Mercure (E5-48).

Vénus/Venus Express : nous avons eu la coordination du projet EuroVénus de l'UE (2014-2016), dédié à l'étude de la chimie et la dynamique de la mésosphère vénusienne utilisant les données de la mission VEX (achevée en décembre 2014, le LESIA était PI de l'instrument VIRTIS sur Venus Express) et ceux des télescopes ALMA, IRTF (six périodes d'observations entre 2012 et 2016) et CFHT (quatre périodes). Les résultats majeurs peuvent être résumés ainsi :

- le rapport de mélange HDO est uniforme sur le disque avec de faibles variations temporelles à court et long terme (E5-49)
- caractérisation du profil vertical et abondance du SO₂, gaz trace en lien possible avec le volcanisme actif, est très fortement variable à diverses échelles spatiales et temporelles (E5-49)
- la découverte d'une cellule de vent méridien symétrique sur les deux hémisphères de Vénus a été confirmée dans les données CFHT, comme prévu par les modèles de contrainte dynamique de la superrotation (E5-50).

7. Planètes géantes et satellites

Saturne : l'équipe est très impliquée sur l'analyse et interprétation des données Cassini/CIRS. Pour Saturne ces données ont montré que la température de la stratosphère moyenne (1 hPa) évoluait avec les saisons comme attendu dans les modèles d'équilibre radiatif mais que la température de la haute stratosphère (0.01 hPa) restait stable, suggérant la prépondérance de sources d'énergie autres que le rayonnement dans cette région (E5-52). Au contraire de Titan, l'abondance des hydrocarbures majoritaires sur Saturne n'a pas évolué avec les saisons, révélant ainsi les très longues constantes de temps de la photochimie kronienne. Enfin, des mesures sol ont permis de montrer que le

réchauffement stratosphérique associé à la grande tempête de 2010 était localisé dans la couche 1-3 hPa, suggérant qu'il était dû au déferlement local d'ondes de gravité (E5-53).

Titan : l'atmosphère de Titan montre des changements saisonniers très marqués depuis l'équinoxe de printemps nord qui a eu lieu en août 2009. A partir de l'étude des champs de température et des distributions spatiales des composés atmosphériques déduits des données de Cassini/CIRS, nous avons montré que la dynamique globale s'était inversée en moins de 2 ans après l'équinoxe (E5-54; E5-55; E5-56) avec l'apparition d'un fort enrichissement moléculaire au-dessus du pôle sud (E5-56, E5-57), associé à un fort refroidissement (E5-57). Une variation inattendue de l'abondance stratosphérique du méthane avec la latitude a été mise en évidence (E5-58), tandis qu'une analyse des données Huygens/DISR a permis de préciser sa valeur à basse latitude (E5-59). Par ailleurs, la surface de Titan montre aussi des variations avec le temps, en particulier liées à des phénomènes exogènes ou endogènes (cryovolcanisme ou érosion). Nous avons analysé des données Cassini/VIMS et montré des effets surfaciques que nous avons connectés à des processus physiques (E5-60, E5-61, E5-62).

Observations submillimétriques par HERSCHEL des planètes et satellites : les observations des planètes géantes et de Titan, dans le cadre du Key Program HssO sur le temps garanti (2 Co-PI du projet au LESIA et 5 Co-I), nous ont permis

- (i) de confirmer que l'eau dans la stratosphère de Jupiter avait été déposée par la comète Shoemaker-Levy 9 en 1994 (E5-63),
- (ii) de montrer que l'eau dans l'atmosphère de Titan vient vraisemblablement des geysers d'Encelade (E5-64, E5-65),
- (iii) de mesurer le rapport D/H dans les atmosphères d'Uranus et de Neptune (E5-66),
- (iv) de prouver l'existence d'un apport externe de matière oxygénée (par les poussières interplanétaires ou les comètes) dans Uranus (E5-67).

Observations ALMA : les chercheurs du pôle planétologie du LESIA réussissent remarquablement à obtenir du temps d'observation avec l'interféromètre ALMA avec en moyenne 2-3 projets PI par an sélectionnés et autant de projets Co-I, ce qui représente environ 50% de toutes les observations acceptées par ALMA en planétologie. Les projets principaux du pôle planétologie avec ALMA concernent :

- i) la cartographie de l'eau et de composés soufrés (SO, SO₂) montrant des variations spatiales de leurs abondances d'un facteur 4 dans la mésosphère de Venus (E5-51),
- ii) la recherche et cartographie de nitriles dans l'atmosphère de Titan, en particulier la caractérisation spatiale de HNC l'isomère de HCN,
- iii) la détection dans le domaine submillimétrique de CO et HCN dans l'atmosphère de Pluton (E5-80).

8. Exoplanètes

Le LESIA s'est fortement impliqué dans le développement des instruments VLT/SPHERE et JWST/MIRI qui permettent l'imagerie directe et la spectroscopie d'exoplanètes géantes jeunes. Une thèse en co-tutelle entre les pôles HRAA et planétologie a été menée pour développer un modèle d'équilibre radiatif-convectif d'atmosphère d'exoplanète géante, Exo-REM (E5-68). Ce modèle calcule les profils de température et d'abondance des gaz les plus importants et il prédit le spectre d'émission. Il a été appliqué à plusieurs exoplanètes détectées en imagerie directe, dont β Pictoris b, permettant de mieux contraindre ses paramètres physiques à partir des observations existantes.

Deux codes de nouvelle génération, développés au LESIA pour l'étude des disques de débris, DyCoSS et LIDT-DD, ont amené des avancées majeures dans la compréhension de ces systèmes. DyCoSS a ainsi permis de comprendre l'évolution d'un disque dans l'environnement perturbé des étoiles binaires ainsi que la signature observationnelle laissée par une planète géante dans un disque de débris (E5-69, E5-70). Quant à LIDT-DD, il est le premier (et à ce jour le seul) code permettant d'étudier l'évolution d'un disque de manière totalement auto-consistante, en couplant le traitement des collisions et celui de la dynamique (E5-71). Ce code a déjà été appliqué avec succès à l'étude de certains phénomènes violents et transitoires (E5-72). Nous sommes, par ailleurs, à la pointe dans le domaine de la formation planétaire dans les systèmes binaires.

Analyse SWOT du pôle planétologie

	FORCES	FAIBLESSES
Contexte interne	<ul style="list-style-type: none"> - Variété thématique - Maîtrise de méthodologies et techniques variées - Implication dans toutes les missions spatiales dédiées à la planétologie 	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de R&T pour répondre aux appels d'offre - Nombre élevé d'EC dans l'unité avec comme conséquence moins d'ETP dédiés à la recherche pure
	OPPORTUNITÉS	MENACES
Contexte externe	<ul style="list-style-type: none"> - Forte reconnaissance internationale - Motivation à répondre à de nombreux appels d'offre sur la planétologie 	<ul style="list-style-type: none"> - Manque de manpower scientifique et technique pour suivre et maintenir la forte implication dans plusieurs missions spatiales

Tableau 22 - Analyse SWOT du pôle planétologie

Projet scientifique à cinq ans du pôle planétologie

1. Petits corps primitifs : missions de retour d'échantillon OSIRIS-REX et HAYABUSA 2

Depuis plusieurs années nous travaillons comme Co-Is ou scientifiques associés sur les missions de retour d'échantillons d'astéroïdes primitifs Hayabusa2 (JAXA) et OSIRIS-Rex (NASA). La mission Hayabusa2 a été lancée par la JAXA le 3 Décembre 2014 et arrivera à l'astéroïde géocroiseur (162173) Ryugu en juin 2018 pour étudier ses caractéristiques jusqu'à février 2019 et en ramener des échantillons sur Terre en décembre 2020. Au cours du printemps 2019 les 4 atterrisseurs MASCOT (développé par le DLR et le CNES) et 3 MINERVA seront largués sur le sol et effectueront leurs observations in situ. L'astéroïde étudié est de type C, primitif susceptible de contenir des matériaux organiques.

La mission OSIRIS-Rex a été lancée le 9 septembre 2016. La cible est l'astéroïde géocroiseur Bennu (1999 RQ36), un objet primitif d'environ 500 m de diamètre. La sonde mettra environ 2 ans à atteindre sa cible et après des manœuvres d'approche en août 2018, OSIRIS-REx débutera l'étude détaillée de Bennu pendant deux ans, période à l'issue de laquelle sera sélectionné le site d'échantillonnage. Un échantillon d'au moins 60 grammes de poussières sera stocké et ramené sur Terre en septembre 2023. OSIRIS-REx embarque cinq instruments scientifiques (une caméra, trois spectromètres et un altimètre) qui cartographieront l'astéroïde dans le domaine visible-infrarouge et rayons X.

Notre équipe participe activement à plusieurs working groups mis en place au sein du Science Team de ces 2 missions : i) spectroscopie, ii) chondrites carbonées et iii) caractéristique de la surface. Notre but est de donner des contraintes sur les caractéristiques physiques, chimiques et morphologiques de deux cibles pour la sélection du site d'échantillonnage. Notre équipe participera aux phases de programmation des observations, au développement d'outils d'analyse spectrale et à l'analyse des données des caméras et des spectromètres des deux missions pour caractériser la morphologie et la composition de surface et les processus d'altération spatiale.

2. Mars : surface et atmosphère

Le LESIA est très fortement impliqué, techniquement et scientifiquement dans le projet SuperCam, instrument qui sera embarqué sur le Rover Mars 2020 de la NASA, successeur de Curiosity. SuperCam est une suite instrumentale qui combinerà en 2021 des observations LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), Raman, Infrarouge passive, imagerie visible et sonore. Nous sommes spécifiquement maître d'œuvre du spectromètre infrarouge, mais impliqués dans l'ensemble de l'instrument (notamment chef de projet adjoint, ingénieur système, responsable thermique, ...). Scientifiquement, nous sommes responsable scientifique du spectromètre infrarouge. A partir de 2021, l'ensemble des observations SuperCam permettra de déterminer simultanément la composition élémentaire et minéralogique des roches et des sols martiens pour comprendre l'évolution de cette planète. Le

spectromètre infrarouge, sensible aux minéraux hydratés, jouera un rôle-clé dans la sélection des échantillons qui seront prélevés en vue du retour, encore non programmé, sur Terre.

Le LESIA est également impliqué avec plusieurs CoI dans l'instrument ACS de la mission ExoMars de l'ESA. En orbite autour de Mars depuis octobre 2016, ACS observera l'atmosphère martienne entre 0.73 et 17 μm pour en déterminer la composition chimique et la température. Les chercheurs du LESIA apporteront leur expertise sur l'inversion de la température, la mesure des espèces oxygénées (O_2 , H_2O , ...), le cycle du deutérium.

3. Mercure/BepiColombo

Le pôle planétologie du LESIA compte 8 Co-Is de l'instrument SIMBIO-SYS sur BepiColombo dont le Co-PI. Nous sommes impliqués dans plusieurs working groups de l'instrument, dont une coordination du working group « exosphère », en vue de la préparation des observations de la mission (lancement en 2018) et participerons aux phases de calibration en vol de l'instrument après lancement. Une thèse vient de commencer, dédiée à l'étude de Mercure avec une approche pluridisciplinaire :

- l'exploitation des données fournies par MESSENGER afin d'identifier et de définir des zones particulièrement intéressantes à caractériser en détail avec SIMBIO-SYS ;
- la réalisation d'expériences en laboratoire d'irradiation et chauffage d'analogues minéralogiques possibles de la surface herméenne, afin d'étudier les processus d'altération spatiale sur ces matériaux et afin de tester l'hypothèse d'une contribution importante d'une composante carbonée exogène - d'origine cométaire ou astéroïdale - à l'assombrissement de la surface.

4. Jupiter ICy moons Explorer (JUICE)

Le LESIA fut impliqué dès le départ dans l'élaboration de la mission JUICE, A. Coustenis étant co-Lead du Science Definition Team, et différents membres du LESIA y contribuant comme co-investigateurs ou scientifiques associés aux instruments MAJIS (spectro-imageur), SWI (instrument qui étudie les ondes sub-mm) et JANUS (caméra). Plusieurs membres du LESIA suivent de près le développement et participent à la définition de la mission via le SWT, les working groups (T. Cavalié est co-lead du working group « Jupiter ») et sa charge utile. Le lancement de la mission est prévu en juillet 2022. Dans la phase actuelle, les personnes impliquées participent au développement scientifique de trois instruments de la mission, en vue d'optimiser le retour scientifique et sont impliqués dans la définition des objectifs scientifiques, dans l'optimisation des modes instrument et des observations des différents objets qui seront observés par JUICE.

5. Grands observatoires au sol et dans l'espace

Préparation et exploitation des observations du système solaire avec le JWST : nous nous sommes impliqués dans la définition des objectifs scientifiques du JWST pour le Système solaire - qui vont de Mars aux objets trans-neptuniens - contribuant à 4 des 11 White Papers (Mars, Titan, planètes géantes, occultations). Nous sommes ainsi associés à une partie du temps garanti (GTO) Système solaire (Titan, Mars, comètes). Nous participons également à trois propositions Early Release Science, deux sur les petits corps, et une sur le système de Jupiter (co-PI au LESIA). De manière générale, l'exploitation scientifique de JWST en planétologie et exo-planétologie sera un axe important de l'équipe dans les 5-10 ans à venir.

MICADO-ELT : le pôle planétologie joue un rôle important dans l'élaboration du futur instrument MICADO dont l'optique adaptative de première lumière est gérée par le LESIA. L'équipe est responsable scientifique du thème Système solaire pour MICADO. L'élaboration de la liste des fichiers de calibration, de la sélection des filtres utiles et des sous-produits attendus du pipeline sont en phase de réalisation et seront à finaliser au cours des mois/années à venir. Outre le fait de finaliser au mieux l'instrument, le pôle planétologie testera les outils de simulation et de traitement d'images afin de les rendre opérants dès les premières lumières de l'ELT. Nous aurons également en charge l'identification des cas scientifiques du Système solaire à couvrir avec MICADO et la planification des premières observations pendant la période de temps garanti.

Occultations : le catalogue Gaia/DR1 a amélioré d'un ordre de grandeur les prédictions d'occultations, atteignant la milliseconde d'arc, soit quelques dizaines de km au sol. Cette précision sera encore améliorée d'un facteur dix en avril 2018 (catalogue DR2). Ceci permettra entre autres l'étude fine des anneaux de Chariklo (forme, structure

interne, modes propres), le suivi des atmosphères de Pluton et Triton (qui varient sur des échelles décennales), ou la détection de reliefs (montagnes, cratères, failles) à la surface des objets transneptuniens, aussi bien que la détermination de taille d'un grand nombre de TNOs. Une campagne de recherche d'occultations aléatoires est également menée avec le photomètre multi-objets Miosotys sur le télescope de 2m de Calar Alto. Le projet « Lucky Star » de financement ERC continuera de produire des résultats à haute définition sur les petits corps du Système solaire, avec une amélioration des prédictions permise par la précision astrométrique des données GAIA.

Données Cassini et Rosetta : la mission Cassini se terminera en septembre 2017 après 13 années d'observations du système de Saturne, et Rosetta s'est terminée en septembre 2016. L'analyse des données n'est pas pour autant terminée et nous allons continuer, au cours des prochaines années, notre étude des changements saisonniers des atmosphères de Saturne et de Titan, et l'analyse de la composition du noyau de la comète 67P, de son évolution, des liens entre morphologie - composition - activité et des processus de la coma interne.

6. Exoplanètes

Dans le domaine des exoplanètes, notre activité va s'orienter vers : les observations d'exoplanètes en imagerie directe et en transit avec des instruments sol (VLT/SPHERE) et espace (JWST) ; la préparation de la mission ESA M4 Ariel si elle est sélectionnée ; le développement de modèles d'atmosphères d'exoplanètes pour analyser les données sol ou espace. Ainsi Exo-REM sera développé dans plusieurs directions (e.g. meilleure prise en compte des nuages, incorporation du chauffage stellaire et de la diffusion dans l'atmosphère). Des outils d'inversion massive seront développés en partenariat avec l'IPAG (proposition ANR i-TEA). Un modèle couplant photochimie, nuages et circulation générale sera développé et utilisé pour interpréter les spectres d'exoplanètes en transit (collaboration avec les laboratoires : LMD, LATMOS). En collaboration avec le LUTH à l'Observatoire et dans le cadre de l'IRIS OCAV de PSL, les effets des échanges avec l'intérieur et de l'échappement atmosphérique seront étudiés. Un travail important sera enfin mené dans le cadre de l'ANR e-PYTHEAS, coordonnée au LESIA, pour aboutir à des listes de raies adaptées aux hautes températures des exoplanètes observées. Notons que la mission Ariel, si elle est sélectionnée, nécessitera un lourd travail de modélisation afin d'optimiser la stratégie d'observation et le choix des cibles.

Dans le domaine des disques circumstellaires, nous envisageons d'étendre le domaine d'applicabilité du code LIDT-DD et d'explorer d'autres problèmes jusqu'ici hors de portée des codes « traditionnels », comme les « avalanches » collisionnelles, le couplage gaz/poussière, ou bien encore la compréhension de l'origine des disques de poussières chauds (« Exozodis »). En ce qui concerne la formation planétaire, nous prévoyons de travailler en lien plus étroit avec la communauté des observateurs, afin d'obtenir des données statistiques plus complètes sur la prévalence d'exoplanètes dans les binaires serrées. Un tel travail a déjà démarré avec SPHERE et continuera également avec l'implication dans le Science Case de la mission astrométrique Theia.

Annexe A : ACRONYMES

ACRONYME	SIGNIFICATION	PAGE
AERES	Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur	45
AGN	Active Galaxy Nucleus (Noyau Actif de Galaxie)	39
AIT	Assemblage Intégration Tests	42
ANR	Agence nationale de la recherche	9
ARIEL	Atmospheri Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large survey	23
ARM	Architecture pour GPU développée par la société ARM Ltd	38
ASHRA	Action Spécifique pour la Haute Résolution Angulaire (INSU)	17
AWG	Astrophysics Working Group (ESA)	29
CCERES	Campus et Centre d'Etude et de Recherche pour l' Exploration Spatiale (PSL)	7
CFHT	Canada-France-Hawaii Telescope	30
CINES	Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur	53
CNAP	Conseil National des Astronomes et Physiciens (INSU)	61
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales	66
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	4
CNU	Conseil National des Universités	4
COPUOS	Committee on the Peaceful Uses of Outer Space	24
CPE	Commission Paritaire d'Etablissement (Observatoire de Paris)	16
CS	Conseil Scientifique (Observatoire de Paris)	6
CSAA	Commission Spécialisée Astronomie Astrophysique (INSU)	17
DGA	Délégation Générale de l'Armement	53
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile	24
DIM ACAV	Domaine d'Intérêt Majeur Astrophysique et Conditions d'Apparition de la Vie (Région Ile-de-France)	39
DLR	Deutsches Zentrum für Luft--und Raumfahrt (Berlin)	66
EIDD	École d'Ingénieurs Denis Diderot (Université Paris-Diderot)	6
ELT	Extremely Large Telescope (anciennement E-ELT, European Extremely Large Telescope)	14
ERC	European Research Council	36
ESA	European Space Agency	52
ESEP	Exploration Spatiale des Environnements Planétaires (labex PSL)	1
ESO	European Southern Observatory	31
ESRR	Evolution Stellaire en Rotation Rapide (projet ANR)	28
ETP	Equivalents Temps-Plein	4
FOAD	Formation Ouverte et/ou à Distance	17
FPGA	Field-Programmable Gate Array	13
GED	Gestion Electronique de Documentation	16
GIS PHASE	Groupement d'Intérêt Scientifique PHASE (CNRS)	37
GPU	Graphics Processing Unit	33
GTO	Guaranteed Time Observation	67
HRAA	Haute Résolution Angulaire en Astrophysique (LESIA)	21
IAS	Institut d'Astrophysique Spatiale	22
IBENS	Institut de Biologie de l'Ecole Normale Supérieure	37
IDEX	Initiatives d'Excellence	6
IDRIS	Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique	24
IMNC	Imagerie et Modélisation en Neurobiologie et Cancérologie	44
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers	18
IPAG	Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble	38
IPEV	Institut polaire français Paul-Émile Victor	24

ACRONYME	SIGNIFICATION	PAGE
IRAM	Institut de Radioastronomie Millimétrique	63
IRAP	Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Toulouse)	22
IRIS	Initiative de Recherches Interdisciplinaires et Stratégiques (PSL)	10
IRS	Infrared Spectrograph (Hubble Space Telescope)	22
ITA	Ingénieurs, Techniciens, Administratifs	23
JMMC	Jean Marie Mariotti Center	37
JWST	James Webb Space Telescope	22
LAM	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille	37
LATMOS	Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales	67
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique	67
LPC2E	Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace	17
MHD	Magnéto-HydroDynamique	10
MOOC	massive open online course	17
NRH	Nançay RadioHéliographe	54
OA	Optique Adaptative	36
OCAV	Origines et conditions d'apparition de la vie	11
OCT	Optical Coherence Tomography	39
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales	37
OTN	Objet Trans-Neptunien	64
PADC	Paris Astronomical Data Centre (OV-Paris)	14
PCS	Planetary Camera and Spectrograph (instrument ELT)	42
PLATO	PLANetary Transits and Oscillations of stars	23
PNP	Programme National de Planétologie (INSU)	44
PNPS	Programme National de Physique Stellaire (INSU)	28
PNST	Programme National Soleil-Terre (INSU)	13
PSL	Paris Sciences & Lettres Research University	6
R&D	Recherches et Développement	9
RPW	Radio and Plasma Waves (Solar Orbiter)	22
SESP	Sciences pour les Exoplanètes et les Systèmes Planétaires	18
SCAO	Single Conjugate Adaptive Optics (instrumentation ELT)	37
STIX	Spectrometer Telescope for Imaging X-rays (Solar Orbiter)	11
SWOT	strengths, weaknesses, opportunities, threats.	4
SWT	Science Working Team (ESA)	67
TBL	Telescope Bernard Lyot	30
THD	Très Haute Dynamique	37
THOR	Turbulence Heating Observer	23
UFE	Unité de Formation et d'Enseignement (Observatoire)	18
UFR	Unité de Formation et de Recherche (Universités)	6
UMR	Unité Mixte de Recherche (CNRS)	6
UPD	Université Paris-Diderot - Paris 7	61
UPMC	Université Pierre et Marie Curie - Paris 6	6
USN	Unité de Service de Nançay (Observatoire)	25
USTH	Université des Sciences et des Technologies de Hanoi	18
UVSQ	Université de Versailles Saint-Quentin	62
WMO	World Meteorological Organization	24

Annexe B : Références citées dans la table des faits marquants (page 15)

Les références complètes et étendues sont en Annexe 4

Référence	Titre
E1-1	[E1-041] Baglin Annie, The CoRoT Legacy Book: The adventure of the ultra high precision photometry from space, by the CoRoT Team. ISBN: 978-2-7598-1876-1.EDP Sciences, 2016
E1-2	[E1-ACL004] Mosser Benoît, Goupil Marie-José, Belkacem Kevin, Marques J. P., Beck P. G., Bloemen S., de Ridder Joris, Barban Caroline, Deheuvels S., Elsworth Y., Hekker S., Kallinger T., Ouazzani Rhita-Maria, Pinsonneault M. H., Samadi Davoud-Reza, Stello D., Garcia Rafael A., Klaus T. C., Li J., Mathur S., Morris Robert L. Spin down of the core rotation in red giants. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2012, vol. 548, pp. 10.
E1.3	[E1-ACL013] Marques J. P., Goupil Marie-José, Lebreton Y., Talon S., Palacios A., Belkacem Kevin, Ouazzani Rhita-Maria, Mosser Benoît, Moya A., Morel P., Pichon B., Mathis S., Zahn J.-P., Turck-Chieze Sylvaine, Nghiem P. A. P. Seismic diagnostics for transport of angular momentum in stars. I. Rotational splittings from the pre-main sequence to the red-giant branch. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2013, vol. 549, pp. 74.
E1-4	[E1-ACL033] Valentini Marica, Chiappini C., Miglio A., Montalbán Josefina, Rodrigues T., Mosser Benoît, Anders Friedrich, GES Consortium. The CoRoT-GES Collaboration: Improving red giants spectroscopic surface gravity and abundances with asteroseismology. <i>Astronomische Nachrichten</i> , 2016, vol. 337, pp. 970.
E1-5	[E1-ACL028] Belkacem Kevin, Marques J. P., Goupil Marie-José, Mosser Benoît, Sonoit T., Ouazzani Rhita-Maria, Dupret Marc-Antoine, Mathis S., Grosjean M. Angular momentum redistribution by mixed modes in evolved low-mass stars. II. Spin-down of the core of red giants induced by mixed modes. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 579.
E1-6	[E1-ACL027] Belkacem Kevin, Marques J. P., Goupil Marie-José, Sonoit T., Ouazzani Rhita-Maria, Dupret Marc-Antoine, Mathis S., Mosser Benoît, Grosjean M. Angular momentum redistribution by mixed modes in evolved low-mass stars. I. Theoretical formalism. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 579.
E2-1	Martin O. A, et al. <i>Astronomy and Astrophysics</i> . 2017. vol. 598.
E2-2	Gendron Eric, et al. <i>Proceedings of the SPIE</i> . 2016. vol. 9909.
E2-3	Boccaletti Anthony, et al. <i>Nature</i> . 2015. vol. 526. pp. 230-232.
E2-4	Kervella Pierre, et al. <i>Astronomy and Astrophysics</i> . 2016. vol. 585.
E2-5	Gratadour Damien, et al. 2015. vol. 581. pp. id. L8.
E2-6	GRAVITY Collaboration; Abuter, R.; Accardo, M.; Amorim, A.; Anugu, N.; Ávila, G.; Azouaoui, N.; Benisty, Met al. First Light for GRAVITY: Phase Referencing Optical Interferometry for the Very Large Telescope Interferometer. <i>Astronomy and Astrophysics</i> . 2017. Vol. 602, A94, pp. 1-23.
E3-1	Schippers Patricia, Meyer Nicole, Lecacheux Alain, Belheouane Soraya, Moncuquet Michel, Kurth W. S., Mann I., Mitchell D. G., Andre N. Nanodust Detection between 1 and 5 AU Using Cassini Wave Measurements. <i>The Astrophysical Journal</i> , 2015, vol. 806, pp. 77.
E3-2	Le Chat Gaétan, Issautier Karine, Zaslavsky A., Pantellini Filippo, Meyer Nicole, Belheouane Soraya, Maksimovic Milan. Effect of the Interplanetary Medium on Nanodust Observations by the Solar Terrestrial Relations Observatory. <i>Solar Physics</i> , 2015, vol. 290, pp. 933-942.
E3-3	Lion Sonny, Alexandrova Olga, Zaslavsky A. Coherent Events and Spectral Shape at Ion Kinetic Scales in the Fast Solar Wind Turbulence. <i>The Astrophysical Journal</i> , 2016, vol. 824.
E3-4	Perrone D., Alexandrova Olga, Mangeney André, Maksimovic Milan, Lacombe Catherine, Rakoto V., Kasper J. C., Jovanovic Dusan. Compressive Coherent Structures at Ion Scales in the Slow Solar Wind. <i>The Astrophysical Journal</i> , 2016, vol. 826.
E3-5	Louis C. K., Lamy L., Zarka P., Cecconi B., Hess S. L. G. Detection of Jupiter decametric emissions controlled by Europa and Ganymede with Voyager/PRA and Cassini/RPWS., <i>Journal of Geophysical Research (Space Physics)</i> , 2017, doi:10.1002/2016JA023779
E4-1	Dalmasse Kevin, et al. First observational application of a connectivity-based helicity flux density. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2013, vol. 555, pp. L6.
E4-2	Dalmasse Kevin, et al. Photospheric Injection of Magnetic Helicity: Connectivity-Based Flux Density Method. <i>Solar Physics</i> , 2014, vol. 289, pp. 107-136
E4-3	Zuccarello F. P., Aulanier Guillaume, Gilchrist S. A. Critical Decay Index at the Onset of Solar Eruptions. <i>The Astrophysical Journal</i> , 2015, vol. 814.
E4-4	Musset S., Vilmer Nicole, Bommier Véronique. Hard X-ray emitting energetic electrons and photospheric electric currents. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 580, pp. 106.
E4-5	Salas-Matamoras, et al. On the Statistical Relationship Between CME Speed and Soft X-Ray Flux and Fluence of the Associated Flare. <i>Solar Physics</i> , 2015, vol. 290, pp. 1337-1353

Référence	Titre
E5-1	Capaccioni F., et al. The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta. <i>Science</i> , 2015, vol. 347, pp. aaa0628.
E5-2	Filacchione G., et al. Exposed water ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov--Gerasimenko. <i>Nature</i> , 2016, vol. 529, pp. 368-372.
E5-3	De Sanctis M. C., et al. The diurnal cycle of water ice on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. <i>Nature</i> , 2015, vol. 525, pp. 500-503.
E5-4	Filacchione G et al Seasonal exposure of carbon dioxide ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. <i>Science</i> , 2016, vol. 354, pp. 1563-1566.
E5-5	Bockelée-Morvan D., et al First observations of H2O and CO2 vapor in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko made by VIRTIS onboard Rosetta. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 583, pp. 6.
E5-6	Bockelée-Morvan D., et al Evolution of CO2 , CH4 , and OCS abundances relative to H2O in the coma of comet 67P around perihelion from Rosetta /VIRTIS-H observations. <i>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society</i> , 2016, vol. 462, pp. S170-S183.
E5-7	Quirico E., et al. Refractory and semi-volatile organics at the surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Insights from the VIRTIS/Rosetta imaging spectrometer. <i>Icarus</i> , 2016, vol. 272, pp. 32-47.
E5-8	Rousseau B., Erard, S., Beck, P., et al., 2016, Sulfides and refractory organic matter at the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko: evidence from VIRTIS data and laboratory measurements. <i>American Astronomical Society, DPS meeting #48, id.211.08</i>
E5-9	Sierks H., et al. On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. <i>Science</i> , 2015, vol. 347, pp. 1044.
E5-10	Thomas Nicholas, et al. The morphological diversity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. <i>Science</i> , 2015, vol. 347, pp. 0440.
E5-11	Vincent J. B., et al, 2015. Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse. <i>Nature</i> , 2015, vol. 523, pp. 63-66.
E5-12	Massironi M., et al. Two independent and primitive envelopes of the bilobate nucleus of comet 67P. <i>Nature</i> , 2015, vol. 526, pp. 402-405
E5-13	Fornasier S., et al. Spectrophotometric properties of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from the OSIRIS instrument onboard the ROSETTA spacecraft. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 583
E5-14	Hasselmann P.H., et al., Barucci M.A, Fornasier S., et al., The Opposition Effect of 67P/Churyumov-Gerasimenko on post-perihelion Rosetta images <i>MNRAS</i> , 2017, in press 2017
E5-15	Feller C., et al. Decimetre-scaled spectrophotometric properties of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from OSIRIS observations. <i>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society</i> , 2016, vol. 462, pp. S287-S303.
E5-16	Fornasier S., et al. Rosetta's comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sheds its dusty mantle to reveal its icy nature. <i>Science</i> , 2016, vol. 354, pp. 1566-1570.
E5-17	Barucci M. Antonella, et al. Detection of exposed H2O ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as observed by Rosetta OSIRIS and VIRTIS instruments. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2016, vol. 59
E5-18	Deshapriya J. D. P., Barucci M. Antonella, Fornasier S., Feller C., Hasselmann P. H., Sierks et al., Spectrophotometry of the Khonsu region on the comet 67P/Churyumov-Gerasimenko using OSIRIS instrument images. <i>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society</i> , 2016, vol. 62, issue Suppl 1, pp. S274-S286
E5-19	Pajola M., et al. The pristine interior of comet 67P revealed by the combined Aswan outburst and cliff collapse", <i>Nature Astronomy</i> , vol 1, Article number: 0092 (2017)
E5-20	M.R.El-Maarry, et al. -Surface changes on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko suggest a more active past," <i>Science</i> , 355, Issue 6332, pp. 1392-1395 (2017)
E5-21	G Groussin Olivier, et al. Gravitational slopes, geomorphology, and material strengths of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from OSIRIS observations. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 583.
E5-22	Schloerb F. et al. MIRO observations of subsurface temperatures of the nucleus of 67P/Churyumov-Gerasimenko. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 583.
E5-23	Choukroun, M.; et al., 2015. Dark side of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in Aug.-Oct. 2014. MIRO/Rosetta continuum observations of polar night in the southern regions. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 583, A28
E5-24	Gulkis Samuel, et al. Subsurface properties and early activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. <i>Science</i> , 2015, vol. 347.
E5-25	Biver Nicolas, et al. Distribution of water around the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko at 3.4 AU from the Sun as seen by the MIRO instrument on Rosetta. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2015, vol. 583.

Référence	Titre
E5-26	<u>Biver et al., 2016</u> , The heliocentric and time variation of the release of molecules by 67P/CG as seen by MIRO. Symposium Comets: a new vision after osetta ad Philae, Toulouse, 14-18 novembre 2016
E5-39	<u>Lellouch Emmanuel</u> , et al. TNOs are Cool: A survey of the trans-Neptunian region. IX. Thermal properties of Kuiper belt objects and Centaurs from combined Herschel and Spitzer observations. <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2013, vol. 557.
E5-40	<u>Fornasier S.</u> , et al. TNOs are Cool: A survey of the trans-Neptunian region. VIII. Combined Herschel PACS and SPIRE observations of nine bright targets at 70-500 μm . <i>Astronomy and Astrophysics</i> , 2013, vol. 555, pp. 15.
E5-41	<u>Lacerda P.</u> , et al. The Albedo-Color Diversity of Transneptunian Objects. <i>The Astrophysical Journal Letters</i> , 2014, vol. 793, pp. L2.
E5-42	<u>Braga-Ribas F.</u> , et al. A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. <i>Nature</i> , 2014, vol. 508, pp. 72-75.
E5-43	<u>Sicardy, B.</u> et al. (2017). « Rings beyond the giant planets », livre "Planetary ring systems", Cambridge Univ. Press, sous presse.
E5-52	<u>Sylvestre Mélody</u> , et al. Seasonal changes in Saturn's stratosphere inferred from Cassini/CIRS limb observations. <i>Icarus</i> , 2015, vol. 258, pp. 224-238.
E5-53	<u>Fouchet Thierry</u> , et al. Stratospheric aftermath of the 2010 Storm on Saturn as observed by the TEXES instrument. I. Temperature structure. <i>Icarus</i> , 2016, vol. 277, pp. 196-214.
E5-54	<u>Bampasidis G.</u> , et al. Thermal and Chemical Structure Variations in Titan's Stratosphere during the Cassini Mission. <i>The Astrophysical Journal</i> , 2012, vol. 760, pp. 144.
E5-55	<u>Coustenis Athena</u> , et al. Evolution of the Stratospheric Temperature and Chemical Composition over One Titanian Year. <i>The Astrophysical Journal</i> , 2013, vol. 779, pp. 177.
E5-56	<u>Vinatier Sandrine</u> , et al. Seasonal variations in Titan's middle atmosphere during the northern spring derived from Cassini/CIRS observations. <i>Icarus</i> , 2015, vol. 250, pp. 95-115.
E5-57	<u>Coustenis Athena</u> , et al. Titan's temporal evolution in stratospheric trace gases near the poles. <i>Icarus</i> , 2016, vol. 270, pp. 409-420.
E5-58	<u>Lellouch Emmanuel</u> , et al. The distribution of methane in Titan's stratosphere from Cassini/CIRS observations. <i>Icarus</i> , 2014, vol. 231, pp. 323-337.
E5-59	<u>Bézar Bruno</u> . The methane mole fraction in Titan's stratosphere from DISR measurements during the Huygens probe's descent. <i>Icarus</i> , 2014, vol. 242, pp. 64-73.
E5-60	<u>Solomonidou Anezina</u> , et al. Morphotectonic features on Titan and their possible origin. <i>Planetary and Space Science</i> , 2013, vol. 77, pp. 104-117.
E5-61	<u>Solomonidou Anezina</u> , et al. Surface albedo spectral properties of geologically interesting areas on Titan. <i>Journal of Geophysical Research (Planets)</i> , 2014, vol. 119, pp. 1729-1747.
E5-62	<u>Solomonidou Anezina</u> , et al. Temporal variations of Titan's surface with Cassini/VIMS. <i>Icarus</i> , 2016, vol. 270, pp. 85-99.