

Bilan scientifique - II- ACTIVITES SCIENTIFIQUES

II.4. Pôle Astronomie

1. Présentation générale	1
2. Résultats marquants en astrophysique	1
2.1. Physique stellaire	1
2.2. Astérosismologie stellaire: premiers résultats CoRoT	2
2.3. Exoplanètes	4
2.4. Centre galactique.....	5
2.4. Extragalactique	6
3. Programmes instrumentaux	7
3.1. HRA	7
3.1.1. Optique adaptative	7
3.1.2. Interférométrie	10
3.1.3. Coronographie.....	11
3.2. Astérosismologie expérimentale	12
3.2.1. Performances CoRoT	12
3.2.2. Sismo Sol	13
4. Prospective.....	14
4.1. Prospective interférométrie	14
4.2. Prospective coronographie.....	14
4.3. Prospective optique adaptative.....	14
4.4. Sismo sol	15
4.5. Plato	16

II.4. Pôle Astronomie

1. Présentation générale

Le pôle Astronomie du LESIA comprend en fin de plan quadriennal 22 chercheurs ou enseignants chercheurs dont un émérite, ainsi que 5 postdocs et 13 thésitifs qui se répartissent de manière équilibrée sur les deux composantes du Pôle que sont la haute résolution angulaire (HRA) et l'astérosismologie, et conduisent leur recherches dans deux thématiques principales:

- La structure interne des étoiles, étudiée au moyen de l'astérosismologie et de modèles numériques;
- L'astrophysique des objets compacts comme les noyaux actifs de galaxies, les étoiles en formation, les étoiles évoluées ou les exoplanètes.

Pour mener à bien ces recherches le pôle Astronomie du LESIA est impliqué fortement dans le satellite CoRoT et développe des programmes instrumentaux en imagerie infrarouge à haute résolution angulaire, comme l'optique adaptative, l'interférométrie et la coronagraphie. L'intégration, en 2006, des activités instrumentales HRA (y compris les applications ophtalmologiques) au sein du groupement d'intérêt scientifique (GIS) PHASE (Partenariat Haute résolution Angulaire Sol - Espace), a été un des faits marquants du début du quadriennal.

2. Résultats marquants en astrophysique

2.1 Physique stellaire

La période 2006-2008 a vu une progression spectaculaire sur plusieurs thèmes de recherche du pôle astronomie du LESIA: l'étude des Céphéides, des disques de débris, des étoiles naines à fréquences astérosismiques, des étoiles pauvres en métaux et des étoiles en rotation rapide. Nous nous concentrerons ici sur la description des résultats marquants sur les Céphéides et les étoiles en rotation rapide.

La mesure directe du diamètre angulaire des Céphéides présente un intérêt considérable du double point de vue de la physique stellaire et de l'estimation des distances dans l'Univers. Nos nouvelles observations de Céphéides nous ont permis de montrer que la présence d'enveloppes circumstellaires autour de ces étoiles (découvertes en 2005 par notre équipe) est un phénomène très répandu. Un exemple de la qualité exceptionnelle des données obtenues est présenté sur la Figure 1.

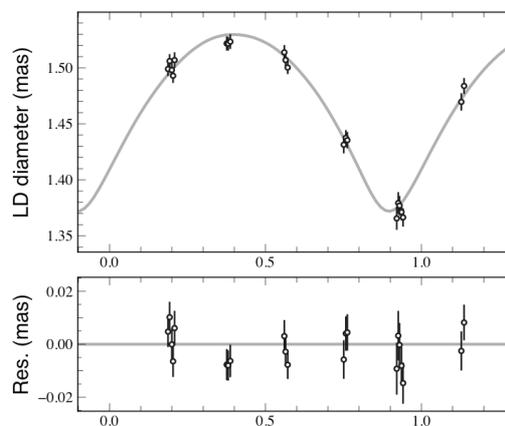


Figure 1. Observations CHARA/FLUOR de δ Cep.

La force de l'interféromètre CHARA est de posséder une base maximum de plus de 300m, et donc une résolution angulaire très élevée. Grâce aux observations avec le VLTI et CHARA, nous avons également découvert des enveloppes circumstellaires autour de quatre Céphéides (L Car, Polaris, δ Cep et Y Oph). Cette découverte de quatre enveloppes pour quatre Céphéides observées indique que la présence d'enveloppes pourrait être la règle.

Les étoiles naines massives présentent souvent des vitesses de rotation particulièrement élevées qui ont un impact important sur leur structure interne. L'aplatissement résultant peut être mesuré par interférométrie, comme nous l'avons démontré sur l'étoile α Eri (Achernar) avec VINCI. Cette étoile est en rotation ultra-rapide ($v \cdot \sin i = 225 \pm 23$ km/s) et nos mesures ont permis de constater l'effet de cette rotation sur sa photosphère (Domiciano, Kervella et al. 2003). En 2006, nous avons de plus mis en évidence avec l'instrument VINCI la présence d'un vent stellaire important partant des pôles (Kervella & Domiciano 2006, Figure 2 gauche). En collaboration avec l'équipe de l'interféromètre CHARA, nous avons mis en évidence la rotation rapide de Véga par son assombrissement centre-bord anormal (Aufdenberg et al. 2006). Autour de cette même étoile a été détectée aussi avec FLUOR/CHARA une composante interne, chaude et ténue, au disque de débris froids (Absil & al. 2006). A la suite de cette découverte nous avons entrepris une recherche systématique de matériau circumstellaire chaud autour des étoiles de type solaire (di Folco & al. 2007, Absil & al. 2008).

En 2007, nous avons découvert un compagnon d'Achernar à une séparation de $0,3''$ à l'aide de l'instrument VISIR (Figure 2 à droite). Cette étoile pourrait être une des causes de la pseudo-périodicité des épisodes Be de cette étoile. Des observations NACO (imagerie et spectroscopie) ont été obtenues fin 2007 pour préciser le type spectral d'Achernar B et mesurer ses paramètres orbitaux. Les données sont excellentes et permettent d'établir qu'il s'agit d'une étoile naine de type spectral A2V (Kervella et al. 2008).

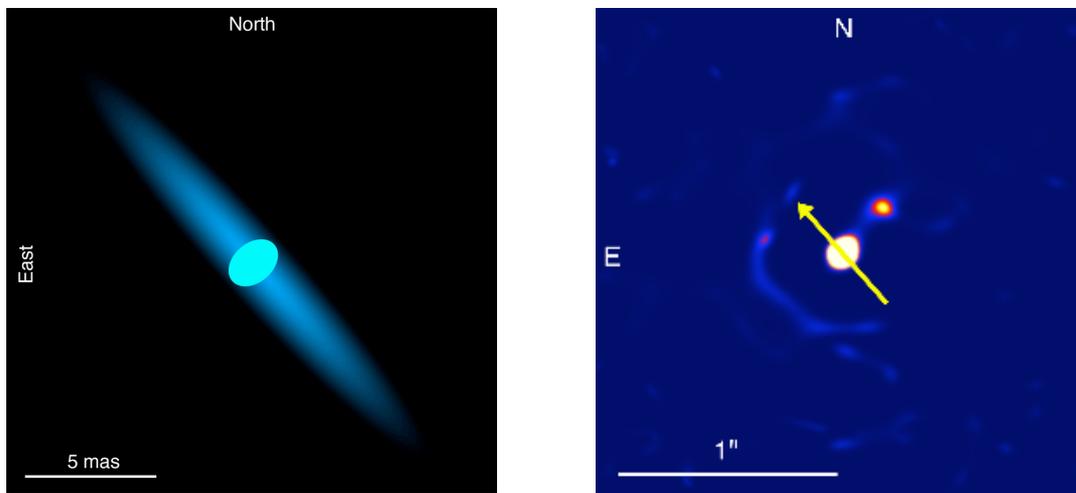


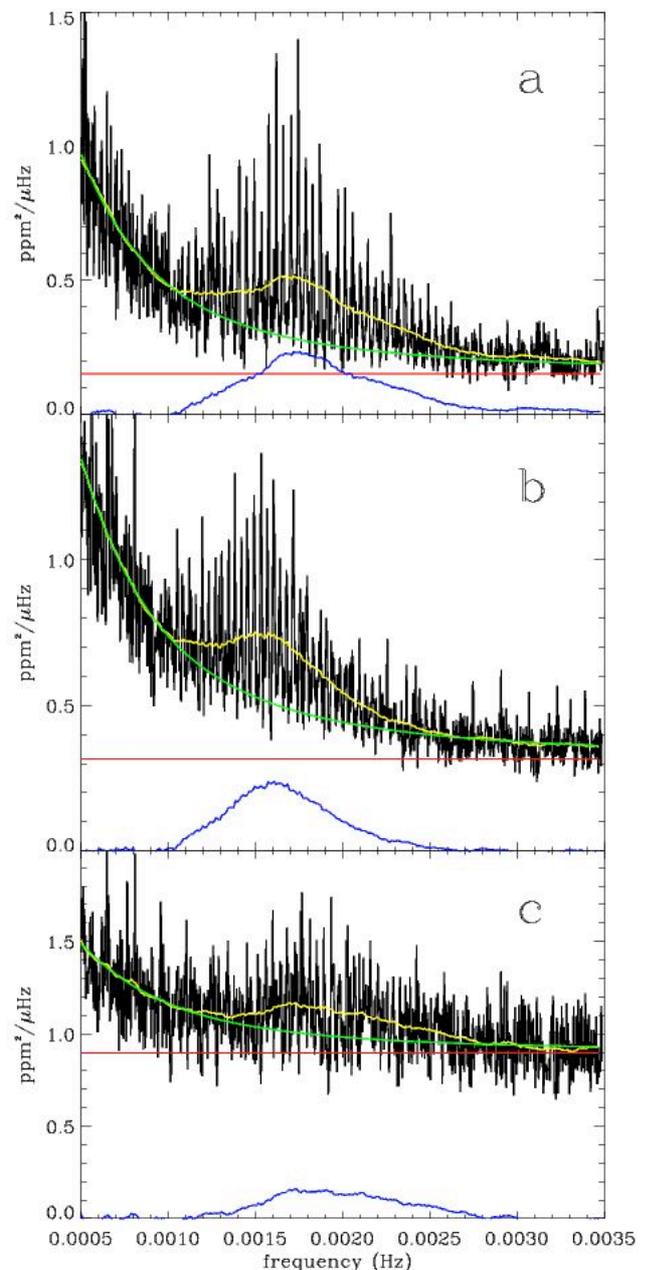
Figure 2. Gauche: Modèle d'Achernar obtenu grâce aux observations VINCI (Kervella & Domiciano 2006). Droite: Compagnon d'Achernar découvert en 2007 (Kervella & Domiciano 2008)

2.2 Astérosismologie stellaire: premiers résultats CoRoT

La période 2006-2008 a été marquée par le lancement (décembre 2006) et la mise en exploitation du satellite CoRoT, projet phare de sismologie stellaire et dont les résultats sont très attendus par la communauté de physique stellaire en général.

La physique des intérieurs stellaires a en effet connu de nombreux développements théoriques au cours de cette dernière décennie, développements visant à comprendre et modéliser les processus de transport de la chaleur par la convection, des éléments chimiques par triage gravitationnel, pression radiative ou circulation de grande échelle, du moment angulaire. La prise en compte de ces processus est en effet nécessaire pour faire franchir à nos modèles d'étoiles un saut qualitatif important et leur permettre de rendre compte, au delà des grandes lignes de la structure et de l'évolution stellaire, de plusieurs aspects cruciaux de l'évolution stellaire qui restent mal expliqués et mal modélisés. Ces développements ont besoin de contraintes observationnelles et la sismologie en offrant des observables d'une grande précision et sensibles à l'intérieur des étoiles est la seule technique permettant de répondre à cette attente.

Fig. 3: densité spectrale de puissance faisant apparaître pour trois objets observés avec CoRoT : le peigne caractéristique des oscillations de type solaire (en noir), la contribution associée à la granulation stellaire (en vert), le bruit de photon (en rouge), qui augmente avec la magnitude des objets considérés : $mV=5.7$ (a), $mV=6.5$ (b), $mV=7.6$ (c).



Parmi les objectifs principaux fixés à CoRoT, on trouve:

- la détection et la mesure d'oscillations de type solaire dans d'autres étoiles que le soleil, qui va permettre de généraliser l'étude menée jusqu'à présent sur le seul cas solaire.
- pour les étoiles plus massives que le soleil dont certains modes montrent des amplitudes suffisantes pour être observés du sol, abaisser le niveau de bruit d'un facteur 100 par rapport aux meilleures données sol actuelles, afin d'explorer ce domaine où des oscillations sont théoriquement prédites, mais jusque là inaccessibles.
- mesurer la variabilité stellaire sur des temps caractéristiques de l'ordre de 5 mois, inaccessibles du sol, même dans le cadre de réseaux coordonnés. Ces trois objectifs sont d'ores et déjà atteints pour les premiers runs d'observation effectués avec CoRoT.
- Deux runs de 156 jours et 135 jours avec un cycle utile supérieur à 92% confirment la capacité de CoRoT à effectuer des mesures de grande précision sur des durées longues.
- Sur les trois candidats pulsateurs de type solaire observés dans des runs longs, nous détectons les modes d'oscillation et une première analyse nous a permis de mesurer (pour la première fois) l'amplitude photométrique des oscillations. Elle est 1.5 fois supérieure au cas solaire et 20% inférieure aux estimations théoriques, alors que les estimations faites à partir des mesures de vitesse radiale au sol semblent en accord avec ces estimations théoriques. Cet écart reste à interpréter.
- On a mesuré également pour la première fois la signature de la granulation stellaire qui apparaît jusqu'à 3 fois plus élevée que dans le cas solaire.
- Pour les étoiles plus massives de type delta Scuti notamment, le niveau de bruit de 10-6 est conforme aux prévisions et nous avons mis en évidence jusqu'à plusieurs centaines de modes indétectables du sol.

2.3 Exoplanètes

Cette thématique qui était très présente dans le pôle via les développements instrumentaux (COROT, MIRI, NAOS, SPHERE, ALADDIN, EPICS) est désormais marquée par l'obtention de résultats effectifs, avec les cinq premières planètes découvertes par COROT et des observations en coronographie et en interférométrie dans le domaine connexe des disques de débris.

COROT, lancé en décembre 2006 a déjà observé 7 champs différents dont les premiers ont pu faire l'objet d'une première analyse, après la diffusion des données auprès des co-investigateurs en novembre 2007. Déjà cinq découvertes de planètes ont été annoncées par le Corot Exoplanets Science Team (Barge et al., 2008, Alonso et al. 2008, Bouchy et al., 2008, Deleuil et al., 2008, Aigrin et al., 2008, Moutou et al., 2008). Toutes correspondent à des orbites serrées ($a = 0.025 - .090$ UA) mais, en revanche, les domaines couverts en masse ($0.70 - 20 M_{Jup}$) et densité ($0.11 - 1.31 \text{ g cm}^{-3}$) sont vastes, une confirmation que la formation planétaire ne procède pas suivant un mécanisme universel standardisé. La découverte la plus marquante est celle de Corot-exo3b, un objet de $20 M_{Jup}$ et de rayon $0.83 R_{Jup}$, faisant de lui un cas tout à fait hors norme, à la frontière des naines brunes (le terme de super-Jupiter a été employé), or celles-ci étaient considérées comme quasi-absentes parmi les planètes découvertes jusqu'ici (*brown dwarf desert*). Le suivi au sol est essentiel dans la confirmation du caractère planétaire des candidats de COROT : d'une part via la photométrie en imagerie qui permet de lever les ambiguïtés de binaires de fond et d'autre part via les mesures de vitesses radiales qui permettent d'exclure les binaires à éclipses rasantes. Notre équipe est en charge de l'un des programmes de suivi photométrique au sol avec le CFHT. Par ailleurs en collaboration

avec l'équipe de l'IAS, elle travaille à l'analyse des courbes de lumière pour l'extraction des transits.

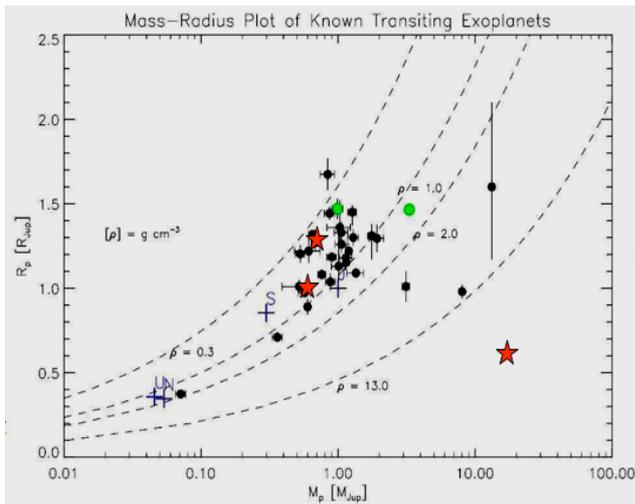


Fig. 4: Position dans un diagramme Masse / Rayon des 5 planètes découvertes par CoRoT : on note la dispersion large qui traduit une grande variété de propriétés physiques et le cas extrême de CoRoT-exo3b (en bas à droite) qui exhibe une masse de $20 M_{Jup}$ lui conférant une place unique dans le bestiaire des exoplanètes découvertes jusqu'ici.

Le volet observationnel en coronagraphie correspond à l'exploitation de NAOS, équipé par nos soins de deux coronographes à quatre quadrants afin d'analyser des disques de débris autour d'étoiles jeunes proches. Un objet de l'échantillon (PDS 70) montre de fortes similitudes avec le disque autour de TW Hya et révèle un compagnon de masse entre 27 et $50 M_{Jup}$. En outre, trois indices de formation planétaire sont fortement suggérés par ces mesures (Riaud et al. 2006). L'étude d'un autre disque de débris, AB Dor, a permis de confirmer la nature du compagnon de petite masse et surtout de déterminer un âge compris de l'ordre de 75 Myr (Boccaletti et al. 2008).

2.4 Centre galactique

L'activité du trou noir au centre de la Galaxie et l'étude de son environnement proche a constitué une activité importante de recherche au LESIA ces dernières années, en relation directe avec les développements instrumentaux en haute résolution angulaire réalisés au laboratoire. Les premiers systèmes d'optique adaptative, tel ADONIS au 3.6m de la Silla/ESO, avaient déjà permis d'obtenir de premiers résultats, avec la première cartographie en optique adaptative à $3.6 \mu m$ (bande L) du Centre Galactique et une mesure non biaisée de l'extinction interstellaire vers cette région. Mais le système d'optique adaptative NAOS et plus particulièrement son analyseur infrarouge, conçu au LESIA, a permis à une équipe internationale comprenant des chercheurs allemands du MPE et des chercheurs du laboratoire de réaliser une étude astrométrique des étoiles gravitant au cœur de la Galaxie avec une résolution spatiale jusqu'ici inégalée, démontrant de façon quasi certaine l'existence d'un trou noir au centre de la Galaxie. Toujours grâce à NAOS, cette même équipe a par ailleurs observé pour la première fois la contrepartie infrarouge de la source radio associée au trou noir dans plusieurs bandes infrarouges : H, K, L' et M'.

L'origine des sursauts de luminosité observés de cette contrepartie infrarouge reste encore à préciser : ils pourraient s'expliquer par de la matière sur la dernière orbite stable du trou noir se précipitant sur le trou noir (Gillessen et al. 2006) ou par un jet accélérant les électrons à l'origine du rayonnement non thermique observé (cf. par exemple Clénet et al. 2006). Une autre question majeure posée par ces observations infrarouge à haute résolution spatiale est l'origine des étoiles jeunes observées très proches du trou noir (moins de 0.4pc) : naissance *in-situ* ou dans un amas proche mi-

grant vers le centre de la Galaxie ? Pour résoudre toutes ces questions nous avons reconduit la collaboration fructueuse lancée avec NAOS avec des chercheurs du MPE au sein d'un Large Program d'observations multi-longueurs d'onde (X, IR proche, IR moyen, submm) dont la partie infrarouge a été soumise et acceptée par l'ESO. Ces observations nous ont permis par exemple d'obtenir les images moyen IR les plus "fines" jamais obtenues, sans toutefois pouvoir détecter de sursauts dans cette gamme de longueurs d'onde (Haubois et al. 2008), ainsi qu'une caractérisation fine (âge, métallicité, perte de masse par vent stellaire, ...) d'étoiles proches du trou noir et d'un amas proche du Centre Galactique (Martins et al. 2007, 2008) permettant de tester les différentes hypothèses de l'origine des étoiles jeunes du Centre Galactique.

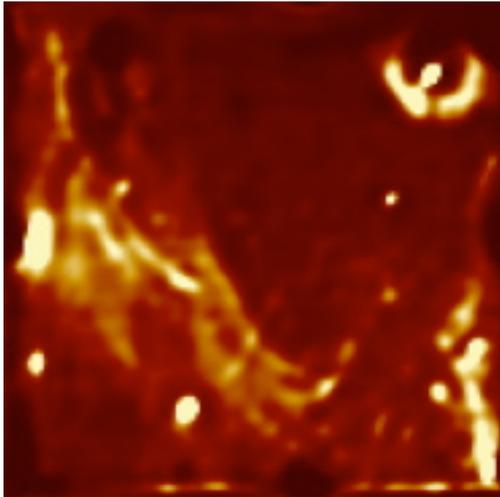


Fig. 5: Image à 8.6 microns de la région du Centre Galactique obtenue avec VISIR lors du Large Program ESO (Haubois et al. 2008)

Notre équipe a d'autre part coordonné et a largement contribué à l'élaboration du document de justification scientifique de Phase A de Gravity (document ESO VLT-TRE-GRA-15880-4349, 2008), un des instruments de seconde génération de l'interféromètre du VLT à l'ESO. Ce travail a donné lieu à plusieurs études, par exemple de modélisation de l'émission du trou noir lors d'un sursaut (Hamaus et al. 2008 soumis, Dodds-Eden et al. 2008, en préparation), de modélisation de détection d'effets post-newtoniens sur les orbites d'étoiles très proches du trou noir ou de modélisation de la précision astrométrique de l'instrument lors de la détection de ces mêmes étoiles (F. Vincent 2008, en préparation).

2.5 Extragalactique

Parce qu'il correspond à une grande richesse de diagnostics spectroscopiques (poussière chaude, étoiles, gaz ionisé, raies coronales, raies moléculaire) et permet de lever le handicap de l'extinction par la poussière, l'infrarouge est un domaine privilégié pour deux branches de l'astronomie extragalactique : d'une part l'activité dans les régions nucléaires de galaxie et d'autre part l'étude de la morphologie des galaxies très distantes. Les deux ensembles de résultats concernent a) l'étude détaillée de plusieurs noyaux actifs de galaxie en interférométrie et optique adaptative/coronographie ; b) l'étude de la morphologie de galaxies distantes dans le cadre de grands relevés en optique adaptative et avec Wircam. Dans les deux cas, les avancées de l'équipe ont été possibles grâce à la maîtrise des techniques de haute résolution angulaire : optique adaptative, coronographie et interférométrie.

Dans le premier thème, c'est la poursuite de l'analyse de l'archétype de NAG Seyfert2, NGC 1068, au moyen de NACO et du VLTI qui a permis de préciser la structure de l'environnement du trou noir ultra massif. La coronographie sur NAOS à 2.2 μm a confirmé la réalité des et la température élevée des structures en *vagues* fines encadrant le jet (Gratadour et al., 2006), tandis que les mesures interférométriques MIDI ré analysées et couplées à de l'imagerie à 10 μm avec VISIR ont permis de montrer que l'essentiel (80%) de l'émission à cette longueur d'onde était due à des nuages compacts qui s'évaporent dans le cône d'ionisation (Poncelet et al., 2006, 2007, 2008).

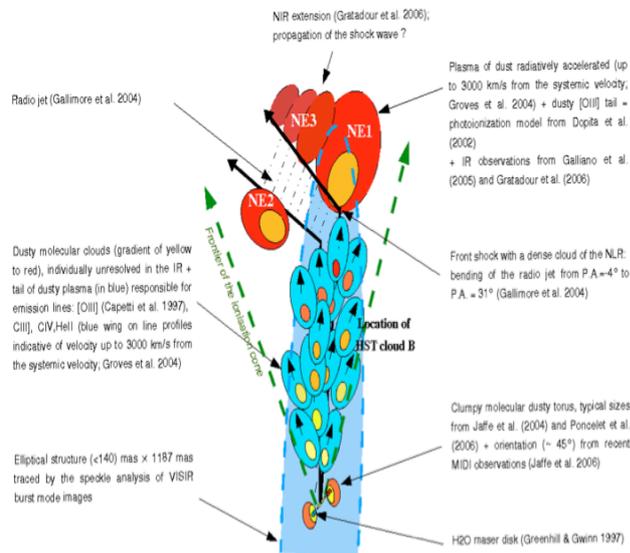


Figure 6: Structure du noyau actif NGC1068, telle qu'elle est décrite à partir de l'ensemble des résultats obtenus par l'équipe au moyen de la haute résolution angulaire (Poncelet et al., 2007).

Pour ce qui concerne le second thème, c'est le travail de thèse Marc Huertas qui en a constitué le cœur : l'exploitation de relevés d'imagerie profonde avec NAOS et plus récemment avec WIR-CAM a permis d'extraire pour la première fois une morphologie fiable des galaxies jusqu'à $z = 1.5$. Cela a été possible grâce à : a) la qualité d'image ; b) le domaine de longueur d'onde (bande K) qui, aux décalages considérés, est représentatif de la masse stellaire réelle des galaxies ; c) la mise au point d'une méthode de classification automatique basée sur des « machines à vecteurs supports » qui a très largement fait croître la fiabilité de classification (Huertas-Company et al., 2007, 2008). L'évolution de la morphologie est une donnée essentielle de la compréhension de l'histoire de l'assemblage de la masse dans l'Univers.

3. Programmes instrumentaux

3.1 HRA

3.1.1 Optique adaptative

GIS PHASE

Le groupement d'intérêt scientifique (GIS) PHASE (Partenariat Haute résolution Angulaire Sol - Espace) a été créé en 2006 pour regrouper les moyens des équipes du DOTA (Département d'Optique Théorique et Appliquée) à l'ONERA, du LESIA et du GEPI à l'observatoire de Paris dans le domaine de l'instrumentation optique à haute résolution angulaire (HRA) pour les applications astronomiques et ophtalmologiques. L'objectif de PHASE est de pouvoir :

- Répondre aux défis des futurs projets internationaux dans le domaine de la HRA,
- Développer en commun la R&D et mener une démarche prospective,
- Pérenniser ce domaine d'excellence au sein des équipes de l'Ile de France et atteindre une masse critique,
- Former par la recherche à travers un programme coordonné.

A ce jour, PHASE a permis à un accroissement significatif du volume d'activités en HRA et des collaborations entre l'ONERA et l'Observatoire.

Depuis plus de vingt ans, les équipes du LESIA contribuent au développement de l'optique adaptative en Europe et dans le monde. Ces travaux ont conduit à mener des recherches technologiques sur plusieurs sujets et à construire de nombreux instruments équipés d'optique adaptative. C'est encore le cas aujourd'hui. Le LESIA participe au projet SPHERE, mène des R&D sur le banc SESAME associé au projet EAGLE et développe les applications de l'optique adaptative en ophtalmologie. Ces différents points sont détaillés ci après.

Banc SESAME

Le LESIA a ouvert en 2006 à la communauté astronomique française le banc de recherche en optique adaptative SESAME. Ce banc permet de simuler les conditions d'observations sur un télescope de 8m de diamètre. Il offre une architecture complète d'optique adaptative avec miroir déformable, miroir de basculement, analyseurs de front d'onde et calculateur de commande. Plusieurs voies optiques en parallèle (jusqu'à 5) permettent d'installer plusieurs appareils ou expériences sur le banc en même temps. Il est couramment utilisé pour mener des R&D dans le domaine de la HRA.

Projet SPHERE

La détection directe et la caractérisation des planètes extra-solaires sont un des enjeux majeurs aujourd'hui en astronomie. SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch) est un projet d'instrument de deuxième génération du VLT financé par l'ESO et l'INSU. L'objectif est l'observation dans le proche infrarouge (0.95 – 2.32 μ m) de planètes extra-solaires géantes (jusqu'à 10 masses de Jupiter) dans l'environnement des étoiles proches jusqu'à 100pc. Il nécessite la mise en œuvre d'une optique adaptative dite extrême à 1300 actionneurs sur le miroir déformable (pour une erreur totale de front d'onde inférieure à 100nm), d'un coronographe pour rejeter la lumière de l'étoile (contraste de 10^{-4} autour de $10\lambda/D$) et enfin une imagerie différentielle, par exemple à deux longueurs d'onde, pour atteindre un contraste final de quelques 10^{-6} .

Le LESIA participe à l'étude de l'optique adaptative extrême en collaboration avec l'ONERA. Les travaux portent sur la définition, la réalisation et les tests de trois miroirs de basculement. Le premier adaptatif est en charge de la correction des basculements turbulents de l'onde, il doit atteindre une bande passante de 1000Hz et une précision de 0,5mas sur le ciel. Un deuxième miroir, lent celui-là, est dédié à la correction du bougé de la pupille. Enfin un troisième, lent lui aussi, corrige le basculement différentiel entre la voie coronographique et la voie analyse de front d'onde afin de maintenir parfaitement centrée l'image de l'étoile sur le coronographe. Le LESIA a mené la définition d'une caméra IR dédiée à la mesure de ce basculement différentiel. Il a aussi contribué à la spécification du calculateur temps réel de l'optique adaptative. Il est en charge de la définition et de la mise en place des moyens de tests de l'optique adaptative et de son intégration et tests en 2009 avec l'ONERA dans en salle propre PHASE en cours d'aménagement. Enfin, il participe au développement des algorithmes de réduction des données pour l'imagerie coronographique différentielle à plusieurs longueurs d'onde (thèse d'A. Cornia).

La revue de définition finale du projet (FDR) devrait avoir lieu en décembre 2008. Les intégrations et tests en France se dérouleront à partir de 2009 jusqu'à fin 2010. La première lumière sur le télescope est programmée pour le début de 2011.

Projet EAGLE

Un des programmes scientifiques majeurs des ELT est l'observation et la caractérisation de l'univers à grand redshift, en particulier pour l'étude de l'assemblage de la masse et l'évolution des galaxies. Ce programme passe par le développement d'un instrument permettant la spectroscopie 3D à intégrale de champ multi objet (typiquement 30 à 40 objets) dans un champ total de l'ordre de 5 arcmin, offrant une résolution spatiale de 75mas et une résolution spectrale $R > 4000$ dans le proche infrarouge (0,8 à 2,4 μm).

EAGLE (Elt Adaptive optics for GaLaxy Evolution) est un projet devant permettre dès maintenant de mener les R&D, et de développer les technologies, requises pour un tel programme astrophysique dans la perspective d'une première lumière sur l'E-ELT en 2018 environ. Cet instrument demande la mise en œuvre d'une optique adaptative distribuée sur les objets d'intérêt, dite multi objet (MOAO : Multi Object Adaptive Optics). L'enjeu majeur en termes de technologie est le développement et la maîtrise de ce concept. Un consortium franco-britannique s'est mis en place en 2007 pour mener ce projet. Il regroupe le LAM, le LESIA, le GEPI, l'ATC à Edimbourg et l'Université de Durham.

Le LESIA mène dans ce cadre un programme de R&D pour la mise au point de la MOAO (thèse de F. Vidal). Des validations expérimentales de l'optique adaptative multi objet sont en cours sur le banc Sésame ainsi que le test de différentes technologies de miroir déformable afin d'en asseoir la faisabilité. Le LESIA participe aussi à la préparation d'une expérimentation « CANARY » visant à valider sur le ciel (télescope WHT) la MOAO en configuration NGS (étoiles naturelles) en 2010 puis LGS (étoiles lasers) en 2011. Cette expérience est développée en étroite collaboration avec l'Université de Durham. Par ailleurs, le LESIA mène l'étude d'un nouvel analyseur de front d'onde, permettant d'avoir un très grand nombre de points de mesure, une grande linéarité et une grande dynamique, particulièrement bien approprié pour la MOAO. Ce concept d'analyseur pourrait être très intéressant dans le cadre de l'analyse de front d'onde sur étoile laser pour les ELT et est bien adapté à un fonctionnement en boucle ouverte.

Les soutiens financiers à EAGLE viennent de l'ANR, du contrat ESO de phase A, de l'ELT Preparatory Phase du FP7 et de l'INSU. Un soutien supplémentaire viendra de l'I3 « Opticon » du FP7.

Projet OEIL

Des travaux récents au LESIA ont démontré qu'il était possible d'imager la rétine humaine in vivo avec une résolution à l'échelle de la cellule (quelques microns), grâce à la mise en œuvre de technologies d'optique adaptative issues de la recherche en astronomie. L'intérêt de ce type de dispositif est de pouvoir caractériser les manifestations physiques auparavant inobservables de diverses maladies rétinienne. Le banc prototype développé par le LESIA est maintenant installé dans un laboratoire de l'hôpital des XV-XX et est régulièrement utilisé par des médecins dans le cadre d'un protocole d'investigation clinique portant sur plusieurs pathologies ciblées touchant : les microstructures du fond d'œil (photorécepteurs, micro-vaisseaux, cellules ganglionnaires) et la microcirculation sanguine de la rétine.

Le LESIA participe à deux projets : INOVEO et Rétinopathie. L'objectif du projet INOVEO (INstrumentation à Optique adaptatiVE pour l'Ophtalmologie) financé par l'ANR – RNTS est de

franchir une nouvelle étape en passant du démonstrateur de laboratoire à un dispositif adapté au contexte clinique. Le consortium est dirigé par la PME Imagine Eyes. L'objectif du projet Rétinopathie (Pôle de compétitivité MEDICEN) est de développer un banc d'imagerie 3D de la rétine par tomographie cohérente optique plein champ corrigé par optique adaptative. Le consortium est ici dirigé par la PME MKT. Dans ce cadre, un banc prototype est en cours d'intégration dans les laboratoires du LESIA. Ces projets s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration étroite avec l'ONERA, et font l'objet de thèses co-dirigées par les deux laboratoires (N. Nicolas puis G. Chene-gros).

3.1.2 Interférométrie

Le LESIA et les laboratoires dont il est issu ont une longue tradition interférométrique. Les développements en optique adaptative ont d'ailleurs d'abord été motivés par la perspective du VLTI et de la nécessité de corriger les turbulences sur les télescopes de 8m du VLT. Le premier créneau interférométrique du LESIA a été l'emploi des fibres monomodes pour s'affranchir des perturbations de la turbulence atmosphérique qui empêchait l'obtention de données de bonne qualité. L'instrument FLUOR qui a été réalisé dans ce but a aujourd'hui fait école et le filtrage par fibres est devenu un élément fondamental de l'interférométrie, tous les grands interféromètres en sont équipés.

Le LESIA a joué un rôle pionnier dans l'emploi des fibres pour la propagation cohérente des faisceaux (avec le laboratoire XLIM de Limoges). Il a ainsi proposé l'instrument 'OHANA à la fois instrument en soi et démonstrateur pour de futurs très grands interféromètres. 'OHANA est aujourd'hui cité comme le précurseur de futurs grands projets aussi bien en Europe qu'aux États-Unis.

Enfin, le LESIA a également été précurseur pour l'interférométrie en frange noire avec l'instrument DARWIN. Il a participé activement aux études pour les instruments précurseurs comme GENIE (sur le VLTI) et maintenant ALADDIN sur le plateau antarctique.

Ces axes structurent les développements conduits au LESIA ces dernières années ainsi que les développements futurs abordés dans les perspectives. On peut citer parmi les instruments suivants :

FLUOR

Depuis son déménagement à CHARA (Université de Géorgie) en 2002, FLUOR est utilisé avec succès comme instrument de production astrophysique (5 publications de rang A depuis 2006). Il a notamment permis la détection d'environnement de poussières autour d'étoiles de la séquence principale (lumière exozodiacale) et la mise en évidence de Vega comme rotateur rapide expliquant ainsi la source de l'anomalie de sa brillance. Sur le plan instrumental, l'instrument est en cours de mise à jour pour améliorer son intégration à CHARA et préparer la venue d'un détecteur sensible développé au LESIA conjointement pour 'OHANA et PERSÉE.

'OHANA

Les premières franges entre les deux télescopes Keck ont été obtenues en 2005 (G. Perrin et al. 2006, Science 311, page 194). Du temps scientifique a été obtenu en 2006 et 2007 (une nuit à chaque fois) mais gâché par le mauvais temps. L'instrument est toujours installé sur le Keck. En parallèle, la base Gemini-CFHT est en cours d'équipement. La ligne à retard a été expédiée fin 2006 et installée de 2007 à 2008. Le recombineur a également été expédié et installé pendant la même période. Une conduite a pu être installée pour le passage des fibres entre les deux télescopes. L'instrument est en cours de test et les premières franges sont anticipées pour 2009.

FIRST

FIRST (Fibered Imager foR Single Telescope) est un projet original inventé et développé par le LESIA. Il s'agit d'un imageur haute dynamique à masquage de pupille dans lequel l'intégralité de la pupille est utilisée grâce à l'emploi de fibres optique monomodes (G. Perrin et al. 2006, MNRAS, 373, 747). Un démonstrateur de laboratoire est en cours de développement et une étude est conduite pour le CFHT (instrument de future génération).

Les développements pour l'espace s'articulent autour du projet DARWIN auquel le LESIA participe depuis son origine. Le LESIA a pris part à deux propositions Cosmic Vision faites à l'ESA :

- DARWIN : interféromètre en frange noire pour l'étude directe d'exoplanètes de type Terre
- PÉGASE : interféromètre proche infrarouge à vocation plus généraliste que DARWIN et pouvant servir de précurseur.

Aucun de ces deux instruments n'a été sélectionné pour la phase suivante de Cosmic Vision. Le CNES a cependant décidé de maintenir une activité de recherche préparatoire à PÉGASE. Elle se manifeste par le développement du banc de cophasage PERSÉE auquel collaborent le LESIA, l'ONERA et le laboratoire FIZEAU de l'Observatoire de la Côte d'Azur. PERSÉE est installé au LESIA.

3.1.3 Coronographie

Au cours des deux dernières années l'équipe coronographie a pris part à plusieurs projets instrumentaux et développé de nouveaux concepts.

Tout d'abord en février 2007, nous avons remplacé un coronographe de phase installé en 2003 sur NACO au VLT. Le nouveau composant contient 2 masques chacun optimisé pour deux filtres autorisant une combinaison avec le mode l'imagerie différentielle. Un article sur un résultat astrophysique a été publié en 2008 (Boccaletti et al. 2008).

En ce qui concerne le mode coronographique de l'instrument MIRI/JWST auquel nous participons depuis 2001, les composants dénommés VM (verification model) ont été livré au CEA et testé au printemps 2008. Les mesures sont conformes. Les "flight model" ont aussi été fabriqués. La thèse de Celine Cavarroc sur ce sujet a pris fin en Novembre 2007. Au cours de la dernière période elle a identifié et évalué les limitations des algorithmes de pointage sur le coronographe (Cavarroc et al., soumis)

Sur l'instrument SPHERE, nous sommes responsables des modes coronographiques, du senseur auxiliaire et des simulations numériques. Un prototype de masque de phase achromatique a été défini, fabriqué puis testé entre fin 2006 et mi-2007. Les résultats satisfaisants ont été présentés à la Preliminary Design Review à l'ESO (Sept 07). De nouvelles mesures ont eu lieu fin 2007 dans des conditions plus proches de l'instrument final et sont conformes aux prévisions. L'activité simulation a été très importante depuis les 2 dernières années. Elles ont permis d'étudier les tolérances et mettre des spécifications sur le système et ensuite d'estimer les performances. Les éléments coronographiques sont maintenant en phase finale de design. Le senseur auxiliaire permettant d'asservir le positionnement de l'étoile sur le masque coronographique a lui aussi été défini, et nous avons fourni des spécifications pour son design.

Depuis Octobre 2007 nous prenons part à la phase A d'EPICS l'équivalent de SPHERE pour l'Extremely Large Telescope Européen (2018). Cette phase durera 2 ans au cours de laquelle nous devons définir et tester quelques prototypes de coronographes. La phase de définition a déjà débuté. Dans le cadre d'EPICS, nous étudions également un nouvel instrument (Self Coherent Camera) qui

améliore l'efficacité de détection des planètes mais permet aussi de mesurer le front d'onde directement sur l'image finale.

En 2007, nous avons également participé activement à la proposition SEE COAST pour COSMIC VISION 2015-2025. Bien que ce projet n'ait pas été sélectionné nous continuons à travailler sur la définition d'un tel instrument. Il s'agit d'un télescope spatial optimisé pour l'imagerie haut-contraste et ciblé vers la spectro-polarimétrie des planètes géantes matures et des Super Terres. Le PI, Jean Schneider est à l'Observatoire de Paris.

Parallèlement aux projets instrumentaux nous menons aussi une phase de R&D dans le domaine de la coronographie et de la mesure de front d'onde plan focal, qui sont deux techniques corréées. Pierre Baudoz a proposé un nouveau concept de coronographe achromatique qui consiste à mettre en série plusieurs coronographes de phase qui eux sont chromatiques. Les premières mesures de laboratoire sont très prometteuses et donnent des contrastes de 10^8 sur une bande passante de 20%. Le deuxième aspect concerne la mesure plan focal du front d'onde. Pour cela un nouvel instrument (Self Coherent Camera) est en cours d'étude du point de vue numérique (une thèse sur le sujet a débuté en sept. 2006) et instrumental puisqu'un premier prototype a permis de démontrer le principe du fonctionnement. Ce concept s'est avéré intéressant sur plusieurs aspects. Il s'agit maintenant de mettre en place un tel système sur un banc optique pour montrer que l'on peut effectivement mesurer de faibles défauts du front d'onde et utiliser cette information pour les corriger et ainsi permettre une meilleure performance du coronographe (un papier de principe vient d'être accepté, Galicher et al. 2008).

3.2 Astérosismologie expérimentale

3.2.1 Performances Corot

Depuis le lancement de CoRoT, le 27 Décembre 2006, l'instrument et la plateforme fonctionnent parfaitement. Six séquences d'observations ont été réalisées dont les durées vont de 20 à 150 jours. Les difficultés potentielles qui avaient été identifiées au cours des phases B et C du développement et donc gérées, ne posent aujourd'hui aucun problème ni en terme de performances ni en terme d'exploitation scientifique des données. C'est le cas par exemple de la lumière diffusée par la Terre dont le contrôle du niveau a déterminé l'architecture optique et l'étude d'un baffle sophistiqué. Au final les variations orbitales de ce niveau sont inférieures à 0.6 photons/pixel/seconde quand on a à l'entrée du baffle un nombre de photons en provenance de la Terre allant de 0 à 1.E20. Le logiciel de vol qui a été spécifié et testé au LESIA fonctionne de façon nominale. Une nouvelle version a été chargée en avril 2008 et fonctionne aussi parfaitement.

Le système de contrôle d'attitude a des performances un peu meilleures que l'attendu, soit 0.15 seconde d'arc sur les axes transverses. En revanche les entrées/sorties d'éclipses induisent sur l'attitude, par l'intermédiaire des panneaux solaires dont la température passe de -80 à +70 C en quelques minutes, des fluctuations qui peuvent atteindre 12 secondes d'arc pendant quelques dizaines de secondes deux fois par orbite. Cet effet qui n'était pas prévu a demandé pendant la première année de vol un important travail pour définir les méthodes de correction des données.

Au final, toutes corrections faites, les performances photométriques sont très voisines ou meilleures que l'attendu. Sur la voie astérosismologie le niveau de bruit atteint est de 0.7 partie par million (ppm) en cinq jours pour une spécification de 0.6 ppm. Ce niveau de bruit permet de détecter des modes d'oscillations dont l'amplitude est de l'ordre ou même inférieure à 1 ppm. Sur la voie

exoplanète le niveau de bruit est égal à celui spécifié. Il autorise la détection des transits dont la profondeur est de 6.10^{-4} , ce qui permet d'atteindre des planètes de 3 rayons terrestres si l'étoile parente est de type solaire.

3.2.2 Sismo sol

CoRoT a ouvert la voie pour l'observation des oscillations de type solaire par photométrie. Le projet Kepler, qui va être lancé par la NASA en février 2009, va étendre le nombre de cibles, mais ne va pas bénéficier du même niveau de performances que CoRoT. De plus, il va s'intéresser à des cibles très peu brillantes, peu connues par ailleurs, pour lesquelles les données astérosismiques ne vont pas être exploitables de façon optimale.

Plusieurs travaux récents ont montré l'intérêt de faire converger différents types de mesures (paramètres fondamentaux, rayon stellaire par interférométrie, mesures astérosismiques) pour contraindre au mieux les modèles de structure interne stellaires dans une vaste région du diagramme HR. L'exemple solaire et les mesures photométriques de CoRoT montrent par ailleurs que l'observable Doppler apporte une information plus complète (observation des modes de degré 3) et plus propre. Le signal de l'activité stellaire apparaît 1 à 2 ordres de grandeur inférieur en spectrométrie par rapport à la photométrie, et sa superposition au signal beaucoup plus ténu des oscillations n'empêche pas l'observation des modes à basse fréquence.

La feuille de route de l'astérosismologie observationnelle comporte donc nécessairement une étape vers les étoiles proches et brillantes observées spectrométriquement. C'est l'objectif du projet SIAMOIS développé ci-dessous, dédié à l'étude sismologique Doppler des étoiles, apportant des contraintes observationnelles cruciales pour la théorie de l'évolution stellaire.

Le réseau de photométrie sol STEPHI d'observations coordonnées, fonctionne depuis 1989 sur la base de collaborations internationales (France, Canaries, Mexique, Chine), au rythme d'une campagne trisites de trois semaines par an approximativement. La responsabilité de l'instrumentation et la coordination sont au LESIA (E. Michel et M. Chevreton). Avec près d'une vingtaine d'objets observés, STEPHI a fourni la majorité des données de ce type disponibles. Grâce à ces données, nous avons pu engager et développer un travail de modélisation et d'interprétation sismologique qui nous permet d'être au premier rang pour l'analyse et l'interprétation des données CoRoT. Par ailleurs, alors que les données CoRoT, par leur qualité incomparable vont nous permettre d'étudier sous un jour nouveau ce type d'objets, le programme d'observation STEPHI, spécialisé depuis des années dans l'observation d'étoiles d'amas ouverts, permet une approche différente et complémentaire, en bénéficiant notamment de la réduction des paramètres libres lorsqu'on considère des étoiles d'un même amas et en permettant une étude différentielle qui facilite le travail de modélisation et d'interprétation.

Au cours de la période 2006-2008, deux campagnes ont été organisées avec succès. 4 publications de rang A, dont 2 d'interprétation ont été publiées (et plusieurs communications dans des colloques internationaux). La prochaine campagne est prévue en 2009. Elle sera caractérisée par l'utilisation de photomètres CCD sur les trois sites. En fonction des résultats (et des questions) apportés par CoRoT, nous envisagerons une réorientation des objectifs scientifiques de STEPHI.

4. Prospective

4.1 Prospective interférométrie

La poursuite des projets engagés constitue l'objectif court terme de l'équipe d'interférométrie du LESIA. Deux projets structurants font également partie des projets d'avenir dans lesquels le LESIA est engagé : ALADDIN et GRAVITY avec à plus long terme l'étude d'exoplanètes par DARWIN et l'interférométrie très longue base avec le projet générique KOI (Kilometric Optical Interferometer) dont 'OHANA est un précurseur.

ALADDIN est un interféromètre en frange noire à deux télescopes fonctionnant en bande L pour le Dôme C. L'objectif de cet instrument est la caractérisation de la lumière exozodiacale présente autour des futures cibles de DARWIN. Le site de Dôme C en Antarctique présente l'avantage des basses températures ce qui déterminant pour la sensibilité de l'instrument et potentiellement de conditions de turbulence meilleures que pour tout autre site terrestre au-delà d'une couche de l'ordre de quelques dizaines de mètres.

Un autre créneau du LESIA est la démonstration de l'imagerie haute qualité et d'une haute sensibilité en interférométrie, conditions sine qua none de la crédibilité de la technique auprès de la communauté astronomique. Cette motivation ainsi que la motivation astrophysique ont conduit à la proposition de l'instrument de seconde génération GRAVITY (dont le LESIA est le porteur au niveau français) pour le VLTI. L'objectif d'étude de l'environnement proche du trou noir au centre de la galaxie est très ambitieux mais il permettra le test direct de la relativité générale en champ fort, un résultat important de physique fondamentale. GRAVITY a été accepté à l'issue de l'étude de phase A et sera un projet important pour la prochaine période de 4 ans.

4.2 Prospective coronographie

L'essentiel de l'activité se concentrera sur SPHERE en vue de la Final Design Review (fin 2008). La phase d'intégration, d'alignement et de tests aura lieu à Grenoble mi 2009. Plus tard (fin 2010 - début 2011), la phase d'installation et de commissioning à Paranal sera aussi très critique. Pour le projet EPICS, nous ferons fabriquer des prototypes, plus particulièrement un second prototype de multi-4QPM plus compact que le premier. En collaboration avec l'Université de Liège nous étudions aussi un concept de coronographe achromatique faisant appel à des technologies de la micro-électronique. Nous allons poursuivre également l'étude numérique pour SEE COAST en développant un nouveau code. Pour cela nous pourrions bénéficier du travail en cours dans le cadre d'EPICS. Pour finir, le banc optique Haute Dynamique en cours de définition pour le test de la SCC sera effectivement mis en place et concernera une grosse partie de l'activité. Dans le cadre du quadriennal, il faut souligner que le travail instrumental que nous menons est rendu possible par la présence à temps plein d'un IR en fin de carrière. Vu l'ampleur de nos activités, il est nécessaire de renouveler rapidement ce poste.

4.3 Prospective optique adaptative

Après les développements spectaculaires de l'Optique Adaptative (OA) dans ces 20 dernières années où les équipes du LESIA ont joué un rôle majeur à travers les réalisations de Come On, PUEO et NAOS, l'OA est devenue un système clef des nouveaux instruments construits en astro-

nomie optique au sol. Les nouveaux télescopes de par le monde s'équipent tous d'une telle technologie. Et bien sûr les projets d'extrêmement grands télescopes (ELT) ne se conçoivent pas sans OA.

Les enjeux principaux en OA qui doivent être abordés par le LESIA dans les années futures sont les suivants :

- MOAO et ces variantes : les travaux portent sur les concepts d'analyseurs de front d'onde pour l'utilisation des étoiles lasers, sur le développement des procédures de calibration et des algorithmes de commande optimaux (cf EAGLE) et enfin sur l'obtention d'une démonstration des capacités de ces techniques sur le ciel (cf CANARY).

- Etoile laser (LGS) pour la couverture du ciel : il s'agit de la recherche de solutions viables aux nombreuses limitations de cette technique qui deviennent critiques pour les ELT.

- AO extrême : les travaux portent sur l'obtention de haut contraste dans les images par la maîtrise des erreurs résiduelles de phase (nanométriques) et de la complexité des systèmes à très grands nombres d'actionneurs. L'instrument SPHERE est une des étapes clés pour la démonstration de cette technique sur le ciel.

- ELT : les défis à relever sont nombreux, on notera en particulier le problème de la dimension et de la complexité des OA à mettre en œuvre, la recherche de nouveaux concepts pour les systèmes mais aussi pour les analyseurs de front d'onde, le problème des contraintes d'implantation et d'utilisation de la LGS et enfin les nouveaux composants et algorithmes de contrôle à développer pour répondre aux exigences spécifiques des ELT.

- Composants : les recherches et les développements s'orientent sur les analyseurs à très grand nombre de sous pupilles et les détecteurs très sensibles associés. La maîtrise des composants allant des micro-miroirs déformables aux très grands miroirs déformables à intégrer dans le télescope est crucial pour les futurs systèmes à développer.

Aujourd'hui le LESIA est impliqué dans l'étude système de l'OA du projet Gravity du VLTI et participera à sa mise en œuvre sur le ciel. Il participe à deux phases A des instruments de l'ELT européen. L'objectif est de concrétiser ces études par l'entrée dans les phases de conception détaillée, de construction et enfin de mise en service sur le ciel.

Dans le domaine de l'ophtalmologie, le LESIA développe l'imagerie 3D de la rétine en étroite collaboration avec les médecins. Les étapes suivantes passent par une meilleure maîtrise du bougé de l'œil et de la profondeur observée, l'accroissement significatif du champ corrigé et la prise en compte des effets chromatiques. Enfin le couplage de l'OA avec des techniques de restauration d'images plus intégrées est une voie à explorer.

4.4 Sismo sol

Les observations astérosismiques nécessitent des données continues, performantes (au bruit de photons) et ininterrompues. Ce sont ces spécifications qui ont conduit l'équipe SIAMOIS à proposer un projet à implanter à la base Concordia en Antarctique.

Le projet implique l'installation d'un collecteur et d'un instrument à la station CONCORDIA du Dôme C en Antarctique. Le site de la base Concordia au Dôme C apparaît comme un site idéal pour l'astérosismologie. Les conditions météo inégalées et la longue nuit polaire garantissent un cycle utile d'au moins 90% sur 3 mois, comme cela a été observé lors des hivernages 2005 et 2006 (Mosser & Aristidi 2007). Un tel cycle utile, crucial pour l'astérosismologie, est comparable aux performances des observations depuis l'espace.

Le concept SIAMOIS s'appuie sur l'interférométrie à transformée de Fourier, conduisant à un petit instrument conçu et réalisé pour les conditions extrêmes de l'Antarctique. L'instrument sera entièrement automatique, sans pièce mobile, et de mise à poste très simple. Le programme scientifique unique permettra de s'affranchir des difficultés inhérentes à un instrument polyvalent. La réduction des données sera effectuée sur site en temps réel, et la transmission des données vers l'Europe ne nécessitera d'une faible bande passante. SIAMOIS utilisera 1 (voire 2) télescope de 40 cm dédié.

Le développement de SIAMOIS, sous maîtrise d'œuvre du LESIA (laboratoire d'études spatiales et instrumentales pour l'astrophysique), est prévu sur 4 ans, pour une première saison d'observation en 2013. La phase A est achevée depuis 2007, sous la maîtrise d'œuvre du LESIA, avec Tristan Buey comme chef de projet, en partenariat avec 3 laboratoires (Fizeau, LATT et IAS) et 1 entreprise (SESO). Un conseil scientifique, comprenant pour moitié des experts européens, pilote le programme scientifique. Le lancement en phase B du projet attend i) la mise en place d'une feuille de route pour l'Antarctique (dossier piloté entre autres par le réseau européen ARENA) ii) un financement ANR.

4.5 Plato

La mission spatiale PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars) a été sélectionnée pour une phase d'étude parmi 4 missions de classe M, dans le cadre du programme Cosmic Vision de l'ESA. Son objectif scientifique principal est l'étude des systèmes exoplanétaires, par la détection et la mesure des transits devant un très vaste échantillon d'étoiles brillantes, et par la caractérisation complète de ces planètes et de leurs étoiles-hôtes.

En particulier, cette caractérisation inclut une analyse sismique des étoiles-hôtes, conduisant à une mesure précise et fiable de leurs masses, rayons et âges, et permettant une estimation de ces mêmes paramètres pour les exoplanètes détectées.

La charge utile de PLATO comporte un ensemble de 28 petits télescopes identiques à très grand champ, installés sur une plateforme unique, et observant le même champ de 25 degrés de diamètre. Chacun de ces télescopes de 10cm de pupille comporte son propre plan focal, composé de 4 CCDs de 3854x3854 pixels de 18 μ m.

Le programme d'observation se divise en deux phases de suivi de très longue durée (3 ans chacune) de deux champs de 557 degrés carrés, suivies d'une phase de "step & stare" d'un an, pendant laquelle différents champs seront suivis pendant 3 mois chacun, donnant la possibilité de revenir sur les champs déjà observés pendant les deux phases initiales, de manière à confirmer les exoplanètes à longue période. Cette dernière phase permettra également d'inclure dans le programme une séquence d'amas ouverts d'âges et métallicités différents.

Un consortium d'instituts de nombreux pays européens est en cours de mise en place pour l'étude de la charge utile de PLATO. Le LESIA, laboratoire-PI de ce projet, est responsable de la définition de ce consortium. Avec l'aide d'autres laboratoires français (LAM, IAS, SAp, GEPI) et du CNES, il est responsable des études systèmes d'une part, et de l'étude du traitement des données à bord.