

# Action Spécifique Haute Résolution Angulaire

*“La maîtrise du front d'onde pour atteindre la limite de résolution.”*

**Bilan 2011-2015**  
**Prospective 2015-2020**



**CS 2011-2015** : Pierre Baudoz, Olivier Chesneau (2011-2013, président), Vincent Coudé du Foresto, Kjetil Dohlen, Gilles Duvert, Emmanuel Hugot, Vincent Michau, David Mary (2014-2015), David Mouillet, Marc Ollivier (président depuis 2013), Romain Petrov, Gérard Rousset, Michel Tallon (directeur), Eric Thiébaud

**CS 2015-2020** : Pierre Baudoz, Jean-Philippe Berger, Philippe Bério, Gilles Duvert, Eric Gendron, Emmanuel Hugot, Frantz Martinache, David Mary, Vincent Michau, Florentin Millour, David Mouillet (directeur), Benoit Neichel, Eric Thiébaud

26 novembre 2015

## Table des matières

### 1. L'ASHRA dans les grandes lignes

Interférométrie optique

Optique Adaptative

(Imagerie) Très Haute Dynamique

Science des données

### 2. Introduction : les thématiques de l'ASHRA

### 3. Etat des lieux de l'ASHRA

3.1. Fonctionnement

3.2. Effectif impliqué dans les activités HRA et son évolution

3.3. Thèses de Doctorat

3.4. Publications scientifiques 2009-2014

3.5. Bilan des projets ANR financés

### 4. Enjeux astrophysiques et développements HRA

4.1. Physique stellaire en interférométrie optique et optique adaptative

4.2. Formation planétaire et planétologie comparée

4.3. Centre galactique et physique fondamentale

4.4. Astrophysique extragalactique en interférométrie optique

4.5. Applications de la HRA en dehors de l'astrophysique

Applications biomédicales

Optique active

### 5. Thématique interférométrie

5.1. Introduction

Les instruments à l'oeuvre

La marche vers une imagerie accessible et plus de télescopes

L'augmentation de la magnitude limite

Une R&D focalisée

5.2. Les instruments du VLTI

AMBER 10 ans après

PIONIER : recombinaison à 4 télescopes sur le VLTI

De MIDI à MATISSE

GRAVITY

5.3. Les instruments français sur CHARA : VEGA et JouFLU

VEGA : interférométrie visible en production

JouFLU : haute résolution angulaire et haute dynamique

#### 5.4. Activités de R&D

Carlina, la voie des hypertélescopes

FRIEND et CESAR : vers l'interférométrie visible de nouvelle génération

ALOHA : simplifier l'architecture des futurs interféromètres kilométriques

Augmenter la magnitude limite

#### 5.5. L'interférométrie dans les 5 ans qui viennent

Ouvrir largement l'interférométrie à la communauté

Du court terme au long terme

### 6. Thématique Optique Adaptative

#### 6.1. Développement instrumental : SAXO au coeur de SPHERE

Développement instrumental : l'E-ELT et son instrumentation

#### 6.2. Activités de R&D : CANARY pionnier de l'OA multi-objet

Historique

Le projet CANARY

Les résultats

R&D en analyse de surface d'onde

#### 6.2.3. R&D pour la commande et les simulations

Learn & Apply

#### 6.3. L'optique adaptative dans les 5 ans qui viennent

### 7. Thématique très haute dynamique

#### 7.1. Activités en cours et faits saillants

Analyse et exploitation d'instruments actuels

Développement de nouveaux instruments

R&D Préparatoire pour les futurs instruments d'ITHD

#### 7.2. Exploitation et suivi de SPHERE

#### 7.3. R&D et évolution de l'(I)THD

#### 7.4. Les Applications de la R&D (I)THD dans les 10 ans

(I)THD sur l'E-ELT

(I)THD spatiale

### 8. Thématique science des données

#### 8.1. Activités en cours et faits saillants

Haut contraste sur SPHERE

Interférométrie optique et projet POLCA

Données multivariées

Réponse impulsionnelle variable

[8.2. Le traitement du signal en HRA dans les 5 ans qui viennent](#)

[9. Optique et turbulence atmosphérique](#)

[Optique active](#)

[Profils verticaux de turbulence atmosphérique](#)

# 1. L'ASHRA dans les grandes lignes

*par Michel Tallon*

L'objectif de cette section est de donner rapidement les lignes de force qui orientent l'activité de l'ASHRA actuellement. En ce sens, elle va au-delà d'un résumé du document et propose un moyen rapide d'appréhender le contexte de la haute résolution angulaire aujourd'hui.

Comme présenté dans l'introduction qui suit, les activités identifiées comme du domaine de la HRA se sont largement étendues. Le cas de l'optique adaptative est exemplaire : ne serait-ce qu'en astronomie, le fait d'inclure l'optique adaptative dans l'E-ELT lui-même implique que toutes les thématiques seront concernées, au-delà de la pure recherche de "haute résolution angulaire". Se pose donc la question du contour thématique de la HRA, d'autant plus que la communauté ne s'est pas élargie. Les réflexions sur le sujet se sont conclues pour l'instant par la définition sur la couverture du document : "La maîtrise du front d'onde pour atteindre la limite de résolution". Cependant, concernant l'OA pour l'E-ELT notamment, certaines activités dépassent ce contour et concerne simplement "la maîtrise du front d'onde".

L'extension de la HRA s'accompagne de l'apparition de subdivisions et d'une crainte de cloisonnement de sous-thématiques où les spécialités pourraient s'isoler. Dans ce contexte, le travail de coordination et d'animation de l'ASHRA est plus difficile, mais aussi d'autant plus nécessaire. Pour des raisons d'efficacité dans le fonctionnement et de clarté de présentation, nous découpons la HRA en thématiques, autour desquelles ce document est articulé. Cela permet de dégager plus simplement les grandes lignes de l'ASHRA. Les thématiques sont abordées par ordre chronologique de leur apparition depuis ces 40 dernières années. Bien entendu, essayer de dégager des grandes lignes implique des simplifications, toujours discutables.

## **Interférométrie optique**

En interférométrie optique, les activités françaises s'articulent essentiellement autour de deux infrastructures, le VLTI (4 ATs ou 4 UTs) et le réseau CHARA (6 télescopes).

L'élément majeur pour le VLTI est l'arrivée de la deuxième génération d'instrument, GRAVITY (2016) et MATISSE (2017), dans lesquels la France est fortement impliquée (respectivement Co-I et PI). Par rapport à la première génération, le passage à la recombinaison à 4 télescopes va démultiplier les possibilités d'imagerie, sur la voie de PIONIER, maintenant ouvert à la communauté depuis fin 2014. A ce potentiel, s'ajoute l'accès à de nouvelles bandes photométriques avec MATISSE, et un accroissement de sensibilité avec GRAVITY qui va aussi offrir des possibilités astrométriques. De plus, des optiques adaptatives vont arriver sur les ATs et finaliseront les travaux d'amélioration du VLTI.

Un nouvel essor de l'usage de l'interférométrie au VLTI est attendu. La priorité de l'ASHRA (et de l'ESO !) est que ces instruments soient un succès, s'accompagnant d'un élargissement de la communauté utilisant ces moyens. Il faut pour cela rendre l'interférométrie plus accessible. C'est l'objectif de la création de "noeuds d'expertise en interférométrie" comparables aux Alma Regional Centers (ARCs), en collaboration avec l'ESO et l'EII (European Interferometry Initiative). L'existence du JMMC et son fonctionnement exemplaire en font un outil idéal pour mettre en oeuvre ce service. Corrélativement, il est nécessaire d'accélérer les travaux sur les outils de reconstruction d'image en interférométrie multi-spectrale en les rendant beaucoup plus accessibles. De ce point de vue, la recherche amont et le soutien aux activités du JMMC est particulièrement important.

Pendant les 5 ans qui viennent, ces instruments complexes vont progresser dans l'environnement du VLTI, au moins au niveau de leur opérabilité, mais aussi probablement en performances, à l'instar d'AMBER par exemple. Un point critique est l'absence de suiveur de franges pour MATISSE. Le projet GRA4MAT démarre pour que MATISSE puisse utiliser le suiveur de frange de GRAVITY dès 2017, mais le développement d'un suiveur de franges plus sensible sera nécessaire ensuite pour exploiter au mieux MATISSE.

Du côté du réseau CHARA, l'optique adaptative est aussi en cours de déploiement sur les télescopes. L'instrument JouFLU (*cf.* §5.3) a fait sa jouvence (ex-FLUOR) en préparation à la nouvelle période. L'instrument VEGA (*cf.* §5.3) est en pleine phase d'exploitation, bénéficiant d'améliorations continues apportées à l'instrument. La R&D préparatoire au successeur de VEGA a commencé (voir FRIEND et CESAR, *cf.* §5.4), en visant la recombinaison des 6 télescopes dans le visible. L'objectif est aussi de pouvoir proposer un instrument visible de 3<sup>ème</sup> génération au VLTI.

La période qui vient sera justement le moment de préparer une possible 3<sup>ème</sup> génération d'instruments au VLTI, en cohérence avec les développements sur CHARA. Ces travaux s'appuient sur la R&D en cours, en particulier celles visant l'augmentation de la magnitude limite de l'interférométrie (*cf.* §5.4), ou sur les algorithmes de reconstruction d'image. Ces deux volets concernent aussi une augmentation du potentiel de l'interférométrie. La question de l'ajout d'un AT supplémentaire (éventuellement fixe) au VLTI va devenir urgente.

Enfin, quelle sera la place de l'interférométrie au moment des E-ELTs ou dans un contexte post-VLTI ? Des études ont commencé au niveau international autour du projet PFI (Planet Formation Imager). Les R&D exploratoires comme Carlina ou ALOHA (*cf.* §5.4) préparent cette période. Les réflexions sur la 3<sup>ème</sup> génération d'instruments est le bon moment pour élaborer une feuille de route pour le plus long terme.

## Optique Adaptative

La situation de l'optique adaptative (OA) est différente. La dernière période s'est articulée autour de deux faits majeurs : d'une part la fin de la réalisation de SAXO (l'optique adaptative de SPHERE) et sa mise sur le ciel ; d'autre part la phase préparatoire aux optiques adaptatives de l'E-ELT.

L'implication de l'ONERA dans SAXO a été importante pour SPHERE. Cette OA est de loin la plus performante du VLT, et pour la première fois, l'OA a été totalement intégrée dans l'instrument en s'appuyant sur plusieurs innovations (*cf.* §6.1).

Concernant l'E-ELT, les activités menées se situent entre la fin des études de phases A (2010) et le début des travaux de phases B (2016), dans une période d'incertitude sur l'architecture des OA et de questionnements sur leur faisabilité. Ces questions ont motivé la communauté à négocier l'ajout d'une OA classique (dit "SCAO") dans les instruments de première lumière, HARMONI et MICADO. Cette période a vu une forte activité de R&D, notamment pour la mise en oeuvre de nouveaux analyseurs de surface d'onde (pyramide, LIFT, Mach-Zhender), de nouvelles approches pour la commande (Learn&Apply, FrIM, LQG, ETKF) ou encore pour le développement des outils de simulations et des calculateurs temps réel. Dans les travaux de R&D, CANARY a occupé une place centrale pour expérimenter la tomographie atmosphérique sur le ciel, en visant en particulier l'OA multi-objet en préparation à l'instrument MOSAIC.

Les équipes travaillant en OA vont maintenant s'investir dans la réalisation de l'instrumentation E-ELT qui va durer bien au delà de 2020. La difficulté de la prochaine période sera de gérer au mieux des ressources limitées par rapport à l'ampleur de la tâche. Le recentrement de la coordination en OA sur l'ASHRA doit permettre, au moins pour la communauté française, la mise en place de collaborations entre les acteurs au-delà des intérêts de chaque consortium, pour éviter la duplication des travaux.

La R&D pour toujours nécessaire car de nombreuses questions restent ouvertes, avec probablement quelques difficultés à déterminer la frontière entre R&D et prototypage plus ciblé dans le cadre des projets.

### **(Imagerie) Très Haute Dynamique**

D'une certaine manière, la situation en (I)THD est comparable à celle de l'optique adaptative, à ceci près que la R&D est généralement plus amont.

SPHERE, maintenant sur le ciel, est un tout nouveau type d'instrument qui s'est appuyé sur une R&D très active depuis les années 2000. La nouveauté de cet instrument pousse tout particulièrement à en attendre un retour d'expérience, un suivi, et à formuler des propositions à court terme pour en améliorer les performances. Garder ces possibilités est important car l'expérience de SPHERE aura un impact certain pour l'instrumentation future en (I)THD.

Le défi de SPHERE était de gagner deux ordres de grandeur de contraste ( $10^{-6}$  à  $0.5''$  de l'étoile ou moins) ; la motivation scientifique pousse pour obtenir deux ordres de grandeurs supplémentaires ( $10^{-8}$  à  $0.1''$  de l'étoile ou moins). SPHERE est une étape intermédiaire vers cet objectif, qu'il est indispensable d'analyser et de comprendre très finement pour fonder les évolutions futures. L'ESO a identifié dès 2011, suite à l'étude de phase A, le mode (I)THD de l'E-ELT comme prioritaire mais nécessitant une période de R&D. Les études systèmes correspondantes ont également un potentiel d'application pour le spatial. Ces travaux vont s'accélérer ; ils demandent une composante de R&D amont, de développements de composants, d'expérience en laboratoire, et d'étapes intermédiaires sur le ciel, comme amélioration d'instruments existants (SPHERE est une excellente base, les collaborations avec les expériences sur Subaru ou Palomar également) ou comme instruments de génération intermédiaire. L'ensemble doit être phasé dans une feuille de route cohérente et le rôle de coordination de l'ASHRA sera particulièrement utile dans cette période.

### **Science des données**

Une volonté de l'ASHRA depuis 5 ans est de faire apparaître le traitement du signal comme une thématique. Cela vient du fait que nous avons réalisé la nécessité de développer la recherche dans ce domaine, et dépasser la simple application de recherches menées dans d'autres disciplines. Le "traitement du signal" étant souvent considéré en astronomie comme une technique connue de tous, l'expression "science des données" est parfois utilisée pour souligner cette aspect recherche. Mais au-delà des mots, il s'agit de faire avancer les connaissances en traitement du signal et en mathématiques appliquées pour répondre aux besoins de la HRA et les diffuser dans notre communauté.

On peut par exemple lister quelques sujets urgents : 1/ en interférométrie la reconstruction d'image, mais aussi la nécessité d'atteindre la limite physique de la précision des mesures interférométriques (donc augmenter la magnitude limite), 2/ en optique adaptative avec l'émergence de nouveaux algorithmes de commande ou la déconvolution des images corrigées grand champ avec réponse impulsionnelle variable dans le champ et en longueur d'onde, 3/ en (I)THD avec les algorithmes de détection des planètes. Dans tous ces domaines, l'articulation du traitement du signal avec la physique des instruments (franges, surfaces d'onde, coronographes, etc.) nécessite l'émergence de chercheurs dans notre discipline.

L'émergence de cette thématique se fait naturellement dans un contexte interdisciplinaire. C'est par exemple le cas des projets menés ces 5 dernières années, tous soutenus par l'ANR (cf. §3.5) : CHAPERSONA (OA, automatique), POLCA (interférométrie, traitement du signal), MiTiV (interférométrie, OA, bio-médical), COMPASS (OA, analyse numérique).

Il s'agit de poursuivre les efforts dans ce sens, en réalisant que les bénéfices dépasseront le strict périmètre de la HRA.

## 2. Introduction : les thématiques de l'ASHRA

par Michel Tallon

Le domaine de la Haute Résolution Angulaire a commencé à s'organiser en France par la création du GdR AMI (Astrophysique et Méthodes Interférométriques) en 1989, relayé en 1993 par le programme national PNAHRA (Astrophysique à Haute Résolution Angulaire), puis par l'action spécifique ASHRA depuis 2000. L'ensemble des thématiques de la Haute Résolution Angulaire peuvent être rassemblées par un seul objectif : la maîtrise du front d'onde pour atteindre la limite de résolution. Autour de cet objectif, la discipline s'est régulièrement élargie par l'apparition successive de plusieurs thématiques au cours de son histoire :

- L'*interférométrie optique* a émergé dans les années 1980, dans le prolongement de l'interférométrie des tavelures (années 1970).
- L'*optique adaptative* s'est particulièrement développée dans les années 1990 après le travail de quelques pionniers.
- La *très haute dynamique* s'est déployée dans les années 2000.
- Une nouvelle branche *traitement du signal* progresse actuellement avec dynamisme, et représente sans doute la nouvelle thématique de notre décennie.

Ce découpage thématique souligne les lignes de force de la discipline, mais ne doit pas cacher les recherches transversales sur lesquelles la HRA se fonde :

- L'étude et la mesure de la *turbulence atmosphérique* est un domaine essentiel pour toutes les activités au sol, sans lequel aucune activité HRA ne serait possible.
- L'*optique* est au coeur des concepts HRA qui utilisent tous les aspects, de l'optique classique (interférences, active, déformable) à l'optique intégrée, en passant par l'optique diffractive et non-linéaire.

Nous avons donc vu l'apparition d'une nouvelle thématique environ tous les dix ans. À chaque fois, la période exploratoire de fortes activités en R&D succède à une gestation où de nouveaux concepts apparaissent, et précède un déploiement sous la forme de nouveaux moyens d'observation en astronomie, et des applications au-delà de l'astronomie.

L'apparition progressive de nouvelles thématiques s'est accompagnée d'une spécialisation des compétences et des activités, dans un contexte où les projets et les enjeux sont toujours plus grands. Plus rares sont aujourd'hui les scientifiques qui oeuvrent dans plusieurs de ces domaines à la fois. Dans ce contexte, le rôle de coordination de l'ASHRA est devenu plus nécessaire et plus difficile.

En parallèle à l'apparition des thématiques présentées précédemment, nous voyons une évolution des urgences, qui correspond au moment où une thématique arrive à pleine maturité. L'*interférométrie* autour du VLTI a été l'urgence qui a notamment motivé la création du PNAHRA, à un moment où il fallait porter ce nouveau domaine à un niveau opérationnel pour la première fois. L'arrivée de l'instrumentation de seconde génération du VLTI illustre les progrès accomplis, même si du travail reste à accomplir pour en optimiser l'exploitation. L'urgence aujourd'hui est clairement l'*optique adaptative* de l'E-ELT, où le saut qualitatif demandé est très ambitieux par rapport au savoir faire actuel, avec une intégration complète dans un moyen d'observation généraliste. La *très haute dynamique* constitue l'urgence suivante, attendue dans un second temps sur l'E-ELT après une période de R&D en cours et très active.

Pour accompagner cette dynamique dans la durée, nous devons disposer des compétences appropriées. Sur la période, le conseil scientifique de l'ASHRA a identifié deux priorités de recrutement dans notre domaine. Ces priorités reflètent les urgences les plus critiques dans la discipline.

- **Recherche amont en optique adaptative pour l'E-ELT.** Les performances espérées des optiques adaptatives sont très difficiles à atteindre pour l'E-ELT et deviennent très diverses (OA grand champ, OA extrême pour la haute dynamique, OA multi-objets, ...). Les progrès sont trop lents à cause du manque de chercheurs dans ce domaine où la France veut continuer à tenir un rôle central dans des méthodes d'observations qui se généralisent. Cela concerne aussi bien la R&D instrumentale que les aspects théoriques nécessaires pour lever des verrous comme l'auto-calibration, le contrôle optimal, ou la reconstruction d'images multi-longueur d'onde avec une réponse instrumentale variable dans le champ et en longueur d'onde.
- **Traitement du signal en imagerie haute dynamique et en interférométrie.** L'exploitation des nouveaux instruments en imagerie haute dynamique (SPHERE, E-ELT/PCS) et en interférométrie (GRAVITY, MATISSE), nécessite des progrès continus en traitement du signal et la maîtrise des effets instrumentaux. La détection et la caractérisation de sources est critique pour la détection des exoplanètes, apportant des contraintes fortes dans le design des instruments futurs. L'optimisation de la sensibilité et la transition vers la reconstruction d'image multi-longueur d'onde sont déterminantes pour le succès des interféromètres optiques et l'élargissement de leur utilisation par l'ensemble de la communauté.

## 3. Etat des lieux de l'ASHRA

### 3.1. Fonctionnement

*par Michel Tallon, Marc Ollivier*

Les activités HRA sont actuellement portées par les laboratoires suivants : le CRAL (Obs de Lyon), l'IAS, l'IPAG (Obs de Grenoble), Lagrange (Obs de la Côte d'Azur), le LAM (Obs de Marseille), le LESIA (Obs de Paris), et XLIM (Université de Limoges). L'OHP a reçu un soutien qui s'est arrêté à la fin de la R&D Carlina (*cf.* §5.4). Depuis 2014, l'ONERA reçoit un soutien, en cohérence avec la convention INSU-ONERA, pour faciliter les collaborations avec les laboratoires et aider à sa participation aux conférences, activités difficiles à financer sur leur fond propre. D'autres laboratoires interviennent directement dans les activités HRA, comme le GEPI ou GéoAzur, mais ne font pas directement de demandes de soutien.

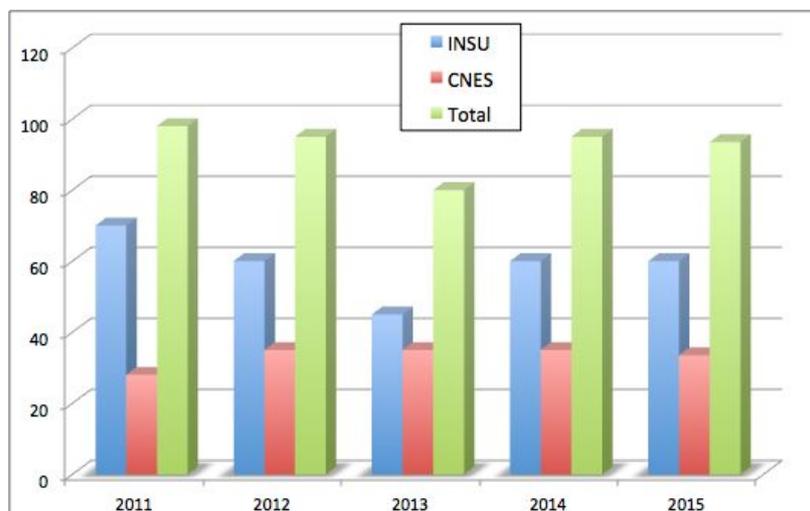


Figure 3.1 : évolution du budget annuel de l'ASHRA.

Comme le montre la figure 3.1, le budget a été assez stable, entre 90 et 95 k€, avec un minimum à 80 k€ en 2013. Les trois premières années (2011-2013) ont vu une diminution régulière de la part INSU (de 70k€ à 45k€), partiellement compensé par une légère augmentation de la part du CNES qui actuellement représente plus du tiers du budget. Cette évolution a pesé sur la politique du soutien des équipes, en avantageant les activités pour lesquelles nous voyons un intérêt pour le spatial, en particulier sur la base d'un atelier CNES/ASHRA sur "télescopes spatiaux de nouvelle génération" organisé en 2012. La part CNES reste donc significative et continue à infléchir la politique de soutien de l'ASHRA.

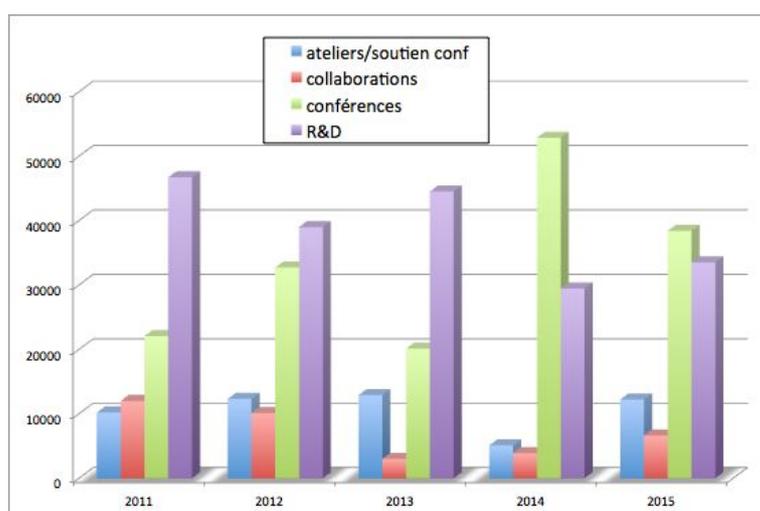


Figure 3.2 : évolution de la répartition budgétaire en fonction des différents types de soutien.

La figure 3.2 montre l'évolution du soutien de l'ASHRA par grandes catégories. Le taux de pression sur les demandes est en moyenne 2.1. Les "ateliers" regroupent les ateliers nationaux et aussi quelques soutiens accordés pour l'organisation de conférences ou d'écoles. Le graphe montre de fortes fluctuations annuelles, mais les tendances restent assez stables, avec une lente érosion du soutien R&D et une augmentation corrélative du soutien à la participation aux conférences, pour lesquelles la recherche de subvention devient de plus en plus difficile.

A cause de la forte pression sur les conférences, elles sont soutenues sur la base de co-financements avec une priorité pour les jeunes, et en minimisant les redondances thématiques dans le même laboratoire. On peut noter la forte oscillation bisannuelle du financement des conférences, due à la conférence SPIE organisée les années paires, alternativement en Europe (2012) et en Amérique du Nord (2014), et qui concerne toutes les thématiques HRA. Le coût significatif de SPIE en Amérique entraîne une forte pression et explique le pic de 2014.

La frontière entre collaboration et R&D n'est pas toujours facile à trancher car la R&D se fait de plus en plus en réseau, entre des équipes différentes, avec une part croissante de besoins en missions. Par exemple des composants fabriqués sur un site demandent à être caractérisés ailleurs. Dans la R&D, nous regroupons aussi des améliorations des instruments (e.g. JouFLU (*cf.* §5.3), PIONIER (*cf.* §5.2)), ou des démonstrations expérimentales exploratoires (e.g. Self Coherent Camera et FIRST visible sur le télescope Subaru (*cf.* §7.1)).

### 3.2. Effectif impliqué dans les activités HRA et son évolution

*par Marc Ollivier, Michel Tallon*

Lors d'une enquête effectuée en 2014 auprès des laboratoires en HRA, nous avons recensé les différents personnels, chercheurs comme ITA, permanents ou CDD et doctorants impliqués dans les différentes activités en lien avec la HRA. Cette implication peut être instrumentale, théorique, ou observationnelle (utilisation de moyens HRA). Au total, et en moyenne sur la période d'étude, la HRA équivaut, hors ONERA, à 124 ETP, dont 39 de chercheurs / enseignants chercheurs, 45 de doctorants / post-doctorants, et 40 d'ITA (CDD inclus). L'ONERA ajoute 6 ETP de permanents et 13 de doctorants / post-doctorants. Il s'agit d'ETP, excluant les charges d'enseignement et les tâches de service hors HRA : le nombre de personnes est supérieur.

La répartition au sein des différents laboratoires est représentée sur la figure 3.3.

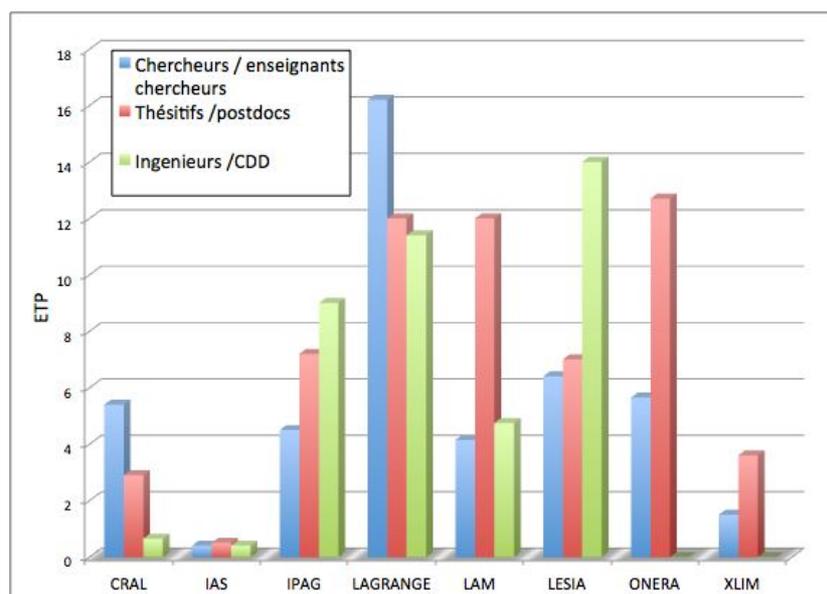


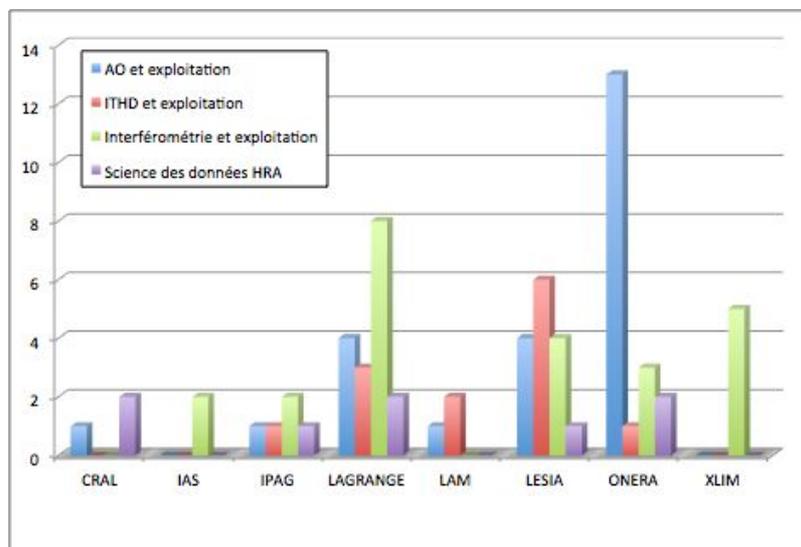
Figure 3.3 : répartition des effectifs impliqués en HRA.

Durant la période d'étude, il y a eu sur ces mêmes laboratoires 8 recrutements chercheurs ou enseignants chercheurs, et 5 recrutements ITA (personnels affectés en partie sur des activités HRA), pour autant de départs en retraite ou éméritat. L'effectif en HRA est donc globalement stable. L'âge moyen de la communauté est assez jeune, de sorte que la communauté est pour l'instant relativement protégée du phénomène d'érosion lié aux départs en retraite.

### 3.3. Thèses de Doctorat

*par Marc Ollivier, Michel Tallon*

Sur la période 2009-2014, 69 thèses ont été soutenues, en lien avec les activités de l'ASHRA. La figure 3.4 donne la répartition en thématiques au sein des laboratoires.



*Figure 3.4 : répartition thématique des thèses soutenues.*

L'équilibre entre les thématiques interférométrie et AO/ITHD est assez respecté. A noter le nombre croissant de thèses spécifiquement orientées vers le traitement des données (6 thèses soutenues).

Fin 2014, 40 thèses étaient en cours de préparation et devraient être soutenues d'ici 2017. La figure 3.5 donne la répartition en thématiques de ces thèses au sein des laboratoires.

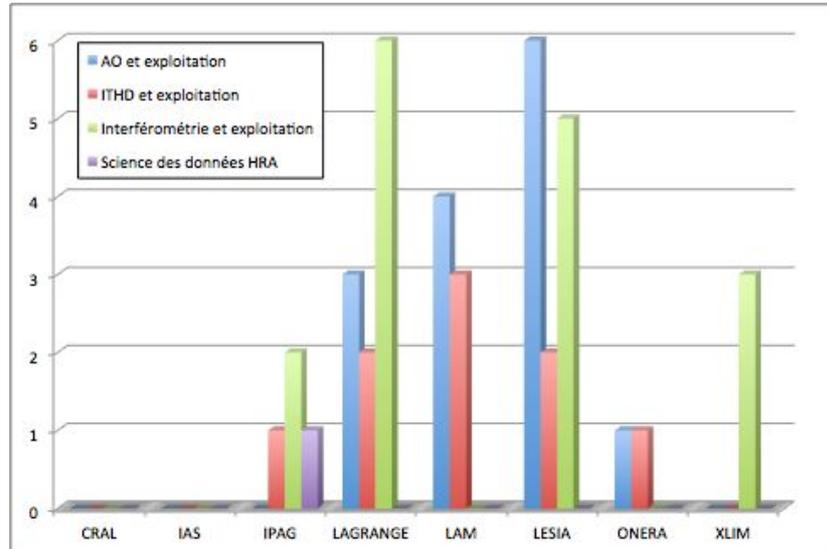


Figure 3.5 : répartition thématique des thèses en cours.

### 3.4. Publications scientifiques 2009-2014

*par Marc Ollivier, Michel Tallon*

Il est très réducteur, surtout dans le domaine de la HRA de ne regarder que les publications comme révélateur de la production scientifique. Cet indicateur est cependant intéressant si l'on sait le déconvoluer des différents biais.

- beaucoup de papiers sont liés à l'utilisation de techniques HRA. Les laboratoires dont les chercheurs utilisent beaucoup cette technique sont donc très prolifiques
- en matière de réalisation instrumentale, les personnels impliqués dans les projets instrumentaux publient moins que leurs collègues observateurs, et dans des revues moins "prestigieuses". Dans la statistique qui suit, nous avons recensé, par laboratoire, le nombre de papier de rang A en lien avec la HRA (instrumentation ou observation) auxquels un membre du laboratoire participe (il peut donc y avoir des doublons car plusieurs laboratoires participent généralement au même papier), ainsi que les papiers SPIE dont seul le premier auteur est dans le laboratoire. L'ensemble des résultats est reproduit sur le graphe ci-dessous.

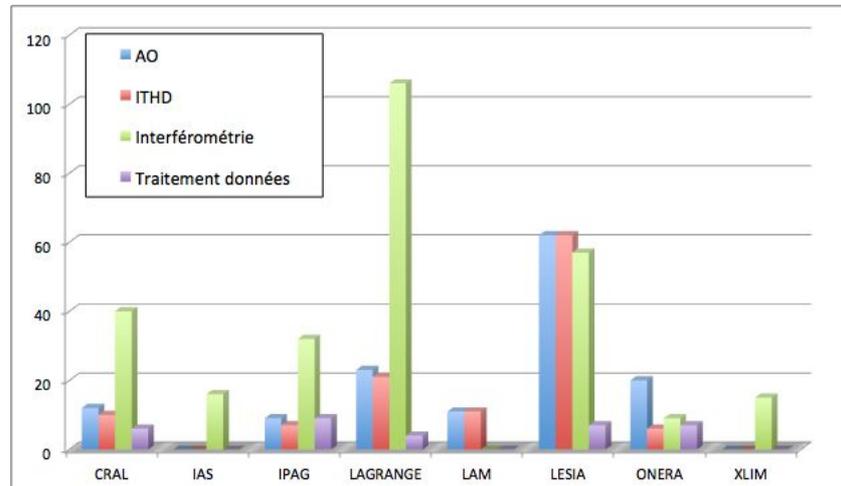


Figure 3.6 : nombre de publications de rang A auquel le laboratoire participe + nombre de papier SPIE avec un premier auteur dans le laboratoire).

On voit clairement que les laboratoires qui ont participé à des développements instrumentaux lourds en HRA (VEGA / MIDI / AMBER / NACO ...) sont particulièrement bien placés pour les exploiter. La communauté HRA française est en pointe dans le sujet, et au premier rang pour l'exploitation des données observationnelles.

### 3.5. Bilan des projets ANR financés

par Michel Tallon

La liste suivante porte sur les projets financés par l'ANR et actifs entre 2011 et 2015. On pourra remarquer qu'un seul projet (WASABI, ANR retour post-doc) se poursuivra après 2015. C'est la conséquence de la très grande difficulté actuelle d'obtenir un financement de l'ANR dans notre discipline, difficulté qui devient aujourd'hui un réel problème.

- CHAPERSOA : Commande HAute PERFORMANCE des Systèmes d'Optique Adaptative (C. Kulcsár, 2009-2013, 480 k€)
  - L2TI, SATIE, ONERA, IPAG
  - <http://hebergement.u-psud.fr/caroline.kulcsar/chapersoa/>
- RALIS : Recombineurs Actifs en Niobate de Lithium pour l'Interférométrie Stellaire (Guillermo Martin, 2009-2013, 210 k€)
  - IPAG (ANR jeune chercheur)
- MiTiV : Méthodes Inverses pour le Traitement des Images du Vivant (E. Thiébaud, 2009-2014, 650 k€)
  - CRAL, Centre Commun de Quantimétrie, Lab. Hubert Curien, Hôpital de la Croix Rousse, TIMC-IMAG, IAP, Shaktiware
  - <http://mitiv.univ-lyon1.fr/>
- EXOZODI : On the origin of exozodiacal dust (Jean-Charles Augereau, 2011-2014, 430 k€)
  - IPAG, Lagrange

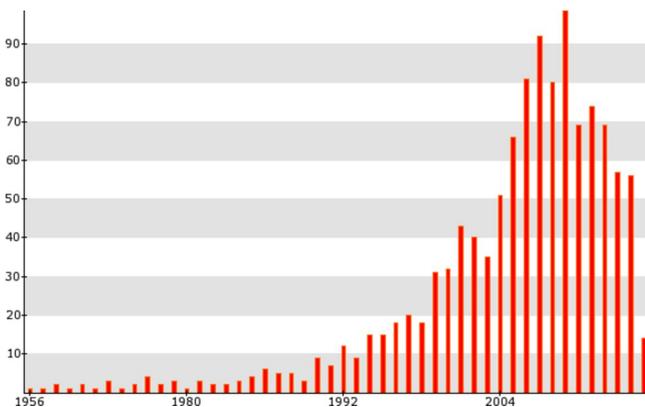
- POLCA : Processing of pOLychromatic interferometriC data for Astrophysics (M. Tallon, 2011-2015, 400 k€)
  - CRAL, IPAG, Lagrange, LESIA
  - <http://polca.univ-lyon1.fr/>
- OASIX : Optique Active Spatiale et Instrumentation complexe (E. Hugot, 2012-2015, 260 k€)
  - LAM (ANR jeune chercheur)
- COMPASS : COMputing Platform for Adaptive optics Systems : une plateforme hétérogène haute-performance pour le développement de l'optique adaptative de l'E-ELT (D. Gratadour, 2013-2016, 675 k€)
  - LESIA, LAM, GEPI, IPAG, ONERA, Maison de la simulation
- WASABI : Wide-Field Adaptive Optics Systems for Today's Astronomy and Beyond future Instruments (B. Neichel, 2013-2017, 300 k€)
  - LAM (ANR retour post-doc)

## 4. Enjeux astrophysiques et développements HRA

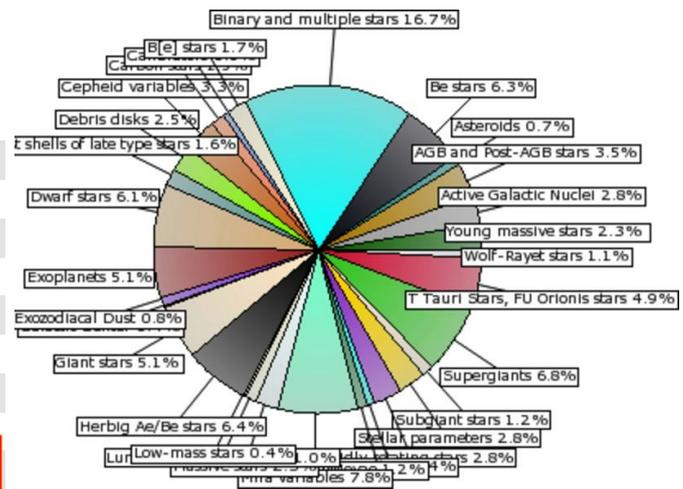
### 4.1. Physique stellaire en interférométrie optique et optique adaptative

par Romain Petrov, Yann Clénet

L'exploitation scientifique de l'interférométrie optique s'est poursuivie pendant la période 2009-2014 avec 424 articles de « résultats astrophysiques » dans des revues de rang A. Cela représente 46% de la production scientifique totale de l'interférométrie optique, à comparer aux 370 articles (44%) de la période 2004-2008 et aux 85 articles (10%) antérieurs à 2004. Toutefois, la production scientifique tend à diminuer depuis son maximum de 2009. C'est très probablement dû au vieillissement des instruments « general user » MIDI (production maximale en 2009) et peut être de AMBER (production maximale en 2013) qui n'ont pas été compensés par la montée en puissance de PIONIER et les progrès de CHARA, instruments d'équipe sur la période<sup>1</sup>. Une autre limitation est clairement que la production astrophysique à partir de l'interférométrie optique repose toujours très largement sur des personnes associées au développement instrumental, ce qui limite les capacités d'observation et d'analyse, notamment dans la phase actuelle de mise au point et d'installation des instruments de seconde génération du VLTI.



Résultats astrophysiques de l'interférométrie optique en nombre d'articles par an



Résultats astrophysiques de l'interférométrie optique par sujets

Source : <http://apps.jmmc.fr/bibdb/>

Plus de 90% de l'ensemble de ces publications relèvent des différents domaines de la physique stellaire. Des résultats importants ont été obtenus dans chacun de ces domaines. Un sondage partiel combinant nombre d'articles et nombre de citations met en avant (dans un ordre approximatif) :

<sup>1</sup> Après une première période d'instrument visiteur, PIONIER est ouvert à la communauté par l'ESO depuis octobre 2014.

- Les paramètres stellaires fondamentaux (binarité, diamètres, masses, températures effectives...)
- Les étoiles de Herbig et les étoiles jeunes massives (structure du disque de poussière, interaction gaz-poussière...)
- Les super géantes (paramètres fondamentaux mais aussi de plus en plus structures de surface, éventuellement à haute résolution spectrale...)
- Les rotateurs rapides (aplatissement, effet Von Zeipel...)
- Les Be classiques (cinématique Képlérienne, flux polaire, asymétries et oscillations globales dans le disque...)

Le travail sur les étoiles jeunes de masse proche du soleil à longterm a été bridé par une limitation en sensibilité, mais PIONIER a fait évoluer cette situation en basse résolution spectrale et les gains récents de AMBER+ en sensibilité ouvrent des perspectives importantes en moyenne résolution spectrale. Cette sensibilité avec les ATs (pour leur capacité de relocalisation et donc d'imagerie), surtout en moyenne et haute résolution spectrale, reste une frontière importante du VLTI. C'est une des motivations principales pour un suiveur de franges ou des techniques d'observations qui permettrait de travailler jusqu'à  $K \sim 9$  avec les ATs en MR ou en HR. On pourrait alors avoir des images de la cinématique du disque pour tous les types d'objets jeunes, avec GRAVITY en bande K, MATISSE en bande L et M, et AMBER en J et H.

L'étude des disques « d'accrétion », complétée par celle des disques de débris, est en train de passer de la physique stellaire à celle de la formation planétaire. C'est le programme prioritaire de MATISSE comme l'axe de développement choisi par la communauté interférométrique européenne (EII) pour l'avenir à terme de l'interférométrie optique.

Ces travaux partagent largement quelques caractéristiques communes :

- Dans leur très grande majorité, ils viennent lever des ambiguïtés dans des modèles issus d'observations non interférométriques. La clarification qui en résulte est spectaculaire, comme par exemple dans le cas des enveloppes de poussières de gaz des étoiles de Herbig ou des Be classiques. Toutefois, il y a eu peu de découvertes réellement surprenantes à ce jour. Par ailleurs, les observations interférométriques, images comprises, ne peuvent être interprétées astrophysiquement qu'en complément de toutes les autres observations.
- La très grande majorité des articles publiés à ce jour comprennent une part importante de développement des méthodes d'interprétation astrophysique de l'interférométrie optique. On est donc resté très largement dans une phase de « découverte » et les synthèses restent à faire. Des « surveys », destinés à établir des statistiques sur des classes d'objets ont été effectués assez récemment et n'ont pas encore été exploités complètement (voir [PIONIER](#)).
- L'interférométrie optique produit des images depuis environ 2009, mais ces images restent rares et lentes à produire. Les instruments à 4 télescopes (et plus) comme MIRC/CHARA, PIONIER, GRAVITY et MATISSE sur le VLTI permettent ou vont permettre une accélération importante du processus. Le principal frein actuel vient néanmoins des algorithmes de reconstruction d'image qui sont encore au stade de prototype dont la mise en œuvre repose sur un nombre encore trop restreint d'experts.
- Ces images ont toujours été interprétées (et en fait validées) en les confrontant à des modèles astrophysiques. Il y a eu un débat dans la communauté entre promoteurs d'images « détaillées et objectives », qui privilégient le nombre d'ouvertures, et ajusteurs de modèles, qui insistent sur la précision des mesures.

Ces constatations suggèrent quelques axes de développement :

- Pour tous les sujets astrophysiques, il est crucial de passer de « découvertes » sur des objets particuliers à des études statistiques sur des classes d'objets. Cela suppose :
  - Une accélération de la collecte des données. Cette collecte croît très vite avec le nombre de bases, donc la généralisation d'instruments à 4 télescopes permet un progrès important. **L'augmentation du nombre d'ouvertures reste un objectif majeur.**
  - Une accélération de l'analyse des données, par la stabilisation et la standardisation des procédures de traitement des données, de reconstruction d'image et d'ajustement de modèles. Cela implique le développement de pôles d'expertise et de service.
- Un gain en sensibilité limite, notamment avec les ouvertures individuelles de classe 1-2 m qui composent les réseaux interférométriques dédiés. Le gain en sensibilité permet d'accéder à un plus grand nombre de sources. Il permet aussi d'arriver plus vite au degré de précision requis, avec un impact déterminant sur la vitesse de collecte des données. Ce gain en précision suppose toutefois la poursuite d'un travail sur la stabilité des mesures, le but ultime étant que la précision ne soit limitée que par le RSB fondamental.
- Un gain en résolution angulaire, par l'augmentation des bases. Pour certains sujets astrophysiques comme l'activité stellaire, une descente en longueur d'onde peut contribuer à ce gain en résolution. Cela renforce généralement le besoin d'un gain en sensibilité dans le visible, notamment grâce à des optiques adaptatives permettant de travailler à la limite de diffraction.
- Gain en sensibilité et gain en résolution sont associés à un gain sur la précision des mesures interférométriques. Ces trois points doivent être traités ensemble.

En dehors du passage à une analyse statistique par classe d'objet, les sujets astrophysiques émergents ou en développement rapide sont :

- L'étude de l'activité stellaire au sens large, et de l'astérosismologie en particulier. Cela pointe sur les mêmes besoins, mais dans un ordre différent. Le gain en résolution est dans ce cas la première priorité. Pour cette thématique, le gain en résolution est fortement associé à un gain en précision des mesures, pour permettre à l'interférométrie de dépasser les limitations de l'imagerie Doppler, ce qui suppose qu'elle atteigne des précisions équivalentes. Le domaine de longueur d'onde privilégié est alors le visible.
- L'étude des disques protoplanétaires, qui est largement issu du travail sur les disques d'étoiles jeunes. La priorité est alors la capacité d'imagerie à haute dynamique dans l'infrarouge. C'est le créneau scientifique principal de FLUOR/CHARA et de MATISSE, dont on peut espérer qu'il observera tout ce qui peut l'être avec les bases maximales du VLTI. L'augmentation de ces bases serait alors probablement l'objectif majeur du projet « Planet Formation Imager » (PFI).

Parallèlement à l'ensemble des travaux en interférométrie optique mentionnés ci-dessus, il est à noter quelques études basées sur des observations en optique adaptative. On citera ainsi l'imagerie directe avec NACO au VLT de l'environnement très proche de la supergéante rouge Bételgeuse ou de la géante rouge L2 Puppis, mettant en évidence à chaque fois une nébuleuse de gaz et de poussières

autour de ces étoiles. SPHERE commence déjà à produire des résultats similaires avec par exemple de nouvelles observations de L2 Puppis en polarimétrie.

Ce type d'étude est d'ores déjà programmé en première lumière de l'E-ELT, en mode SCAO : imagerie directe de surface stellaire pour une meilleure compréhension de la convection stellaire, étude de l'environnement des étoiles massives ou évoluées et de leurs pertes de masse, imagerie résolue de systèmes stellaires multiples à éclipse pour en déterminer les paramètres fondamentaux, etc.

## 4.2. Formation planétaire et planétologie comparée

*par Romain Petrov*

Les sciences planétaires sont également une thématique en lien direct avec les développements HRA, que ce soit pour l'étude des systèmes en formation (disques protoplanétaires) ou formés (disques de débris et systèmes exoplanétaires). Ces activités ont également été et sont encore un formidable moteur de R&D, en particulier pour ce qui concerne l'imagerie très haute dynamique et l'interférométrie annulante.

Cependant, les études de phase préliminaire de différents projets d'observation directe depuis l'espace, que ce soit en coronagraphie ou en interférométrie ont révélé l'extrême complexité de la tâche, non principalement pour des raisons instrumentales, mais surtout de complexité système et opérationnelle, de sorte que la question de l'observation directe des exosystèmes est maintenant l'un des objectifs des plus grands observatoires au sol uniquement, que ce soit le VLT (SPHERE), GEMINI (GPI), ou les futurs ELT. Le rôle moteur qu'a pu jouer un projet comme DARWIN par exemple, ou son homologue américain (TPF, coronographe ou interféromètre) a cessé, et la prospective sur cette question reste à réviser, car le choix ELT pour l'observation directe n'est pas évident en soi.

Pourquoi l'observation directe reste-t-elle un objectif majeur ? La détection et la mesure des paramètres principaux des exosystèmes (masse, diamètre, paramètres orbitaux) est réalisée presque intégralement par des méthodes de détection indirecte (mesure des vitesses radiales et détection des transits principalement). La caractérisation spectrale nécessite la détection des photons planétaires. L'analyse spectrale du signal de transit ou d'occultation est une méthode très performante pour les systèmes à dynamique limitée (contraste maximal de  $10^5$  à  $10^6$ ). Or plus on cherche à caractériser des planètes tempérées (systèmes thermalisés ou à plus grande distance de leur étoile) et plus ce contraste augmente, de plusieurs ordres de grandeur.

La question de la détection directe doit donc être repensée, en étudiant de manière critique les atouts et difficultés respectifs des grands instruments au sol et dans l'espace. Dans tous les cas, c'est l'effort de R&D qu'il faut maintenir, à la fois au niveau des instruments sol dans le cadre de la correction de la turbulence (AO extrêmes) et des instruments spatialisés (télescopes imageurs de grande qualité optique, interféromètres spatiaux). La principale difficulté est l'absence de cas scientifiques solides de difficulté intermédiaire qui ne puisse pas être traité autrement que de l'espace et qui pourrait servir de précurseur aux futurs projets plus ambitieux.

Sur le plan de la caractérisation des disques, le besoin d'imagerie des environnements stellaires et particulièrement la partie interne des disques est clairement établi. Reste à déterminer si cet objectif est accessible avec des instruments à pupille connexe même de grande taille ou si un réseau interférométrique dédié type PFI est nécessaire. Ce point doit être regardé soigneusement.

### 4.3. Centre galactique et physique fondamentale

par Thibaut Paumard

Le Centre galactique (CG) est situé à  $\approx 8$  kpc. Étant, bien évidemment, situé dans le disque galactique, il n'est pas observable dans le domaine visible en raison de la quantité de poussière sur la ligne de visée. De par cette relative proximité, il offre une résolution linéaire bien plus élevée que les autres noyaux de galaxie, dès lors que l'on observe aux grandes longueurs d'onde (infrarouge, radio) ou au contraire en rayons X ou encore plus énergétiques. L'objet compact supermassif qui y siège, Sgr A\*, bien que d'une masse modeste (environ  $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ ), est celui dont le rayon de Schwarzschild  $R_s$  sous-tend l'angle le plus grand :  $\approx 10 \mu\text{as}$ . Le second trou noir par ordre de rayon de Schwarzschild projeté est celui au cœur de la galaxie M82, deux fois plus petit. En outre, le CG présente des traces d'activité passée et actuelle. C'est donc le sujet idéal pour étudier en détails les mécanismes en jeu dans les noyaux actifs de galaxies (NAG).

La source ponctuelle Sgr A\* a été détectée dans le domaine radio dans les années 70 et rapidement suspectée de coïncider avec un trou noir supermassif. Il a fallu près de trente ans pour détecter des contreparties infrarouge et X. Dans ces deux domaines, l'émission de Sgr A\* est variable et se manifeste par des sursauts brillants (un à quelques uns par jour) qui durent environ 1 h. Selon certains auteurs, ces sursauts ou *flares* sont liés à des événements énergétiques individuels dont la nature exacte n'est pas encore claire, soit au sein d'un disque d'accrétion à quelques  $R_s$  du trou noir, soit dans un jet en émanant. Selon d'autres auteurs, on ne peut pas parler d'événements car Sgr A\* montrerait des variations d'amplitudes diverses à diverses échelles de temps suivant un spectre de bruit rouge. Selon eux, les « sursauts » ne sont finalement que les plus énergétiques de ces variations.

Autour de Sgr A\* orbitent des milliers d'étoiles. C'est d'ailleurs l'étude de l'orbite de l'une d'entre elles, S2, qui a donné l'une des meilleures estimations de la distance au CG et de la masse de Sgr A\*. S2 a une période orbitale d'une quinzaine d'années et passe au périapse à environ  $2000 R_s$  seulement, à une vitesse quasi-relativiste ( $\approx 1\%$  de la vitesse de la lumière). Elle fait partie d'un groupe d'une dizaine d'étoiles qui occupent la seconde d'angle centrale et orbitent autour de Sgr A\* en quelques années. Au-delà de la région la plus interne s'étend l'amas nucléaire, constitué de milliers d'étoiles de type tardif qui orbitent autour du trou noir selon des orbites aléatoires, relaxées dynamiquement. Cet amas contient également une centaine d'étoiles massives beaucoup plus jeunes, dont la dynamique est encore marquée par leurs conditions initiales. Il apparaît que les orbites de ces étoiles ne sont pas aléatoires : elles sont confinées dans un ou deux disques relativement minces. Cela donne une indication sur leur origine : l'hypothèse actuellement favorisée est celle selon laquelle ces étoiles se seraient formées dans un disque d'accrétion de quelques  $10^4$  masses solaires qui aurait occupé le parsec central il y a quelques millions d'années. On peut se demander si à l'époque la Voie lactée présentait l'aspect d'un noyau actif de galaxie.

L'amas nucléaire s'étend sur une vingtaine de secondes d'angle, soit l'échelle du parsec. Il est baigné par un complexe de nuages de poussière et de gaz dont la surface est ionisée et qui a en projection l'apparence d'une spirale à trois bras. Cet ensemble est nommé Sgr A ouest et surnommé la Minispirale. Il est entouré par un tore de gaz moléculaire, le Disque circumnucléaire (CND), qui marque la frontière de la région à laquelle nous nous intéresserons ici.

Voici deux questions clés qui structurent la recherche dans le domaine du Centre Galactique :

- Mécanismes à l'œuvre au cœur d'une galaxie : comment le gaz et la poussière des régions internes de la galaxie évoluent-ils ? Le CND a-t-il vocation à s'effondrer pour former un disque d'accrétion ? Sont-ce les étoiles jeunes qui par leur vent stellaire empêchent cet

effondrement ? La Minispirale provient-elle du CND ? Comment procède la formation stellaire aux abords immédiats d'un trou noir supermassif ?

- Mesure de la métrique autour d'un trou noir : il est maintenant considéré comme acquis que Sgr A\* est un trou noir. Cependant, cette conclusion dépend dans une large mesure du fait que la relativité générale est elle-même considérée comme valide même dans des conditions extrêmes. Même si l'hypothèse « trou noir » est à considérer comme la moins exotique et la plus simple permettant à ce jour de rendre compte des données, il est important de la vérifier par une observation irréfutable en apportant la preuve que l'objet compact possède bien un horizon des événements (par souci de simplicité, nous utiliserons le terme de trou noir indépendamment de ces considérations, exception faite des passages où la nature exacte de l'objet central est importante). De même, les conditions qui règnent à proximité immédiate de l'objet sont si extrêmes que la validité de la théorie de la gravitation devra être vérifiée dès que possible par l'observation et non admise comme juste *a priori*. Par exemple, le théorème dit de calvitie (qui stipule que les trous noirs n'ont que trois propriétés mesurables extérieurement) pourra et devra, à terme, être vérifié (Will2008, ApJ 674:L25).

Ces questions clefs se déclinent en projets instrumentaux, observationnels et informatiques. Depuis plus de 10 ans, les instruments mono-télescopes NACO, SINFONI et VISIR du VLT et les instruments interférométriques MIDI et PIONIER du VLTI ont servi à l'étude de la population stellaire et du milieu interstellaire du parsec central ainsi que de leurs interactions. Ce sont eux, en grande partie, qui ont permis de mesurer la masse et la distance du trou noir, l'âge de la population d'étoiles jeunes, ainsi que la dynamique et les conditions physiques qui règnent dans le milieu interstellaire.

Les instruments de l'ELT (MICADO, HARMONI, MOSAIC) prendront à terme le relais pour d'une part affiner notre compréhension de l'histoire de la formation stellaire dans le parsec central ainsi que les spécificités de la population stellaire qui en est issue en termes de fonction de masse initiale et de fraction de binarité par exemple, et d'autre part pour mesurer les effets relativistes dus au trou noir sur les orbites stellaires ainsi que les effets de lentille gravitationnelles.

En outre, la seconde génération d'instruments pour le VLTI (GRAVITY et MATISSE) joueront également un rôle important dans l'étude de la population stellaire, notamment à travers l'étude de la multiplicité des étoiles massives et des enveloppes circumstellaires des étoiles évoluées. Mais surtout GRAVITY a été spécifiquement dimensionné pour mesurer les orbites relativistes et les effets de lentilles des étoiles de la seconde d'angle centrale et des sursauts énergétiques du trou noir. Ces mesures se feront en asservissant la boucle du suiveur de franges de GRAVITY sur une des étoiles brillantes (magnitude K=10 en bande K) du groupe IRS 16, qui servira de référence astrométrique pour la mesure des phases de la voie scientifique de l'instrument, pointée sur le trou noir central.

Enfin, notons que l'interprétation des données aussi bien spectroscopique et interférométriques que d'imagerie haute résolution, par exemple pour l'élucidation de la nature des sursauts et la prise en compte des effets de lentille, nécessite le développement d'outils de traitement du signal et de modélisation à la mesure des développements instrumentaux. Le projet POLCA cité plus haut a participé à cet effort en ce qui concerne le traitement des données interférométriques des données issues notamment de GRAVITY et MATISSE. De son côté, le projet GYOTO prend de l'envergure sur la scène internationale en ce qui concerne le calcul d'orbites relativistes et d'effets de lentilles gravitationnelles.

#### **4.4. Astrophysique extragalactique en interférométrie optique**

*par Romain Petrov*

Les observations interférométriques d'objets extragalactiques se limitent pour l'instant aux AGNs. Elles sont réservées aux très grandes ouvertures du KI et du VLTI, et au VLTI seul depuis l'arrêt du mode interférométrique du Keck. Les observations dans l'infrarouge proche ont commencé dès 2004 (Jaffe, 2004) avec MIDI et près de 50 AGNs ont été observés à ce jour (Burtscher, 2013). Les résultats principaux portent sur les dimensions et la structure du bord interne du tore de poussière à différentes températures (de 1500 °K, ~température de sublimation, en K jusqu'à environ 300°K à 13 microns). La structure interne du tore apparaît complexe, avec une combinaison variable entre une structure équatoriale « plus froide » et une structure polaire « plus chaude ». Kishimoto (2014) propose une unification de ces mesures par la luminosité, les nuages « polaires » étant éliminés dans les AGNs à forte luminosité par la pression de radiation. Les autres auteurs (Burtscher, 2013 et ses co-auteurs) principaux contestent cette interprétation et considèrent que chaque AGN est un cas particulier. La capacité d'imagerie de MATISSE apportera des éléments de réponse décisifs sur la poignée d'objets pour lesquels les bases du VLTI sont suffisantes pour reconstruire des images en L, M et N.

En bande K, le KI et le VLTI ont permis des mesures de dimensions équivalentes sur une douzaine de sources depuis 2009. Depuis 2011, le mode d'observation « blind » et le mode de traitement associé AMBER+, dérivé des traitements utilisés sur VEGA/CHARA, ont permis le gain en sensibilité donnant accès aux observations en moyenne résolution spectrale de 3C273 et, en principe, de quelques autres Quasars. On a montré (Petrov, 2012) que la BLR de 3C273 était bien plus grande (1.5 à 2 fois plus grande que le bord interne du tore) et bien plus épaisse (loin d'un disque plat) que prévu. Un travail de comparaison entre les possibilités de l'IO et du Reverberation Mapping (RM) montre que l'interférométrie optique peut tester, compléter et calibrer les observations de RM sur un nombre suffisant de sources pour espérer améliorer notablement les lois délai-luminosité et masse-luminosité issues du RM seul (Rakshit 2014). Ces lois doivent permettre d'utiliser les Quasars et les Seyfert 1 comme chandelles standard pour la mesure des distances et comme étalons de masse pour l'étude de l'évolution des galaxies. Ce programme repose sur GRAVITY, qui devrait donner des mesures à haute précision pour les 10 à 20 sources accessibles jusqu'à la magnitude limite ( $K=10.5$ ) de son suiveur de franges interne. OASIS (Optimizing AMBER for Spectro Interferometry and Sensitivity) est un module très simple d'extension de AMBER qui devrait permettre de doubler au moins le nombre de sources accessibles à ce programme. Ce module « visiteur » a été proposé à l'ESO sans réussir, pour l'instant, à passer la barrière des problèmes de plan de charge et de calendrier du VLTI. La percée finale dans ce domaine sera obtenue par la mise en service d'un suiveur de franges de 2<sup>nd</sup>e génération du VLTI, à condition qu'il permette d'exploiter jusqu'à  $K>13$ , GRAVITY, MATISSE et OASIS (ou un autre instrument visiteur optimisé pour les observations à MR). Diverses études montrent la possibilité de produire un tel suiveur de franges, mais l'ESO a reporté le démarrage d'un programme sur ce point au delà de 2016, dans le meilleur des cas. Malgré la charge actuelle représentée par la finalisation de GRAVITY et de MATISSE, il est souhaitable qu'un effort de R&D sur ce point soit maintenu par les communautés OI françaises et européennes, d'autant plus qu'un tel suiveur de franges conditionne la pleine exploitation de GRAVITY et de MATISSE. Il faut aussi que la communauté interférométrique européenne, par le biais de l'EII, maintienne une pression sur l'ESO pour que ce programme soit relancé au plus tôt.

#### **4.5. Applications de la HRA en dehors de l'astrophysique**

Les applications de la HRA en dehors de l'astrophysique sont nombreuses. L'idée de cette section n'est pas d'être exhaustive mais de mettre l'accent sur des activités menées par des acteurs de l'HRA.

## Applications biomédicales

*par Gérard Rousset*

Le LESIA mène depuis le début des années 2000 une R&D de valorisation des techniques d'optique adaptative développées en astronomie pour l'imagerie in vivo à haute résolution spatiale de la rétine humaine en collaboration avec des ophtalmologistes de l'hôpital des XV-XX. Après l'installation au Centre d'Investigation Clinique d'un premier instrument d'imagerie de fond d'oeil à haute résolution et petit champ, le LESIA développe dans ses locaux un banc de démonstration de la tomographie cohérente optique (OCT) plein champ corrigée par optique adaptative permettant d'atteindre la haute résolution spatiale en trois dimensions (typiquement quelques micromètres cube). Ce développement ambitieux se fait en plusieurs étapes. Tout récemment, les premières images OCT d'échantillons biologiques in vitro ont été obtenues.

Par ailleurs, une collaboration au sein de l'Idex PSL\* est en cours entre l'Observatoire de Paris, l'ENS et l'ESPCI pour la confrontation des problématiques autour du contrôle de front d'onde et de l'optique adaptative en Microscopie des milieux biologiques. Cette collaboration a débouché cette année (2015) sur l'organisation à Paris de la première conférence internationale « Adaptive Optics and Wavefront Control in Microscopy and Ophthalmology » qui a réuni plus de 125 chercheurs de nombreux pays et douze orateurs invités les plus en pointe dans leur domaine. Les thématiques abordées portaient sur les méthodes d'optique adaptative, le contrôle de front d'onde dans les tissus diffusants, les nouvelles techniques en microscopie, les applications à la biologie et l'imagerie de la rétine.

A noter que l'ONERA mène aussi des activités dans ces domaines de l'Ophtalmologie et de la Microscopie.

## Optique active

*par Emmanuel Hugot*

La haute résolution angulaire depuis l'espace est un besoin identifié comme stratégique par le CNES et l'ESA depuis bientôt 10 ans. De nombreux efforts sont mis en place afin de pouvoir augmenter le diamètre des télescopes spatiaux tout en conservant des volumes, masse et coûts raisonnables. L'Optique Active est aujourd'hui la technologie privilégiée pour la conception de systèmes flexibles et modulaires intégrant des miroirs primaires de grand diamètre, allégés soumis aux déformations thermo-mécaniques dues aux variations d'environnement.

L'Observation de la Terre est aujourd'hui le domaine le plus demandeur en termes de haute résolution angulaire, pour les applications duales telles que prévention des risques, gestion des catastrophes naturelles, urbanisme, agriculture, défense, océanographie. Ce domaine est le moteur du développement des activités de HRA dans l'espace et sera la porte d'entrée vers les missions d'exploration planétaire à haute résolution pour l'étude du système solaire. Les développements de ces technologies vont au delà de la rupture technologique : on parle de rupture psychologique, qui permettra aux différents acteurs du domaine spatial de concevoir et envisager des missions ambitieuses pour des thématiques telles que l'imagerie directe de planètes extra-solaires et leur caractérisation.

En 2012 a été co-organisé un atelier CNES/ASHRA sur les "télescopes spatiaux de nouvelle génération", abordant l'ensemble de ces problématiques et réunissant plus de 300 acteurs de la discipline.

## 5. Thématique interférométrie

### 5.1. Introduction

par Michel Tallon

#### Les instruments à l'oeuvre

Après une trentaine d'années pionnières qui ont permis la mise au point de l'interférométrie optique, l'exploitation scientifique du VLTI a débuté en 2001 avec les mises en service progressives des instruments VINCI (2001-2003), MIDI (2002-2015) et AMBER (depuis 2004), puis l'arrivée récente de PIONIER (depuis 2010). Alors que VINCI a été conçu pour la recette du VLTI et sa première lumière, MIDI (2 télescopes, bande N) et AMBER (3 télescopes, bandes H et K) ont porté toute la production du VLTI sous la forme d'instruments largement ouverts à la communauté. PIONIER (4 télescopes, bande H), après une période avec le statut d'instrument d'équipe, est ouvert à la communauté depuis octobre 2014. Comme le montre la figure 5.1, l'impact de ces 4 instruments est très significatif et a porté celui du VLTI, utilisé dans ~35% des publications. Dans cette progression, apparaît nettement l'augmentation régulière du nombre de télescopes combinés. La seconde génération d'instruments, GRAVITY (bande K, en cours d'installation) et MATISSE (bandes L, M, N à partir de 2017) recombinera aussi 4 télescopes, augmentant significativement les possibilités d'imagerie.

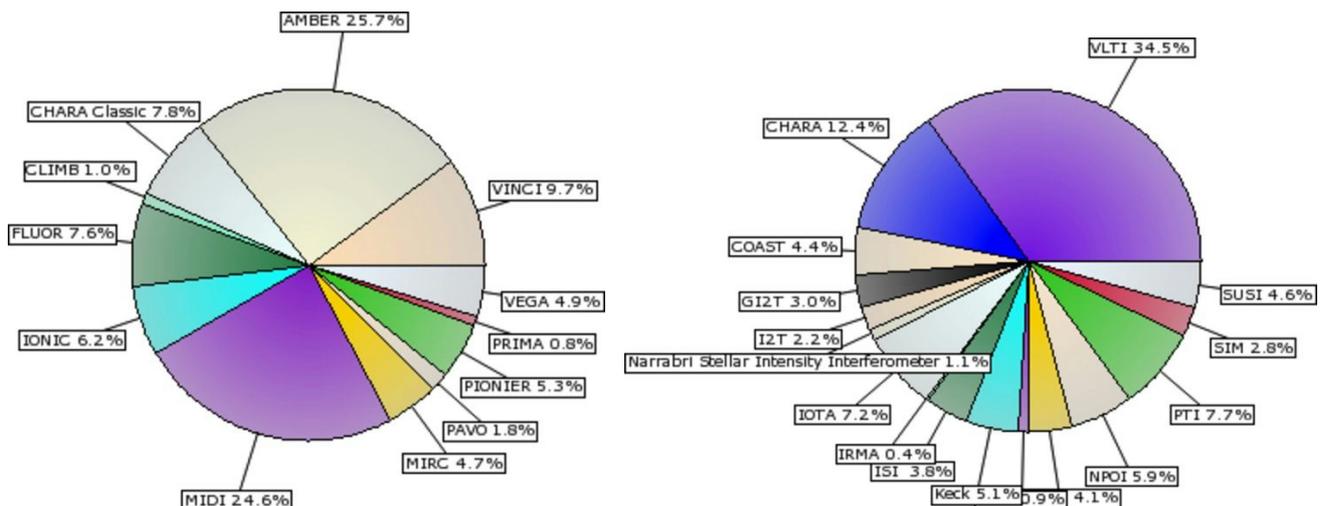


Figure 5.1 : A gauche, pourcentage des publications de rang A en interférométrie optique utilisant un instrument donné, depuis le début de l'interférométrie. À droite, même chose en fonction des interféromètres (nombre de ces interféromètres ne sont plus en fonctionnement). Source : <http://apps.jmmc.fr/bibdb/>

La communauté française a aussi accès à l'infrastructure CHARA (6 télescopes). Les deux instruments français qui y sont installés, JouFLU (ex-FLUOR, bande K) et VEGA (visible, depuis 2008) recombinent respectivement 2 et 3 (parfois 4) télescopes. La figure 5.1 montre l'impact significatif de ces deux instruments et de CHARA sur la production scientifique. Par le biais de ces deux infrastructures, les équipes françaises ont un impact majeur en interférométrie. L'augmentation de 2 à 4 du nombre de télescopes recombinés avec VEGA est très récente. Néanmoins, les premières images ont été obtenues avec VEGA, en particulier en s'appuyant sur l'aspect multi-spectral de l'instrument. Une R&D très active présentée dans la suite, vise à terme la recombinaison des 6

télescopes de CHARA. Là encore, la poussée est forte vers l'augmentation du nombre de télescopes recombinaisonnés.

### **La marche vers une imagerie accessible et plus de télescopes**

Avec cette augmentation du nombre de télescopes recombinaisonnés, il faut s'attendre à une demande croissante en outil de reconstruction d'image en interférométrie dans les prochaines années, notamment en reconstruction multi-spectrale. Si les progrès ont été significatifs dans ce sens (voir la partie traitement du signal), ces outils ne sont pas encore assez avancés pour être utilisés sans expertise. Les efforts en traitement du signal sont continus, mais les moyens manquent pour progresser assez vite, en particulier concernant la recherche sur le réglage automatique des paramètres des algorithmes utilisés. La mise en place par le JMMC de "noeuds d'expertise en interférométrie" pour aider les observateurs à exploiter ces instruments devrait aider à dépasser ce problème, dans la limite des moyens disponibles. Mais l'investissement dans le traitement du signal est indispensable pour rendre l'interférométrie plus accessible.

L'augmentation des capacités d'imagerie devrait aider à interpréter les observations des objets complexes, comme par exemple celles des disques des objets jeunes. En anticipant l'impact de ces nouveaux moyens, on peut s'attendre en retour à l'augmentation de la demande pour un télescope supplémentaire (AT éventuellement fixe) sur le VLTI. En effet, avec seulement 4 télescopes recombinaisonnés, la reconstruction d'image reste un problème ardu et incertain.

### **L'augmentation de la magnitude limite**

L'augmentation de la magnitude limite de l'interférométrie optique est aussi un point crucial pour étendre les programmes scientifiques de l'interférométrie, notamment vers l'extragalactique. Les améliorations apportées continuellement à AMBER lui ont permis d'atteindre la magnitude  $K=11.7$  avec les UT. L'arrivée prochaine de l'optique adaptative sur les télescopes auxiliaires du VLTI d'une part, et sur les télescopes de CHARA d'autre part, améliorera la situation. Mais au cours de ces 5 dernières années, des travaux ont montré des possibilités de gagner encore quelques magnitudes, notamment en s'appuyant sur l'amélioration des méthodes de mesure (voir section [iLimits](#)). Là encore, le traitement du signal est en première ligne pour approcher les limites physiques des instruments. A plus long terme, il est attendu que ces méthodes puissent orienter le design de futurs instruments dans une approche de co-design. La première retombée de ces travaux pourrait être dans la réalisation du suiveur de franges qui manque à MATISSE pour atteindre ses performances ultimes.

### **Une R&D focalisée**

Les progrès continus de l'interférométrie s'appuient sur une R&D, en partie directement soutenue par l'ASHRA, qui alimente la progression des instruments. C'est le cas notamment des développements en optique intégrée et en optique guidée. Parmi les divers travaux de R&D menés, nous avons sélectionné la présentation de quatre R&D significatives sur les 5 dernières années :

- Carlina : la période a vu la conclusion de la première exploration de cette nouvelle architecture d'interféromètre en démontrant sa faisabilité et en mettant en évidence les points sur lesquels un travail est encore nécessaire.
- FRIEND et CESAR : la R&D préparatoire à une nouvelle génération de recombineur visible, sur CHARA et sur le VLTI.
- Augmentation de la magnitude limite : plusieurs R&D sont menées pour augmenter la magnitude limite de l'interférométrie.

- ALOHA : exploration de la conversion de fréquence pour l'interférométrie longue base future.

En parallèle de ces lignes de R&D, il est à noter l'importance d'avoir accès aux instruments pendant leur exploitation, à la fois pour l'amélioration même de l'instrument (particulièrement flagrant dans le cas d'AMBER), mais aussi pour un retour d'expérience qui permet de préparer la génération suivante. C'est relativement aisé lorsque l'instrument est maintenu par l'équipe (JouFLU, VEGA, PIONIER), mais plus délicat pour l'instrumentation livrée à l'ESO. Il est attendu que cet accès soit toujours possible pour la seconde génération, en particulier pour GRAVITY qui aborde l'astrométrie avec un dispositif instrumental nouveau qui s'étend dans tout le train optique du VLTI, jusque dans les télescopes.

Ce chapitre présente tout d'abord une revue des instruments à l'oeuvre au VLTI, et les instruments français implantés sur CHARA, puis les R&D principales annoncées précédemment.

## 5.2. Les instruments du VLTI

### AMBER 10 ans après

*par Florentin Millour*

AMBER est l'instrument proche infrarouge du VLTI à 3 télescopes. Il est le résultat d'une collaboration internationale regroupant l'observatoire/l'université de Nice, l'institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, l'institut Max-Planck de Bonn (Allemagne) et le laboratoire d'astrophysique d'Arcetri (Italie) pour le compte de l'observatoire Européen Austral (ESO). Il fut installé à Paranal en 2004 et a obtenu ses premières données scientifiques à Noël de cette année là. Depuis ce moment, AMBER a montré son efficacité en étant l'instrument qui a le plus publié d'articles à comité de lecture dans le domaine de l'interférométrie optique à longue base (26% de tous les articles aujourd'hui). Il fait aussi partie, avec MIDI, des deux premiers instruments d'interférométrie ouverts à tout astrophysicien pour ses propres programmes d'observation. On peut donc dire sans ambages qu'il a permis d'élargir la communauté des utilisateurs de l'interférométrie optique pour l'astrophysique.

Parmi les résultats marquants de cet instrument, on peut noter la première détection de la rotation Keplerienne dans le disque d'une étoile Be, la découverte de boules de feu bipolaires dès les premiers instants des explosions de Novae, la première image du VLTI, ou encore la première image disque d'accrétion autour d'une étoile jeune massive.

AMBER a introduit un nouvel algorithme de traitement des données "P2VM" qui a ainsi pu être testé et validé sur le ciel avec succès. AMBER, et le VLTI, ont progressé continuellement pendant ces 10 ans d'exploitation, avec l'arrivée des AT et du suiveur de franges FINITO en 2005, l'optimisation des procédures d'observation, l'amélioration de la caméra de centrage IRIS, de nouveaux modèles de lignes à retard, des modifications électroniques (électronique du détecteur), mécaniques (mise à niveau des supports de fibres) et optiques (mise à niveau de la source de calibration, installation du module de commutation de faisceaux, remplacement des polariseurs par des lames en niobate de lithium) pour améliorer l'efficacité et la transmission de l'instrument.

Côté logiciel, l'efficacité d'AMBER a été améliorée par une optimisation des procédures d'observation et d'enregistrement des volumes de données, de nouvelles procédures de centrage des franges, et un suivi du développement du logiciel de traitement des données par le JMMC. AMBER est aujourd'hui l'instrument d'interférométrie le plus sensible avec une limite de magnitude  $K=11.7$  sur les UT, grâce à des nouvelles procédures d'acquisition et de traitement des données.

AMBER est aujourd'hui sur le point d'être surpassé en bande K par l'arrivée de GRAVITY. Cependant, il possède encore de forts atouts tels que sa magnitude limite ou encore sa très haute résolution spectrale de 12000.

## **PIONIER : recombinaison à 4 télescopes sur le VLTI**

*par Jean-Baptiste Le Bouquin*

L'instrument visiteur PIONIER a été proposé à l'ESO en 2009 dans le but d'exploiter la capacité d'imagerie et de haute sensibilité du VLTI pour la période 2011-2014, c'est-à-dire en avance de phase par rapport aux instruments de seconde génération, plus ambitieux mais aussi plus complexes à développer. Après un important travail d'explication, la proposition a été acceptée par l'ESO qui y a vu une opportunité unique de valider les opérations du VLTI à 4 télescopes dans une collaboration simple et réactive.

PIONIER est bâti sur un concept instrumental éprouvé, les franges scannées, déjà mis en oeuvre dans FLUOR, VINCI et IONIC-3, et une technologie mature, l'optique intégrée silice-sur-silicium. L'objectif de simplicité était double :

- minimiser les risques, pour tenir le planning (1 an) et la contrainte budgétaire (150 k€)
- maximiser la compréhension instrumentale, et donc les performances (sensibilité/précision).

Le financement initial a été obtenu en 2009 de l'Université Joseph Fourier, suivi d'un soutien plus faible de l'INSU, de l'ANR et du labex OSUG@2020. L'instrument a été installé au VLTI fin 2010 et a été exploité comme instrument visiteur jusqu'en 2014.

PIONIER est un instrument de niche, se focalisant sur un unique mode instrumental : la basse résolution spectrale en bande H, à haute précision ( $\sim 1\%$  et  $\sim 1\text{deg}$ ), et à haute sensibilité ( $H > 7.5$  en routine sur les ATs). L'apport principal de PIONIER est d'avoir permis la réalisation de révélés systématiques assez riches pour tirer des conclusions générales sur certaines classes d'objets. Citons en particulier :

- La sensibilité nouvelle a permis d'observer un échantillon de plus de 100 étoiles massives (type O) et de caractériser leur multiplicité dans un domaine de séparation inexploré. Il s'avère que toutes les étoiles O observées sur la séquence principale font partie d'un système multiple (Sana et al. [2014ApJS..215...15S](#)).
- L'efficacité et la précision nouvelle ont permis de chercher des disques de débris chaud autour de 92 étoiles connues pour avoir un disque de débris froid et de 100 étoiles sans disque connu, servant d'échantillon de référence (soit un total de plus de 400 objets en environ 15 nuits en comptant les étoiles calibrateurs). La très intrigante absence de corrélation évidente entre présence d'un disque chaud et présence d'un disque froid questionne notre compréhension des disques de débris en général (Ertel et al [2014A&A...570A.128E](#))
- La capacité d'imagerie nouvelle a permis de résoudre spatialement le disque proto-planétaire entourant plus de 50 étoiles jeunes Herbig AeBe et T-Tauri (Kluska et al. [2014IAUS..299..117K](#) ; Anthonioz et al. [2015A&A...574A..41A](#)). Il s'avère que les bases du VLTI sont pour l'instant trop courtes pour réaliser des images détaillées d'un grand nombre de source, mais une approche statistique basé sur des modèles géométriques permet de comprendre les grandes tendances.

En 4 ans, les données de PIONIER sont au coeur de  $\sim 35$  papiers dans A&A et ApJ. Elles ont aussi été utilisées pour le fameux "Interferometric Beauty Contest" (Monnier et al [2014SPIE.9146E..1QM](#)). Après avoir été l'instrument le plus demandé du VLTI pendant quelques années, l'intérêt pour

PIONIER diminue fortement avec l'arrivée de GRAVITY. Néanmoins il est possible que PIONIER reste privilégié des utilisateurs ayant besoin d'un maximum de résolution angulaire (bande H au lieu de K).

## De MIDI à MATISSE

*par Bruno Lopez, Michel Tallon*

L'exploitation scientifique du VLTI a débuté en 2001 avec les mises en service progressive des instruments VINCI, MIDI et AMBER. MIDI, mis en fonction en 2002, a été le premier instrument d'interférométrie opérant en infrarouge moyen au VLTI. Décommissionné en mars 2015 pour permettre l'arrivée de MATISSE, il combinait 2 faisceaux et offrait deux résolutions spectrales dans la bande N. Le projet MIDI piloté par Christoph Leinert et Uwe Graser (MPIA) a apporté de nombreux résultats astrophysiques (485 communications et articles à referee), et a permis une avancée importante de l'état de l'art en instrumentation dans le domaine particulier de l'IR moyen.

MATISSE est une proposition d'instrument qui est née en concertation avec l'ESO à partir d'une idée alternative appelée APreS-MIDI. Suite au workshop d'avril 2005 sur les instruments de deuxième génération, le projet est entré dans une étude de phase A en juin 2006, mené par un consortium de plusieurs instituts européens ayant participé à la réalisation d'AMBER et de MIDI, et conduit par l'OCA (PI).

MATISSE offre deux nouvelles percées pour les recherches en cours : la possibilité de cartographie de l'environnement proche de différentes sources (e.g. disques de T Tauri et Ae/Be, objets massifs type Eta Car, AGB, environnement de poussière des B[e] et Wolf-Rayet, ...), ainsi que l'ouverture des bandes L et M en plus de la bande N qui était couverte par MIDI. Les deux sujets astrophysiques d'importance qui ont motivé le projet sont l'étude de la formation planétaire par l'étude des disques protoplanétaires et l'étude des noyaux actifs des galaxies les plus proches, sur lesquels il apportera des résultats nouveaux. L'instrument est très complémentaire d'ALMA et de SPHERE.

La recombinaison de 4 faisceaux permettra à MATISSE de produire des images et de lever les ambiguïtés dans l'interprétation des observations. C'est le cas par exemple pour les disques d'objets jeunes pour lesquels la courbe de visibilité fournie par MIDI peut contenir des signatures en apparence similaires mais d'origines différentes : présence d'un compagnon, sillon laissé par la formation d'une planète géante ou concentration de matière. Dans le cadre du projet, le MPIfR de Bonn a développé un logiciel de reconstruction d'image monochromatique, IRBIS. Mais il est encore nécessaire de développer un logiciel polychromatique.

Depuis la fin de la phase A en 2007, MATISSE devrait passer sa PAE (Preliminary Acceptance Europe) en novembre 2016, marquant la fin de la réalisation de l'instrument avant son envoi au Chili, pour une mise en service fin 2017. Pour le moment, il manque à GRAVITY le suiveur de franges lui permettant de couvrir tout son programme. Le projet GRA4MAT se met en place actuellement pour que MATISSE puisse utiliser le suiveur de franges de GRAVITY avec une magnitude limite de  $K \sim 7.5$ . Cela représente plus de 50 disques protoplanétaires observables avec les ATs autour des étoiles de masses intermédiaires (Herbig). L'objectif est de développer ensuite un suiveur de franges dédié qui offrira la possibilité d'atteindre des magnitudes  $K > 12$  avec les UTs, rendant possible le programme extragalactique.

## GRAVITY

*par Guy Perrin*

## A mettre à jour

GRAVITY a donné lieu à des développements instrumentaux pour la plupart originaux. La liste des développements à mettre au crédit des équipes françaises engagées (LESIA et IPAG avec une participation de l'ONERA) est donnée ici. La recombinaison des faisceaux est effectuée au moyen de recombinateurs d'optique intégrée (IPAG). Les faisceaux sont filtrés par fibres optiques monomodes en verres fluorés, les fibres sont également utilisées pour la compensation des différences de chemin optique différentielles entre les deux champs et pour le contrôle de la polarisation (LESIA). Les différences de marche sont stabilisées par un suiveur de franges doté de la capacité de contrôler les vibrations grâce à un contrôleur Kalman (LESIA).

Les autres responsabilités et contributions françaises sont :

- le logiciel de réduction des données
- l'étude système pour l'astrométrie et technique d'étalonnage
- l'étude système de l'optique adaptative et de son logiciel temps-réel
- le groupe scientifique.

Parmi les autres développements citons le système de métrologie original inventé et développé par le MPE qui permet de mesurer toutes les différences de marche à rebours depuis les points de recombinaison jusqu'au pupilles des télescopes.

Le projet a démarré en 2006. Il est actuellement en cours de mise en service (commissioning) depuis novembre 2015. Il devrait être offert au public à compter de septembre 2016.

## 5.3. Les instruments français sur CHARA : VEGA et JouFLU

### VEGA : interférométrie visible en production

*par Nicolas Nardetto*

L'instrument VEGA (Visible spEctroGraph and polArimeter) installé en septembre 2007 au foyer de l'interféromètre CHARA au Mont Wilson en Californie est issu du projet REGAIN de l'interféromètre GI2T. Le début de l'exploitation scientifique date de juillet 2008, les premières franges à 3 télescopes ont été enregistrées en octobre 2008 et les franges à 4 télescopes en octobre 2011. Depuis 2009, l'instrument est utilisé depuis une salle de télé-observation à distance installée initialement sur le site de Grasse, puis sur le site du Mont Gros et depuis août 2015, depuis les locaux du GI2T au plateau de Calern. Un système d'archivage est en place, il alimente une base de données de niveau L0 (information contextuelle) ainsi que les deux ordinateurs de traitement de données (Nice et Mont Wilson). Le pipeline réduit des données brutes jusqu'aux fichiers au standard oifits prêts pour l'analyse scientifique. L'instrument fonctionne en mode 3T de manière routinière. Les opérations de l'instrument relèvent d'un service d'observation SO2 de l'INSU depuis fin 2012 ; depuis l'été 2015 un ingénieur d'étude est en charge des opérations de l'instrument ; il est accompagné d'un IR en charge de l'ensemble du contrôle commande et d'un IE en charge de la préparation des données et de leur déploiement. Le pipeline est maintenu par l'équipe scientifique et l'aide d'un IR.

L'instrument est basé sur le principe des franges dispersées et opère dans le visible sur deux chambres spectroscopiques simultanées. La haute résolution spectrale ( $R=30000$ ) alliée à la haute résolution spatiale ( $< 1\text{mas}$ ) que permet CHARA avec ses grandes bases (jusqu'à 300m) lui donne des performances uniques ouvrant de nombreux programmes scientifiques autant sur les paramètres stellaires fondamentaux que sur l'étude des atmosphères et des environnements stellaires. CHARA (<http://www.chara.gsu.edu/>) construit par une équipe de Georgia State University (GSU) est un

réseau de 6 télescopes optiques de 1m abritant aujourd'hui dans son laboratoire focal 6 instruments, 4 infrarouges et 2 visibles, respectivement : CLASSIC, CLIMB, MIRC, JouFLU (ex-FLUOR), VEGA et PAVO.

L'instrument VEGA développé au sein du Laboratoire Lagrange regroupe une équipe de 15-20 personnes autour d'une trentaine de programmes scientifiques nationaux et internationaux. Plusieurs collaborations sont très actives avec l'IPAG, le CRAL, le groupe CHARA au Mont Wilson et à Atlanta, le groupe MIRC à Michigan, le groupe tchèque (Petr Harmanec) ainsi qu'avec le groupe lié au projet Araucaria (G. Pietrzynski, W. Gieren).

50 nuits par an (30% sur site, 70% à distance) sont ainsi assurées par l'équipe VEGA. Les accords passés entre le GSU (l'opérateur de CHARA) et l'Observatoire de Paris (pour FLUOR) d'une part, ainsi que l'Observatoire de la Côte d'Azur (pour VEGA) d'autre part, permettent à la communauté française d'accéder à du temps d'observation scientifique sur le réseau, quel que soit l'instrument demandé. Cet accès se fait via les groupes scientifiques des deux instruments.

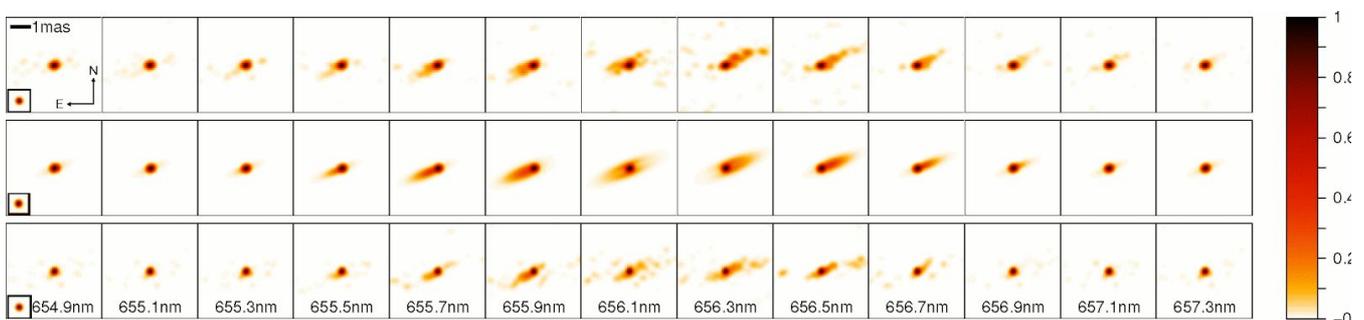


Figure 5.2 : en haut, images (6.4x6.4mas) obtenues sur l'étoile Be Phi Per avec VEGA pour différents canaux spectraux dans la raie Ha. Au milieu, modèle cinématique correspondant. En Bas, simulation d'observations à partir du modèle cinématique. Ces observations permettent l'étude géométrique et cinématique du disque en rotation autour de l'étoile.

VEGA/CHARA compte à ce jour 29 publications scientifiques (<http://www-n.oca.eu/vega/en/publications/index.htm>). Trois thèses ont été soutenues dans le cadre du groupe VEGA (O. Delaa en 2012, R. Ligi en 2013 et M. Challouf en 2015). La résolution angulaire de VEGA a permis des mesures de diamètres angulaires de l'ordre de 0.25 mas, jamais réalisées auparavant (Perraut et al. 2013, A&A 559, 21). Le groupe VEGA est également à l'origine de la première image chromatique de Phi Per (Mourard et al. 2015, A&A 577, 51).

Les développements principaux de ces 4 dernières années ont visé l'amélioration de la fiabilité et des performances de l'instrument. Il est important de citer ici les principales avancées :

- Modification des séparatrices tip/tilt – science dans le visible (50-50 à 85-15)
- Jouvence importante des deux détecteurs à comptage de photons : passage à 100Hz, suppression des overheads, sensibilité accrue des intensificateurs, centrage de photon amélioré
- Parallélisation du traitement temps réel pour amélioration très sensible des performances de détection et asservissement/cophasage des franges.
- Remplacement du système de visualisation des pupilles
- Remplacement du coating des miroirs du spectrographe ; remplacement de 4 miroirs de renvoi abimés par un ancien traitement.
- Systématisation des opérations VEGA avec un tracker infrarouge (CLIMB et/ou MIRC)
- Automatisation de la procédure de fin de nuit pour l'archivage. Alimentation de la base de données OIDB du JMMC

- Contribution aux améliorations d'ASPRO2 pour prise en compte des évolutions de VEGA et CHARA
- Travail de fond sur le pipeline de réduction de données et amélioration des routines de post-traitement.
- VEGA a aussi contribué de manière importante au développement du prototype FRIEND (tests initiaux caméra OCAM, coalignement/cophasage VEGA/CHARA important pour FRIEND).

## **JouFLU : haute résolution angulaire et haute dynamique**

*par Vincent Coudé du Foresto*

JouFLU (Jouvence FLUOR) est une évolution de l'unité de recombinaison interférométrique à fibres optiques monomodes développée au LESIA et installée sur l'interféromètre CHARA depuis 2002. L'ensemble FLUOR/CHARA est unique par sa capacité à réaliser des observations à très haute résolution angulaire (grâce à une base maximale de 350m) et à haute précision (0,2% rms). Il a ainsi permis des avancées importantes dans l'étude des étoiles et de leurs environnements, comme la découverte d'une enveloppe moléculaire autour de la plupart des Céphéides, et celle de poussières chaudes dans les environnements planétaires de certaines étoiles de la séquence principale.

Le projet JouFLU a démarré en 2011, motivé par la nécessité de faire évoluer l'instrument FLUOR pour qu'il puisse être pleinement intégré dans CHARA. En effet, auparavant FLUOR fonctionnait comme une entité autonome (un héritage de l'époque où l'instrument était installé sur IOTA, de 1996 à 2002), ce qui compliquait son interaction avec l'interféromètre (notamment au cours des évolutions de celui-ci) et empêchait de bénéficier de ses nouvelles fonctionnalités, comme la possibilité de faire observer deux instruments en simultané, de stabiliser les fluctuations de phase sur chaque télescope individuel par une optique adaptative et entre les pupilles par un suiveur de franges. Ces améliorations permettent d'envisager à terme des progrès considérables pour FLUOR, de l'ordre de 3 magnitudes en sensibilité et d'un facteur 5 en dynamique.

La mise en œuvre de JouFLU s'est poursuivie jusqu'en 2014 grâce aux actions suivantes :

- Refonte complète du banc optique :
  - Motorisation de toutes les fonctions nécessaires pour la commande à distance des alignements et des reconfigurations de l'instrument ;
  - Installation d'une voie de contrôle de la pupille ;
  - Mise en place d'un mode FTS (Fourier Transform Spectrometer) avec une unité de balayage de la ddm à grande course (50 mm).
- Réécriture complète du code de lecture de la caméra NICMOS afin d'augmenter le débit de lecture des données, permettant notamment l'acquisition sur le ciel d'interférogrammes dans plusieurs canaux spectraux simultanés ;
- Réécriture complète du code de contrôle de l'instrument, afin que celui-ci devienne interopérable avec le reste de CHARA ;
- Réécriture complète et vérification du pipeline de réduction des données ;
- Installation d'une station d'observation à distance (ROCMé) à Meudon.

L'exploitation scientifique de JouFLU a repris en 2014 avec notamment la poursuite du relevé des poussières exozodiacales chaudes (thèse de N. Scott en cotutelle soutenue en novembre 2015), sur un nombre de sources accru par rapport au relevé initial de FLUOR, et en revisitant les détections passées afin de mettre en évidence d'éventuelles variations temporelles. A moyen terme, il est prévu d'utiliser JouFLU pour des programmes en préparation aux missions spatiales de détection et/ou de caractérisation d'exoplanètes (CHEOPS, TESS, PLATO, ARIEL etc.).

## 5.4. Activités de R&D

Ce chapitre sur la R&D en interférométrie n'est pas exhaustif. Il manque par exemple les travaux en optique intégrée et en optique guidée. Parmi les divers travaux menés, nous avons sélectionné la présentation de quatre R&D significatives sur les 5 dernières années.

### Carlina, la voie des hypertélescopes

*par Michel Tallon, Hervé Le Coroller*

Un hypertélescope est une nouvelle architecture d'interféromètre proposée par Labeyrie (1996, A&AS 118, 517; Labeyrie et al. 2002, Proc. SPIE, 4838), fondée sur la combinaison sans ligne à retard d'un grand nombre de miroirs et sur la densification de pupille pour former directement une image. Il promet une grande sensibilité à haute résolution angulaire. La structure particulière de cette image (invariance par translation, champ, chromatisme) a été abondamment étudiée, mais il était nécessaire de tester la faisabilité d'une architecture de ce type et mettre à l'épreuve ses qualités. Cela a été l'objet de la R&D Carlina qui a mis en oeuvre pour la première fois un hypertélescope de 2002 à 2014. Notons que l'optique focale de Carlina peut accueillir n'importe quel type de recombineur (Le Coroller et al. 2015, A&A 573, A717): Fizeau, Michelson, réorganisation de pupille (densifié ou pas), utilisant des optiques fibrées, des optiques intégrées, etc.

L'architecture de Carlina repose sur un ensemble de miroirs ancrés au sol et phasés sur une sphère virtuelle créant un miroir géant "dilué", de sorte que, par construction, des franges d'interférences multiples sont formées au foyer pour un grand domaine du ciel, sans ligne à retard. Il faut alors amener l'instrumentation où se forment ces franges, suspendue à un ballon, à des poteaux ou au relief, en assurant sa mobilité. Cette architecture est comparable à celle du radio télescope d'Arecibo qui aurait une pupille diluée. Elle est considérée pour de grands interféromètres imageurs post-ELT.

L'interféromètre Carlina a été construit à l'OHP pour opérer dans le visible, en utilisant un ballon gonflé à l'hélium pour tendre la structure et soutenir deux nacelles, une nacelle focale à 36 m et une nacelle métrologique à 71m de haut. L'utilisation d'une grue érigée à 75m a été testée en 2013.

Au cours des travaux, plusieurs étapes importantes ont été franchies :

- La démonstration du guidage d'une étoile en 2004 (Le Coroller et al. 2004, A&A 426, 721), avec une nacelle suspendue à un ballon.
- La mise au point d'une métrologie innovante en 2012 (Le Coroller et al. 2012, A&A 539, 17), permettant la stabilisation à 100  $\mu\text{m}$  près du centre de courbure de la structure portée, tout en ramenant toute l'optique de métrologie au sol. Le dispositif a permis le phasage des miroirs au sol.
- L'acquisition des franges en septembre 2013 (Le Coroller et al. 2015, A&A 573, A717) sur deux miroirs (bases de 5 m). La mise au point d'un maintien particulier de la nacelle focale a permis d'obtenir les précisions nécessaires en terme de vitesse de suivi et de vibrations, comparables à celle d'une ligne à retard d'un interféromètre classique de base équivalente.

Au cours du projet, la maîtrise des vibrations a été particulièrement étudiée car elles constituent une limite qui doit être levée. Notamment, il a été montré que des vibrations à 0.2 Hz sont dues à des fréquences de résonance des cordes dans le vent, et non aux mouvements de la monture (grue ou ballon). Ces vibrations sont maintenant correctement modélisées et les modèles numériques validés

(Andersen et al 2014, OHP2013) permettent d'étudier les meilleures solutions parmi celles proposées. La disponibilité de ces outils résultent aussi de cette R&D.

Il est remarquable qu'une petite équipe (2-3 FPE en moyenne) ait pu mener une telle R&D avec des budgets modestes par rapport aux objectifs, notamment en considérant que des maquettes en échelle réduite et divers montages ont été testés au laboratoire, dans un processus itératif.

Pour atteindre la sensibilité ultime, la question du cophasage en temps réel d'un tel réseau reste ouverte. D'un point de vu mécanique, il faudra éliminer passivement les vibrations à très haute fréquence, trop rapides pour être corrigées par optique adaptative. D'un point de vu optique, le problème posé est plus difficile qu'un système d'optique adaptative sur un télescope de diamètre comparable, à cause de la dilution de la pupille. Des solutions ont été proposées (Nunez et al 2014, MNRAS 439, 1787), mais pas encore expérimentées.

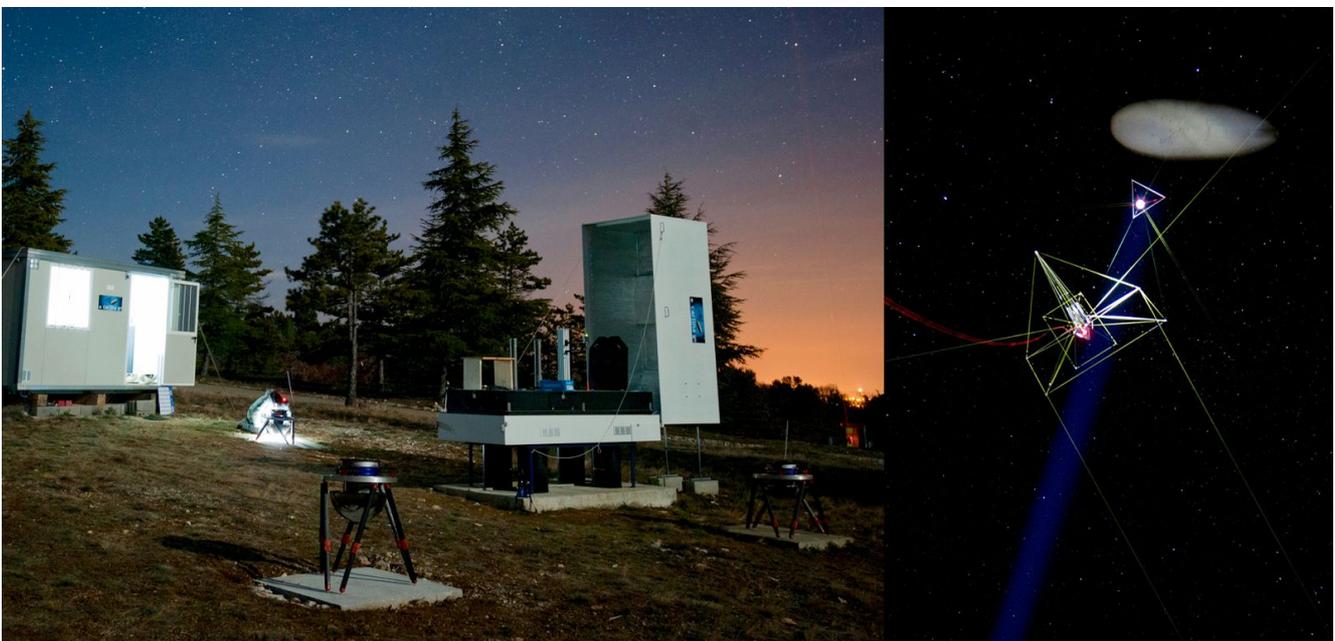


Figure 5.3 : L'expérience Carlina à l'Observatoire de Haute-Provence. A gauche, les trois miroirs primaires de Carlina (bases: 5m, 9m et 10m) sont encrés autour de la table de métrologie. A droite, la nacelle focale (à 35.5 m) et de métrologie (à 71 m) est portée par un ballon à hélium.

## FRIEND et CESAR : vers l'interférométrie visible de nouvelle génération

*par Philippe Bério*

Le contexte du projet **FRIEND** est la préparation d'une nouvelle génération d'instrument interférométrique opérant dans le visible et adapté à des réseaux de 4 à 6 télescopes de la classe 1m à 2m équipés de système d'optique adaptative (OA). Les deux grands réseaux interférométriques actuels (VLTI et CHARA) vont en effet évoluer dans les 2 ou 3 prochaines années en équipant leurs télescopes de 1.8m et 1m respectivement de systèmes d'OA. Ces OA vont permettre l'adaptation dans le visible du principe de filtrage spatial monomode par l'utilisation de fibres optiques dont l'efficacité sur l'amélioration des performances n'est plus à démontrer.

Dans ce contexte, le laboratoire LAGRANGE a développé un instrument démonstrateur appelé FRIEND. Cet instrument, installé depuis décembre 2014 au foyer de l'interféromètre CHARA au Mont Wilson en Californie, permet de recombinaison 3 télescopes au travers d'un étage de filtrage spatial par fibres optiques monomodes. Le développement et l'installation de cet instrument ont été financés par l'INSU (CSAA), par le BQR OCA (en 2014) et par les fonds FEDER du laboratoire LAGRANGE.

Les premières franges d'interférence ont été obtenues à 2 télescopes en décembre 2014 et à 3 télescopes en avril 2015. Une troisième campagne d'observations a été menée en juillet 2015. La figure 5.4 montre la densité spectrale moyenne des interférogrammes enregistrés en observant kappa Dra en mode 3 télescopes et l'autocorrélation des franges enregistrées en observant gamma Cas en mode 2 télescopes. L'ensemble de ces observations a permis de confirmer l'intérêt du concept et de valider les différentes technologies utilisées (filtrage spatial et caméra EMCCD). Néanmoins, un point dur qui limite actuellement les performances de FRIEND a été identifié : la biréfringence intrinsèque des fibres optiques monomodes utilisées engendre un déphasage entre les systèmes de franges dans les deux polarisations linéaires transmises, entraînant une dégradation du contraste instrumental qui se traduit par une perte de sensibilité de l'ordre de 2 magnitudes. Ce problème devrait être corrigé en 2016 par des retardateurs à cristaux liquides.

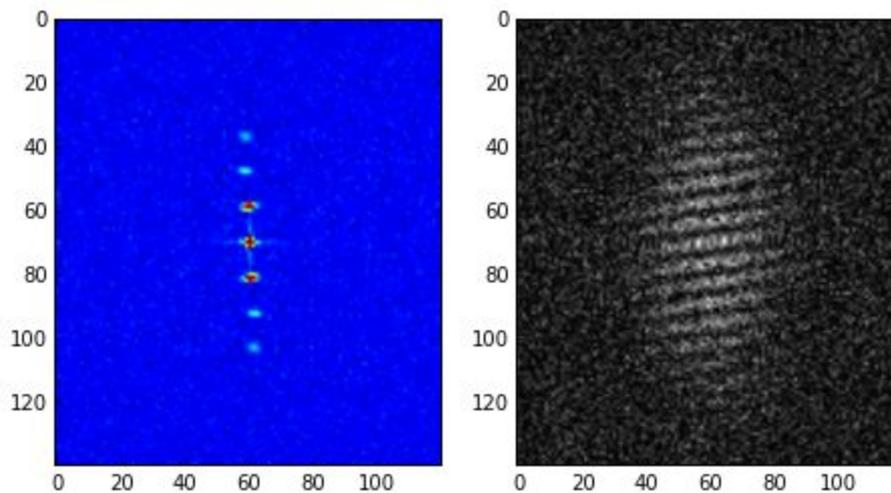


Figure 5.4 : A gauche, densité spectrale moyenne des interférogrammes enregistrés en observant kappa Dra en mode 3 télescopes. A droite, autocorrélation des franges enregistrées en observant gamma Cas en mode 2 télescopes.

Le projet **CESAR** vise l'étude de l'injection de la lumière collectée par un télescope équipé d'un système d'optique adaptative dans une fibre optique monomode dans le domaine des longueurs d'onde visible. Ce projet regroupe des équipes de l'ONERA, des laboratoires LAGRANGE, GEOAZUR (Observatoire de la Côte d'Azur) et CRAL (Observatoire de Lyon). L'équipe de l'ONERA impliquée dans ce projet s'intéresse notamment à cette étude dans le but de développer des liaisons optiques haut débit (>10Gbps) pour la transmission de données satellite-sol. L'intérêt du LAGRANGE et du CRAL concerne plutôt le filtrage spatial par fibre optique pour l'interférométrie stellaire longue base.

L'expérience utilise le système d'Optique Adaptative ODISSEE, développé par l'ONERA, réalisé en collaboration avec le laboratoire GéoAzur, et installé au foyer du télescope MEO de l'Observatoire de la Côte d'Azur. L'expérience permettra d'une part de confronter les modèles analytiques et les simulations numériques existantes aux mesures d'efficacité de couplage et d'autre part d'optimiser les lois de commande de l'OA afin de maximiser l'efficacité de couplage en fonction des conditions d'observation. Le premier run d'observations aura lieu en décembre 2015.

## ALOHA : simplifier l'architecture des futurs interféromètres kilométriques

par François Reynaud, Michel Tallon

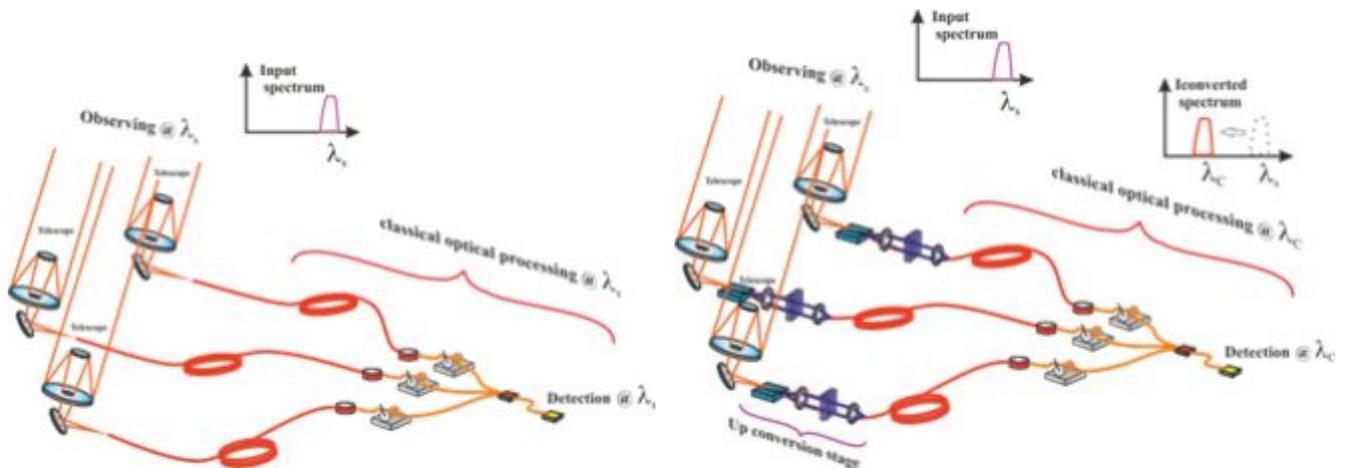


Figure 5.5 : À gauche, configuration classique d'un interféromètre à 3 télescopes où tout le train optique véhicule la même longueur d'onde observée. À droite, une conversion de fréquence sur chaque télescope permet de recombinaison dans les longueurs d'onde télécom des signaux reçus à plus grande longueur d'onde.

Les systèmes de recombinaison en interférométrie pour des bandes infrarouges moyens et lointains sont principalement réalisés en développant des composants et détecteurs dédiés. Il faut alors concevoir toute la chaîne de mesure (transport, lignes à retard, recombinaison et détection) dès lors que l'on souhaite explorer de nouvelles bandes spectrales. Dans bon nombre de cas, on se heurte à l'indisponibilité de composants adéquats ou à la limitation de leurs performances.

La solution explorée par la R&D ALOHA (Astronomical Light Optical Hybrid Analysis) est de décaler en fréquence le spectre des sources observées pour le placer dans un domaine où l'on bénéficie des composants télécoms existants ainsi que des détecteurs Si ou InGaAs très performants. Grâce aux performances inégalées des fibres dans la bande télécom (bande H), il est alors possible d'envisager des liaisons kilométriques entre télescopes ouvrant un domaine de résolution angulaire difficilement accessible avec les techniques classiques. Le coût de telles liaisons ne sera ainsi plus contraint par la difficulté de réaliser des fibres exotiques ou loin des standards télécoms. Engagé depuis plusieurs années, cet axe de recherche interdisciplinaire s'appuie sur la double compétence de l'équipe du XLIM (Limoges) en interférométrie et en optique non linéaire.

La stratégie suivie par ALOHA est la suivante :

- Travailler dans un premier temps dans les gammes de longueurs d'onde où l'effort technologique est le plus faible possible même si le bénéfice par rapport aux instruments classiques paraît moins marqué. Ainsi, l'ensemble des études de principe a été mené dans la bande H, autour de  $1,55 \mu\text{m}$ , en bénéficiant des technologies télécoms.
- Améliorer les propriétés des divers composants et tendre vers des longueurs d'ondes de plus en plus élevées. Cette seconde étape ouvre deux axes de recherche :
  - l'élargissement de la bande spectrale de conversion avec des sources multipompe

- la conversion de longueur d'onde dans le domaine 3-10  $\mu\text{m}$  en s'appuyant sur des collaborations avec l'Université de Paderborn (D), FEMTO ST, Thales R&T et l'institut Néel.

Depuis 2008, les étapes clés de cette R&D ont été les suivantes.

- Démonstration au laboratoire de la conservation du contraste des franges (Brustlein et al 2008, PRL 100, 153903) et de la clôture de phase (Ceus et al 2011, Opt. Ex. 10) après une conversion de fréquence, validant le principe de l'approche.
- Première conversion de fréquence de lumière stellaire, et mesure de sensibilité sur le ciel (Ceus et al 2012, MNRAS 427, L95).
- Démonstration au laboratoire de la mesure des contrastes et des clôtures en régime de faible flux (comptage de photon) (Ceus et al 2013, MNRAS 430, 1529).
- Première mise en évidence d'une compression spectrale par conversion de fréquence, en utilisant une source de pompe multi-longueur d'onde (Gomes et al 2013, Opt. Ex. 21, 3073).
- Première démonstration de mesure du contraste des franges sur une source thermique en comptage de photon (Gomes et al 2014, PRL 112, 143904).
- Analyse des aspect cohérents d'une conversion large bande utilisant une source de pompe multi-longueur d'onde (Darre et al 2015, Opt. Ex. sous presse).
- Premières franges d'interférence obtenues sur le ciel avec ALOHA sur CHARA en avril 2015, jusqu'à une magnitude 3 (1,5 nuit d'observation), après une installation et des tests de sensibilité sur CHARA en 2014.

Dans les 3 années qui viennent, les travaux auront pour objectifs d'analyser finement le fonctionnement d'ALOHA 1.55  $\mu\text{m}$  sur CHARA (photométrie, multipompe, optimisation traitement du signal en fonction de la turbulence et amélioration des composants) et d'étudier les processus de conversion de longueurs d'onde jusqu'à 10  $\mu\text{m}$ . Au fur et à mesure de ces études, nous veillerons à l'amélioration des composants et à l'élargissement de la bande spectrale observée par l'utilisation de pompes multi-longueur d'ondes. L'introduction de modulations sur la pompe permettra de basculer en mode spectroscopique sans l'adjonction d'aucun composant. Une étude dédiée aux lignes à retard permettra de bénéficier de la compression spectrale déjà mise en évidence avec les propriétés de congruence d'ordre des pompes. Cette dernière possibilité permettrait de minimiser les pertes en évitant de ressortir des fibres pour utiliser des lignes à retard dans l'air, comme c'est le cas actuellement.

## Augmenter la magnitude limite

*par Michel Tallon, Romain Petrov, Florentin Millour*

Comme énoncé précédemment, pousser l'interférométrie à sa sensibilité ultime est essentiel pour en maximiser le retour scientifique. Par exemple, l'absence du suiveur de franges initialement prévu pour MATISSE impose dans un premier temps à utiliser GRAVITY pour cette fonction, conduisant à une perte de sensibilité d'environ 3 magnitudes. Cette limite de sensibilité enlève environ 60% des AGN et 40% des objets jeunes du programme scientifique initial de MATISSE.

Les études en cours portent sur deux aspects couplés : 1/ optimiser les algorithmes de détection et de mesure du signal interférométrique, 2/ étudier de nouvelles architectures de suiveur de frange pour en maximiser la sensibilité.

Sur le premier aspect, le projet AMBER+, développé au Lagrange, a permis d'obtenir un gain de 3 magnitudes sur AMBER en appliquant en infrarouge l'approche utilisée dans le visible en comptage de photon (e.g. sur VEGA), fondée sur des mesures de densités spectrales à deux dimensions des

franges dispersées (Millour et al 2012 & 2014, rapports ESO). Elle a permis de résoudre la BLR de 3C273 (Petrov et al 2012, SPIE 8445, 84450W). Cette approche permet d'intégrer le signal même perturbé par la turbulence atmosphérique. Il est possible de gagner encore en sensibilité en minimisant le nombre de pixels nécessaires : c'est l'objet du projet OASIS qui propose une modification mineure d'AMBER.

D'autre part, dans le cadre du projet POLCA (*cf.* §8.1), un travail de fond a été initié au CRAL pour reposer le problème de la détection de franges, en essayant d'atteindre la limite théorique par approche inverse (Soulez et al 2014, SPIE 9146, 91462Y). En utilisant un modèle physique des franges dispersées, une méthode d'optimisation globale minimisant les erreurs de cophasage entre deux poses successives, un gain de 2.5 magnitude a été obtenu sur des données simulées d'AMBER en bande H. Le travail doit être poursuivi pour proposer de nouvelles observables, mieux adaptées à la reconstruction d'image multi-spectrale. Ces travaux sont applicables à la fois à la mesure elle-même et à la stabilisation des franges dans un suiveur de frange.

En ce qui concerne le second aspect, les suiveurs de franges, les innovations au niveau des algorithmes leur sont directement applicable, que ce soit pour le cophasage (stabiliser les franges à une fraction de frange près) ou le cohérencage (maintenir les franges dans leur domaine de cohérence). L'intérêt d'un suiveur de franges est de pouvoir exploiter un autre signal que celui utilisé pour les observations : par exemple le suiveur FINITO utilise la bande H pendant qu'AMBER acquiert en bande K, ou le suiveur de GRAVITY utilise une étoile de référence voisine de l'objet observé, ou encore, sur CHARA, l'instrument CLIMB stabilise les franges en K pendant que VEGA acquiert dans le visible. La méthode permet l'observation de flux faibles (e.g. bandes d'absorption) ou de contrastes faibles (objet résolu dans la bande observée).

De nouveaux concepts doivent néanmoins être trouvés pour stabiliser les franges d'un nombre grandissant de télescopes, tout en maximisant la sensibilité. La proposition du suiveur de frange hiérarchique du Lagrange répond à ce paradoxe (Petrov et al 2014, SPIE 9146, 91462P). Après une étude par simulations, ce concept doit maintenant être validé en laboratoire. L'enjeu de cette R&D est de proposer à court terme un suiveur de frange qui redonnera à MATISSE ces performances ultimes.

## **5.5. L'interférométrie dans les 5 ans qui viennent**

*par Romain Petrov, Michel Tallon, Gilles Duvert, David Mouillet*

La France a grandement contribué financièrement et humainement depuis une quinzaine d'années au développement de l'interférométrie optique, que ce soit à l'ESO/VLTI ou sur CHARA. Nous avons maintenant le recul d'une dizaine d'années d'exploitation de la première génération d'instruments au VLTI (VINCI, puis MIDI, AMBER et PIONIER) et sur CHARA (JouFLU et VEGA). La prochaine période voit l'arrivée de GRAVITY et MATISSE sur le VLTI, eux aussi largement financés par la communauté, avec un nouveau potentiel, en particulier en capacité d'imagerie. Dans ce contexte, la volonté est d'optimiser ces moyens. Trois axes sont proposés : l'élargissement de la communauté qui exploite ces moyens, un accompagnement instrumental et des progrès en traitement du signal pour en maximiser les performances.

### **Ouvrir largement l'interférométrie à la communauté**

La mise en place de "noeuds d'expertise en interférométrie" dans une dynamique comparable à celle qui a conduit ALMA à mettre en place les Alma Regional Centers (ARCs) est une nécessité. L'objectif principal est de rendre les interféromètres optiques plus accessibles et élargir plus

rapidement la communauté des utilisateurs. Ce service soutiendrait au mieux l'exploitation la plus large possible de GRAVITY et MATISSE. Mais il ne faut pas le limiter au VLTI, et inclure aussi les instruments du réseau CHARA auxquels nous avons accès (VEGA, JouFLU, etc.), en relation avec les services d'observation associés.

À court terme, l'interférométrie devrait produire plus d'images et les efforts en traitement du signal devrait se traduire par une augmentation continue de la sensibilité. L'usage de l'interférométrie est donc appelé à s'étendre. Mais, en l'état de l'art, les outils de traitement nécessitent un apprentissage et, au moins pour les néophytes, une certaine validation par des experts. Le temps nécessaire pour s'approprier ces méthodes devrait être significativement raccourci par ces noeuds d'expertise.

Ce service devrait être porté par le JMMC qui a tous les outils et le savoir faire pour cela. Il n'y aurait probablement pas un seul noeud, mais plusieurs, à organiser dans le réseau des laboratoires du JMMC (IPAG, LAGRANGE, LESIA, CRAL, ONERA). L'IPAG et le LAGRANGE ont déjà annoncé leur intention de mettre en place un noeud.

Les objectifs de ces noeuds seraient :

- une aide personnalisée (“face to face”) à l'écriture de demandes de temps et à l'utilisation des logiciels de préparation d'observation ;
- une aide personnalisée (“face to face”) à la réduction de données ;
- une aide à la recherche de données (“Data Mining”) en relation avec des besoins scientifiques ne nécessitant pas forcément de nouvelles observations ;
- l'organisation de formations aux méthodes et outils d'observation, de dépouillement de données et d'interprétation des observables interférométriques.

De nombreuses questions restent ouvertes (principes de fonctionnement, moyens, interface avec l'ESO, etc.). Le rôle de l'ASHRA sera de faire en sorte que ce moyen se mette effectivement en place.

### **Du court terme au long terme**

Au-delà de l'enjeu de l'ouverture vaste et efficace à une large communauté d'utilisateurs, les années à venir sont riches de défis instrumentaux, à court terme, et dans une perspective à plus long terme.

Sur de courtes échelles de temps, les premiers tests sur le ciel commencent pour l'instrument GRAVITY. Cette étape suivra prochainement pour MATISSE. Les premiers résultats sont très encourageants mais ils ne doivent pas faire oublier ou sous-estimer les actions qui en découlent immédiatement. Il faut s'attendre à des enseignements nombreux et complexes : pour couvrir dans le détail les actions nécessaires à l'optimisation de ces instruments, obtenir tout le potentiel (notion de “learning curve”) d'abord, mais aussi simplement pour comprendre et caractériser la nature et les propriétés des limitations. Cette phase est essentielle pour ces instruments eux-mêmes mais aussi pour préparer l'avenir.

Immédiatement après, des développements sont d'ores et déjà identifiés. En particulier, un enjeu important concerne la sensibilité, critique en particulier pour MATISSE, pour pouvoir utiliser plus massivement l'infrastructure (avec les ATs et non pas seulement les UTs), et pour couvrir une variété de cibles intéressantes. Ce besoin se reporte sur le module clé de suiveur de frange, à pousser en termes de précision et d'efficacité sur l'utilisation des photons disponibles dans le volume de cohérence.

A plus long terme, et sur la base des enseignements obtenus avec ces instruments de 2e génération, les besoins scientifiques s'ouvriront encore, avec une sensibilité accrue, des capacités d'imagerie (nombre de lignes de base plus nombreuses) plus efficaces, une meilleure résolution (plus courtes longueurs d'onde et/ou ligne de base plus longues), et des mesures plus précises (en particulier pour

l'accès à des structures à grand contraste). Cette ouverture demande un travail important de mise en priorité et en calendrier de ces objectifs, et une coordination avec les efforts nécessaires en amont pour la R&D : au niveau de composants, travail théorique sur les concepts, démonstrateurs. La traduction en instrument pourra se faire ensuite sous forme d'amélioration des instruments existants, par la possibilité d'instruments de nouvelle génération sur les infrastructures existantes, ou encore, à plus long terme, sur de nouvelles infrastructures (PFI). Une réflexion sur cette organisation et la définition de feuille de route est à l'oeuvre au niveau international, avec par exemple au niveau européen le travail du groupe EII, ou un exercice de prospective au sein de l'ESO, avec aussi au-delà du périmètre européen, la concertation dans la perspective PFI. Le rôle de l'ASHRA est important dans ce contexte, avec l'animation de la communauté française (utilisateurs et développeurs) et l'identification des choix prioritaires, avec l'objectif de porter cette opinion et de la faire entendre, avec aussi une mise en priorité cohérente des efforts de R&D.

## 6. Thématique Optique Adaptative

Dans les grandes lignes, l'Optique Adaptative (OA) en France s'est articulée autour de la fin de la réalisation de SAXO (l'optique adaptative de SPHERE) et sa mise sur le ciel, et de la phase préparatoire aux optiques adaptatives de l'E-ELT. Ces deux points sont présentés dans la partie développement instrumental.

Cette phase préparatoire de l'E-ELT en OA, entre la fin des études de phases A (2010) et le début des travaux de phases B (2016), a vu une forte activité de R&D, notamment pour la mise en oeuvre de nouveaux analyseurs de surface d'onde (pyramide, LIFT, Mach-Zhender), de nouvelles approches pour la commande (Learn&Apply, FrIM, LQG, ETKF) ou encore pour le développement des outils de simulations et des calculateurs temps réel. Dans les travaux de R&D, CANARY a occupé une place centrale pour expérimenter la tomographie atmosphérique sur le ciel, en visant en particulier l'OA multi-objet en préparation à l'instrument MOSAIC. Cette R&D est synthétisée dans la partie suivante.

Enfin, dans la dernière partie, nous donnons quelques éléments pour les 5 ans à venir.

### 6.1. Développement instrumental : SAXO au coeur de SPHERE

*par Jean-François Sauvage, Michel Tallon*

Installé sur le VLT en mai 2014, SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research) est ouvert à la communauté depuis début 2015. Comme le montre la figure 6.1, le système associe une optique adaptative, SAXO, et des coronographes qui alimentent 3 instruments :

- IRDIS, caméra bandes Y, J, H et K, fournissant des images simultanément dans 2 bandes spectrales ou 2 polarisations, et un mode spectroscopie longue fente basse et moyenne résolution ;
- IFS, un spectrographe intégral de champ produisant un cube de 30 canaux spectraux en bande H ;
- ZIMPOL, caméra visible produisant des images simultanément dans 2 polarisations.

SPHERE atteint des contrastes typiques de  $10^{-6}$  à 0.5" de l'étoile. Pour cela, SPHERE combine SAXO, l'OA la plus performante jamais réalisée sur un télescope de 8m, des coronographes résultants des R&D très actives des années 2000, et un traitement du signal optimisé. Ce dernier point a eu une influence forte sur le choix des trois méthodes d'acquisition qui offrent toutes le moyen d'un traitement "différentiel" double ou multi-canaux, permettant de supprimer au mieux les résidus stellaires dans le champ. Cette approche se traduit jusqu'aux procédures d'observation et fait de SPHERE un instrument particulièrement complexe qui a nécessité plus de 3 ans de tests exhaustifs en Europe (performances ultimes, robustesse, opérabilité), puis 4 mois de remise en route au Chili.

SPHERE a été conçu et réalisé par un consortium européen piloté par l'IPAG et comprenant l'ONERA, le LAM, le LESIA, le laboratoire Lagrange ainsi que des instituts allemands, italiens, suisses et néerlandais, en collaboration avec l'ESO.

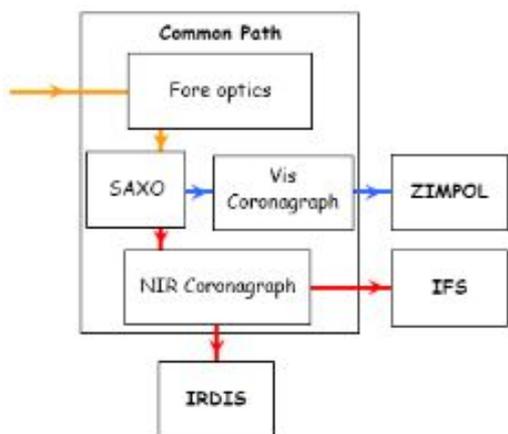


Figure 6.1 : Architecture de SPHERE combinant l'optique adaptative SAXO aux autres sous-systèmes. A droite, SPHERE au foyer du VLT.

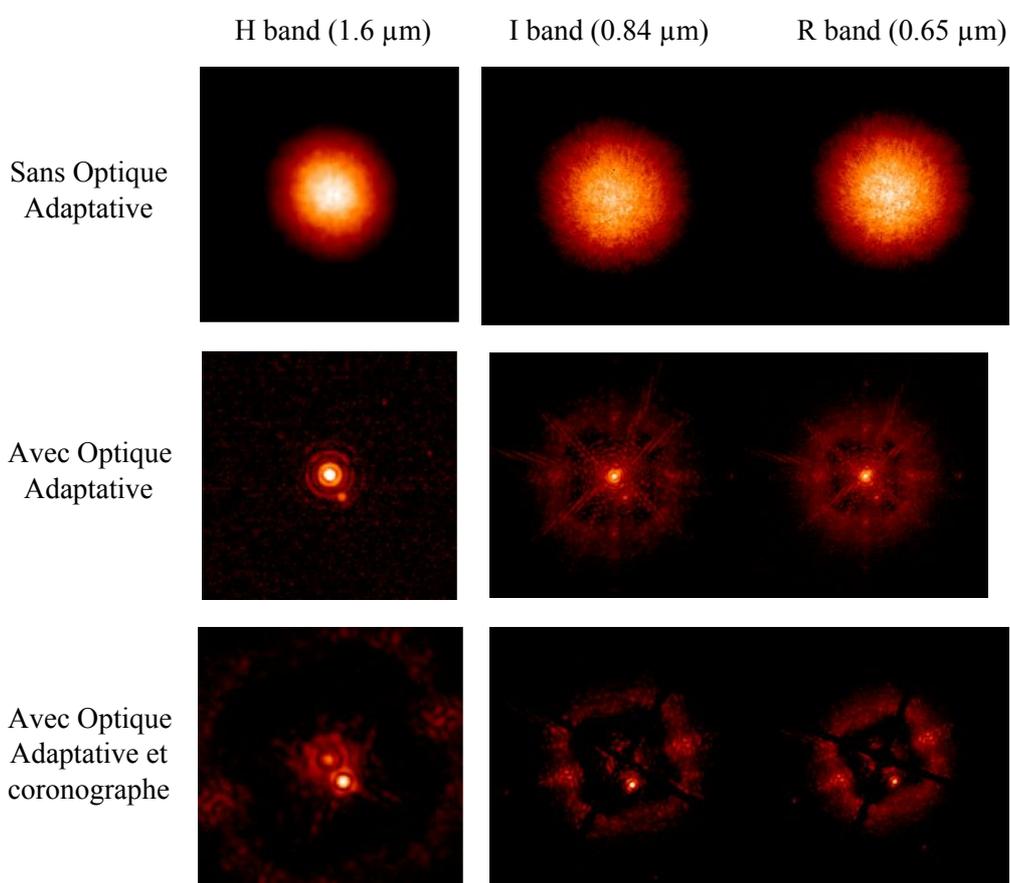


Figure 6.2: Illustration des différents étages de corrections de SPHERE. De haut en bas : images non corrigées, corrigées par OA et images derrière le coronographe. De droite à gauche : trois bandes spectrales H, I et R. Le rapport de Strehl en H est supérieur à 90% et la diffraction atteinte en I et R (soit moins de 20 mas dans le dernier cas).

En produisant des rapports de Strehl supérieurs à 90% en bande H, SAXO minimise les résidus stellaires dans le champ autour de l'étoile étudiée (qui sert aussi d'étoile guide), ce qui est essentiel à SPHERE. Pour atteindre ces performances, SAXO rassemble un certain nombre d'avancées par rapport aux systèmes précédents, notamment :

- L'optique déformable est plus rapide et présente plus d'actionneurs et plus de précision : le miroir déformable de 1377 actionneurs à 1.2 kHz (CILAS) est associé à un miroir de pointage rapide et de grande dimension (50 mm à 800 Hz, observatoire de Paris) et à un miroir torique actif compensant les aberrations lentement variables (LAM).
- L'analyse de surface d'onde a gagné en précision par l'utilisation d'un filtrage spatial optique qui permet un élargissement du champ corrigé dans l'image, en sensibilité (nouveaux détecteurs) et en robustesse (nouveaux algorithmes d'extraction des mesures).
- Le calcul des commandes (calculateur SPARTA de l'ESO) est plus rapide (retard inférieur à 80  $\mu$ s), et compense par filtrage de Kalman jusqu'à 12 pics de vibrations entre 10 et 300 Hz, réduisant le bouger résiduel de l'image à moins que 2 mas, ce qui est critique pour les coronographes. Ce dernier point est un retour d'expérience de NAOS.

Outre l'optimisation de ces points "classiques" en OA, SAXO introduit de nouvelles fonctionnalités qui visent la stabilité globale de l'ensemble de l'instrument. En particulier :

- Une boucle de contrôle fonctionnant à 1 Hz au plus près du coronographe stabilise l'image à 0.5 mas (un centième de son diamètre en bande H).
- La position de l'image de la pupille est maintenue à 2 pour mille de son diamètre pour compenser les dérives du télescope.

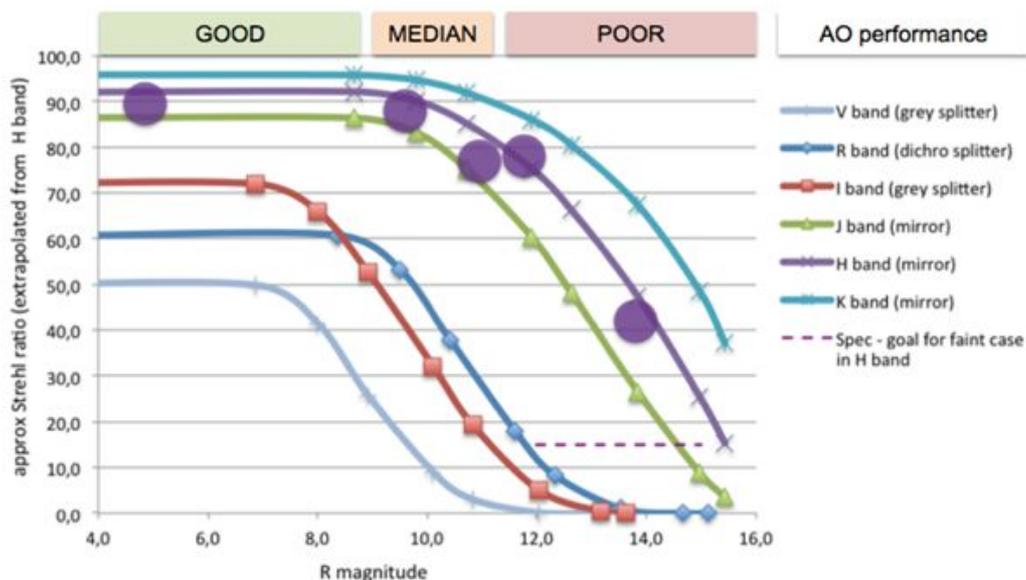


Figure 6.3 : Performances de SAXO mesurées au laboratoire (courbes) et sur le ciel (points). Elles dépassent significativement la spécification en faible flux (trait pointillé). Au laboratoire, le seeing est optiquement simulé à 0.85 arcsec (à 0.5 microns).

L'ensemble de ces fonctionnalités produit des performances exceptionnelles, meilleures qu'attendues en sensibilité (fig. 6.3). On notera aussi les performances remarquables dans le visible. De plus, SAXO a été dimensionné et réalisé pour être aussi automatique que possible, c'est-à-dire qu'il s'optimise en utilisant ses données internes sans intervention extérieure. Dans le même esprit, les processus d'étalonnage et de vérification des performances sont complètement automatiques. Ainsi

SAXO, et plus généralement SPHERE, peut être opéré par un non spécialiste sans aucune perte en performance.

Dans les prochaines années SPHERE va sûrement apporter des percées significatives à la formation et l'évolution des systèmes planétaires. Mais cet instrument est aussi un précurseur pour l'E-ELT : l'expérience acquise sur SPHERE, tant sur le dimensionnement que sur son opération, sera la base sur laquelle les futurs instruments seront bâtis.

## 6.2. Développement instrumental : l'E-ELT et son instrumentation

*par Gérard Rousset*

La période couverte par ce rapport porte sur une phase transitoire assez longue et pleine d'incertitudes pour l'instrumentation de l'E-ELT du fait du retard dans la décision de lancement du projet de télescope suite à l'engagement non finalisé du Brésil. Le feu vert du projet a finalement été donné par le Conseil de l'ESO à la fin de 2014. Le télescope devrait voir sa première lumière en 2024.

Suite aux 11 études de phase A d'instruments qui se sont terminées en 2010, l'ESO a proposé et mis en place le plan d'instrumentation suivant.

**1- Quatre instruments de première génération** entrent en 2015 en Phase B sur la base des anciennes phases A et de cas scientifiques revisités :

- ELT CAM (MICADO) : une caméra proche IR (J – K) à la limite de diffraction du télescope ayant un champ proche de  $1' \times 1'$  avec des capacités de imagerie spectrale et de spectroscopie à fente. Cette caméra sera installée en première lumière scientifique avec un système de SCAO (optique adaptative sur l'axe sur étoile naturelle) en attendant le module MAORY. Le consortium est mené par le MPE à Garching et inclut les laboratoires INSU suivants : LESIA responsable de la SCAO avec des contributions du GEPI et de l'IPAG.

- ELT CAM (MAORY) : c'est le système d'optique adaptative final pour MICADO de type MCAO afin d'obtenir une correction sur tout le champ de vue de 1 minute d'arc. Ce système inclut deux miroirs déformables conjugués en altitude en plus de M4 et M5, six étoiles lasers (LGS) et trois étoiles naturelles. Le consortium est mené par l'observatoire de Bologne et inclut un laboratoire INSU l'IPAG, en charge des analyseurs sur LGS. Le LESIA collabore aussi avec ce consortium pour l'inclusion du mode SCAO dans MAORY.

- ELT IFU (HARMONI) : spectrographe à champ intégral visible et proche IR (0,47 à 2,45 microns) offrant une résolution spectrale variant de 500 à 20000 et un échantillonnage spatial pouvant atteindre la limite de diffraction du télescope. L'échantillonnage spatial le plus grossier conduit à un champ maximum de  $6'' \times 9''$ . Ce spectrographe sera installé en première lumière scientifique avec un système de SCAO en attendant le module de LTAO. Le consortium est mené par l'Université d'Oxford et inclut les laboratoires INSU suivants : CRAL, LAM, IPAG et l'ONERA. L'ONERA/LAM est en charge de la SCAO.

- ELT IFU (module LTAO) : c'est le système d'optique adaptative final pour HARMONI de type tomographie laser afin d'obtenir une bonne correction sur le centre du champ. Une phase A est lancé par l'ESO en 2015 auprès du consortium HARMONI en parallèle de la phase B de l'instrument. Cette étude est principalement menée par l'ONERA et le LAM.

- ELT MIR (METIS) : caméra d'imagerie et spectrographe moyen IR (L – N) à la limite de diffraction du télescope sur un champ de  $11'' \times 11''$ . Cet instrument sera installé en première lumière avec un

module de SCAO. Le consortium est mené par NOVA (NL) et inclut le CEA Saclay comme partenaire français.

**2- Quatre instruments de deuxième génération** qui devront pour les deux premiers refaire une phase A à partir de 2016 :

- ELT MOS (MOSAIC) : il s'agit du spectrographe multi-objet à champ intégral équipé d'un mode haute résolution spatiale nécessitant une correction par optique adaptative multi-objet (MOAO) et d'un mode haut multiplex à faible résolution spatiale nécessitant uniquement une correction de la couche au sol (GLAO). Le consortium est mené par le GEPI avec les contributions sur l'OA par les laboratoires LESIA, LAM et ONERA en collaboration avec l'Université de Durham et l'observatoire de Rome. L'IRAP est aussi impliqué dans le projet.

- ELT HIRES : Il s'agit du spectrographe à très haute résolution spectrale (pouvant aller jusqu'à 100000) qui pourrait couvrir des domaines spectraux allant de l'ultra violet au proche IR en K. Il résulte d'une remise à plat des Phases A de Codex et Simple. Il pourrait nécessiter l'usage de modes SCAO et LTAO. Les équipes HRA françaises ne sont pas directement concernées à ce jour par cet instrument.

- ELT 6 : pour une proposition ouverte à la communauté.

- ELT PCS : cet instrument sous responsabilité ESO/IPAG est pour l'instant sans date précise de programmation du fait de l'importante R&D à conduire pour le rendre faisable. L'ESO a prévu de dégager un budget pour cela.

### **6.3. Activités de R&D : CANARY pionnier de l'OA multi-objet**

*par Eric Gendron*

#### Historique

Dans les années 2000 est né un nouveau concept à l'observatoire de Paris : l'optique adaptative multi-objet, fusion de l'optique adaptative et des spectrographes multi-objet (MOS). La thématique visée est l'étude des galaxies primordiales à  $z$  élevé. Le défi en OA est de taille: le champ exploré par un spectrographe multi-objet est d'un facteur 20 à 30 fois supérieur au champ d'une optique adaptative classique, et dépasse largement celui de la MCAO. L'idée est alors la suivante: 1) utiliser toutes les étoiles brillantes du champ pour une analyse de surface d'onde multi-directions appuyée par la tomographie pour déduire la correction à apporter dans chacune des directions des galaxies et 2) segmenter le champ en autant de minuscules sous-champs qu'il y a de galaxies et corriger chacune d'entre elles par un miroir déformable. Ce dernier est piloté en boucle ouverte, car la segmentation du champ interdit alors la boucle de rétroaction entre le miroir et l'analyseur. Ce fonctionnement en boucle ouverte est le prix à payer pour l'accès à un champ gigantesque, limité seulement par celui du télescope.

Présenté à un colloque en 2001, le concept (FALCON) est jugé trop innovant. Mais il est repris et poussé en avant aux États-Unis, où il vient opportunément fournir une application de premier plan aux recherches du LAO (D. Gavel) sur les micro-miroirs déformables. C'est là, vers 2003, que naît l'acronyme MOAO (Multi-Object AO). Les Américains la proposent pour l'instrumentation du TMT en 2004 –avant d'abandonner pour raisons budgétaires. Le concept est alors repris en Europe, dans des études d'instruments pour OWL tels que MOMFIS (France) et MOMSI (UK), lesquels finissent par fusionner, sous la pression de l'ESO, en EAGLE (PI LAM, phase A entre 2007 et 2010, spectro IR multi-objets à champ intégral).

Cependant le concept de MOAO, jamais testé sur le ciel, fait peur à la communauté OA, et pourrait être rejeté par l'ESO pour cause de jeunesse excessive du concept. Le consortium décide alors de réaliser un prototype, CANARY, favorisé d'une part par le télescope William Herschel (WHT, La Palma, Canaries) qui vient d'être proposé à la communauté internationale par l'Université de Durham comme plate-forme de R&D, et d'autre part par les travaux en MOAO pour FALCON sur le banc SÉSAME à l'observatoire de Paris, les 2 équipes étant partenaires au sein du consortium EAGLE.

### Le projet CANARY

L'université de Durham et l'observatoire de Paris sont les PI de CANARY, aux côtés de l'UK-ATC, l'ING, le LAM, et dans les phases suivantes du projet l'ONERA et l'Institut d'Optique. Le projet est divisé en phases de complexités croissantes pour venir, en 2015, simuler une voie de MOAO constituée de 2 étages. Le premier étage simule la correction par le miroir M4 du télescope, en boucle **fermée** sur 3 analyseurs à étoiles naturelles déplaçables dans le champ, et 4 analyseurs laser Rayleigh (13 à 21 km), avec un miroir à 52 actionneurs (CILAS). Le deuxième étage, en cascade, s'appuie sur les mesures du premier pour piloter en boucle **ouverte** le miroir de MOAO à 241 actionneurs (ALPAO), lequel est tenu en forme par un analyseur interne au banc (*figure sensor*). L'ensemble est complété par une caméra d'acquisition du champ, et un simulateur de télescope multi-étoiles naturelles et lasers pour l'intégration et les tests du système.

Le but de CANARY est une démonstration technique. Les objets observés sont des quadruplets d'étoiles (1 centrale, 3 hors-axes plus ou moins equi-réparties autour à environ 1 arcminute). L'étoile centrale est l'objet cible, observé en H par une caméra IR, et un analyseur espion (*truth sensor*) qui ne prend pas part à la commande mais se destine aux diagnostics du système, à l'évaluation détaillée de ses performances, et aux calibrations. CANARY totalise 10 analyseurs de surface d'onde. Démarré en 2007 dans un mode "fast-track project", CANARY délivre les premières images corrigées en 2010, avec 1 seul étage, sur 3 étoiles naturelles seulement, en boucle ouverte. Les 5 ans suivant seront nécessaires pour obtenir en Juillet 2015 les premières images de MOAO en mode final avec 7 analyseurs (dont 4 lasers) et woofers-tweeters, tout en ayant passé par une démonstration de la LTAO en 2014, et une démonstration astrophysique en 2013 sur des noyaux de galaxies.

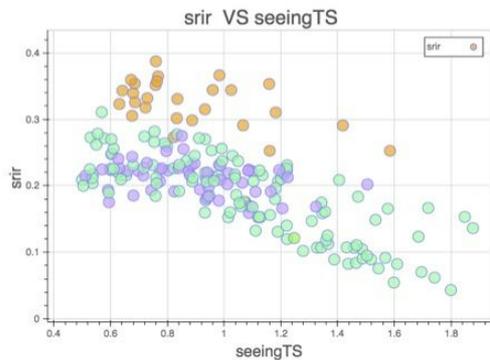
Ce n'est pas seulement la MOAO que CANARY a démontré, puisque pour atteindre ce but il fallait en traverser beaucoup d'autres. CANARY a démontré, au cours de ces 5 années:

- la tomographie, avec reconstruteur tomographique optimal MMSE, en LTAO et MOAO
- le contrôle en boucle ouverte pure (sur miroir piezo-stack)
- le contrôle en boucle ouverte avec *figure sensor*
- le contrôle optimal avec NGS et LGS, en LTAO et MOAO
- le contrôle en mode woofers-tweeters tel qu'on le souhaite sur l'E-ELT.

Les techniques appliquées sur CANARY sont applicables au cas de l'E-ELT.

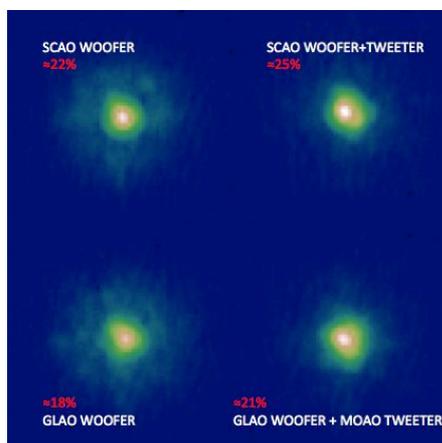
### Les résultats

L'opération de CANARY sur le ciel génère toute la nuit des centaines de fichiers de mesure, avec un rendement digne d'un instrument de production astrophysique. Des scripts automatiques permettent de comparer les modes de fonctionnement en les alternant, d'archiver les données, et les pré-traiter au vol via un pipeline de réduction adapté.



Des images en mode SCAO (AO classique) sont acquises pour permettre de fixer la référence de la limite supérieure ultime de la correction. Le graphe ci-contre montre les rapports de Strehl en bande H en fonction du seeing, en SCAO (orange), LTAO (vert, correction en mode tomographique sur axe) et MOAO double étage (violet) obtenus au cours d'une nuit en Juin 2015, qui montre le nombre de points acquis.

Un exemple de PSFs obtenu en Juin 2015 est exposé ci-dessous :



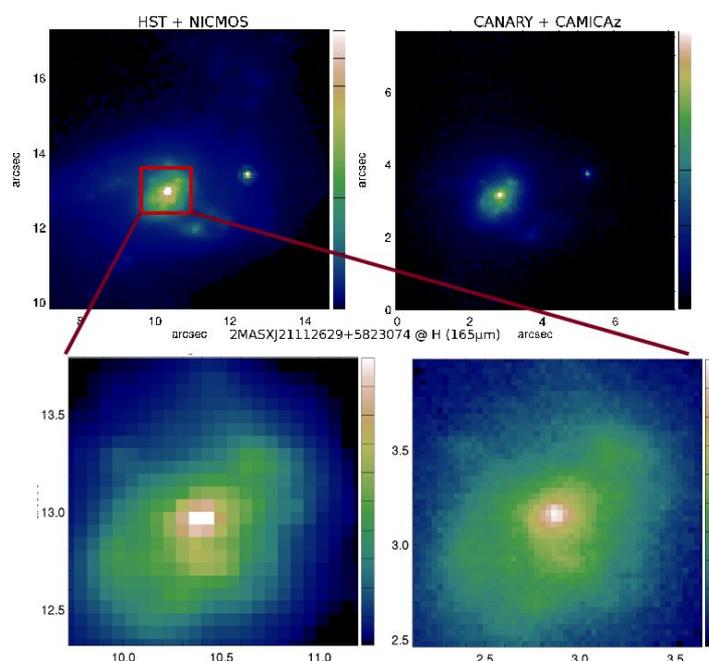
Deux images supérieures : la limite ultime de la SCAO.

Deux images inférieures: les modes tomographiques.

Gauche : seul le premier étage fonctionne.

Droite : Les deux étages fonctionnent.

On constate, de gauche à droite dans tous les cas, l'amélioration imputable au 2ième étage de correction (tweeter en boucle ouverte). La re-concentration des speckles périphériques vers le coeur est notable, signe de l'efficacité du tweeter, et preuve de l'efficacité de la correction tomographique sur les hautes fréquences spatiales.



Ci-contre : Exemple de correction comparée sur un noyau de galaxie, entre une image HST (gauche) et CANARY (droite) obtenu en Juillet 2013, dans un mode MOAO pur, tomographique, à un seul étage, avec 4 étoiles laser et 1 étoile naturelle de tilt à 50". Temps de pose 900s, bande H.

Ces exemples illustrent les capacités de CANARY de façon visuelle. Pourtant, le véritable apport de CANARY est ailleurs: pour chaque point de mesure (image IR de 20 à 30s de pose + fichiers de

données de front d'onde associés), une décomposition en budget d'erreur peut être effectuée, de façon à être comparée aux valeurs issues de simulations numériques. Le grand nombre de fichiers permet un traitement statistique.

## 6.4. R&D en analyse de surface d'onde

*par Michel Tallon, Thierry Fusco, Maud Langlois*

Plusieurs urgences réclament des progrès en analyse de surface d'onde (ASO) et tirent les développements actuels, particulièrement actifs ces 5 dernières années dans ce domaine :

- Le mode OA classique (dit "SCAO") maintenant adopté sur les instruments de première lumière de l'E-ELT nécessite la recherche de la meilleure sensibilité possible mais sur un télescope beaucoup plus grand.
- L'utilisation des étoiles laser sur l'E-ELT est affecté par le phénomène d'élongation, et doit être complétée par une ASO sur des sources naturelles, ASO que l'on souhaite la plus sensible possible car elle fixe la magnitude limite et la proportion du ciel observable.
- En haute dynamique, il faut trouver des méthodes d'analyse qui peuvent se mettre à l'échelle de l'E-ELT tout en étant plus précises et plus rapides.

Pour l'ASO à inclure dans les instruments de première lumière, l'objectif est la recherche de méthodes les plus sensibles possibles sur les détecteurs les plus petits possibles. Le LAM s'est engagé dans le développement d'un banc autour de "l'analyseur à pyramide", plus économe en surface de détecteur et qui a montré d'excellentes performances sur le LBT. C'est un analyseur ayant un comportement non-linéaire qui demande une acquisition de savoir faire. Ces travaux ont récemment débouché sur la proposition d'une modification de cet analyseur, "l'analyseur à pyramide aplatie" (figure 6.4) qui semble fournir une meilleure précision sur une plus petite surface de détection (Fauvarque et al [2015OptL...40.3528F](#)). Toujours concernant l'analyseur pyramide, le LESIA travaille actuellement sur un prototypage dans le cadre du projet de SCAO de MICADO.

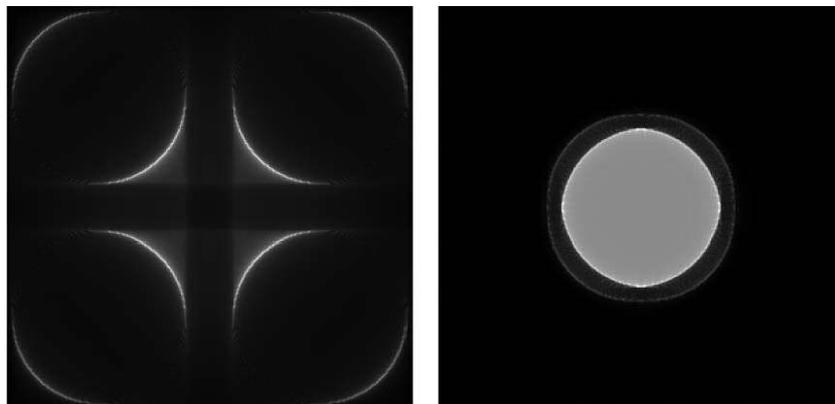


Figure 6.4 : répartition d'intensité obtenue pour une surface d'onde parfaite, pour un analyseur à pyramide classique (à gauche), et pour sa version aplatie (à droite).

Pour le même objectif, un Shack-Hartmann "LIFTé" a été proposé par l'ONERA. Fondé sur l'analyseur LIFT (voir plus loin), il permet de mesurer autant de détails de la surface d'onde avec quatre fois moins de sous-pupilles (elles sont deux fois plus grandes) et une résilience au bruit augmentée (Meimon et al [2014OptL...39.2835M](#)).

Les autres systèmes d'OA de l'E-ELT utiliseront des étoiles laser. Une étoile laser est en fait un fil de lumière d'un mètre de diamètre et de plus de 10 km de long. Le diamètre de l'E-ELT est tel que, par effet de perspective, les étoiles laser sont vues allongées (typ. jusqu'à 1"x10"). Un analyseur classique de Shack-Hartmann (comme pour SPHERE) nécessite donc un très grand champ et une taille de détecteur non disponible. Le LAM étudie actuellement un système optique produisant un grandissement anisotrope, différent dans chaque sous-pupille, afin de pouvoir revenir à un détecteur plus petit. Cela imposera d'étudier les propriétés des mesures obtenues.

Les mesures des étoiles laser doivent être complétées par des mesures obtenues sur des sources naturelles. Un analyseur classique de Shack-Hartmann avec 2x2 sous-pupilles de 20m suffit. L'ONERA a proposé LIFT (LInearized Focal-plane Technique), un nouvel analyseur plan image qui obtient la même information sur seulement quelques pixels, en ayant introduit de l'astigmatisme dans le faisceau. La méthode permet de gagner 1 magnitude en sensibilité par rapport à l'utilisation d'un Shack-Hartmann. Cet analyseur a été testé avec succès en boucle ouverte sur l'OA multiconjuguée de Gemini (Plantet et al [2014SPIE.9148E..2DP](#)). Les études en boucle fermée sont en cours.

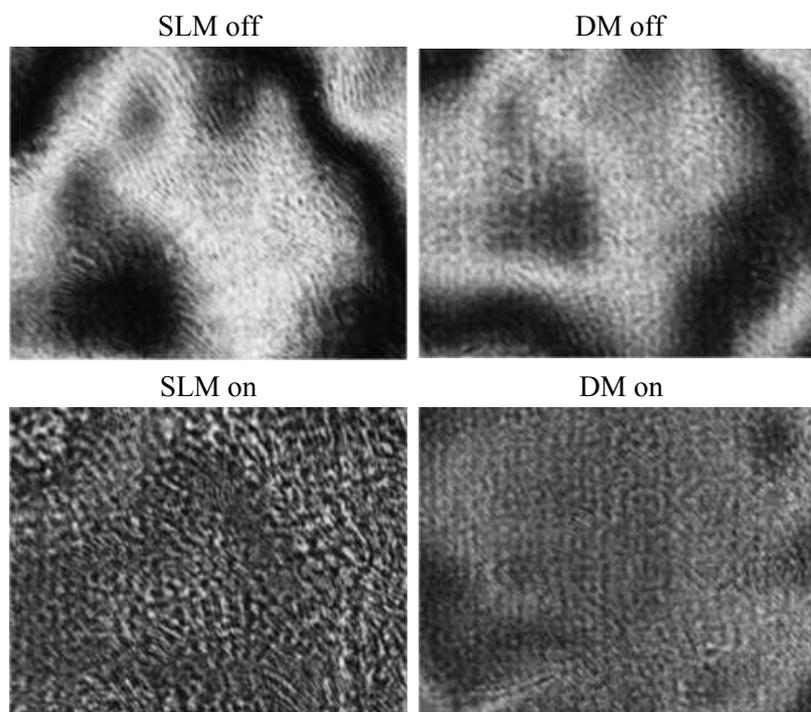


Figure 6.5 : Mesures de phase obtenues par l'analyseur de Mach-Zehnder sur le banc expérimental XAO4ELT du CRAL. Les deux images du haut montrent les mesures prise en boucle ouverte, celles du bas montrent des mesures, prises indépendamment, en boucle fermée avec une correction 1) par le modulateur de phase à cristaux liquides (SLM) utilisé comme tweeter (image de gauche) et 2) par le miroir déformable utilisé comme woofers.

Concernant enfin la haute dynamique, COFFEE, une méthode de mesure plan image derrière le coronographe, a été développée dans le cadre du projet SPHERE. La méthode, testée lors de la mise au

point de SPHERE au laboratoire, a montré un gain d'un facteur 5 sur le contraste (Paul et al [2014A&A...572A..32P](#)). La volonté est d'implanter COFFEE dans à demeure l'instrument, dans le cadre des demandes de mise à niveau de SPHERE.

SPHERE est un jalon sur la voie de la haute dynamique sur l'E-ELT, pour laquelle une longue phase de R&D se met en place en France. L'analyse de surface d'onde est un point critique pour la future OA extrême de l'E-ELT nécessaire à la haute dynamique, en devant être plus rapide, plus précise et adaptée au très grand nombre de degrés de liberté. Dans ce contexte, un analyseur de type Mach-Zehnder est étudié au CRAL. Ses propriétés en font un bon candidat pour l'E-ELT (matrice d'interaction creuse, précision nanométrique aux petites et moyennes échelles spatiales, robustesse aux discontinuités d'amplitude dans la pupille,..), mais demande à maîtriser sa réponse non-linéaire. Les premiers résultats du banc expérimental en boucle fermée montre un rapport de Strehl >90% à des échelles spatiales de l'ordre de 10 cm sur l'E-ELT (fig. 6.5).

A noter aussi des développements au LESIA, d'un analyseur plan focal fondé sur le principe de la Self Coherent Camera (cf. § 7.1) ayant démontré en laboratoire l'obtention d'un dark hole de quelques  $10^{-8}$  de contraste à quelques lambdas sur D de l'axe par suppression active par un miroir déformable des speckles résiduels dûs aux aberrations quasi-statiques en amont du coronographe.

## 6.5. R&D pour la commande et les simulations

*par Michel Tallon*

Le terme "commande" regroupe le calcul des consignes à donner au miroir déformable à partir des mesures effectuées par les analyseurs de surface d'onde. La commande est au coeur du système et de la qualité du calcul dépend la qualité de la correction de l'OA. Le calcul doit être aussi rapide que possible car il entraîne un délai qui limite la stabilité du système. Ce point est très critique si l'on réalise que la quantité des calculs croît comme la puissance 4 du diamètre du télescope, en sachant que nous sommes proches des limites technologiques aujourd'hui et que nous devons passer à la taille de l'E-ELT.

De plus, l'amélioration des performances des OA passe par la prise en compte d'un environnement non-stationnaire (turbulence et précision de mesure variables), de vibrations rapides des structures, et de composants qui vont devenir mobiles car dans le télescope. La commande doit devenir plus robuste, flexible, et devoir s'adapter automatiquement. Les progrès attendus sont significatifs, ce qui motive une recherche active et des développements mathématiques faisant appel à des collaborations interdisciplinaires. Cependant, la tâche est colossale.

Théoriquement, la commande LQG (Linéaire Quadratique Gaussien), basée sur le filtrage de Kalman, fournit la commande optimale. Mais elle nécessite une quantité de calculs incompatible avec les besoins de l'OA. C'est pourquoi cette approche a été appliquée dans un premier temps à des problèmes de petite dimension (estimation des vibrations, petit nombre de degrés de liberté), et que ce problème est au coeur de beaucoup d'activités pour passer à l'échelle de l'E-ELT.

L'expérience de NAOS sur le VLT a montré combien la correction des vibrations était importante pour les OA. C'est un point encore plus critique pour les OA à haut contraste. Pour corriger ces effets, l'ONERA a développé une commande LQG associée à une identification régulière des fréquences de vibration. Elle offre une commande optimale et efficace, notamment sur SPHERE qui est le premier système opérationnel équipé d'une stabilisation LQG des images qui s'adapte automatiquement.

Corrélativement, l'immunité aux phénomènes de saturation de ce type de correction est étudiée au Lagrange par des approches similaires (Folcher [2014SPIE.9148E..4HF](#)).

Plusieurs voies de recherche sont menées pour passer à l'échelle de l'E-ELT. Par exemple :

- L'introduction d'approximations réduisant le volume des calculs au détriment de l'optimalité. Cette voie est suivie par l'ONERA en collaboration avec l'institut d'optique et l'INSA-Lyon. Un résultat récent est la résolution de l'équation de Riccati, en se basant sur sa linéarisation par développement de Taylor (Massioni et al 2015, Control Syst. Techn., IEEE). La quantité de calcul revient au même niveau que l'approche minimum de variance.
- L'exploration de nouvelles solutions de contrôle dérivées de l'ETKF (Ensemble Transform Kalman Filter) développé en géophysique et météorologie pour adapter le filtrage de Kalman aux grands nombres de degrés de liberté. Cette voie est suivie par le LAM en collaboration avec l'ONERA. L'avancée récente est la "localisation" du calcul, mené en parallèle sur de petits sous-domaines de la pupille (Gray et al [2014OExpr..2220894G](#)). Cette approche pourrait à terme offrir un contrôle quasi-optimal dans un cadre non stationnaire pour les OA tomographiques de l'E-ELT. L'effort est actuellement d'essayer d'appliquer cette approche à SPHERE.
- La stratégie inverse a été adoptée par le CRAL avec la méthode FrIM (Fractal Iterative Method), fondée sur l'approche inverse. Elle est suffisamment rapide, et effectue une reconstruction tomographique optimale prenant en compte tous les aspects de l'E-ELT (e.g. fusion des mesures hétérogènes, étoiles laser souffrant d'élongations, dislocation de pupille). Mais les aspects dynamiques ne sont pas optimaux. Les travaux sont menés en collaboration avec l'ESO. FrIM montre actuellement les meilleures performances sur le simulateur de l'E-ELT de l'ESO.

Le démonstrateur CANARY a montré une grande utilité pour tester certaines nouvelles approches pour la commande. La petite dimension du télescope permet de tester et de valider de nouvelles approches même lourdes en calcul. La figure 6.6 montre le résultat obtenu par l'ONERA lors d'un test sur CANARY de l'approche LQG prenant en compte les vibrations.

Figure 6.6 : Images SCAO acquises avec la caméra IR de Canary au WHT. Gauche : commande standard (intégrateur). Droite : commande LQG avec réjection de vibration.

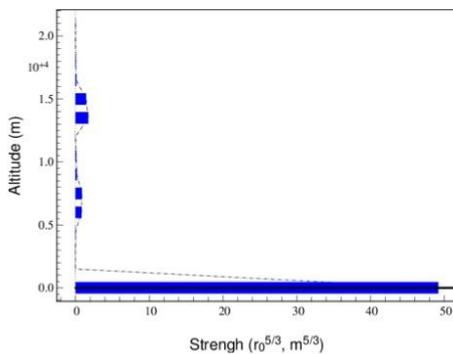
L'équipe du LESIA a particulièrement travaillé sur le développement de "*Learn & Apply*", technique globale permettant à un instrument tomographique (MC/LT/MOAO) de construire un reconstruteur tomographique de type MMSE (minimum variance), auto-étalonné et construit sur des *a priori* mesurés par l'instrument lui-même (profil, directions d'observation, échelle externe, erreurs de tracking télescope, sensibilités des analyseurs, bruits, ...) à partir de ses propres données, pendant que l'instrument observe. C'est la technique de base qui a été utilisée —et donc validée sur le ciel— avec CANARY pour l'ensemble des démonstrations tomographiques, permettant de générer *ex-nihilo* les reconstruteurs optimisés.

Le principe est un peu déroutant car il repose sur l'utilisation d'un "*truth sensor*", un analyseur qui peut —le cas échéant— ne pas exister physiquement. Ce senseur fictif est supposé observer la direction

(i.e. le point du champ) optimisé tomographiquement. Seule sa matrice d'interaction avec le(s) miroir(s) déformable(s) a besoin d'être connue (et si le senseur existe elle sera alors *mesurée*, renforçant d'autant la qualité de l'étalonnage).

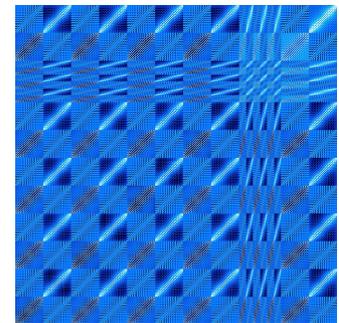
L'algorithme du "*Learn & Apply*" se base sur l'ajustement des paramètres du modèle global de l'instrument (turbulence, perturbations, lasers, etc, compris) par rapport aux données observées. Le résultat principal de sortie du L&A est la matrice de covariance des mesures (de *toutes* les mesures, y compris *truth sensor*, calculée selon le modèle le mieux adapté aux données observées), qui serviront à calculer le reconstituteur. Mais de nombreux sous-produits intéressants sont générés *de facto*: tous les paramètres du-dit modèle, et notamment, le profil de turbulence.

Pour fonctionner, cet algorithme doit générer les matrices de covariance en un temps record. On a utilisé 2 astuces: 1) tout coefficient de la matrice fait l'objet d'un calcul indépendant, ce qui permet d'en confier la tâche à un GPU qui les calcule tous en parallèle, 2) le calcul d'un coefficient a été approximé et réduit à une expression dérisoirement simple, d'où un temps de calcul foudroyant.



Gauche: exemple d'un profil turbulent avec CANARY au WHT dans la nuit du 28/6/15, dominé par une furieuse couche au sol.

Droite : la matrice de covariance ajustée selon modèle.



## 6.6. L'optique adaptative dans les 5 ans qui viennent

Les équipes travaillant en OA vont s'investir dans la réalisation de l'instrumentation E-ELT qui va durer bien au delà de 2020.

Le consensus dans la communauté est que les OA à construire sont très ambitieuses, et que cette difficulté s'ajoute à celle de la réalisation d'un télescope lui-même très ambitieux. Au regard des difficultés et des inconnues liées au télescope, les ressources et les connaissances actuelles ne permettent pas de garantir une réussite immédiate. Il faudra probablement accepter des étapes. Dans ce contexte, le mode OA classique (dit "SCAO") des instruments de première lumière HARMONI et MICADO est un objectif prudent. Pour autant, l'OA multiconjuguée est pour l'instant attendue en première lumière, mais il nous semble que cet objectif est plus risqué.

La R&D en cours n'est pas achevée. Des pistes ont été ouvertes, certaines bien avancées, et il est attendu que certaines études se poursuivent dans le cadre des phase B des projets. Il est important que la R&D puisse continuer, que ce soit dans les projets ou en dehors, pour au moins apporter des solutions aux problèmes qui ne manqueront pas de se présenter.

Dans cette longue marche, il est fort probable que les apports du traitement du signal soient déterminants. Cela peut concerner des points comme apporter de la flexibilité dans les algorithmes de commande, ou de la robustesse dans l'analyse de surface d'onde. La préparation des algorithmes qui

exploiteront les données, comme la prise en compte de la non stationnarité de la réponse impulsionnelle dans les images multi-spectrales, est aussi à préparer dès maintenant.

La difficulté de la prochaine période sera de gérer au mieux des ressources limitées par rapport à l'ampleur de la tâche. Le recentrement de la coordination en OA sur l'ASHRA doit permettre, au moins pour la communauté française, la mise en place de collaborations entre les acteurs au-delà des intérêts de chaque consortium, pour éviter la duplication des travaux, et ainsi optimiser nos ressources et réduire les risques.

Enfin, le soutien et le suivi des développements hors recherche académique semble nécessaire. C'est le cas en ce qui concerne l'ONERA. Cela doit être aussi le cas en ce qui concerne les détecteurs et les miroirs déformables, en particulier en Europe.

## 7. Thématique très haute dynamique

### 7.1. Activités en cours et faits saillants

*par Pierre Baudoz*

#### Analyse et exploitation d'instruments actuels

L'imagerie à Très Haute Dynamique (ITHD) a connu un essor important ces 5 dernières années avec la découverte et l'étude poussée de plusieurs systèmes planétaires (Beta Pic, HR 8799, etc...). La mise au point d'outils de réduction des données et une analyse critique des différentes approches observationnelles en fonction de la morphologie de l'objet observé (disque ou planète) et de la méthode d'observation (images saturées, types de coronographes, avec ou sans rotation de champ) s'est révélée cruciale pour la confirmation de ces planètes et l'évaluation des barres d'erreurs photométriques et astrométriques. Ces méthodes sont réutilisables pour les nouveaux instruments comme SPHERE ou GPI qui sont rentrés en phase opérationnelle depuis 2014.

L'exemple de Beta Pictoris est parlant. Découverte en 2009, un effort de caractérisation spectrale, photométrique et astrométrique a été mené en poussant à leur limite des instruments généralistes d'imagerie par optique adaptative comme NACO. Les différentes observations de Beta Pic b (environ 10 publications par des leaders français avec des collaborations entre instituts nationaux et internationaux) ont permis de contraindre précisément l'orbite de la planète et sa photométrie. L'analyse fine et simultanée du disque et de la planète dans le système Beta Pictoris a également permis de montrer que la planète était responsable du warp présent dans le disque (fig. 7.1).

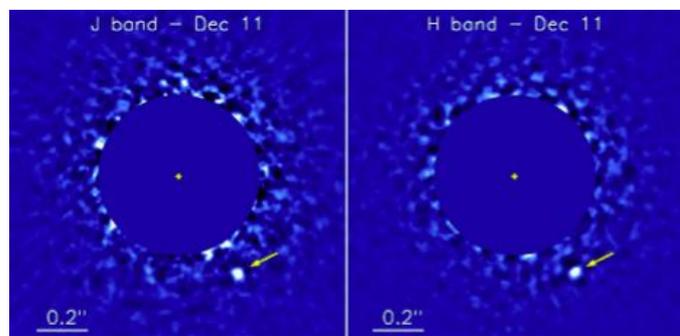
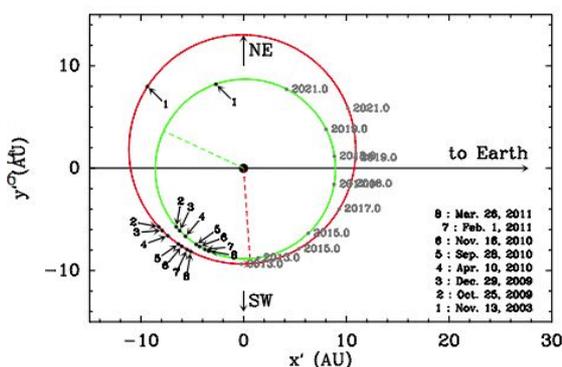


Figure 7.1 : Gauche : Deux solutions possibles pour l'orbite de Beta Pictoris b (Chauvin et al. 2012). Droite : Images typiques après post-processing en ITHD. La position de Beta Pictoris b en bande J et H est indiquée par les flèches (Bonnefoy et al. 2013).

Un autre exemple très illustratif est l'imagerie du disque de débris très faible entre 0,3 et 1'' de séparation projetée dans le halo de l'étoile HR4796A.

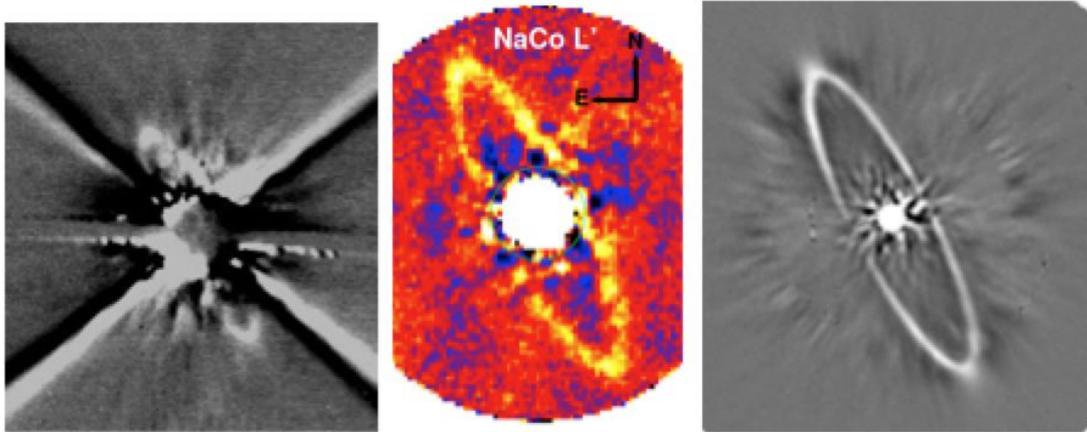


Figure 7.2 : Disque de débris autour de HR4796A observé en lumière réfléchie entre 2003 et 2014. Gauche : avec NACO en 2003 en bande K, avec soustraction du halo par comparaison avec une étoile de référence. Milieu : toujours avec NACO, en bande L avec imagerie angulaire différentielle et traitement statistique en composantes principales (Milli et al 2013). Droite : pendant le commissioning de SPHERE en imagerie différentielle angulaire, avec le bénéfice de minimisation des aberrations variables et correction d'optique adaptative poussée.

## Développement de nouveaux instruments

Ces dernières années, la communauté s'est rassemblée autour de l'effort de développement de l'instrument SPHERE. SPHERE est un instrument de 2<sup>ème</sup> génération du VLT qui a obtenu ses premières images sur le ciel en mai 2014 et dont les retombés scientifiques ne se sont pas faites attendre avec une série de publications sur différentes thématiques en 2015 (Boccaletti et al. 2015, Vigan et al. 2015, Kervella et al. 2015, ...). Il est constitué d'une optique adaptative extrême (XAO) qui fournit une image de très bonne qualité à trois instruments coronagraphiques mettant en œuvre des techniques d'imagerie, de spectroscopie et de polarimétrie différentielles, dans le visible et l'infrarouge proche (cf. §6.1). La France a pris une part importante dans le développement de l'instrument avec des responsabilités dans tous les domaines (PI, responsable du groupe scientifique, de l'étude système, de l'outil de simulation instrumental, de l'optique adaptative, de la coronagraphie, de la caméra d'imagerie principale). SPHERE a représenté ces 8 dernières années un effort intégré de près de 100 hommes-ans pour toute la communauté française.

Pour préparer les observations liées à SPHERE, plusieurs études ont démarré sur de nouvelles méthodes de détection et/ou de caractérisation du signal de l'exoplanète à partir des données coronagraphiques. Basées sur l'approche inverse, ces méthodes utilisent des modèles d'images multispectrales avec coronographe pour extraire le signal de la planète des bruits instrumentaux.

En marge de SPHERE, un instrument, potentiellement capable d'atteindre des contrastes élevés et utilisant le ré-arrangement de pupille (FIRST), a été développé et testé sur le ciel à l'Observatoire Lick sur le télescope de 3m Shane (Huby et al. 2013, 2014). La capacité de l'instrument à observer dans le visible à la limite de diffraction avec une résolution de quelques centaines entre 650 et 800 nm a été démontrée et justifie une campagne astrophysique sur le télescope Subaru avec FIRST.

## R&D Préparatoire pour les futurs instruments d'ITHD

Alors que SPHERE devrait permettre d'observer les planètes jeunes et massives, la caractérisation de planètes moins massives ou plus âgées va requérir d'atteindre des performances plus ambitieuses que SPHERE. La préparation de ces instruments a démarré depuis quelques années avec l'étude de phase A de l'imageur d'exoplanète de l'E-ELT (EPICS, 2008-2010) où la communauté française a été très présente (co-PI, responsable système, analyse de surface d'onde, instrument optionnel). Pour préparer cet instrument mais également de potentielles missions spatiales coronographiques, la communauté ITHD a mis en place des R&D visant à étudier certains aspects cruciaux de l'ITHD. La caractérisation spectrale des planètes nécessite de développer des composants coronographiques achromatiques sur une large bande. Deux R&D sur des composants achromatiques ont été lancées, menant à des prototypes (coronographe à double zone apodisé, coronographe quatre quadrants à passages multiples).

Pour obtenir la performance optimale du coronographe, il est essentiel de faire une mesure (et une correction) précise et non biaisée des défauts de l'onde; notamment pour les aberrations basses fréquences qui ont une forte amplitude. C'est la raison pour laquelle SPHERE possède un analyseur de tip-tilt dédié et que des solutions ont été proposées pour mesurer ce tip-tilt mais également les aberrations de plus hauts ordres directement à partir de l'image finale. Cet aspect de l'ITHD a été particulièrement fécond avec la proposition, l'étude et les tests de 3 techniques d'analyse fine des défauts post-coronographiques dans les dernières années :

- La Self-Coherent Camera (SCC) utilisant la cohérence spatiale d'un flux stellaire pour mesurer les défauts de l'onde incidente dans le plan focal final (testée sur le banc THD au LESIA).
- L'analyseur de surface d'onde coronographique ZELDA qui a été testé en laboratoire au LAM et sur SPHERE.
- L'analyseur COFFEE qui étend la mesure des aberrations par diversité de phase aux images coronographiques et a été testé durant les AIT SPHERE (collaboration ONERA-LAM).

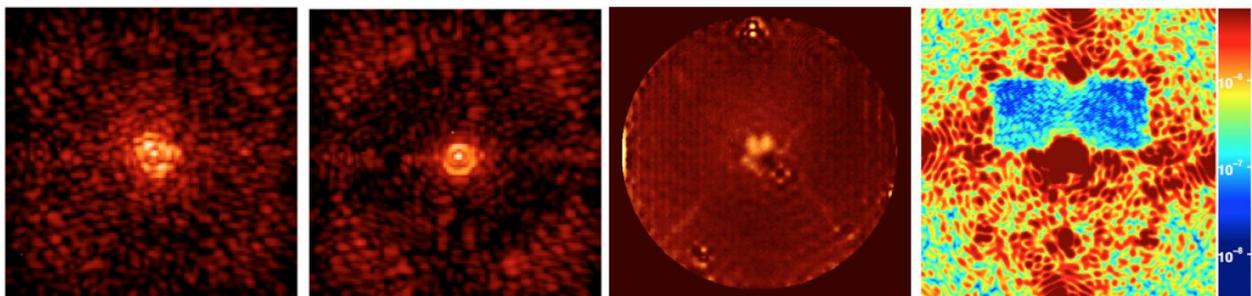


Figure 7.3. Gauche à droite : Image des AIT SPHERE avant et après optimisation de la correction avec COFFEE. Estimation front d'onde de SPHERE par ZELDA après correction COFFEE. Dark Hole créé dans l'image coronographique après corrections des défauts de l'onde par la SCC (Mazoyer et al. 2014).

## 7.2. Exploitation et suivi de SPHERE

*par David Mouillet*

Nous voyons aujourd'hui l'aboutissement d'un travail sur plus de dix ans, si l'on remonte aux phases initiales de pré-étude du concept. La figure 7.2 illustre, sur le cas de l'observation d'un objet particulier, cette phase de recherche et de réalisation dont on peut souligner deux aspects importants et structurant aussi pour l'avenir :

1. Entre les images obtenues peu après la mise en service de NACO et celle du commissioning de SPHERE, le progrès en contraste près de l'axe est spectaculaire. Il n'a pu être obtenu qu'au prix d'efforts considérables impliquant à la fois des développements technologiques nouveaux (miroir déformable, nouveaux détecteurs rapides et sensibles), mais aussi une analyse système fine des limitations d'alors, telles que la capacité d'étalonnage et la stabilité des aberrations optiques, la stabilité de l'image et de la pupille à tous les niveaux de l'instrument, les sources de chromatisme et d'aberrations différentielles etc... L'ensemble de ces éléments fait comprendre le temps et l'investissement nécessaire d'un tel instrument.
2. En parallèle, la capacité d'observation avec le même instrument, NACO, a aussi connu une courbe de progression impressionnante. Cela a impliqué l'ajout de plusieurs modes observationnels (stabilisation de pupille en rotation, nouveaux coronographes,...), une meilleure caractérisation des limitations, et une amélioration significative des algorithmes de soustraction de halo stellaire.

Nous retenons clairement ces éléments qui nous semblent fondamentaux pour le présent et le proche avenir. L'investissement sur SPHERE n'est pas clos aujourd'hui à l'heure des premiers commissionings mais doit bien sûr consolider la livraison à l'observatoire et la capacité d'opération au maximum de ses performances par des non experts, et l'ouverture au plus grand nombre d'utilisateurs. L'analyse fine des limitations sur ciel est une étape essentielle pour envisager de nouveaux progrès de plusieurs ordres de grandeur en préparation des ELT par exemple. Ceci doit se faire dans la suite cohérente des simulations et des tests détaillés de l'instrument. Un travail important est aussi attendu au niveau du traitement du signal pour utiliser de manière optimale toute l'information sur la caractérisation de la réponse instrumentale.

L'ensemble de cette analyse peut alors alimenter en plus de la préparation d'instruments tout à fait nouveaux, des capacités d'amélioration de SPHERE lui-même. Des idées sont émises dès aujourd'hui (concernant en particulier la capacité de mesure et de correction des aberrations statiques à un niveau très fin, mais aussi le contrôle du miroir déformable, ou encore l'optimisation de composants coronographiques), mais il paraît important d'attendre une analyse consolidée du comportement actuel pour identifier les priorités les plus intéressantes de telles améliorations. Ce travail d'upgrade pourra donc prendre forme sur une période de 2 à 5 ans.

Bien sûr, sur des échelles plus longues, des instruments de génération ultérieure nécessiteront de reprendre une analyse système à la base et demanderont assurément des développements technologiques spécifiques majeurs à identifier assez tôt. Selon les limitations identifiées dans le cas de SPHERE, il sera peut-être important de considérer une étape intermédiaire (comme un instrument spécialisé de 3e génération sur 8-m) en terme de calendrier et de gestion de risques "système" avant les investissements majeurs qui seront nécessaires pour l'ELT ou un instrument spatial de grande envergure.

### 7.3. R&D et évolution de l'(I)THD

*par Pierre Baudoz, Emmanuel Hugot*

Comme nous l'avons précédemment, la communauté se place dans une logique de préparation du long terme qui permettra l'étude des planètes rocheuses. Il est à considérer que les instruments les plus ambitieux ne seront pas une simple extrapolation de SPHERE mais doivent reprendre l'analyse système globale très fine qui sera essentielle pour accéder à des hauts niveaux de contraste. Ces niveaux impliquent des problématiques nouvelles qui nécessiteront un accompagnement instrumental sous la forme de bancs de tests dédiés à certains problèmes précis. C'est dans ce cadre que différents bancs de R&D sont/ont été développés pour étudier de manière globale où plus précise certains aspects limitant (Table 7.4). Il faudra également intégrer les enseignements à venir de l'utilisation de SPHERE.

Les points qui semblent actuellement être limitants pour les futurs instruments :

- La dépendance chromatique des composants, des aberrations, etc qui peut être un frein à la caractérisation spectrale. Des efforts sont prévus sur le développement de composants coronographiques encore plus achromatiques que ceux actuellement obtenus et sur la minimisation des aberrations chromatiques par l'optimisation du concept instrumental ou par la correction active des effets chromatiques avec plusieurs miroirs déformables (banc FFREE et banc THD).
- La problématique des mesures fines et non biaisées d'aberrations instrumentales ou liées à la turbulence. Pour les applications au sol, le banc du LAM va s'intéresser aux interactions entre l'OA et un analyseur coronographique potentiellement utilisable dans un upgrade de SPHERE alors que le banc XAO du CRAL va mesurer les performances d'une XAO optimisée pour l'ELT avec un analyseur temps réel de type Mach-Zehnder et des stratégies de contrôle innovantes.
- Dans le cadre des ELT et des futurs grands télescopes spatiaux, la forme de la pupille ainsi que sa qualité de surface d'onde (segments non cophasés, etc) est un problème clairement identifié en ITHD et des solutions sont/vont être étudiées et pourront être testées sur le banc SPEED.
- Un des bancs R&D (banc THD) s'est orienté principalement vers les applications spatiales en visant les corrections à très hauts contrastes ( $10^8$ ) et la correction des aberrations d'amplitude résiduelle.

Dans la table 7.4, on voit que les différents bancs de test en développement ou en fonctionnement sont complémentaires aussi bien dans leurs applications (sol espace, télescopes segmentés), dans les solutions étudiées que dans les domaines spectraux utilisés.

Banc	Labo	Applications	Domaine spectral	Objet d'étude	Instrumentation spécifique	Situation actuelle
MITHIC	LAM	Sol (SPHERE, E-ELT), spatial	600-900 nm	Interaction XAO et analyseur coronographique en présence de turbulence résiduelle	DM : 9x9 + SLM Hammamatsu  Simul turbu résiduelle XAO + défauts cophasages  Analyseurs ZELDA, COFFEE	En fonction.

THD	LESIA	Espace, très haut contraste au sol (ELT-PCS)	600-900 nm	Boucle fermée sur l'image scientifique, correction des aberrations d'amplitude et chromatique	DM : 32x32 + DM : 34x34 + DM : 12x12  Analyseur Self-Coherent Camera	En fonction
SPEED	Lagrange	Télescope segmenté (E-ELT au sol, espace)	500-800 nm +1450-1600 nm	Correction des effets de segmentations des miroirs type ELT	2 DM 34x34 + 1 DM segmenté pour simulation de la pupille ELT	En développement
FFREE	IPAG	Sol (ELT-PCS)	1300-1600 nm	Étude des effets de Fresnel en ITHD	DM : 32x32 Écran de phase statique d'aberration hors plan pupille	En fonction
XAO4ELT	CRAL	Sol (E-ELT, PCS)	600-900 nm	Optimisation des performances de l'XAO pour l'E-ELT (analyseur, contrôle temps réel, auto-calibration)	DM 12x12  SLM jusqu'à 250x250.  Simulateur de turbulence et de segments (typique ELT)  Analyseur : Mach-Zehnder  Contrôle : FRIM	En fonction

Table 7.4 : Description des différents bancs relevant de l'ITHD en développement ou en fonctionnement.

## 7.4. Les Applications de la R&D (I)THD dans les 10 ans

*par Pierre Baudoz, Emmanuel Hugot*

### (I)THD sur l'E-ELT

Sur les premiers instruments de l'E-ELT, on ne peut probablement pas parler de très haute dynamique mais des modes coronographiques plus ou moins dégradés sont proposés sur les deux instruments de première lumière. Pour le spectro-imageur HARMONI, l'IPAG, le LAM et l'ONERA sont impliqués sur l'analyse et les propositions de solution pour un mode haute dynamique. Sur MICADO, l'imageur de première lumière de l'E-ELT, le mode coronographique est sous la responsabilité du LESIA avec une participation de l'IPAG. Le troisième instrument envisagé est un imageur et spectrographe en infrarouge moyen (METIS) dans lequel est prévu un mode coronographique auquel participe le CEA. La feuille de route ESO permet actuellement la proposition d'un instrument intermédiaire (ELT-6) qui pourrait avoir des capacités THD (instrument basé sur un concept de réarrangement de pupille de type FIRST, coronographe avec un très faible champ de vue, ...) avant l'arrivée d'ELT-PCS, l'instrument de THD de l'E-ELT. La communauté ITHD française a l'intention de jouer un rôle majeur dans le développement de cet instrument. Tous les laboratoires français impliqués en ITHD avait participé aux études de phase A d'EPICS (ancêtre d'ELT-PCS). Ces mêmes laboratoires ont démarré la préparation d'ELT-PCS, par l'intermédiaire d'analyses systèmes, de développements de composants ou sous-systèmes et par la mise en place des bancs de R&D présenté dans le tableau 7.4. Cet effort de

préparation au niveau système et au niveau instrumental doit être soutenu probablement au moins jusqu'en 2025 environ où ELT-PCS entrera dans une phase de construction.

### **(I)THD spatiale**

Cet effort de R&D pour ELT-PCS entre en résonance avec les besoins de R&D pour un instrument d'ITHD spatial, qui semble être la seule solution vraiment réaliste pour caractériser finement des planètes extrasolaires rocheuses non-irradiées. D'une part, certains développements R&D en cours pour les ELT ont des débouchés dans le spatial, d'autre part les études pour ELT-PCS vont potentiellement mettre en évidence des problématiques applicables au spatial. Ces R&D vont permettre de préparer les projets de coronographes spatiaux Européens (comme SPICES), la participation éventuelle à des projets internationaux (projet de coronographe spatial américain AFTA-WFIRST, projet de coronographe intégré dans un ballon canadien MAPLE, etc).

## **8. Thématique science des données**

*par Éric Thiébaud et Michel Tallon*

La «*science des données*» est une thématique introduite en tant que telle au sein de l'ASHRA en 2011. Elle résulte du constat que, malgré quelques belles démonstrations, le traitement du signal (TS) reste insuffisamment exploité pour optimiser voire garantir le retour scientifique des instruments astronomiques. Avec les instruments de plus en plus sophistiqués qui se profilent, la situation peut devenir critique au sens ou sans une méthodologie spécifique (qui reste largement à développer) ces instruments seront loin d'atteindre leurs objectifs.

### **8.1. Activités en cours et faits saillants**

#### **Haut contraste sur SPHERE**

Le traitement du signal intervient à plusieurs niveaux dans SPHERE : pour l'étalonnage puis le contrôle de l'instrument pendant les observations et pour le traitement hors ligne. L'étalonnage des aberrations statiques résiduelles de l'instrument est critique pour la qualité de correction du front d'onde et l'efficacité de l'extinction par le coronographe. L'estimation de ces aberrations est réalisée grâce à une méthode, mise au point par l'ONERA et l'IPAG, qui met en œuvre la diversité de phase et qui nécessite un traitement élaboré des images focalisées et défocalisées. Par ailleurs, la détection et la caractérisation des exoplanètes d'après les images coronographiques demande de supprimer de façon très précise les anneaux et tavelures (speckles) où se concentrent les fuites stellaires et qui sont bien plus brillants que la signature des exoplanètes recherchées. Différentes approches ont été proposées pour supprimer *a posteriori* ces tavelures. D'une part des méthodes comme ANDROMEDA qui sont basées sur une approche de type problème inverse et qui traitent globalement les séquences d'images de tous les canaux spectraux. D'autre part, des méthodes alternatives, plus heuristiques, qui sont essentiellement basées sur une analyse en composantes principales (PCA) du problème. Avec l'arrivée de données réelles (SPHERE et GPI), il est clair que les méthodes existantes ne sont pas pleinement satisfaisantes et la recherche méthodologique doit rester active pour améliorer un certain nombre de points. En particulier, il faut atteindre la meilleure sensibilité de détection, augmenter la robustesse vis à vis des artefacts et éviter les biais dans la caractérisation des spectres des planètes.

## Interférométrie optique et projet POLCA

Les instruments installés sur les interféromètres optiques dans le visible (VEGA/CHARA) et l'infrarouge (AMBER et PIONIER au VLTI, CHARA, ...) offrent tous une résolution spectrale (jusqu'à 35000 pour VEGA) qui permet l'observation simultanée de l'objet à des longueurs d'onde différentes. Le traitement des mesures interférométriques se faisait essentiellement en considérant les canaux indépendamment. Une évolution récente des approches consiste à traiter globalement les mesures interférométriques (*i.e.*, tous les canaux spectraux simultanément) en exploitant la régularité spatio-spectrale de l'objet observé. Compte tenu du caractère très lacunaire des mesures interférométriques (guère plus d'une centaines de fréquences spatiales observées par canal spectral pour un objet donné), une approche globale améliore très significativement la qualité et la quantité des informations extraites. Mais c'est aussi et surtout le seul moyen d'ajuster un modèle ou de reconstruire une image de l'objet qui soient consistants avec sa structure à la fois spatiale et spectrale. Cette révolution a nécessité des développements méthodologiques fondamentaux et a été largement portée par le projet d'ANR **POLCA** dont l'objectif était de d'exploiter au mieux le caractère polychromatique des données interférométriques.

Le projet POLCA (Processing of pOLychromatic interferometriC data for Astrophysics), financé par l'ANR (2011-2015, PI M. Tallon), a réuni tous les laboratoires français travaillant en interférométrie optique (CRAL, IPAG, Lagrange, LESIA) pour faire des percées en utilisant pleinement l'information des données interférométriques à toutes les longueurs d'onde et démontrer les avancées obtenues sur des données réelles et des cas astrophysiques concrets. Le projet a été motivé par le constat que la grande majorité des interféromètres produisent des franges dispersées en longueur d'onde (e.g. par un spectrographe) produisant des mesures différentielles (entre longueurs d'onde) sous-exploitées. L'objectif était d'accélérer la recherche sur les méthodes de traitement des données interférométriques "polychromatiques", en particulier en reconstruction d'image multi-spectrale, pour augmenter les performances (magnitude limite, précision) et le potentiel observationnel des interféromètres actuels et à venir (GRAVITY, MATISSE), et in fine élargir leur usage et leur impact. La démarche interdisciplinaire associant des expertises en traitement du signal, en instrumentation interférométrique et en astrophysique, ainsi que le travail sur des données réelles, ont assuré le niveau de qualité des résultats et leur réutilisation par la suite.

Le projet a exploré de nombreuses pistes et produit des algorithmes et des prototypes de logiciels permettant d'exploiter l'information polychromatique dans les données ; 29 publications scientifiques (dont 9 à comité de lecture) ont démontré l'efficacité et l'intérêt de cette approche sur des données réelles. Pour l'essentiel, les résultats ont été obtenus à 3 niveaux : 1) l'étude des signaux interférométriques a fourni des estimateurs pouvant augmenter la précision de mesure de diamètre stellaire d'un facteur 2 à 10, et une méthode de cophasage des franges 10 fois plus sensible ; 2) trois reconSTRUCTEURS d'image polychromatique ont été proposés, SPARCO (adapté aux objets jeunes), MiRA-3D, puis PAINTER mis en accès public ; 3) le projet a permis l'étude de la morphologie de l'environnement des étoiles Herbig Ae/Be dans le cadre d'un "large program" ESO sur PIONIER/VLTI, obtenu les premières reconstructions polychromatiques d'étoiles miras (R For et R Car), et démontré la faisabilité de l'extraction des positions et des spectres d'étoiles du Centre Galactique tel qu'il sera observé par l'instrument GRAVITY. Le JMMC a entrepris la valorisation des outils logiciels développés par POLCA.

Les résultats principaux du projet sont présentés sur le site internet du projet (<http://polca.univ-lyon1.fr/>). La figure 8.1 donne un exemple des résultats obtenus.

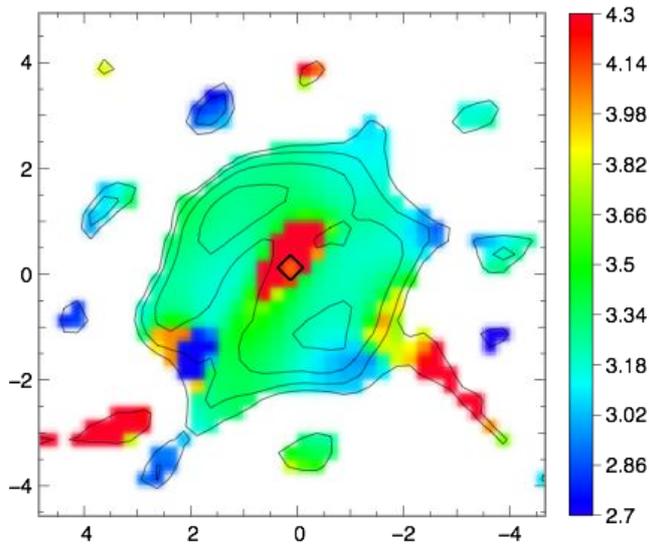


Figure 8.1 : Carte de température (coordonnées en milli-secondes d'arc, échelle logarithmique) du disque protoplanétaire de l'étoile Herbig Ae/Be HD98922 observée par l'instrument PIONIER/VLTI, et obtenue par le nouvel algorithme de reconstruction d'image polychromatique MiRA-3D (Ferréol Soulez, 2014). La température moyenne est de 1670 K.

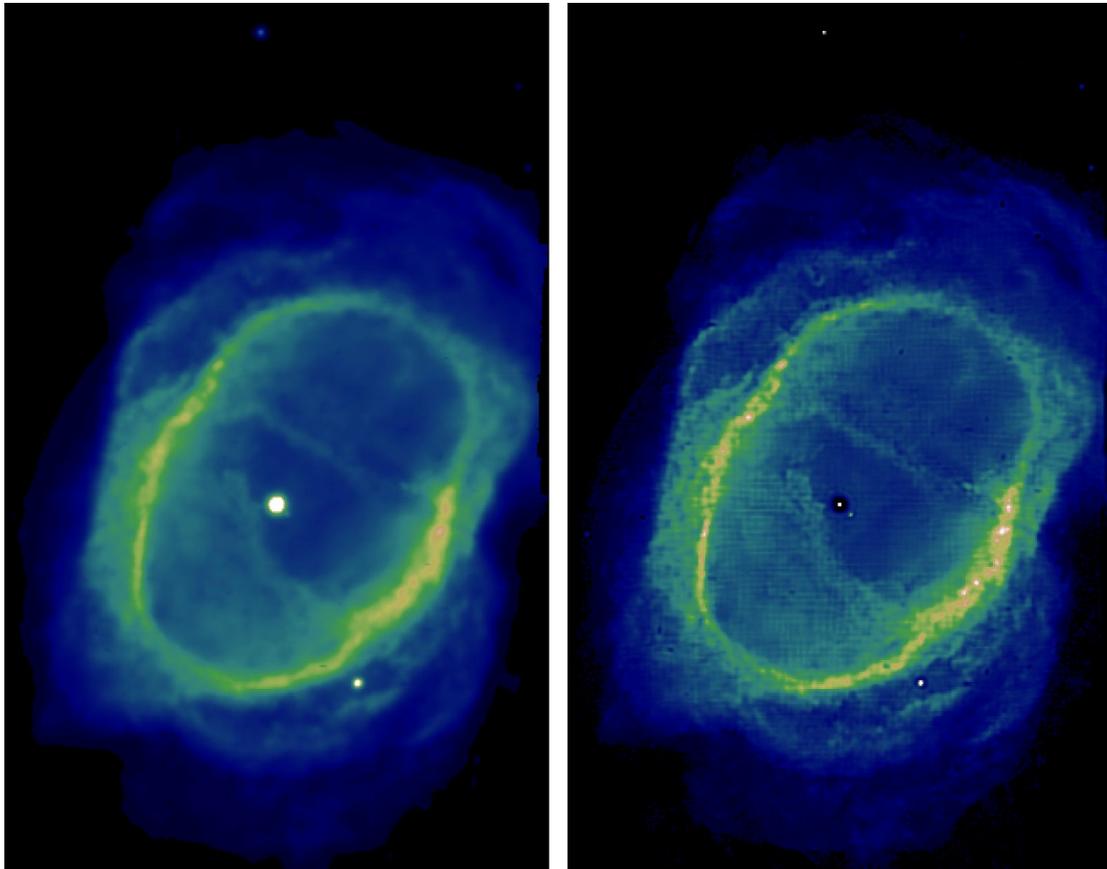


Figure 8.2 : Image en  $H\alpha$  de la nébuleuse NGC 3132 par MUSE (à gauche) et résultat de la déconvolution multi-spectrale (à droite ; source : Ferréol Soulez 2014). Les structures sont bien plus précises et la binaire centrale est bien séparée. Les artefacts horizontaux et verticaux sont causés par une mauvaise soustraction ciel lors de la réduction des données.

## Données multivariées

Les résultats obtenus par le projet POLCA démontrent qu'une des forces des nouvelles approches pour le traitement des données réside dans leur capacité à prendre en compte globalement les mesures et à combiner de façon optimale des informations spatiales, spectrales et temporelles. Ce potentiel se généralise assez immédiatement à d'autres types d'instrument, en particulier les spectrographes à intégrale de champ. Dans le cas du projet SNIFS (Supernovae factory), il a été montré qu'un traitement global de type approche inverse était à même d'extraire les spectres de supernovae jusqu'à des luminosités très faibles et sans contamination par la galaxie hôte. Pour la détection d'exoplanètes, on conçoit bien que la détection d'une exoplanète est renforcée si celle-ci est corroborée à différentes longueurs d'onde et les méthodes les plus efficaces combinent d'ailleurs toutes les mesures disponibles. Dans le cas de la simple imagerie hyperspectrale (comme avec MUSE ou l'IFS de SPHERE), la déconvolution multispectrale (un procédé appelé *fusion de données* en traitement du signal) qui exploite la continuité spatiale et spectrale de la distribution d'intensité pour régulariser le problème fournit des cubes d'images dont la résolution et le rapport signal à bruit sont largement améliorés par rapport à ce que donne le *pipeline* de traitement livré avec l'instrument (*cf.* la nébuleuse NGC 3132 montrée par la Fig. 8.2). Ces méthodes sont en plein essor mais demandent encore à être développées. Cela a été mentionné plus haut pour les méthodes de détection. Pour les méthodes de reconstruction (comme la déconvolution multispectrale), il y a encore de nombreux points durs à surmonter. Pour un instrument à découpeur d'image comme beaucoup de spectrographes à intégrale de champ (SINFONI, MUSE, HARMONI, *etc.*) la réponse instrumentale devient non-stationnaire (non convolutive) et doit être correctement modélisée et calibrée pour tirer le meilleur des mesures. Ce problème est abordé dans la section suivante.

## Réponse impulsionnelle variable

D'un point de vue méthodologique, les approches de type problèmes inverses sont sans conteste les plus prometteuses pour se débarrasser des effets instrumentaux et fournir des images de qualité optimale (défloutées et débruitées) ou extraire les mesures les plus précises. Si la mise en œuvre de ces méthodes et aujourd'hui largement facilitée par la progression de la puissance de calcul, les évolutions des méthodes numériques et les avancées algorithmiques en traitement du signal, elle nécessite de connaître la réponse impulsionnelle de l'instrument. Or les nouveaux instruments sont affligés d'une réponse impulsionnelle qui n'est plus stationnaire et qui est donc à la fois difficile à modéliser (ce n'est plus une simple convolution) et à caractériser (l'image d'une seule source de référence ne suffit plus à l'étalonner). Par exemple, les systèmes imageurs grand champ (grâce à l'optique adaptative multi-conjuguée) et les spectrographes à intégrale de champ fournissent des images avec une réponse impulsionnelle variable dans le champ. Pour résoudre le premier problème de la modélisation de ces effets et compte tenu du volume de données à traiter, une approche de type force brute n'est pas envisageable. Il faut développer des modèles peu gourmands en mémoire et rapides à utiliser, les méthodes de reconstruction étant nécessairement itératives. De tels modèles ont fait l'objet de recherches récentes (par ex., projet ANR MiTiV<sup>2</sup>) et ont été testés sur des données de MUSE. Il reste le problème de la calibration de ces modèles qui ont à la fois beaucoup de degrés de liberté et qui dépendent des conditions d'observation et sont donc variables dans le temps. Plusieurs pistes sont envisagées. Il est possible d'exploiter les mesures de surface d'onde résiduelles fournies par le système d'optique adaptative. Une autre approche, qui a été testée sur SPHERE, consiste à adjoindre à l'instrument un dispositif d'étalonnage (par diversité de phase dans le cas de SPHERE). Enfin une dernière approche qui a le mérite de ne pas nécessiter de mesures supplémentaires (et donc potentiellement plus économique en termes de temps d'observation ou d'atténuation du flux disponible) demande la mise au point d'un procédé d'auto-étalonnage en ne se basant que sur les

---

<sup>2</sup> <http://mitiv.univ-lyon1.fr>

données scientifiques (comme pour la déconvolution aveugle). La bonne solution sera sans doute une combinaison de ces approches.

## 8.2. Le traitement du signal en HRA dans les 5 ans qui viennent

Il y a encore beaucoup à gagner par le traitement du signal pour le retour scientifique et le développement des instruments astronomiques et plus particulièrement en haute résolution angulaire (HRA). Bien que l'approche inverse a clairement démontré sa capacité à tirer le meilleur parti des observations malgré leurs défauts (flou, distorsion, bruit, incomplétude des mesures, ...), ce potentiel est encore loin d'être complètement ou correctement exploité sur les instruments existants. Les nouveaux instruments fournissant des informations plus riches mais aussi moins directement utilisables, cela impose le développement de nouvelles méthodologies à cause de la forme des données (*e.g.*, reconstruction d'image en interférométrie) ou des signaux parasites (*e.g.*, algorithmes de détection des exoplanètes). Ces instruments posent aussi de nouveaux problèmes dont l'impact ne devrait pas être négligé. C'est en particulier le cas de la modélisation et surtout de la calibration de la réponse impulsionnelle (PSF) non-stationnaire, et donc non convolutive, en imagerie grand champ et avec les spectrographes à intégrale de champ. Des méthodes d'auto-calibration inspirées de la déconvolution aveugle ou exploitant la télémétrie (mesures des analyseurs de surface d'onde) semblent prometteuses mais restent largement à développer dans ce contexte. Notons que nombre de ces problèmes ne sont pas spécifiques à la HRA. Pour reprendre l'exemple précédant, des avancées dans le traitement des observations avec PSF variable bénéficieraient très directement à la spectrographie intégrale de champ (MUSE, HARMONI,...).

Le développement des algorithmes numériques et des moyens de calcul autorise des traitements sophistiqués en temps réel pendant les observations et offre une réelle opportunité d'améliorer les performances des instruments (suivi de frange en interférométrie, cophasage des miroirs segmentés des très grands télescopes, contrôle en optique adaptative). Penser le traitement du signal dédié à un instrument dès sa conception serait hautement bénéfique à de nombreux titres. D'abord, la bonne connaissance des effets instrumentaux est incontournable pour traiter correctement les mesures et en tirer des résultats optimaux, aux limites ultimes de sensibilité, de précision et de résolution. Cette connaissance est aussi indispensable pour développer les moyens (matériels et méthodologiques) nécessaires à la calibration d'instruments de plus en plus sophistiqués (la diversité de phase en XAO en est un exemple). Par ailleurs, la capacité de compenser par un traitement adapté certains défauts instrumentaux peut contribuer à relaxer notablement les spécifications d'un instrument et donc non seulement réduire les coûts et le temps de développement mais aussi ouvrir de nouvelles possibilités. De façon peut-être plus déterminante, cela peut être le seul moyen de rendre possible des projets ambitieux déjà lancés. En particulier, comme dans le cas de l'optique adaptative et des instruments de l'E-ELT, lorsque de nouveaux instruments ne peuvent plus être une simple extrapolation de ceux existants. Après l'échec de PRIMA, c'est aussi le cas des suiveurs de frange identifiés comme critiques pour l'astrométrie en interférométrie optique (GRAVITY). En optimisant le couple instrument-traitement, la « *co-conception* » est à même de lever ces points durs tout en ouvrant de nombreuses possibilités. Pour en tirer les pleins bénéfices en astronomie, il faut toutefois en étendre activement la mise en œuvre car la co-conception est une démarche encore relativement marginale. En partie parce qu'elle nécessite de faire travailler simultanément (et non plus séquentiellement) des chercheurs de domaines différents.

Le développement et l'exploitation des instruments en astronomie posent une large variété de problématiques susceptibles de motiver des développements au sein de la communauté Traitement du Signal (TS). Nous devons toutefois maîtriser et développer activement les méthodologies car il ne s'agit pas seulement d'adapter des approches existantes mais aussi d'en inventer de nouvelles pour les finalités de l'astronomie. Cela suggère un renforcement des liens avec les chercheurs du TS mais aussi un soutien des activités de R&D et une évolution culturelle au sein de la communauté astronomique pour intégrer le TS à la formation des astronomes, valoriser la R&D en science des données et motiver des vocations, pour passer des chaînes de traitement de type «*pipeline*» à des approches plus globales et optimales.

## 9. Optique et turbulence atmosphérique

### 9.1. Optique active

*par Emmanuel Hugot*

Aujourd'hui placée au coeur des plus grands observatoires au sol (VLT, Keck, GTC, etc...), l'optique active a été la rupture technologique rendant possible la réalisation de télescopes de très grands diamètres, tout en s'affranchissant du concept de structure ultra-stable. Avec un principe de maintien de la forme optimale des optiques en jouant sur le comportement des matériaux, l'Optique Active permet désormais d'envisager des télescopes extrêmement grands (ELTs), mais aussi d'augmenter la taille des télescopes spatiaux pour accéder à la HRA depuis l'espace.

Sœur jumelle de l'optique adaptative, l'optique active utilise néanmoins des méthodologies différentes pour adresser des besoins différents. La mécanique des milieux continus est au cœur des R&D et réalisations menées en optique active et permet de concevoir des systèmes optimisés répondants à des besoins spécifiques: augmentation de la taille des miroirs primaires, optimisation du ratio masse/coût, développement de miroirs déformables dédiés aux conditions spatiales, etc...

L'optique active participe aussi aux optimisations de systèmes complets: en offrant des capacités de corrections d'aberrations précises et de grandes amplitudes, elle offre des fonctions particulières désormais utilisées quotidiennement. L'un des exemples les plus illustratifs est l'utilisation de miroirs à courbure variable sur les lignes à retard du VLTI, permettant de recombinaison les pupilles des UTs et ATs en adaptant leur taille et leur position. Un autre exemple plus actuel est l'utilisation d'un miroir à toricité variable au cœur de l'instrument VLT-SPHERE, qui permet d'assurer le bon fonctionnement du système d'optique adaptative extrême en compensant en temps réel les défauts du miroir déformable du système. Enfin, le secondaire du CFHT (diamètre 1.4m) est maintenu sous déformation permanente à l'aide d'un système d'optique active pour compenser son aberration sphérique.

D'autres activités sont basées sur la mécanique des milieux continus appliquée à l'optique, comme la recherche en fabrication optique, qui a permis de réaliser les optiques asphériques superpolies de SOHO (ESA), SPHERE (ESO) et HiCAT (STScI), le prototype de segment hors axe de 1.5m pour

l'E-ELT ou encore le prototype de miroir secondaire déformable VLT (ESO).

Désormais identifiée comme stratégique pour le développement de la HRA spatiale, l'optique active permet de développer des axes de recherche tels que l'optimisation combinée des systèmes de correction et de mesure, structures de maintien et méthodes de fabrication de miroirs de grands diamètres afin d'optimiser en tant que systèmes les télescopes spatiaux de nouvelle génération de la classe de 2m.

## 9.2. Profils verticaux de turbulence atmosphérique

*par Aziz Ziad*  
pour le 7/11/2015

- PBL
- mesure turbulence dans milieu confiné
- CO-SCIDAR