

# Document de bilan et prospective de l'Action Spécifique Haute Résolution Angulaire (ASHRA)

Conseil Scientifique de l'ASHRA

Pierre Baudoz, Jean-Philippe Berger, Philippe Bério, Jean-Marc Conan, Gilles Duvert,  
Eric Gendron, Emmanuel Hugot, Frantz Martinache, David Mary, Florentin Millour,  
**David Mouillet**, Benoit Neichel, Eric Thiébaud

10 juin 2020

# Contents

<b>1</b>	<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Communauté et activité 'HRA' en France</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>L'ASHRA depuis 2015 : grandes questions, avancées et faits marquants</b>	<b>7</b>
3.1	Optique adaptative	7
3.1.1	Montée en maturité : "Du laboratoire à l'opérationnel"	7
3.1.2	Du VLT à l'ELT, l'adolescence du géant	7
3.1.3	Maintien de la R&D	8
3.1.4	Au delà de l'OA pour l'astronomie	9
3.2	Interférométrie longue base	10
3.2.1	Le succès de l'ouverture d'instruments ambitieux, sur des infrastructures renforcées	10
3.2.2	Faciliter l'usage de l'interférométrie	10
3.2.3	S'organiser pour l'interférométrie post-VLTI	12
3.3	La haute dynamique à l'épreuve du feu	12
3.3.1	Contrôle fin de la diffraction : de l'atmosphère au détecteur	12
3.3.2	Première génération d'instruments pensés pour le haut-contraste	12
3.3.3	Etapas incrémentales: vers la détection directe de planètes terrestres	13
3.4	Le traitement du signal : de l'arrière pensée à l'élément dimensionnant	15
3.4.1	Le signal au coeur de l'instrument : co-conception, contrôle temps-réel	16
3.4.2	Approches statistiques et de type problèmes inverses	17
3.4.3	Développer l'utilisation des outils du TS et faire vivre les interactions avec la communauté TS	18
<b>4</b>	<b>Réflexion prospective</b>	<b>19</b>
4.1	Optique Adaptative	19
4.1.1	OA OA OA !	19
4.1.2	L'ELT comme étoile-guide	19
4.1.3	Les futurs défis de l'OA	19
4.2	Interférométrie	20
4.2.1	Comment assurer l'exploitation optimale et le retour d'expérience des instruments et des infrastructures existantes ?	21
4.2.2	Pousser aux limites l'instrumentation sur les infrastructures existantes.	22
4.2.3	Comment préparer l'au delà des infrastructures (post-VLTI, post-CHARA)?	23
4.3	Haute Dynamique	25
4.3.1	Opportunité et importance (astronomique et instrumentale) de démonstrateur poussé sur ciel	25
4.3.2	Aborder la haute dynamique sur l'ELT ou dans l'espace	26
4.3.3	Une R&D dédiée pour gagner 4 ordres de grandeur	27
4.3.4	La haute dynamique comme lien entre les thèmes ASHRA	27
4.4	Signal	28
<b>5</b>	<b>Structure ASHRA : rôle et perspectives</b>	<b>29</b>
5.1	Pour une communauté motivée, cohérente	29
5.2	Soutien de fonctionnement : animation et incitations	30
5.3	Réflexions sur les perspectives de l'ASHRA	30
<b>6</b>	<b>Annexes</b>	<b>32</b>
6.1	Rappel du mandat (2015)	32
6.2	Liste des thèses	34
6.3	Liste des communiqués de presse	37
6.4	Liste des conférences internationales co-organisées par la communauté HRA	38
6.5	Liste des acronymes	39

# 1 Résumé

L'Action Spécifique Haute Résolution Angulaire (ASHRA) couvre les activités de recherche en instrumentation et réalisation instrumentale dans les domaines de l'interférométrie, l'optique adaptative, les mesures à très grand contraste, et les techniques intimement associées de sciences des données, dans le domaine optique (visible et proche infrarouge). Ces activités concernent des applications pour les instruments au sol ou dans l'espace, avec des conditions de fonctionnement certes distinctes, mais de fortes synergies en termes de méthodologie, concepts, les technologies impliquées ou de savoir-faire nécessaires.

L'activité des acteurs français sur ce périmètre est importante, avec une communauté de l'ordre de 200 personnes (pour environ 90 ETP), vive avec plus de 60 thèses recensées sur la période, un rôle de premier plan et une visibilité internationale remarquables comme en témoignent par exemple les prises de responsabilité et l'expertise "système" dans les plus grands instruments de la communauté.

**Un périmètre avec un sens physique clair, et un sentiment d'identité stimulant.** Ces différents aspects, apparus successivement dans la communauté astronomique, partagent un fort point commun dans la démarche méthodologique, les enjeux croissants avec les besoins observationnels associés aux télescopes toujours plus grands. Ce point commun est fondé sur **une même physique** et l'objectif de *maîtrise du front d'onde*, comme exprimé dans le rapport précédent de l'ASHRA. Cet objectif commun se décline de différentes manières selon les domaines, avec un front d'onde prélevé sur des longues bases en *interférométrie*, un nombre de degrés bien plus importants pour un contrôle continu sur une pupille pour l'*optique adaptative*, une tolérance beaucoup plus resserrée pour des mesures plus précises et l'association à d'autres composants (coronographes, senseurs fins...) pour le *grand contraste*. Dans tous les cas, les *sciences des données* ont un rôle croissant que ce soit en amont de la conception des instruments ou le traitement a posteriori des données obtenues. Un autre point commun, fort, repose sur **une approche méthodologique partagée**, avec une place centrale à l'"analyse système", permettant d'imaginer des concepts innovants en lien avec les besoins astronomiques, des recherches répétées et critiques des facteurs limitant analysés en budgets de performances, le besoin d'exploration en simulation numérique, en démonstration de laboratoire et jusqu'à l'analyse du comportement effectif et riche d'enseignements sur le ciel.

On note le sens d'une identité forte, voire même renforcée, ressentie au sein de la communauté sur ce périmètre. L'existence de l'ASHRA a certainement de facto contribué à favoriser cette identité et les échanges entre les domaines la constituant, et au final la communauté correspondante partage une culture commune. La spécialisation et la complexification des concepts appliqués dans chacun des domaines ne tend paradoxalement pas à les éloigner ; au contraire, il apparaît plutôt que les concepts se rejoignent dans leur formulation, l'analyse des limitations fondamentales : les idées et méthodes mises en œuvre s'enrichissent entre les domaines d'applications. Si nous gardons dans ce document une structure organisée par thèmes, nous soulignons les échanges et les liens qui les unissent. Les exemples sont nombreux et plusieurs équipes contribuent au premier plan à plusieurs domaines : ainsi les questions pertinentes cruciales sur les précisions des mesures de clôture de interférométrie sont celles de l'imagerie mono-pupille en masque non redondant ; ce sujet allant vers des précisions de mesures accrues rejoignent donc aussi les questions de grand contraste, avec l'optimisation de formes de pupilles, et le couplage des fonctions de senseur et de coronographie ; les problématiques de mesure des perturbations atmosphériques, de référence de phase et prédiction hors axe pour aller vers le grand champ ou des mesures plus rapides sont bien sûr transverses aux différents domaines avec un recours commun et croissant au traitement du signal.

**Une activité intense et pleine de défis.** Chacun des axes a connu un développement important. Cela concerne des aboutissements en termes d'instruments disponibles à la communauté ouvrant des fenêtres observationnelles spectaculaires : les années ont été marquées par exemple par l'exploitation de l'imagerie à grand contraste avec SPHERE ou l'arrivée sur le ciel des instruments interférométriques VLTI de deuxième génération GRAVITY puis MATISSE. Cela concerne aussi l'émergence de concepts nouveaux offrant des perspectives à la mesure des objectifs astronomiques aussi ambitieux que par exemple l'ouverture de l'univers "faiblement" lumineux et en particulier extragalactique à la haute résolution (en interférométrie ou en optique adaptative grand champ) ce qui demande non seulement des avancées sur des nouveaux éléments de mesures et la maîtrise de l'ensemble complexe des systèmes (étoiles lasers, mesures tomographiques de l'atmosphère, interférométrie double-champ,...).

**Des enjeux (et difficultés) toujours croissants.** Les techniques HRA, autrefois pionnières, ouvertes à l'exploitation principalement aux peu nombreux experts les ayant mises en œuvre, se sont développées, ont gagné en maturité et sont maintenant opérées de manière routinière pour une vaste communauté. Elles sont même parfois tout à fait indispensables comme dans le cas de l'OA pour le télescope futur ELT. Ce succès s'accompagne d'une pression correspondante accrue quant à l'exigence portée sur la qualité des instruments à délivrer. L'impact sur les résultats astrophysiques stimule aussi fortement une montée des objectifs de performance (pensons par exemple au gain d'un facteur  $>10$  en contraste obtenu avec SPHERE, ou encore à l'ambition de l'ouverture de l'observation de sources faibles dans tout le ciel à la résolution interférométrique avec le futur de

VLT/GRAVITY+ !). Le grand nombre d'utilisateurs (non experts) envisagé souligne également le besoin de plan d'étalonnage et de traitement a posteriori des données, fiable et efficace, à la mesure de l'investissement instrumental. Le contexte prospectif de ces activités est donc extrêmement riche. Il demande bien sûr un appui sur l'expérience acquise sur les instruments antérieurs, mais aussi sur une force de proposition, d'analyse et de maîtrise de concepts innovants. Un délicat équilibre, tendu mais devant s'enrichir l'un l'autre, entre développement de projets et R&D doit être maintenu, porteur des succès futurs. Une grande qualité d'échanges au sein de la communauté, au sein de chaque thème et aux interfaces, est également essentielle, pour stimuler de nouvelles idées, identifier les opportunités, souligner les synergies et optimiser les résultats obtenus avec les ressources limitées.

**Le rôle de la structure ASHRA : une logique dans la continuité, des actions sans cesse renouvelées.** Dans ce contexte, la motivation pour la structure ASHRA apparaît toujours vive, avec un objectif d'animation, stimulation et coordination de la communauté, en plus d'un relais et d'un rôle d'expertise auprès de l'INSU. Le défi est d'avoir une efficacité certaine sur ces points, tout en restant une structure légère, sans empiéter sur les prérogatives décisionnelles des agences ou structures locales, le dynamisme des initiatives émergentes, ou encore les logiques spécifiques de chaque projet. Le retour d'expérience, tel que ressenti dans la communauté HRA, est largement positif (bien au-delà d'un soutien direct au fonctionnement). Nous suggérons le poursuite de ce fonctionnement, dans la continuité des objectifs et du périmètre thématique, en témoignant de certains éléments de retour d'expérience, et de réflexions en particulier concernant la veille des activités aux interfaces de domaines connexes.

## 2 Communauté et activité 'HRA' en France

La notion de "Haute Résolution Angulaire" dans le domaine optique (visible et infrarouge) correspond à un domaine de compétence avec des sujets d'expertise spécifiques ; elle correspond à des enjeux importants sur les moyens d'observation déployés récemment et envisagés dans l'avenir. Elle correspond en France aussi à une *communauté* d'acteurs significative en nombre, active et qui a développé un sentiment d'identité au fil des années. Le suivi, par un programme national d'abord puis par l'action spécifique, a certainement contribué à cette identité, par une culture partagée, une expertise et des échanges nombreux. Rappelons ici certains éléments factuels sur cette communauté 'HRA'.

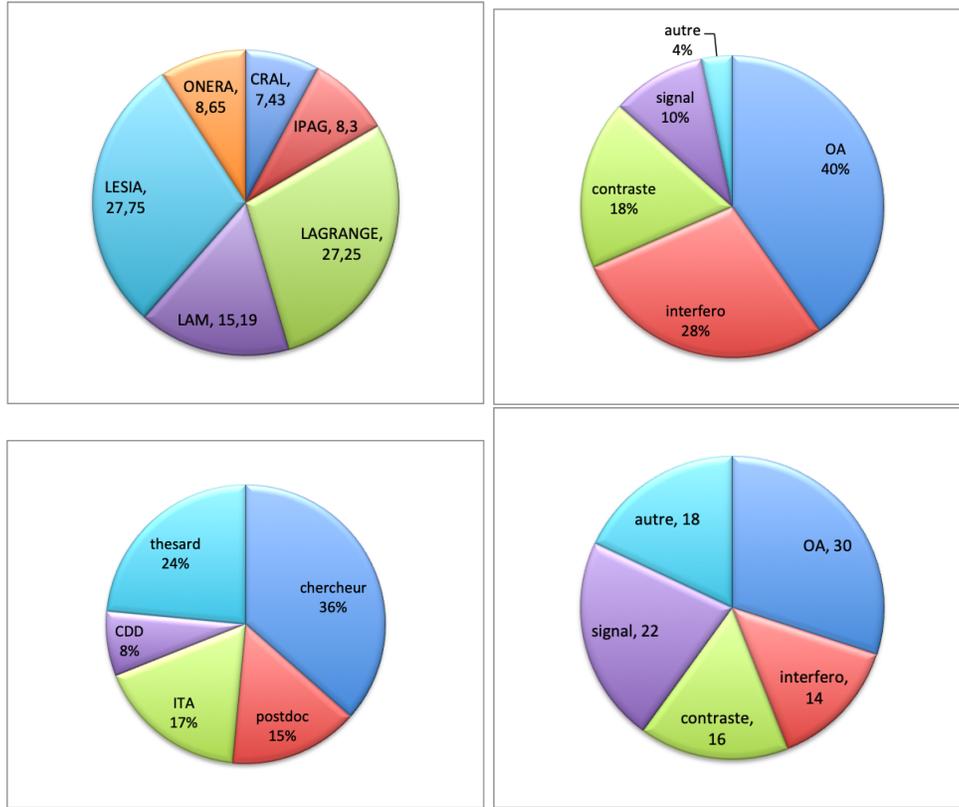


Figure 1: Haut : répartition des ETP 'HRA' (nombre de personnes × fraction du temps sur une activité HRA, en moyenne sur la période), par laboratoire (gauche, [a]) et en proportion par domaine thématique (droite, [b]). Bas : proportion des acteurs physiques (indépendamment de la fraction du temps) en fonction du statut (gauche, [c]) et nombre de thèses par domaine thématique (droite [d])

En *termes d'effectifs*, cette communauté est importante avec de l'ordre de 200 personnes directement identifiées sur ce domaine, représentant environ 90 ETP. La répartition géographique montre une certaine concentration sur des centres pas trop petits (avec pas moins de 15 personnes physiques) permettant des échanges locaux stimulants, et souvent une coloration spécifique sur un domaine d'expertise (pour autant, nous soulignerons aussi plus bas l'importance de collaborations fortes). Ces acteurs (Fig.1.c) incluent chercheurs et étudiants de manière équilibrée, ainsi qu'une contribution significative d'ITA. Une partie des ressources concerne la réalisation d'instruments d'observation pour la communauté ; on ne peut considérer toutefois ce domaine uniquement comme un service de réalisation, et ce pour plusieurs raisons : chacun des instruments réalisés est bien sûr unique avec ses défis spécifiques ; nous voyons l'importance de pouvoir garder une bonne synergie avec des activités de recherche qu'elle soit directement liée à la programmation instrumentale, ou qu'elle soit plus amont avec l'imagination et la démonstration de nouveaux concepts ; nous voyons également le potentiel d'application des démonstrations effectuées dans les publications et ou les collaborations avec d'autres domaines applicatifs.

S'il est difficile de quantifier ces éléments, l'inspection des *thèses soutenues ou en cours* est révélatrice (annexe 6.2). Leurs sujets sont des sujets de recherche, indicateurs des pistes de développements prometteuses, et non pas une réalisation d'instrument. Le nombre de thèses recensées (de l'ordre de 60 soutenues depuis 2015 ou en cours) couvrant l'ensemble du périmètre HRA

souligne la richesse des questions à traiter. Ces thèses témoignent également concrètement des collaborations fortes, avec environ 1/3 des thèses en co-encadrement entre laboratoires français, mais aussi 1/3 de co-encadrements avec d'autres laboratoires, à l'international ou bien en France avec d'autres thématiques, avec des industriels et/ou des domaines connexes bénéficiant directement des questions abordées ou des expertises en HRA, allant vers des domaines tels que la détection, le bio-médical ou encore les télécommunications.

On peut s'appuyer sur d'autres indicateurs. Les *communiqués de presse* fournissent un indicateur de certains faits marquants, orientés essentiellement, pour ce qui concerne la HRA, sur l'aboutissement de réalisations instrumentales, avec une contribution française essentielle au niveau européen pour ce qui concerne le domaine HRA et l'ouverture de nouvelles fenêtres observationnelles impressionnantes (voir annexe 6.3). On peut d'ailleurs suggérer pour le futur l'encouragement à communiquer également sur des résultats de R&D : cela demandera de bien penser cette R&D avec la capacité de souligner son impact possible sur les capacités du futur en astronomie (ou dans d'autres domaines), ainsi que l'identification de jalons significatifs, deux réflexions intrinsèquement saines pour l'activité de R&D indépendamment du rôle de communication. Un autre type d'indicateur, plus orienté sur les actions de R&D, est l'*organisation de conférences*. Les acteurs français sont particulièrement actifs au niveau international (voir annexe 6.4), en étant sollicités comme membres du SOC des conférences les plus reconnues, ou même initiateurs de nouvelles conférences (comme dans le cas par exemple de la série de conférences 'AO4ELT' qui connaît un succès et un impact croissants).

En termes de *domaines d'action et de projets*, les sections suivantes présentent largement les grands axes d'actions, des faits marquants, des aboutissements dans des réalisations instrumentales, des enjeux et des pistes de R&D (bilan 3 et prospective 4).

Enfin, l'activité de recherche évoquée ci-dessus s'accompagne de *contributions à la formation et à la diffusion des connaissances* : cela prend forme de formations vers les doctorants et jeunes chercheurs (telles les "écoles VLTI" par exemple), aux contributions dans les filières académiques, et jusqu'à la diffusion des connaissances vers un public très large. Au niveau des formations académiques, des modules spécifiques concernant les techniques HRA sont fournies en master ou écoles d'ingénieurs ; et on note en particulier un effort fait sur le domaine des sciences des données que ce soit par l'inclusion de cours correspondants dans des formations principalement physique et astrophysique, ou bien l'illustration dans le domaine astronomique au sein de filières de traitement du signal. Ces ponts ont été identifiés comme particulièrement importants et sont bien sûr encouragés pour la suite. Dans le domaine de la formation, on peut aussi souligner un retour d'expérience très positif, et unanime dans plusieurs laboratoires, sur les formations en apprentissage alliant dans la durée la poursuite d'un cursus en école et dans les laboratoires.

## 3 L’ASHRA depuis 2015 : grandes questions, avancées et faits marquants

Cette section présente bilan des années passées de 2015 à aujourd’hui début 2020 dans le domaine HRA. Loin d’une liste exhaustive des actions, il s’agit de faire ressortir les grandes questions dont les acteurs français se sont saisi en cherchant à souligner les enjeux et le positionnement dans le contexte international, des aboutissements, sous forme d’instruments livrés, de faits marquants, de montée en maturité sur des savoirs-faire ou la proposition de nouveaux concepts. Cette section (comme la suivante) est structurée par thématiques, bien que nous soulignons un nombre important et croissant d’interfaces, d’interactions entre elles, bénéficiant de nombreux échanges. Si nous parlons d’optique adaptative en astronomie depuis 30 ans, d’interférométrie longue base depuis une décennie supplémentaire, nous souhaitons souligner l’évolution en cours : les enjeux et défis sont fortement renouvelés, demandant tout à la fois des concepts qualitativement nouveaux, des démonstrations effectives en laboratoire puis trouvant leur application robustes dans des instruments producteurs de nouveaux résultats astrophysiques par une vaste communauté, ainsi que l’appui sur un savoir-faire soigneusement maintenu dans les laboratoires. C’est cette dynamique que nous souhaitons faire ressortir pour une vision de stratégie du domaine.

### 3.1 Optique adaptative

#### 3.1.1 Montée en maturité : ”Du laboratoire à l’opérationnel”

Soulignons l’importance du travail nécessaire, pour un faire progresser un concept, de l’idée initiale proposée (avec une discussion théorique ou appuyée de simulations des performances atteignables, de leur intérêt en fonction du cas d’application et dans le paysage des solutions alternatives) à une démonstration réaliste en laboratoire ou sur une expérience sur ciel ponctuelle, et enfin, jusqu’à un instrument délivré à un observatoire, opérationnel par des non-spécialistes. Cette dernière étape, parfois moins spectaculaire du point de vue de la recherche en instrumentation, est pourtant très demandeuse : elle requiert non seulement de livrer un outil fonctionnel répondant à des spécifications pré-établies, mais aussi la maîtrise des limites de fonctionnement pour assurer fiabilité et robustesse, la compréhension des performances fines, une revue de l’analyse système, et les éléments opérationnels dont en particulier les propriétés de l’étalonnage (des composants au système dans son ensemble).

Aujourd’hui tous les grands télescopes au sol de la classe 8/10 m sont équipés d’OA, et la période 2015 à 2019 a vu fleurir les instruments de deuxième génération du VLT. Pour ce dernier, on citera par exemple la mise en opération de SPHERE, MUSE+AOF (principalement mené par l’ESO) ou encore NAOMI (Fig 2). Les OA de ces instruments couvrent un large spectre des options possibles, avec respectivement de l’OA eXtrême, de l’OA multi-laser ou encore de l’OA plus classique. La période 2015 à 2019 aura donc été marquée par une *montée en maturité* importante sur de tels systèmes permettant de mieux comprendre les limitations obtenues, de les adapter de manière ciblée à des utilisations plus spécifiques, ou encore de les complexifier pour ouvrir largement le champ d’application.

La mise en opération de ces systèmes d’OA représente l’aboutissement de nombreuses années d’efforts qui ce sont principalement concentrés sur deux grands axes : l’opérabilité et l’amélioration des performances par rapport aux premières générations. Ainsi, et même si les nouveaux systèmes sont sensiblement plus complexes, leur intégration dans les opérations est grandement améliorée, et leur utilisation en devient d’autant plus transparente. La fluidité des opérations passe d’une part par la prise en compte de simplicité (qui s’exprime ici par un nombre de modes réduits) en limitant l’impact sur la performance. Au niveau de l’analyse de performance, un travail important, et toujours en cours, a porté sur ces différents instruments mis en opérations. On peut citer la compréhension fine de phénomènes tels que le “Low Wind Effect”, le contrôle optimal ou prédictif, les questions de turbulence interne sur SPHERE, l’auto-calibration, ou les questions de structure verticale de la turbulence et son impact sur la conceptions des variantes de modes de correction à grand champ sur l’AOF, ou encore les questions d’étalonnage fin de la réponse du miroir déformable sur NAOMI . . . La caractérisation détaillée des budgets d’erreur offerte par les nouveaux systèmes permet de mieux les exploiter scientifiquement, mais aussi de fonder la conception des instruments futurs, du niveau des composants au système dans son ensemble.

#### 3.1.2 Du VLT à l’ELT, l’adolescence du géant

Le succès et la solidité des développements et des instruments de 2ème génération VLT fournissent un fondement indispensable pour des étapes ultérieures, telles que les enjeux de l’ELT. Il est tout d’abord important de souligner que l’ELT est un défi formidable pour l’OA, car l’ensemble de ses instruments seront équipés d’un module d’OA. Le succès de ces modules repose pour une partie importante sur les épaules de la communauté française HRA. Elle tient un rôle dans les SCAOs des instruments de première lumière MICADO et HARMONI, dans la LTAO d’HARMONI, dans une contribution à MAORY ainsi que dans les OAs envisagées pour MOSAIC. Au vu de la fiabilité des OAs du VLT, on pourrait penser que la tâche sera aisée sur l’ELT, et qu’une simple mise à l’échelle suffira. Il n’en est malheureusement rien, car l’ELT apporte son lot de défis conceptuels, technologiques et programmatiques: taille du problème, forme de la pupille, nouveaux senseurs ‘pyramide’, spécifications instrumentales hyper-tendues ne sont que quelques-uns des aspects de la difficulté.

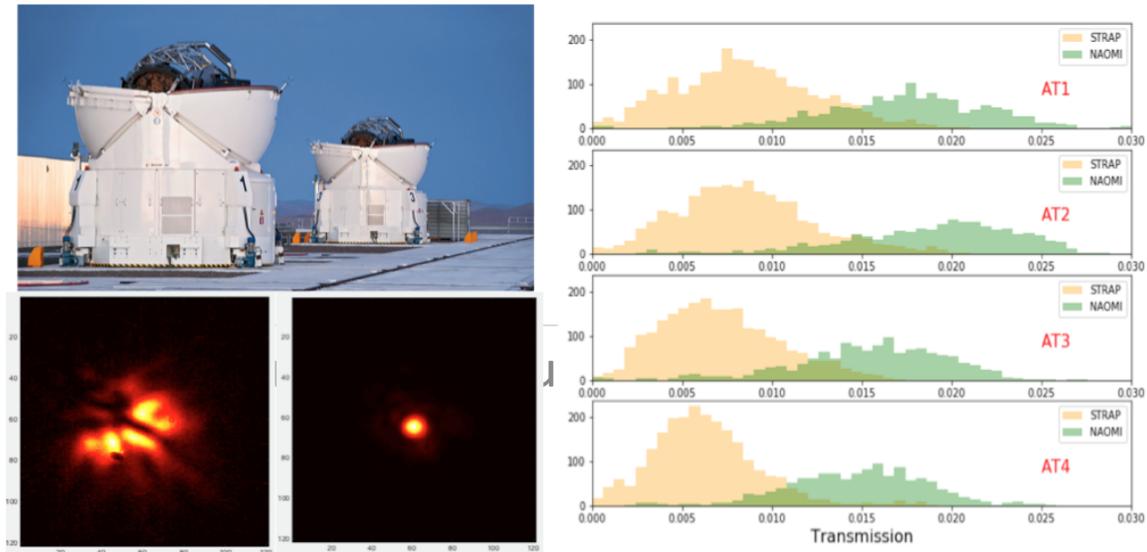


Figure 2: Chacun des 4 ATs du VLTI a été équipé d’un système d’optique adaptative, NAOMI, développé dans un cadre de ressources et calendrier contraint jusqu’à son intégration dans l’ensemble opérationnel interférométrique. La fermeture de boucle permet un gain en transmission ‘moyen’ de l’injection dans les fibres des instruments recombinés (PIONIER ici, figure de droite issue du rapport de commissioning, J. Woillez et al) significatif, de l’ordre de 1 magnitude ; il rend surtout beaucoup plus stable et robuste l’ensemble de mesure interférométrique et de suivi de frange en réduisant fortement les cas où le flux de l’une des voies tombe sous le niveau de bruit. Ces systèmes, restant modeste en performance et complexité, aborde des questions innovantes en particulier dans le régime de fonctionnement du miroir déformable, avec le besoin strict de ne pas introduire de piston, et une commande d’un modes très partiellement vus imposant donc un étalonnage d’un contrôle ‘en aveugle’ (de type boucle ouverte).

Un exemple très spécifique du *changement de paradigme* concerne les interfaces entre le télescope et ses instruments. Alors que jusqu’ici la frontière entre le contrôle et la responsabilité du front d’onde était clairement définie entre le télescope et ses OAs (le télescope avait en charge l’Optique Active, les instruments l’OA), l’ELT voit un contrôle partagé entre le télescope et les instruments. Le miroir déformable est intégré dans le télescope, et celui-ci est utilisé à la fois par le télescope et les instruments. Si la correction de l’atmosphère semble à portée de main, les incertitudes sur le télescope déboucheront sur une période d’apprentissage et d’amélioration des performances qui prendra du temps.

La période 2015 à 2019 a principalement vu des avancées et une consolidation du cadre de travail. Autrement dit, un effort important de “mise en ordre de marche” a été effectué et aujourd’hui les instruments des premières lumières semblent tous ‘sur des rails’. On notera aussi un effort de rationalisation et de mise en place de collaborations ou partage de lots de travail (exemple des analyseurs laser) entre les projets. Cette rationalisation s’est construite dans une approche “bottom-up”, notamment à l’initiative du groupe de travail AO4ELT de l’ASHRA. C’est une organisation nouvelle, car l’ESO avait l’habitude de jouer ce rôle de chef d’orchestre, avec une implication forte dans les développements d’OA (e.g. RTC Sparta), ce qui n’est plus du tout le cas pour l’ELT. Ainsi, il faut souligner qu’une des déceptions de la communauté HRA autour de l’ELT est d’avoir le sentiment que l’OA aurait pu être mieux intégrée dans le télescope, et dans les opérations.

### 3.1.3 Maintien de la R&D

On pourra noter que sur la période 2015→2019, la R&D OA aura été structurée autour de 2 axes: (i) la R&D effectuée autour des grands projets, et notamment l’ELT, (ii) la R&D amont, qui se décline à la fois autour des concepts et des composants.

Il est utile de rappeler que la question se pose de l’équilibre entre implication dans les grands projets, souvent dans un contexte contraint et à forte pression sur la fiabilité, les délais et les coûts (plus que sur les solutions innovantes), et la R&D (d’autant plus la R&D amont) . La priorité dans les faits, si arbitrage est nécessaire et sur les personnels permanents, est placée sur la satisfaction des engagements pris sur les grands projets. La solution souhaitée pour maintenir une R&D active et porteuse de projets futurs est de rebondir sur cette activité projet, pour élargir par effet de levier le périmètre des ressources autour des contributions stimulées et mises en lumière par les projets : attirer des étudiants, organiser des conférences stimulant les échanges, valoriser les collaborations initiées dans les projets, faire émerger des contrats (par exemples européens). Si, sur la période passée, ces pistes de développement ont pu être effectivement mises en oeuvre avec un certain succès (voir par exemple l’indicateur des sujets de thèses, annexe ??), *cette question d’équilibre reste un point de vigilance.*

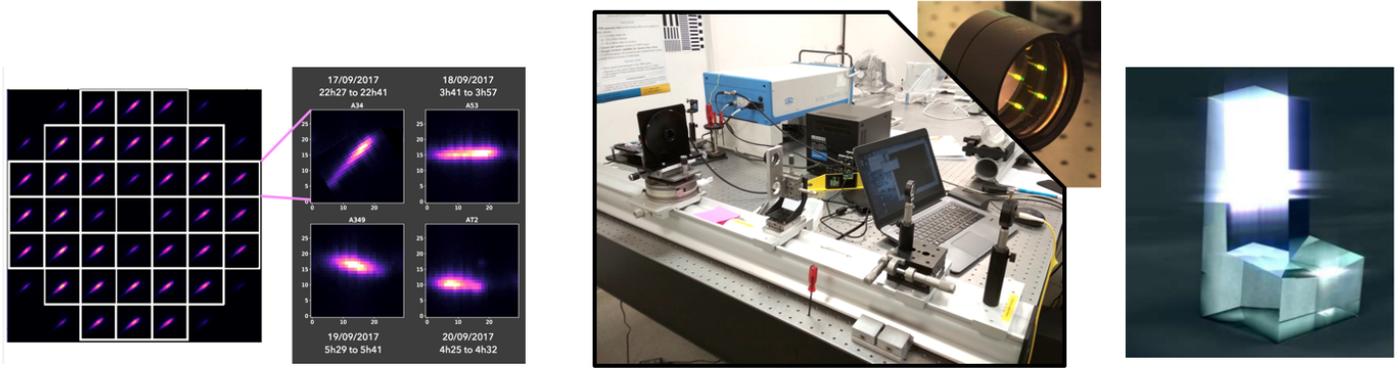


Figure 3: Gauche = CANARY (mesures sur le ciel au télescope WHT de mesures issues d'étoile laser sodium, dans des conditions représentatives d'un télescope de 40-m). Centre = démonstrateur banc LAM, pour le test en laboratoire, et donc avec des conditions maîtrisées et paramétrisables, de solutions envisagées), gauche = INGOT (exemple de R&D continue, de types d'analyseurs alternatifs).

Il est difficile d'être exhaustif mais on peut prendre à titre d'illustration la mesure de front d'onde sur étoile laser pour les ELTs (Fig 3). Les sources de référence laser deviennent, sur un télescope de 40-m, très allongées, et les concepts d'analyse de surface d'onde standard doivent être revus. Sur le premier point R&D, en lien direct avec les grands projets, le démonstrateur CANARY a ainsi pu reproduire une fraction de la pupille du futur ELT, en installant une source laser à une distance de 40m du télescope WHT où se trouve l'analyseur de surface d'onde. Plusieurs expériences sur banc ont aussi pu être montées et utilisées intensivement pour palier à ce manque. Ces démonstrations en conditions quasi-réelles (incluant un profil vertical réel et variable de la concentration de sodium en altitude) ont permis de lever des risques, proposer des concepts solides pour les instruments de l'ELT, et aujourd'hui un niveau fin de compréhension est atteint.

Sur le deuxième point, la R&D amont, l'effort a été maintenu dans les laboratoires, inspiré par les besoins des futurs projets, mais aussi purement amont. Pour rester sur le thème de l'analyse de front d'onde, de nouveaux concepts d'analyseurs ont ainsi vu le jour pendant la période 2015→2019, avec par exemple la "pyramide aplatie", ou le "ingot" WFS pour l'analyse sur étoile laser.

Au-delà de cet exemple, la R&D se poursuit sur plusieurs axes, toujours motivés par un objectif scientifique bien identifié, avec notamment : i/ le besoin d'aller vers des niveaux de correction toujours plus fins pour la haute dynamique et le compromis avec la sensibilité (avec en particulier la maîtrise fine des senseurs de type 'pyramide' et les questions associées de gestion de non-linéarité, ou encore la proposition de nouveaux types de senseurs), ii/ la question de contrôle optimal (voir aussi 3.4.1 pour le lien fort avec les sciences des données et par exemple la R&D déployée sur THEMIS) sur-axe en particulier le plus rapide et robuste ou dans le volume pour une correction grand champ, ou encore iii/ le choix et la maîtrise des meilleures solutions matérielles et logicielles pour des modules critiques tels que les RTC ou les miroirs déformables.

### 3.1.4 Au delà de l'OA pour l'astronomie

L'OA (et plus généralement la maîtrise de la surface d'onde) s'applique à de nombreux domaines en dehors de l'astronomie, et la communauté Française est aussi très présente sur ce front. Quatre grandes thématiques applicatives se dégagent :

- **l'observation de l'espace proche à haute résolution angulaire.** Il s'agit ici d'imager et d'identifier des satellites (en orbite basse ou même géostationnaires) depuis le sol. Pour ce faire il faut combiner des techniques d'OA, d'interférométrie et de traitement d'images. Les liens avec l'astronomie pour cette thématique sont à la fois forts et historiques (depuis COME-ON). De nombreuses thèses et activités sont menées (en particulier au LAM, à l'OCA et à l'ONERA) en commun sur ces sujets (analyse de surface d'onde, commande et traitement d'images).
- **la maîtrise du canal de propagation pour la focalisation de faisceaux laser à travers la turbulence.** L'application phare étant les télécommunications en espace libre. Si au niveau de l'OA, on assiste plus ici à un transfert de technologie de l'astronomie vers la thématique, on voit apparaître de vraies synergies au niveau de la caractérisation fine du canal

de propagation (mesure de paramètres turbulents), l'optimisation du couplage dans une fibre et la gestion (étalonnage et opération) de systèmes d'OA en présence de conditions de turbulence fortes et non-stationnaires.

- **L'imagerie biologique en milieux complexes: la rétine, les tissus biologiques.** Ici les liens sont plutôt des liens de transferts de technologie OA de l'astronomie vers le biomédical. On notera toutefois les développements de techniques de traitements qui ont une vraie nature duale entre cette thématique et l'astronomie.
- **L'optique active spatiale** avec en particulier les techniques de cophasage et d'analyse de front d'onde. Si le spatial a ses propres contraintes, on notera des liens forts sur les composants/concepts élémentaires de la chaîne de mesure/correction.

## 3.2 Interférométrie longue base

### 3.2.1 Le succès de l'ouverture d'instruments ambitieux, sur des infrastructures renforcées

La priorité des 5 dernières années a été de consolider les infrastructures existantes (VLTI, CHARA) *pour une exploitation scientifique ambitieuse*. Cela a conduit la communauté (instruments, observatoires) à travailler sur l'amélioration des infrastructures (suivi de franges performant, travail sur la robustesse des infrastructures<sup>1</sup>), la mise en place d'optiques adaptatives (sur le VLTI et sur CHARA), la mise en place des instruments de seconde génération du VLTI, et enfin la réflexion sur de nouveaux sets d'instruments sur CHARA et sur le VLTI (cf les livres blancs ESO, EII et interférométrie visible réalisés récemment).

Côté VLTI, la première génération d'instruments a cédé sa place (AMBER et MIDI ont été décommissionnés), et la seconde génération d'instruments est maintenant pleinement opérationnelle, avec la première lumière de GRAVITY en 2016, et celle de MATISSE en 2018. L'arrivée de GRAVITY et MATISSE a été accompagnée d'un travail de fond sur l'infrastructure du VLTI, notamment sur la robustesse de l'opération du réseau interférométrique, l'amélioration de la stabilité des faisceaux, l'amélioration du traitement des vibrations des télescopes, et enfin l'arrivée des optiques adaptatives NAOMI sur les AT. Aujourd'hui, les deux instruments sont offerts à la communauté des astronomes professionnels et apportent déjà de nombreux résultats scientifiques.

Le suiveur de franges de GRAVITY permet le suivi de franges stable et sensible jusqu'à  $K=8$  sur les AT et  $K=10$  sur les UT. D'où les performances en double champ tout à fait remarquables de cet instrument: détection de franges sur S2 à  $K=14$ , détection de franges sur HD8799e à  $K=16$ ... Les résultats spectaculaires récents (mesure d'une orbite stable autour du centre galactique, rougissement gravitationnel de l'étoile détectée S2 la plus proche du trou noir central de notre galaxie, mesure du champ de vitesse de la BLR d'un AGN, spectroscopie d'une exoplanète pour n'en citer que quelques uns) montre à quel point cette sensibilité accrue génère des percées scientifiques spectaculaires. Avec la mise en place de l'OA NAOMI, cela autorise aussi l'observation d'objets "faibles" (TTauris, mais aussi certaines AGN) avec les AT, disponibles 300 nuits/an.

MATISSE de son côté, ouvre les bandes L et M, très largement inexplorées jusqu'à présent, et offre la plus large bande spectrale qu'un instrument interférométrique infrarouge ait jamais eu, avec une couverture de 3 à 13 microns simultanés. MATISSE ouvre aussi les capacités d'imagerie en infrarouge thermique (Fig. 4). Ces deux aspects offrent une voie très large à de nouvelles découvertes sur les programmes scientifiques principaux de l'instrument : zones de formation planétaires, noyaux actifs de galaxies, et physique stellaire. Comme il n'est offert que depuis début avril 2019, les résultats scientifiques devraient apparaître dans le prochain bilan de l'ASHRA, mais déjà l'engouement est fort pour cet instrument qui est aux spécifications attendues.

Côté CHARA, après plusieurs années d'exploitation intensive des instruments Français FLUOR et VEGA (18 publications dans des revues de rang A issues de données VEGA entre 2015 et 2019), une nouvelle génération d'instruments est en train de voir le jour. L'arrivée de ces nouveaux instruments est liée à l'arrivée de l'optique adaptative sur les télescopes : des instruments infrarouges plus performants (MIRCx, MYSTIC), et un instrument visible fibré de nouvelle génération (projet CHARA/SPICA). Le projet CHARA/SPICA a démarré suite aux résultats obtenus avec le démonstrateur FRIEND (Fig.5), qui a notamment permis de valider l'utilisation du filtrage spatial par fibres optiques monomodes dans les longueurs d'onde du visible.

### 3.2.2 Faciliter l'usage de l'interférométrie

En parallèle de l'arrivée des instruments de seconde génération du VLTI, très complexes et gourmands en expertise pour exploiter au mieux leurs données, la communauté des astronomes européens a mis en place des "VLTI Regional Centers" sur le modèle des ARCs ALMA, et c'est en France, à travers le SNO3 SUV ("Service aux Utilisateurs du VLTI") du pôle JMMC que l'essentiel de l'effort est concentré. SUV, présenté à la SF2A en Mai 2019, est un service à la personne qui accompagne les chercheurs non-spécialistes depuis la préparation des observations jusqu'à l'interprétation des données en s'appuyant sur la large gamme d'outils maintenus par l'autre SNO du JMMC, MOIO. Maintenant mis en place, la montée en puissance de ce service, en particulier vers de nouveaux utilisateurs non experts, est un des enjeux des années à venir.

<sup>1</sup>Notamment un très gros travail des équipes de l'ESO pour mettre à niveau la transmission du VLTI, supprimer les vibrations...

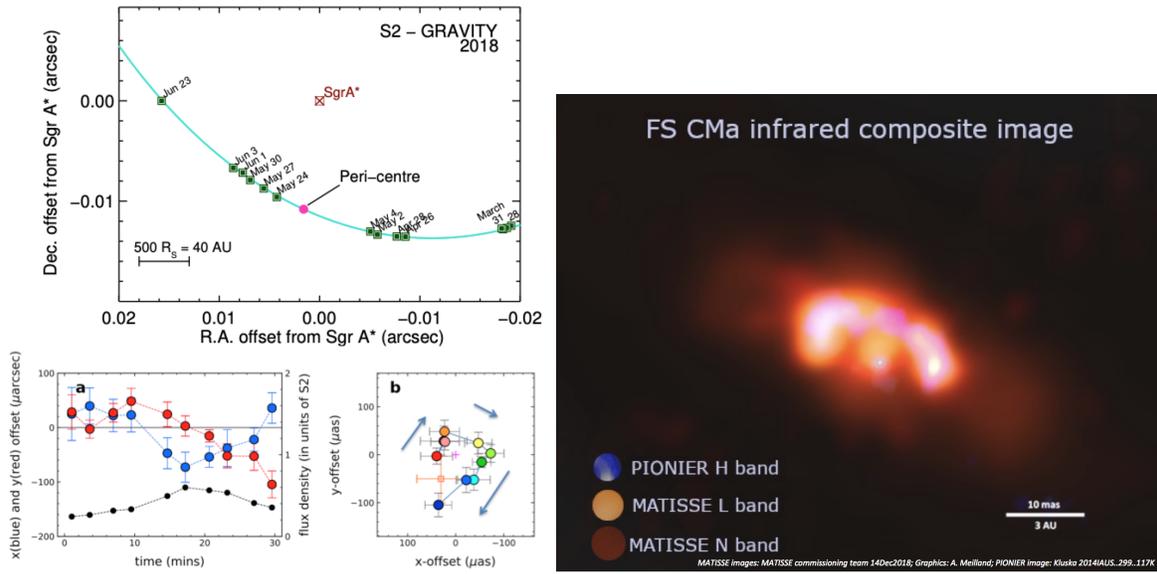


Figure 4: Résultats astrophysiques des instruments VLTI de 2<sup>e</sup> génération, ouvrant des fenêtres observationnelles totalement nouvelles. **Gauche** : mesure avec GRAVITY de la trajectoire de l'étoile S2 à proximité du trou noir central de notre galaxie, permettant de révéler (en lien avec les observations plus haute résolution spectrale) l'effet de rougissement relativiste en champ fort (haut). La précision astrométrique, à l'échelle de quelques dizaines de micro-secondes d'angle, s'applique aussi sur source plus faible (magnitude 14) : un sursaut d'intensité du trou noir lui-même, avec un déplacement indicateur de l'accrétion sur une des dernières orbites stables (bas). Ces illustrations utilisent les propriétés inédites de GRAVITY associant en particulier sensibilité pour le suivi de frange en infrarouge et les mesures interférométriques sur sources faibles, précision astrométrique, et rapidité des mesures en associant 4 UT. **Droite** : Une des premières images reconstruites à partir des données de l'instrument MATISSE. Observations de l'étoile B[e] FS CMA lors du run de commissioning de MATISSE en Décembre 2018. La capacité d'imagerie polychromatique, sensible, à différente résolution spectrale et à grande longueur d'onde est également sans précédent et sera essentielle pour de nombreux cas scientifique incluant les environnements de gaz et poussière aux échelles les plus pertinentes.

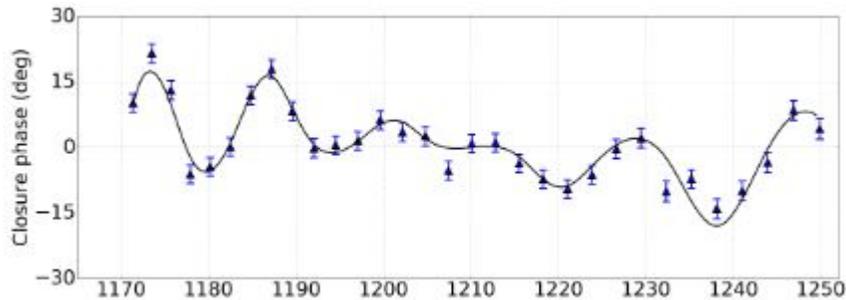


Figure 5: Illustration de la qualité des mesures obtenues avec l'instrument FRIEND. Clôture de phase mesurée sur l'étoile binaire  $\zeta$  Ori A. Chaque point représente 1 minute d'observation. Le trait continu représente l'ajustement d'un modèle de binaire. (Martinod et al., A&A, 2018)

Ces outils sont largement utilisés par la communauté, comme le prouve le taux de  $\sim 70\%$  de citations du JMMC dans [les articles rang A de la discipline](#)<sup>2</sup>.

### 3.2.3 S'organiser pour l'interférométrie post-VLTI

En plus de ce travail sur les infrastructures existantes, une première réflexion sur une future infrastructure, remplaçant les interféromètres actuels, a eu lieu et a permis de mûrir les idées qui circulaient dans l'air du temps. Il s'agit de l'initiative Planet Formation Imager (PFI) dont la collaboration internationale a été un franc succès. Elle a permis de donner une vision plus claire sur les défis et les verrous à lever pour réaliser une telle infrastructure, qui sera un pas majeur en avant pour l'interférométrie. Elle a permis aussi de prendre la mesure de l'effort et de la coordination internationale qui seront nécessaires pour une telle étape ! La suite à donner à cette première réflexion sur un futur grand réseau interférométrique est discutée en section 4.2.3.

## 3.3 La haute dynamique à l'épreuve du feu

### 3.3.1 Contrôle fin de la diffraction : de l'atmosphère au détecteur

En termes d'objectifs, la problématique centrale de l'imagerie à très haute dynamique (ITHD) est de s'accommoder de la présence d'un objet brillant dans une scène astrophysique qui aveugle l'instrumentation scientifique et interdit d'accéder aux informations pourtant théoriquement accessibles dans cette scène. Ce domaine de recherche, qui s'inscrit dans la lignée directe du coronographe de Lyot, a atteint un fort degré de maturité, à la fois au niveau des composants mais aussi au niveau de leur mise en œuvre pratique. Le cas scientifique premier justifiant la mise en œuvre et l'amélioration des performances de cette technique est l'étude des systèmes exoplanétaires et des environnements circumstellaires directs.

Décliné en terme de concept instrumental, cet objectif signifie que l'on parle de haute dynamique lorsque la limitation aux mesures sur un objet faible est dominée par un bruit lié à l'objet brillant voisin : l'estimation précise du halo (bruit des tavelures, associées aux résidus de turbulence atmosphérique, ou à la stabilité des défauts optiques non corrigés) et au bruit de photons associé (restant même si le halo était parfaitement connu). Un instrument à grand contraste demande donc i/ de réduire la diffraction liée à la géométrie de la pupille (créant la base du halo et son niveau minimal de bruit de photon correspondant) et ii/ de gérer et limiter le bruit de tavelures (d'origine atmosphérique en poussant en particulier le niveau requis de correction par l'OA, ou optique) par des mesures et corrections en temps réel, sur différentes échelles temporelles et spatiales, par tout système d'auto-étalonnage et le traitement a posteriori associé.

Pour le premier point, la haute dynamique implique donc de maîtriser la diffraction de l'ensemble définissant la pupille d'imagerie : le télescope et l'instrument. Cette fonction est assurée par un coronographe dans le cas d'un système mono-pupille ou un nuller dans le cas d'un interféromètre. Dans les deux cas, le dispositif permet de retirer optiquement la contribution statique de la diffraction. Les solutions théoriques haute dynamique proposées il y a une décennie concernaient essentiellement des télescopes circulaires idéaux, fonctionnant hors axe pour ne pas présenter d'obstruction centrale. Ce fort niveau de contrainte sur le design du télescope a retardé la mise en œuvre pratique de la haute dynamique hors des conditions de laboratoire. Alors qu'il ne semblait pas évident de garantir l'existence de solutions pour les télescopes à architecture complexe présentant de la segmentation, une obstruction centrale importante et une araignée qui introduisent tous de la diffraction dans les images, on peut aujourd'hui affirmer que *cette question de gestion de la diffraction de pupille a été résolue*. Chaque forme de pupille requiert cependant une phase d'optimisation et de compromis entre la transmission globale, la position des bords internes (IWA) et externes du champ à haut contraste et la largeur spectrale efficace, qui doit être mise en adéquation avec un objectif scientifique et une stratégie globale d'observation.

Les efforts se portent en priorité sur le second point : *la maîtrise du bruit de tavelures*, sa dépendance spatiale, temporelle, chromatique, éventuellement polarimétrique, pour une gestion directement en temps réelle dans l'instrument, pour compenser les défauts correspondants, ou se donner les moyens de mesures d'auto-étalonnage et d'un traitement a posteriori. Cela demande une vision de système global, avec des solutions dépendant du niveau de performance visé, des objectifs scientifiques, et des propriétés de l'environnement de l'instrument (propriétés du télescope, environnement sol ou spatial).

### 3.3.2 Première génération d'instruments pensés pour le haut-contraste

Indépendamment de ces développements théoriques, la période 2015-2020 est surtout marquée par le début de l'exploitation scientifique de la première génération d'instruments dédiés à l'imagerie haut-contraste: l'instrument SPHERE installé au VLT dans laquelle les laboratoires français sont majoritairement impliqués (IPAG institut porteur); GPI, qui est la contre-partie américaine de SPHERE installé au foyer du télescope Gemini Sud; et l'instrument SCExAO équipant le télescope Subaru dans

<sup>2</sup>[http://apps.jmmc.fr/bibdb/plots/tag\\_histogram.php?tagid=10&relative=&prefix=](http://apps.jmmc.fr/bibdb/plots/tag_histogram.php?tagid=10&relative=&prefix=)

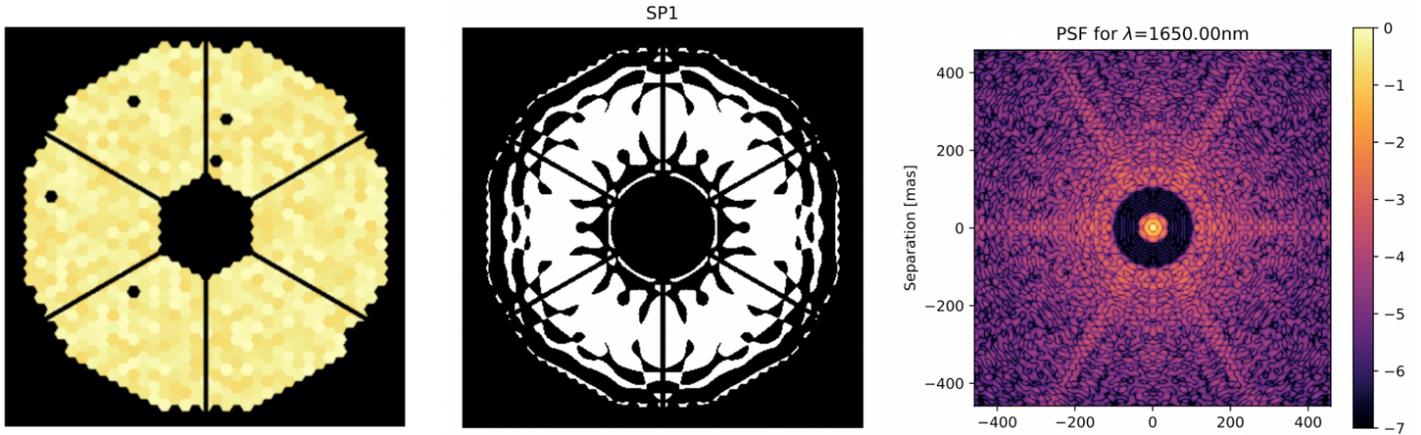


Figure 6: La pupille de l’ELT (panel de gauche) présente de nombreuses structures diffractives (segmentation, araignées, segments manquants) entravant la possibilité d’imagerie haut contraste. Une des solutions techniques, intégrée à l’instrument HARMONI, utilise un masque (panel central) dont l’insertion dans un plan pupille résulte, au coût d’une transmission globale réduite, en une figure de diffraction beaucoup plus contrastée (panel de droite) et adaptée à la recherche de compagnons faibles.

lequel plusieurs laboratoires français interviennent également. Alors que l’ITHD était avant cette période surtout confinée à une utilisation en laboratoire, l’optique adaptative extrême alimentant l’instrumentation haut-contraste permet pour la première fois de faire l’expérience régulière sur le ciel de conditions d’observations à la ”limite de la diffraction”<sup>3</sup> rendant l’ITHD pertinente.

L’arrivée de ces instruments sur le ciel a confirmé les attentes : un coronographe est effectivement capable d’atténuer la contribution statique de la diffraction mais sa performance effective est fortement dépendante de la qualité de la correction offerte par l’optique adaptative située en amont (Fig 7). On distingue deux composantes à ces imperfections: (1) des erreurs dynamiques inhérentes à une boucle d’asservissement à résolution temporelle finie se traduisant par une dégradation du halo et (2) des biais systématiques se traduisant par la présence de structures de diffraction quasi-statiques dans les images. Lorsque les conditions d’observations sont adaptées, les limites de détection sont contraintes par le problème de confusion entre les signaux d’intérêt et les speckles induits par les résidus systématiques de correction. On utilise pour le moment le traitement *a posteriori* de séries d’observations pour limiter l’impact de ces biais dans les images.

### 3.3.3 Etapes incrémentales: vers la détection directe de planètes terrestres

La première génération d’instruments XAO (avec au premier plan SPHERE au VLT qui implique une grande partie de la communauté, notamment française, mais aussi dans une moindre mesure SCExAO au Subaru), a démontré que l’imagerie haute dynamique des exoplanètes utilisant la coronagraphie est une solution viable et efficace. Dans les conditions standards d’observation, les coronographes sont fiables et répondent aux spécifications initiales de contraste lorsqu’ils bénéficient d’une bonne correction adaptative. L’objectif scientifique de l’imagerie des exoplanètes analogues de la Terre reste cependant plusieurs ordres de grandeur au delà de ce qui a été accompli. Le travail pour continuer à améliorer ces performances a largement avancé sur la période passée, pour mieux exploiter les instruments existants, et également pour organiser le chemin vers les instruments à venir.

En parallèle des efforts menés avec les instruments exploités à des fins astrophysiques, un important travail en laboratoire a concerné la mise au point de méthodes rapides de *métrologie plan focal qui peuvent améliorer localement le contraste* brut dans les images avant traitement *a posteriori*. L’information accessible dans l’image coronagraphique peut être exploitée par le contrôle du front d’onde pour créer une région de plus haut contraste, communément appelée ”dark-hole”. La période 2015-2020 a surtout vu une recherche d’efficacité, minimisant le nombre de diversités nécessaires à la détermination de la relation non-linéaire entre la forme du front d’onde et l’image et minimisant le nombre d’itérations nécessaires pour atteindre un objectif de contraste. Les cas d’applications sont variés, du cas perturbé par la présence de résidus atmosphériques significatifs et rapides, au sol sur

<sup>3</sup>la notion de ”limite de la diffraction” est asymptotique : on peut parler de régime de ”faible phase” résiduelle du front d’onde, au sens où d’une part la fraction de l’énergie cohérente est très dominante (c’est cette fraction qui est contrôlable par un dispositif coronagraphique et donc cette condition est nécessaire pour le rendre pertinent), et où d’autre part, il est possible de décrire l’impact de ces défauts résiduels sur l’image, sous forme d’un développement limité, comme fondement conceptuel de nombreuses approches d’étalonnage ou traitement *a posteriori*.

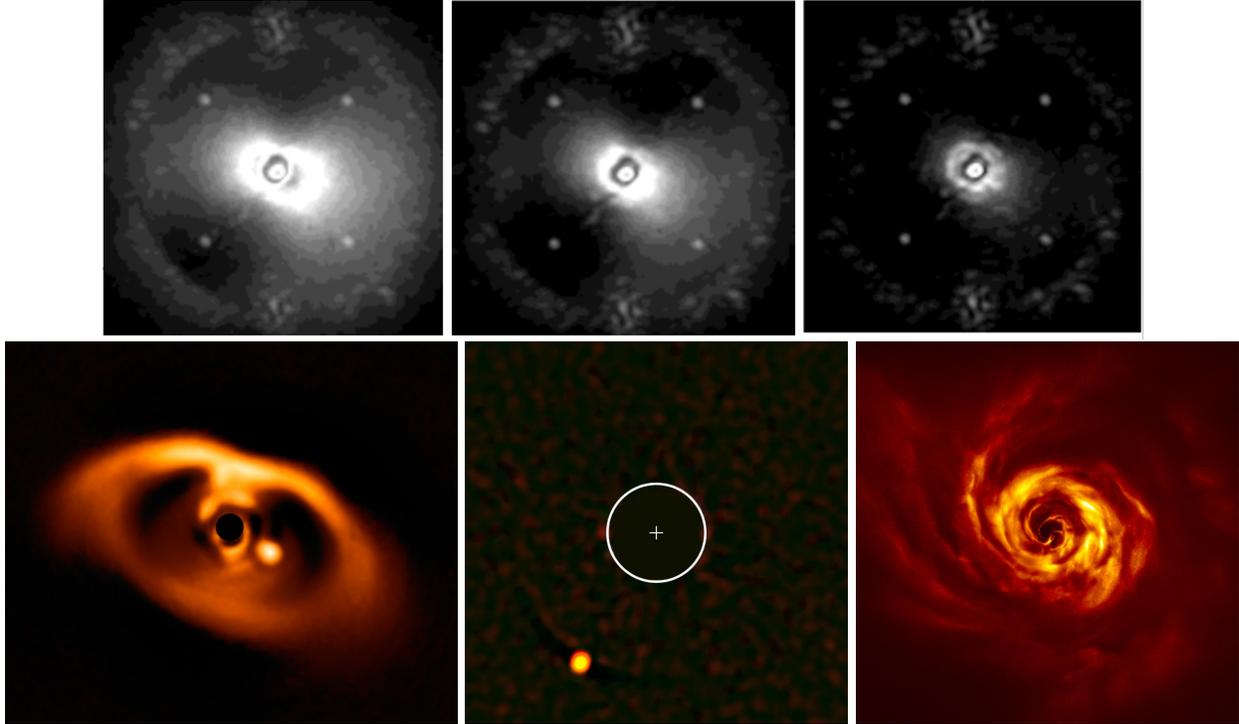


Figure 7: Exemples de résultats obtenus par l'instrument SPHERE, combinant des modes d'observation haut-contraste à une correction par optique adaptative extrême.

Haut : intensité résiduelle du halo stellaire en conditions de turbulence rapide (gauche) à lente (droite). Les 4 répliques du coeur de PSF sont produites par un motif approprié sur le miroir déformable à des fins d'étalonnage (astrométrique et photométrique) des images, en l'absence du centre de l'image de l'étoile occulté par le coronographe. La comparaison de ces images souligne la limitation principale des images par la cadence de correction et fonde la proposition de nouvelles améliorations maintenant possibles (Mouillet et al 2018 ; voir section prospective). Leur analyse fine stimule une R&D plus avant, comme la question de l'asymétrie du halo (liée aux effets couplés de scintillation avec les défauts de phase résiduels : Cantalloube et al 2019) ou la structure spatiale et temporelle des tavelures quasi-statiques dues aux défauts optiques de faible amplitude, révélés et cruciaux pour les performances ultimes, dans le cas d'une très bonne correction de la turbulence atmosphérique.

Bas : première image d'une planète en formation à l'intérieur du disque entourant l'étoile naine PDS 70 (gauche ; crédit: ESO/A. Müller et al). Image de HIP 65426b, la première planète détectée par SPHERE (crédit: ESO, Chauvin et al). Image en lumière polarisée du disque de formation planétaire autour de l'étoile AB Aur (Boccaletti et al 2020)

des instruments tels que SPHERE, au cas permettant des mesures plus longues et plus fines mais avec un objectif beaucoup plus exigeant de mesures dans l'espace. Cette activité spécifique avec un niveau d'expertise reconnu a permis la mise en place de contacts soutenus avec une contribution pour WFIRST et avec les groupes de travail mis en place dans le cadre de l'exercice décennal de prospective de l'astrophysique spatiale (flagship concepts HABEX et LUVOIR) aux Etats-Unis.

Ce qui ressort de cette R&D qui démontre que des contrastes élevés sont possibles, même avec des pupilles complexes et des composants coronographiques non-idéaux, c'est le besoin d'intégrer l'information apportée par la métrologie plan focal à la stratégie globale de contrôle de front d'onde. Alors que le but traditionnel de l'OA est d'aplatir le front d'onde ce qui se traduit par une amélioration de la qualité d'image et un rapport de Strehl qui se rapproche de 100 %, la création du *dark-hole* requiert de stabiliser le front d'onde dans un état non-plat. Cet objectif requiert soit une optique adaptative capable d'opérer autour d'un point de fonctionnement hors-plat ou un étage supplémentaire de correction de front d'onde post-XAO faisant partie du coronographe.

D'autres pistes se dessinent pour le haut-contraste, au-delà de l'amélioration du niveau d'intensité de l'image obtenue en plan focal. Une première piste est de *combinaison l'imagerie haut-contraste à de la haute résolution spectrale*. La corrélation systématique des observables haut-contraste spectralement dispersées avec des templates facilite la détection de caractéristiques spectrales (molecular mapping). Combiné aux avantages du filtrage spatial apporté par l'injection dans des fibres, cette approche a un fort potentiel pour la caractérisation des atmosphères exoplanétaires. Une deuxième piste est d'identifier et de mettre en œuvre des *solutions d'imagerie haut-contraste intrinsèquement moins sensibles aux défauts de front d'onde résiduels* (associés à l'atmosphère ou aux optiques) : c'est le cas du concept de kernel-nuller qui permet de s'affranchir des termes d'erreur d'ordre deux dominant le résidu coronographique classique. Un effort de R&D doit être fourni pour valider ce concept théorique par des démonstrations en laboratoire et/ou en situation au télescope.

Le conseil scientifique de l'ASHRA a organisé et animé deux ateliers nationaux de prospective de la haute dynamique en 2016 et en 2017. Sans vouloir brider l'émergence de nouvelles idées, ces ateliers ont permis une bonne connaissance mutuelle des efforts en cours, une vision commune des éléments de stratégie scientifique, une visibilité présentable à une communauté plus large, et en interne la possibilité de discussions favorisées pour les projets futurs. Cette discussion inclut dans une vision stratégique commune des éléments variés que ce soit sur des études en laboratoire spécifiques, le besoin de démonstration sur ciel à l'épreuve d'un contexte opérationnel et avec l'exigence de résultats astrophysiques, ou encore sur les étapes initiales à prévoir sur l'ELT. Nous reviendrons sur ces éléments dans la partie perspective.

### 3.4 Le traitement du signal : de l'arrière pensée à l'élément dimensionnant

L'importance du traitement du signal (TS) n'a cessé de croître au fil des décennies. On peut identifier qualitativement des différentes causes à ce mouvement d'ampleur. i/ Une raison immédiate, pour les observateurs, est la complexité des données et/ou la taille des échantillons. Une utilisation efficace requiert la mise en œuvre d'algorithmes souvent élaborés (on peut penser à titre d'exemple aux questions de reconstruction d'images à partir de données interférométriques parcimonieuses polychromatique). ii/ Une autre raison est liée à la qualité des données fournies, et la connaissance de l'instrument ou des conditions dans lesquelles elles sont produites. Toute connaissance a priori du signal produit, avec parfois de la redondance entre plusieurs senseurs, des corrélations connues aux éléments extérieurs, ou encore l'identification de la structure attendue d'un signal (d'intérêt ou parasite), structure temporelle, spatiale ou spectrale, doit être intégrée à une approche optimale d'extraction du signal. Meilleurs sont l'instrument, son étalonnage, et la compréhension que nous en avons, plus il y a à gagner à utiliser les techniques de sciences de données pour en bénéficier ! Des travaux sont particulièrement actifs dans les questions d'extraction de signal à grand contraste, ou des problèmes de reconstruction de PSF. iii/ Enfin, les performances des instruments sont tellement poussées à leur limites, des composants (souvent inédits) au système pour qu'un gain en performance ne puisse plus entièrement reposer sur des spécifications toujours reserrées. Les nouveaux instruments plus ambitieux sont naturellement condamnés à intégrer dès leur phase précoce de conception, d'intégrer les étapes nécessaires de sciences de données pour atteindre les objectifs, ce qui implique souvent d'adapter en conséquence dans une démarche de co-conception, les choix de design.

Ainsi, nous confirmons et renforçons le constat fait explicitement par l'ASHRA dès 2011 et rappelé dans son bilan en 2015, identifiant le TS comme un enjeu essentiel. Il est ainsi considéré comme une thématique de recherche en tant que telle, bien que de manière transverse et intimement liée aux autres thèmes de l'ASHRA. Un intérêt particulier de son identification explicite tient à son caractère naturellement inter-disciplinaire, pouvant motiver des actions de stimulation spécifiques. Sans être exhaustif, nous pouvons donner ici quelques exemples marquants, illustratifs d'approches différentes.

Pour illustrer concrètement les considérations ci-dessus, il est intéressant de comparer les éléments de prospective en TS que l'ASHRA avait pointés en 2015 pour la période 2015–2020 avec quelques faits marquants qui ont eu lieu sur cette période. Ces points étaient :

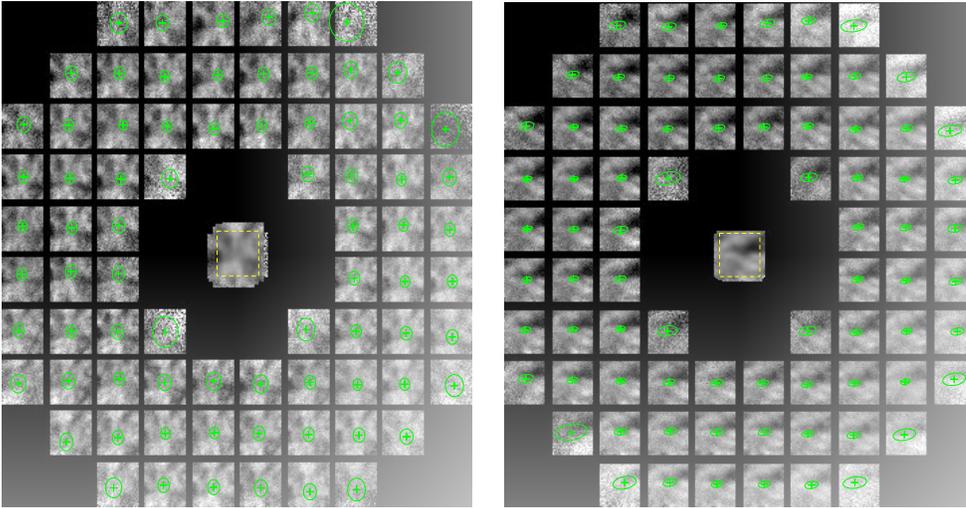


Figure 8: l’analyseur de surface d’onde de l’OA de Themis. Les mesures de pentes locales (croix vertes) sont corrélées et de précisions inégales comme l’indiquent les ellipsoïdes des erreurs (en vert). Prendre en compte ces corrélations est le moyen de résoudre des problèmes critiques pour l’ELT comme l’élongation des sources de référence laser.

Source : Tallon *et al.*, 2019, AO4ELT. Contraste  $\sim 1 - 2\%$ , champ de vue de  $10.3''$  pour 30 pixels, temps de pose : 200  $\mu\text{s}$ , fréquence trame : 1 kHz. Image de référence auto-calibrée représentée au centre.

1. Le développement et la mise en œuvre d’algorithmes numériques dédiés à un instrument spécifique pour le traitement des données brutes ou le contrôle en temps réel (OA, suiveur de franges, cophasage de miroirs segmentés). Cette démarche de “co-conception” permettant de se rapprocher d’une exploitation des instruments aux limites ultimes de performance et offrant la possibilité de relaxer certaines contraintes technologiques ou physiques sinon insurmontables.
2. L’importance croissante des approches de type “problèmes inverses” et de la modélisation statistique pour l’extraction d’information concernant des instruments et des données de plus en plus complexes (interférométrie multi-longueurs d’onde, spectrographes à intégrale de champ, PSF variables dans le champ, ...).
3. L’évolution culturelle nécessaire pour intégrer le TS à la formation des astronomes et valoriser la R&D dans ce domaine. Mais aussi les efforts nécessaires pour favoriser l’utilisation des méthodes de l’état de l’art par la communauté.

Sur la période 2015-2020 ces points ont été déterminants dans de nombreux développements instrumentaux. Les résultats suivants en sont quelques exemples marquants, couvrant des approches de nature qualitativement différente.

### 3.4.1 Le signal au coeur de l’instrument : co-conception, contrôle temps-réel

En interférométrie, la formalisation précise des problèmes, les algorithmes injectés et l’optimisation réalisée sur le suiveur de franges pour GRAVITY<sup>4</sup> ont permis un gain majeur en performances. Le suiveur résultant et en particulier sa robustesse est un élément fondamental du succès global de l’instrument. Toujours en interférométrie, on peut mentionner qu’un algorithme de co-phasage *a posteriori* a été intégré au *pipeline* de MATISSE pour la réduction de données sous forme d’observables interférométriques de meilleure qualité.

Le système d’optique adaptative (OA) en cours de développement pour le télescope solaire Themis est l’occasion de mettre en œuvre des algorithmes (comme FRiM<sup>5</sup>) pour améliorer la robustesse et la précision des mesures, et la qualité de la correction tout en réduisant le nombre d’opérations numériques (Fig. 8). Ce type de recherche a vocation, après étude et démonstration dans ce premier cas, à pouvoir bénéficier à d’autres systèmes. Ainsi, cette approche permettrait de mieux gérer des problèmes comme celui de l’élongation des sources de référence laser (déjà évoqué en 3.1.3). En outre, intégrer, ici aussi dès la conception, les questions d’auto-calibration de l’OA est un élément nouveau mais qui devient crucial dans le cas de l’ELT à défaut de sources d’étalonnage appropriée en amont du miroir déformable et dans le contexte du temps nocturne dédié à l’étalonnage critique réduit !

Un autre exemple de co-conception est le concept de kernel-nuller<sup>6</sup> qui est une adaptation d’un mode d’observation interférométrique haut-contraste (i.e. annulante) intégrant la réalité des imperfections du contrôle du cophasage et permet de construire des observables qui s’en affranchissent. Ici, c’est la perspective TS qui a guidé l’architecture matérielle du recombineur optique qui rend accessible une information normalement perdue dans un recombineur annulant de type Bracewell (voir Fig. 9).

<sup>4</sup>S. Lacour *et al.*, “The GRAVITY fringe tracker”, A&A **624**, 2019

<sup>5</sup>C. Béchet *et al.*, “Comparison of minimum-norm maximum likelihood and maximum a posteriori wavefront reconstructions for large adaptive optics systems” in J. Opt. Soc. Am. A **26**, 497-508 (2009).

<sup>6</sup>Martinache & Ireland, “Kernel-nulling for a robust direct interferometric detection of extrasolar planets”, A&A, 619, 87 (2018)

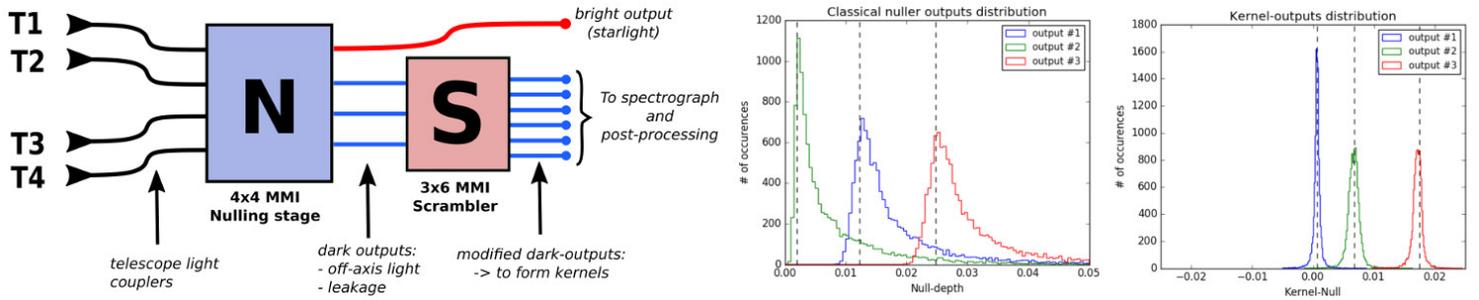


Figure 9: Le kernel-nuller comme concept instrumental nouveau conçu dans la perspective TS. Le succès d’une fonction haut contraste (coronographie ou nulling) repose sur la performance du contrôle de la surface d’onde amont. En présence de résidus de contrôle, non seulement la performance est dégradée mais l’observation est dégénérée. Le kernel-nuller permet de lever cette dégénérescence et conduit à une meilleure performance contraste pour une même qualité de cophasage. Le panel de gauche présente l’architecture d’un recombineur possible pour un interféromètre à quatre télescopes. Le panel de droite compare les distributions des signaux bruts qui seraient enregistrées en présence de turbulence résiduelle, pour un nuller classique (étape correspondant au seul étage ”N” dans le diagramme de gauche) et pour un kernel-nuller (après soustraction de paires de mesures en sortie de l’étage ”S”) La mesure résultante est insensible au deuxième ordre des résidus de contrôle de surface d’onde.

### 3.4.2 Approches statistiques et de type problèmes inverses

Le développements de méthodes de traitement basées sur des approches statistiques ou de type problèmes inverses ont débouché sur des algorithmes permettant de repousser les limites de détection et, à plus bas niveau, sur des méthodes d’extraction de l’information évitant de nombreux artefacts.

Un cas d’application ”traditionnel” des approches de type problèmes inverses concerne les questions de déconvolution, avec toute la question de gestion (éviter l’amplification) du bruit, mais aussi le problème de la réponse instrumentale (PSF) imparfaitement connue, ou encore les données manquantes dans le cas d’une pupille interférométrique diluée. Pour classique qu’il soit, ce champ d’étude reste très actif et productif, avec des enjeux renouvelés par des questions de PSF variable dans le champ, ou encore la prise en compte de données additionnelles issues du système. A défaut d’exhaustivité, nous choisissons ci-dessous des exemples peut-être moins attendus.

Ce type d’approche peut par exemple être indiqué dès les phases de pré-traitement, dans les cas où l’imperfection ou la variabilité des données d’étalonnage rendent sous-optimale leur application de manière immédiate et déterministe. Une démonstration très convaincante a été faite dans le cas de l’instrument de spectromètre à intégrale de champ (IFS) de SPHERE. En s’appuyant sur un modèle réaliste de l’instrument (ajusté sur les données de calibration) et intégrant la détection automatique des pixels défectueux et une extraction régularisée des images hyperspectrales, un gain en qualité significatif a été obtenu, que ce soit pour les objets ponctuels ou étendus, par une approche de type ”problèmes inverses”<sup>7</sup>.

Dans l’extraction d’un signal faible en imagerie à haut contraste, la prise en compte des propriétés sur la statistique et la structure du halo stellaire de tavelures est essentiel. Une méthode de détection de sources faibles (exo-planètes), nommée PACO<sup>8</sup>, a ainsi été proposée sur cette base. Elle s’appuie sur l’estimation empirique de la statistique et des corrélations locales du signal parasite (bruits et fuites stellaires sous forme de *speckles*) et permet ainsi, sans paramètre de réglage, d’améliorer notablement la limite de détection des méthodes de l’état de l’art tout en fournissant une probabilité de fausse alarme maîtrisée et des mesures photométriques non biaisées ( Fig. 10).

Toujours en imagerie haut contraste, la modélisation des pupilles des télescopes comme un système interférométrique de sous-pupilles permet de produire des observables, appelées ”*kernel-phases*”, robustes aux perturbations de phase, sans recourir à l’utilisation d’un masque non-redondant. Une approche TS a permis de faire une étude approfondie<sup>9</sup> des performances de détection de compagnons par cette technique pour le futur télescope spatial JWST. L’approche permet en particulier la caractérisation des limites ultimes de détection, la proposition de critères de détection dont les performances approchent ces limites et l’évaluation des dégradations des performances en cas d’erreurs (de calibration par exemple). Dans le cas de l’imagerie coronographique, l’optimisation non-linéaire du contraste<sup>10</sup> est une méthode de contrôle de surface d’onde fondée sur l’inversion d’un modèle de la chaîne optique, qui converge plus rapidement que les approches linéaires. Cette expertise développée en France a

<sup>7</sup>Berdu et al, A&A **635**, 2020

<sup>8</sup>Flasseur *et al.*, A&A **618**, (2018) , et A&A **637**, (2020) pour la version adaptée aux données multispectrales

<sup>9</sup>Ceau et al., ”Kernel-phase Detection Limits: Hypothesis Testing and the Example of JWST NIRISS Full Pupil Images, A&A, 630, A120 (2019)

<sup>10</sup>Herscovici-Schiller et al, ”Towards the experimental validation of the non-linear dark hole on the THD bench”, SPIE, 10703, 29 (2018)

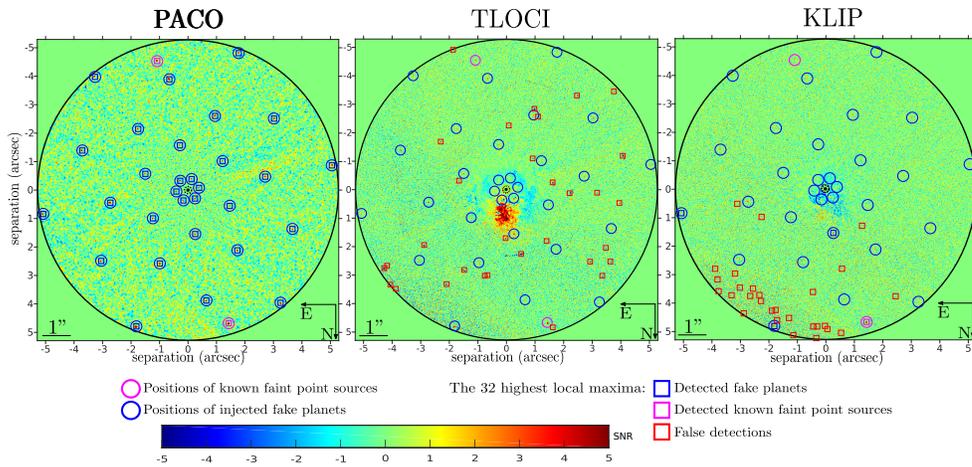


Figure 10: Cartes de détection calculées avec PACO, TLOCI et KLIP dans des données SPHERE/IRDIS de HIP72192 dans lesquelles 30 sources faibles ponctuelles ont été artificiellement injectées (cercles bleus) en sus de 2 sources réelles déjà connues (cercles magenta). Les 32 détections les plus significatives sont indiquées par des carrés (rouges pour les fausses détections, magenta/bleus pour les détections correctes de sources réelles/artificielles). Seul l’algorithme PACO qui estime et prend en compte la statistique du fond, notamment ses corrélations, détecte correctement l’ensemble des sources.

Flasseur *et al.*, A&A **618**, 2018.

permis de bénéficier d’un accès au consortium assez verrouillé de la mission spatiale WFIRST.

On peut souligner, comme un point fort en France, cette expertise, et l’intérêt de collaboration astronomes - traitement du signal. Cela s’illustre aussi, avec une participation riche et multiple des équipes françaises (de Nice à Strasbourg en passant par Toulouse, Lyon et Grenoble) dans le cas de VLT/MUSE. Ici, l’apport de techniques de TS a été indispensable pour produire plusieurs algorithmes<sup>11</sup> et permettre l’extraction et la détection optimale de sources faibles, de manière homogène dans le champ, avec une estimation de faux positifs, dans des conditions de faible signal à bruit mais aussi de fusion de données (avec les données HST)<sup>12</sup>

### 3.4.3 Développer l’utilisation des outils du TS et faire vivre les interactions avec la communauté TS

Sur le plan de l’interaction entre communautés, la période a vu un accroissement important du nombre d’écoles/ateliers de type astro-statistique, astro-informatique et intelligence artificielle. Difficile d’en donner une liste exhaustive mais, au seul niveau français, les chapeaux et les programmes de quelques-unes d’entre elles<sup>13</sup> montrent une prise de conscience du besoin de ces interactions, qui apparaît aussi au niveau de la formation des futurs astronomes<sup>14</sup>.

Il faut également souligner l’effort apporté pour fournir des algorithmes de traitement de pointe et utilisables par des non-spécialistes. Par exemple, en interférométrie, cela c’est traduit par le transfert réussi (pour MATISSE en particulier) des travaux de recherche amont sur des algorithmes d’imagerie, dont l’utilisation était auparavant quasiment limitée aux spécialistes qui les développaient, vers les utilisateurs de la communauté grâce à un travail aval d’automatisation les rendant largement exploitables.

Un certain nombre de *services nationaux d’observation* (SNO) ont pour vocation d’épauler les utilisateurs non spécialistes pour le traitement des données d’instruments spécifiques. Ces tâches peuvent être étroitement liées à la R&D “*signal*” lorsqu’elles s’appuient sur la mise en œuvre d’algorithmes de l’état de l’art dans ce domaine. On peut mentionner à titre d’exemple deux SNO soutenu par le JMMC pour l’exploitation des interféromètres optiques : l’ANO5 MOIO<sup>15</sup> pour le développement des outils et l’ANO3 SUV<sup>16</sup>, récemment labellisé, pour le support des utilisateurs et les actions de formation comme les écoles VLTI.

<sup>11</sup>Meillier et al., “SELI: an object-based, Bayesian method for faint emission line source detection in MUSE deep field data cubes”, A&A **textbf588**, 2016; Bacher et al., “Robust control of varying weak hyperspectral target detection with sparse non-negative representation”, IEEE Trans. Sig. Proc. **65**, 2017; Courbot et al., “Extended faint source detection in astronomical hyperspectral images”, Signal Processing **135**, 2017.

<sup>12</sup>Bacon et al., “The MUSE Hubble Ultra Deep Field Survey I. Survey description, data reduction, and source detection”, A&A **608**, 2017.

<sup>13</sup>Ecoles du CNRS BASMATI (2015 et 2018, <https://basmati.oca.eu/basmati/>), Astro-Informatique (2018, <https://astroinfo2018.sciencesconf.org/program>), les écoles Evry Schatzman (<https://ees2019.sciencesconf.org>) qui contiennent des cours sur des aspects statistiques, Journées analyses et traitement d’images astronomiques (<https://jatia2019.sciencesconf.org/>)

<sup>14</sup>Par exemple le master MAUCA ([mauca.unice.fr](http://mauca.unice.fr)) apparu en 2016 est une formation permettant un fort alliage astrophysique et TS

<sup>15</sup>*Méthodes et Outils pour l’Interférométrie Optique*

<sup>16</sup>*Service aux Utilisateurs du VLTI*

## 4 Réflexion prospective

### 4.1 Optique Adaptative

#### 4.1.1 OA OA OA !

D'un point de vue très général, et au-delà de la perspective de l'ELT détaillée juste après, il est intéressant de noter que la prochaine période verra fleurir *un grand nombre de nouveaux systèmes d'OA sur les grands télescopes* en opérations. Par exemple, le télescope Keck est financé pour développer d'une part une OA à haute performance pour le couplage du signal de planète avec un spectrographe, et d'autre part pour la mise en marche d'un système de LTAO (OA grand champ) multi-LGS. Le télescope Gemini vient aussi d'annoncer l'obtention d'un financement pour le développement d'un nouveau système de MCAO pour son télescope à Hawaï, et le Subaru se lance dans l'aventure d'un miroir secondaire adaptatif. Coté européen, l'ESO finance une phase-A pour un système de MCAO à haute performance, afin d'offrir la limite de diffraction du VLT dans le domaine de longueur d'onde visible, sur un champ de plusieurs dizaine d'arcsecondes, et pour une couverture de ciel quasi complète. Ce dernier instrument, nommé MAVIS, doit permettre d'offrir une alternative au HST pour l'accès à des images à haute résolution angulaire dans le visible, et couvrir un espace de paramètre complémentaire aux ELTs ou JWST, qui fourniront de l'imagerie dans le proche infra-rouge et au-delà. Toujours en Europe, l'amélioration de l'infrastructure VLTI pour ouvrir la fenêtre d'observation à la résolution interférométrique à l'essentiel du ciel, y compris faible, est proposée avec le projet instrument Gravity+ où tous les UTs du VLT seront équipés par OA laser. Ainsi, et même si la communauté Française n'est pas nécessairement impliquée fortement dans tous ces projets, le paysage global montre clairement une tendance vers la généralisation des OA sur les télescopes de la classe 8-10m, avec en particulier l'enjeu de l'accès aux sources faibles. Comme soulignée auparavant, une des avancées majeures de ces dernières années est l'amélioration de l'opérabilité des OAs, et la prochaine étape semble être la généralisation des télescopes adaptatifs.

#### 4.1.2 L'ELT comme étoile-guide

Concernant la communauté Française, la prochaine période sera fortement structurée par les réalisations des premières OAs pour l'ELT, et en particulier par les développements nécessaires pour les validations des performances en labo. Les premières lumières ne seront pas encore sur le ciel à la fin de la prochaine période, et le gros des efforts (ressources humaines) sera concentré sur les phases d'AIT. Pour cette dernière, l'ELT apporte un défi supplémentaire, car en l'absence de simulateur de télescope et de son miroir déformable, la validation des performances en laboratoire est à repenser complètement par rapport aux approches plus classiques développées jusqu'ici. Dans cette perspective, on peut souligner les tests ciel prévus au WHT, sur la plateforme CANARY, avec un miroir déformable à très haut ordres afin d'anticiper des problématiques et limiter les risques une fois à l'ELT. L'utilisation de l'AO4ELT comme plateforme de test pour les OA multi-LGS est aussi prévue dans les prochaines années.

Il est cependant important de souligner que le niveau de travail reste considérable en regard des ressources, et le niveau de risque est important. Ce niveau de risque dérive notamment de la nouveauté des défis à relever et des incertitudes importantes sur le télescope, à la fois qualitativement nouveau, et sur un calendrier trop tardif par rapport aux instruments. Ainsi, et même en plaçant ces contributions AO4ELT à la plus haute priorité, elles pourraient totalement épuiser nos ressources. Ce plan de charge doit en outre intégrer la priorité INSU de réalisation de l'instrument MOSAIC dans une répartition de lots de travail et de responsabilités cohérente avec les partenaires. Dans ce contexte tendu sur les ressources et les risques de développement, tous les acteurs sont bien conscients d'optimiser, plus que jamais, les efforts, les échanges d'information et les synergies, autant que possible au sein des spécificités de développement et de planning propres à chaque projet. Ces contraintes de ressources doivent aussi être connues et discutées avec un point de vue inter-projets et inter-laboratoires, pour bien évaluer les possibilités de contributions, en fonction du calendrier envisagé, de la complexité des modes, et bien sûr des priorités de PN.

Les développements s'appuieront fortement sur (et ne pourraient se concevoir sans) l'expérience acquise lors des réalisations antérieures, mais aussi la R&D nouvelle et récente : nous avons déjà mentionné les exemples de travaux sur les mesures d'étoiles laser (dimensionnées spécifiquement dans la perspective ELT), mais aussi des questions de discontinuité de phase du front d'onde de part et d'autre des supports mécaniques du secondaire du télescope (tel que SPHERE a pu bien l'identifier et le caractériser), ou encore des questions liées à la montée en puissance et en fonctionnalités à intégrer au RTC. On ne saurait trop souligner le caractère essentiel de, même dans un contexte sous pression, une marge de ressource de développement OA, pour pouvoir garder une part d'encadrement d'étudiants, de poursuite de pistes de R&D, de capacité de test et validation de concepts sur télescope.

#### 4.1.3 Les futurs défis de l'OA

Après plusieurs décennies de développement, on pourrait penser que tout est fait, et que la 'boîte à outils' de l'OA est déjà pleine de solutions prêtes à être appliquées, et qui répondent à l'ensemble des problématiques scientifiques. Bien évidemment,

la situation n'est jamais aussi simple.

Nous avons déjà souligné le tournant important en cours, vers la *correction sur un grand champ* (i.e. au-delà de la zone limitée à un angle isoplanétique), qui implique une mesure tomographique (dans le volume et non pas seulement intégrée verticalement), et une correction sur une (LTAO) ou plusieurs (MOAO) direction(s) donnée(s) ou encore également sur le volume à l'aide de plusieurs miroirs déformables en série (MCAO). Les défis sont nombreux et considérables. Les efforts sont déjà largement en cours et nous en saurons beaucoup plus dans les années à venir. Mais au-delà de ce point majeur, nous pouvons rappeler d'autres pistes de développements importantes.

Il y a tout d'abord des défis qui sont la conséquence de la généralisation des OAs sur les grands télescopes. En effet, si l'OA devient de plus en plus transparente aux utilisateurs, cela n'est pas encore vrai pour le *traitement des données produites par OA*. De plus, la communauté exposée à des données corrigées par OA ne cesse de croître, et l'ELT sera 100% OA. La problématique de l'optimisation du traitement des données OA reste une question relativement ouverte. Il est difficile d'estimer un modèle de PSF précis associé à chaque observation d'OA et cette méconnaissance représente souvent la principale limitation lors de l'analyse de données d'OA. Des gains d'un facteur 2 à 5 sur les métriques scientifiques seraient possibles si des modèles de PSF précis (typiquement au %-près) étaient disponibles. On notera ici le lien fort avec la thématique (transverse) du traitement du signal. L'ANR APPLY (2020 → 2024) est un exemple d'effort orienté vers la mise à disposition d'outils opérationnels pour le traitement de données en OA.

Un second défi provient des *exigences en performances et en stabilité des systèmes XAO* utilisés pour l'imagerie directe d'exoplanètes. La problématique scientifique est particulièrement porteuse, et certains verrous technologiques restent à débloquent afin d'exporter les performances d'un instrument type SPHERE sur un télescope de 40m par exemple. S'il est vrai que plusieurs composants critiques (détecteurs rapides à faible bruit, miroir déformable, Lasers, RTC), sont désormais à portée de main pour les télescopes de 8/10m, des efforts de R&D doivent être développés pour les futurs télescopes géants. Une première grande direction semble s'orienter vers l'amélioration des performances des analyseurs à surface d'onde, avec des nouveaux concepts dérivés de la pyramide et spécifiquement optimisé pour l'imagerie à haut-contraste. L'ANR WOLF, qui rassemble plusieurs laboratoires Français démarre en 2019 pour une durée de 4 ans précisément sur cette thématique. Un deuxième axe concerne certainement l'optimisation des lois de commandes, le contrôle prédictif et l'accélération des calculs.

De manière transverse aux défis mentionnés précédemment, *certaines modules ou composants sont critiques*. On remarque le rôle central du calculateur temps-réel (RTC). L'enjeu est ici double : i/ scientifique et technique, pour le choix des solutions matérielles et logicielles les plus appropriées aux besoins de demain, incluant bien sûr les besoins de grandes pupilles et du traitement tomographique, mais permettant aussi l'ouverture à des algorithmes novateurs (non matriciels) en cours de recherche actuellement ; et ii/ organisationnel, assurant la maîtrise des réalisations, des intégrations et des validations qui seront nécessaires pour les prochains instruments, avec une capacité d'adaptation d'autant plus importante que les instruments diffèrent radicalement des précédents. Ce point est stratégique. Par ailleurs, les détecteurs rapides et sensibles sont au coeur des senseurs de front d'onde. Un lien étroit est maintenu entre la communauté OA et les développements de détecteurs les plus en pointe. Un dernier point de vigilance concerne les miroirs déformables. Des producteurs différents sont bien connus et couvrent une offre large des micro-miroirs aux miroirs secondaires adaptatifs de grande taille. Dans chaque créneau, le recouvrement des offres est très limité et il faut noter que l'astronomie est sans doute la discipline la plus demandeuse en spécifications parmi les utilisateurs d'OA. Nos spécifications continue d'augmenter (par exemple en termes de vitesse, précision, stabilité) et il faudra suivre attentivement le lien avec les plans d'offre des producteurs (de manière coordonnée avec les partenaires astronomiques dans d'autres instituts ou à l'ESO).

Enfin, nous pouvons terminer une vue générale d'éléments de prospective en OA en soulignant les besoins notablement convergents entre d'une part l'OA corrigeant la turbulence atmosphérique pour les télescopes au sol, et d'autre part les systèmes spatiaux avec des pupilles de surface croissante (pour l'observation de l'univers ou de la Terre), un intérêt croissant pour la possibilité de relaxer des spécifications en aberrations propres ou en stabilité sur les optiques, avec des objectifs de très haute qualité d'image pour le grand contraste, ou encore pour simplifier considérablement les phases cruciales et coûteuses d'intégration et test des instruments, en présence de turbulence de laboratoire, avant lancement. La *synergie sol-espace* en optique adaptative est un domaine émergent à renforcer.

## 4.2 Interférométrie

Le développement de l'interférométrie optique dans la prochaine décennie se déroulera dans un contexte sensiblement différent de celui de l'optique adaptative et de la très haute dynamique. En effet, il n'existe pas de grande infrastructure au sol ou dans l'espace en cours d'étude ou de construction qui puisse orienter/structurer directement les développements. Il reste cependant que le besoin de la recherche astrophysique en termes de résolution angulaire n'aura pas disparu. Il est aussi certain que toute nouvelle percée dans ce domaine ouvrira de nouveaux champs d'investigations qui n'ont pas été envisagés. Une question fondamentale se pose donc ici : comment doit se développer l'interférométrie optique pour continuer à servir des objectifs scientifiques de plus en plus ambitieux? Nous distinguons pour cela plusieurs grands axes d'évolution qui devront être menés de front au cours de la

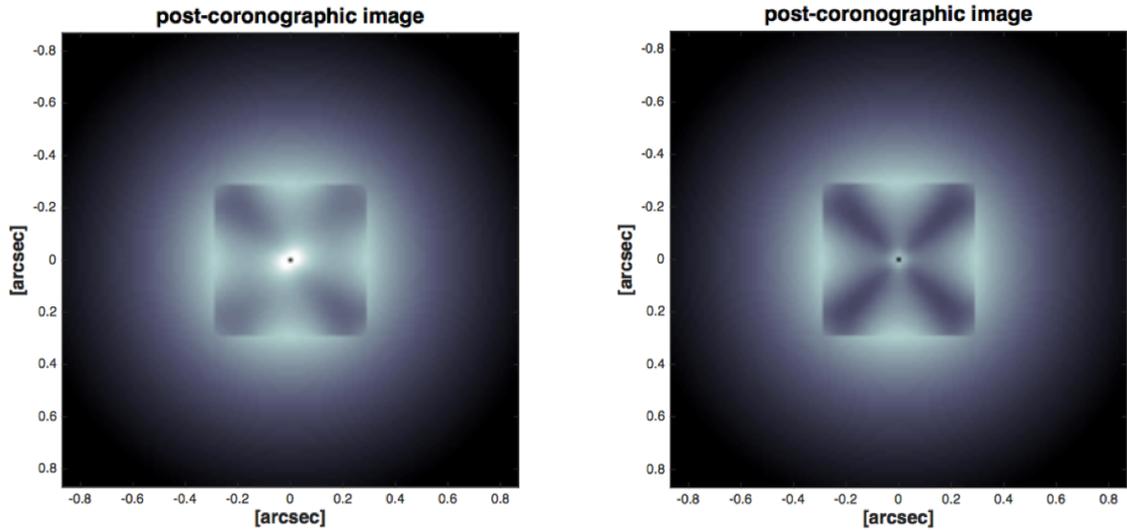


Figure 11: Illustration du rôle de la loi de contrôle, à système égal par ailleurs, sur la performance de contraste obtenue en image coronagraphique. A gauche : intégrateur simple. A droite : filtre de Kalman sur tous les modes. (note : l'implémentation d'une loi de contrôle plus complexe doit aussi intégrer les spécifications correspondantes sur le RTC)

période 2020-2025 : 1) Comment assurer l'exploitation optimale et le retour d'expérience des instruments et des infrastructures existantes ? 2) Comment pousser les infrastructures existantes à leur limite de performance ? 3) Comment préparer l'au delà des infrastructures (post-VLTI, post-CHARA)? On notera que les grandes lignes suivantes ont été alimentées par une réflexion menée dans le cadre d'une feuille de route VLTI à l'ESO.

#### 4.2.1 Comment assurer l'exploitation optimale et le retour d'expérience des instruments et des infrastructures existantes ?

**Au service d'une communauté qui croît.** La mise en opération des nouveaux instruments du VLTI et de CHARA et le développement des synergies entre l'interférométrie et d'autres techniques (GAIA, PLATO, ALMA, XAO) soulève déjà un intérêt scientifique accru pour l'interférométrie optique qu'il faudra accompagner. Le pôle JMMC et ses services MOIO et SUV doivent continuer à jouer un rôle crucial en ouvrant l'interférométrie optique à une communauté plus large, en particulier en formant de nouvelles générations d'astronomes. Le support à la réduction de données, le développement d'outils d'analyse et d'interprétation de données, l'arrivée de nouveaux modes (e.g. astrométrie, MATISSE) représenteront d'importants défis de rationalisation pour le JMMC qu'il faudra soutenir. Il sera également important de se poser la question du périmètre d'action de celui-ci, on peut se demander en particulier si la limitation du support à une communauté strictement nationale sert vraiment le développement de l'interférométrie. On notera les ambitions affichées au Portugal et Angleterre de proposer des services similaires. Parallèlement au support aux utilisateurs les interféromètres, et l'ESO au VLTI en particulier, vont être confrontés au défi de l'augmentation de l'efficacité opérationnelle afin d'augmenter la productivité scientifique. Celle-ci repose sur un certain nombre d'améliorations discrètes mais non moins importantes comme l'amélioration de la couverture du ciel au VLTI, la cadence des observations et la programmation de séquences observationnelles motivées par des objectifs scientifiques différents (suivi temporel, reconstruction d'images, astrométrie). Sur CHARA, l'ambition scientifique de SPICA, recombineur 6 télescopes visible, va requérir également d'optimiser les stratégies d'observations afin d'atteindre l'efficacité et cadences nécessaires à la synthèse d'ouverture et l'observation statistique d'un grand nombre de sources stellaires.

**Au commencement: le cophasage.** L'investissement majeur dans la fiabilisation de l'infrastructure du VLTI et la mise en opération du suiveur de franges de GRAVITY ont mené à la démonstration que le co-phasage robuste d'un réseau de quatre télescopes était possible (intégrations 30 fois plus longues que FINITO, le premier suiveur de franges). Cette fonctionnalité conditionnait tout développement instrumental futur au VLTI. Le projet GRA4MAT, désormais en phase avancée de réalisation va permettre d'utiliser le suiveur de franges de GRAVITY pour MATISSE et ouvrir la possibilité d'intégrations longues pour ce dernier, un pré-requis à l'exploitation de sa résolution spectrale. C'est aussi un premier pas prometteur qui laisse espérer des observations simultanées de la bande H à N. De manière similaire, l'étroite collaboration entre du laboratoire LAGRANGE et l'équipe MIRCX et MYSTIC devrait ouvrir la voie à un cophasage dans l'infrarouge pour l'instrument visible SPICA de

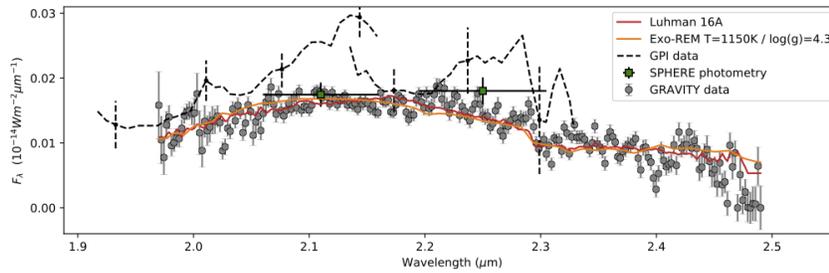


Figure 12: Premier spectre d'une exoplanète (HR 8799 e) obtenu par interférométrie longue base avec le mode double champ astrométrique GRAVITY (GRAVITY collaboration, Lacour et al. 2019, A&A 623).

CHARA.

**Le lien entre image et signal** L'obtention d'images polychromatiques est l'un des objectifs les plus importants de l'interférométrie optique. Celui-ci devrait se développer fortement au VLTI et CHARA avec la nouvelle suite d'instruments. Bien que la recherche sur les algorithmes et logiciels correspondants ait considérablement progressé lors de la dernière décennie il reste des points importants encore à explorer. L'un des plus importants consiste à intégrer dans les processus de reconstruction une meilleure connaissance des propriétés des instruments en particulier la structure des bruits, les corrélations ainsi que les biais. Cette activité, qui nécessite une expertise importante en traitement du signal, devrait être stimulée et continuer à intégrer les contraintes fortes du polychromatisme intrinsèque des objets.

**Nouveaux modes, nouvelle science ...** D'un point de vue scientifique le mode double champ de GRAVITY ouvre des applications innovantes encore inimaginables il y a quelques années telles que l'astrométrie en champ étroit capable d'atteindre des précisions de quelques dizaines de micro-secondes d'angles en quelques minutes ou bien la spectroscopie de compagnons planétaires (Fig. 12). Ceci amène de riches perspectives dans le domaine extra-galactique, l'étude de micro-lentilles ou l'étude et caractérisation d'exoplanètes. On notera également les nouvelles possibilités d'observations interféro-polarimétriques avec GRAVITY et MIRCX qui nécessitera de bien valider les méthodologies d'étalonnage.

#### 4.2.2 Pousser aux limites l'instrumentation sur les infrastructures existantes.

L'interférométrie à longues lignes de bases restera, même à l'horizon de la mise en opération des très grands télescopes (ELT, GMT ...), la technique fournissant la plus grande résolution angulaire dans le domaine optique.

Les instruments de recombinaison interférométrique requièrent une moyens initiaux conséquents, puisqu'elle inclut plusieurs télescopes, de grande taille (et donc munis d'OA) si l'on veut aborder des objets faibles, mais aussi l'acheminement au lieu de recombinaison de "frange blanche" (d'égal chemin de propagation optique) incluant lignes à retard, et maîtrise de la turbulence interne et dispersion sur de longues distances, et enfin l'ensemble dans un ensemble opérationnel fiable, efficace et robuste. Nous parlons donc d'"infrastructure" interférométrique, et cela structure la réflexion sur le moyen et long terme. Nous aborderons dans la section suivante, la question de ce que pourraient être une future infrastructure et verrons que celle-ci sera ambitieuse... et demandera un temps de développement significatif. Cela motive en premier lieu ici la réflexion sur l'exploitation poussée des infrastructures existantes. On peut distinguer quelques pistes de manière non exhaustive : comment faire de l'interférométrie un véritable outil pour la science extragalactique ? comment développer sa capacité à détecter et caractériser des exoplanètes ? comment pousser la résolution spectrale à des niveaux suffisants pour avoir un impact renouvelé en physique stellaire ( $R > 30000$ ) ? De manière plus fondamentale, on pourra se poser la question de comment stimuler de nouvelles idées d'utilisation de l'interférométrie comme cela a été fait avec GRAVITY avec le cas scientifique du centre galactique.

La conférence "The Very Large Telescope in 2030" organisée par l'ESO en juin 2019 a permis de montrer qu'il existait un intérêt très fort dans la communauté VLT, et VLTI en particulier, pour le développement de nouveaux instruments ouvrant de nouvelles opportunités scientifiques. Les projets d'instruments VLTI présentés, GRAVITY +, la suite ASGARD (HEIMDALLR, VIKING/Hi-5, BIFROST), l'instrument visible, reposent nécessairement sur une évolution de l'infrastructure. Par conséquent, bien que l'ESO soit lourdement engagé dans la construction de l'ELT, il ne fait aucun doute qu'il aura un rôle central dans l'éclosion et l'accompagnement de ces nouvelles idées.

**Au service de la sensibilité et de la précision : cophasage et optique adaptative.** Développer une capacité accrue d'observer des objets faiblement lumineux, possédant une brillance de surface faible, à haute résolution spectrale ou à grande dynamique est la clé pour ouvrir de nouvelles opportunités scientifiques à CHARA ou au VLTI. Pour cela, il faudra explorer si il

est possible d'aller au delà des performances du suiveur de franges de GRAVITY tant du point de vue de la magnitude limite que des résidus de co-phasage. Plusieurs défis se posent donc. Le premier passe par une compréhension poussée des limitations du suivi de franges actuel au VLTI et des implications de ce dernier sur la qualité des données en particulier le rôle de la correction d'optique adaptative ainsi que celui du contrôle des vibrations. Le second suppose une réflexion sur les concepts optiques de combineurs permettant une plus grande transmission globale comme l'instrument HEIMDALLR de la suite ASGAR (celle de GRAVITY est de l'ordre du pourcent), ainsi que sur les architectures comme l'exploration du concept de co-phasage hiérarchique (concept HFT), ou bien l'extension de la capacité de co-phasage hors axe à de plus grandes distances angulaires (GRAVITY+). La question du futur des optiques adaptatives dans un contexte de recherche d'augmentation de sensibilité (e.g. augmentation de Strehl) de diminution des fluctuations de flux, voire de l'utilisation d'étoiles laser se posera. On peut finalement souligner que les effets atmosphériques à l'échelle de la base interférométrique gagneraient à être étudiés plus en détail tant du point de vue de la simulation que du retour d'expérience à la manière de ce qui est fait pour les télescopes à pupille connexe.

**Nouveaux concepts instrumentaux** La démonstration de FRIEND effectuée sur CHARA a ouvert la voie de l'interférométrie monomode visible et donc celle de mesures à grande précision dans ce domaine de longueur d'onde. Le projet SPICA de combiner à six télescopes pour CHARA permettra d'exploiter la pleine capacité d'imagerie du réseau mais également des mesures de précision à grande cadence. Son couplage avec un suiveur de frange (SPICA-FT, voir Fig. 13) reposant sur les instruments MIRCx et MYSTIC et la mise en opération des systèmes d'optique adaptative sur CHARA sera l'une des clés de son succès. Du côté du VLTI plusieurs idées ont émergé. On peut imaginer s'appuyer sur la mise à disposition de foyers visiteurs au VLTI par l'ESO pour les valider. Une proposition pour ouvrir la bande J, jamais explorée de manière systématique en interférométrie, a été faite dans l'instrument BIFROST de la suite ASGAR. L'ouverture au visible sur les télescopes unitaires est intéressante mais pose le problème de la correction d'optique adaptative dans le visible. **Sur les télescopes auxiliaires en revanche (de 1.8m de diamètre, pour 1m sur CHARA), le problème est nettement plus simple à résoudre, et ouvrirait la possibilité d'une contrepartie dans l'hémisphère Sud de CHARA/SPICA.** Le foyer visiteur pourrait aussi être une opportunité de concrétiser des concepts dédiés aux observations à haute dynamique en préparation, par exemple, d'une proposition plus ambitieuse d'instrument telle que Hi-5 : nulleur sol dans la bande 3-5 microns. Dans ce dernier cas on devra se poser la question de comment réduire les résidus de co-phasage à des niveaux de l'ordre de quelques dizaines de nm (contre 100-150 nm aujourd'hui) ou de comment contrôler la propagation de la polarisation. Cette plateforme visiteur pourrait être également un moyen de valider des concepts ambitieux tels que VIKING (suite ASGAR) qui couple nulling et phases de noyaux proposés par Martinache et Ireland (2018). On remarquera l'intéressante connexion avec l'imagerie haut contraste simple pupille pour laquelle l'exploitation des phases de noyaux est également explorée. Enfin on notera que l'infrastructure VLTI offre la possibilité de réutiliser les séparateurs d'étoiles de PRIMA afin d'opérer un suivi de franges hors axe allant jusqu'à 30" environ (projet GRAVITY+). Sur ce dernier point un vrai travail d'étude des limitations et performance d'un tel mode est à entreprendre, il offre potentiellement une solution à la problématique de la couverture du ciel par les suiveurs de franges.

On voit clairement que le développement de toute nouvelle instrumentation ambitieuse au VLTI repose sur un effort de R&D conséquent. Bien que seul l'instrument visible soit une proposition française (Lagrange) il existe une implication des équipes de recherche HRA française dans chacun des projets mentionnés plus haut.

#### 4.2.3 Comment préparer l'au delà des infrastructures (post-VLTI, post-CHARA)?

Le projet Planet Formation Imager (PFI) a initié la première réflexion poussée sur un futur interféromètre en combinant l'élaboration d'un cas scientifique ambitieux et la déclinaison de ces objectifs en spécifications techniques et en identification de verrous technologiques. Le lecteur pourra consulter les avancées sur <http://www.planetformationimager.org>. La prochaine décennie verra l'essentiel des efforts européens dans le domaine optique dirigés vers la construction de l'ELT. Il semble donc essentiel de profiter de cette période pour établir une feuille de route concrète pour un interféromètre futur en prolongeant l'effort effectué pour PFI. Cela suppose de consolider et élargir le cas scientifique et la communauté concernée. Une approche graduelle pourrait être adoptée car certaines thématiques sont moins gourmandes en infrastructure. Il est évident qu'un projet d'interféromètre optique à longues lignes de base ambitieux sera coûteux et devra reposer sur des cas scientifiques marquants et des ruptures technologiques significatives. La communauté doit donc s'organiser afin de poser des jalons précis marquant la progression dans la résolution des nombreux défis. Nous discutons certains de ceux-ci ci-après. Les laboratoires français ont certainement une masse critique suffisante pour contribuer à ces réflexions.

**Augmenter la résolution angulaire et la richesse de l'information** L'interférométrie optique actuelle fournit des résolutions de l'ordre de la milli-seconde d'angle et des images de complexité très limitée. Un gain d'un facteur 10 marquerait une rupture très significative dans les applications potentielles (physique stellaire dans la séquence principale, formation planétaire, noyaux actifs de galaxies, objets compacts, petits corps du système solaire). En termes pratiques cela demande la mise en œuvre de bases kilométriques et d'un nombre de télescopes important (> 10) afin de pouvoir réaliser de la synthèse d'ouverture et cartographier des scènes astrophysiques complexes. Ces spécifications de haut niveau se déclinent en verrous technologiques qui

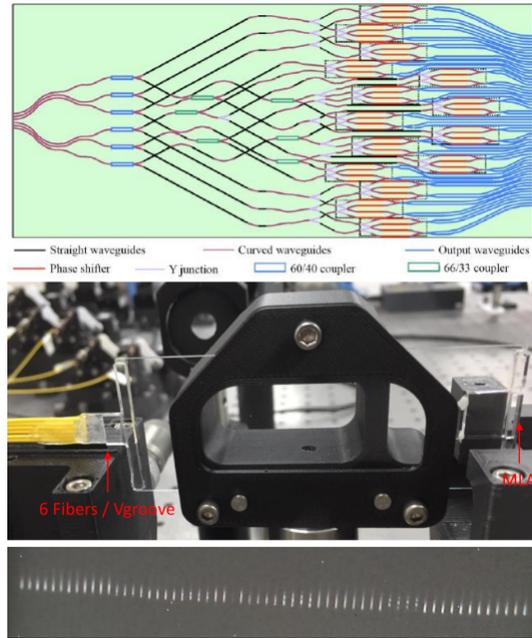


Figure 13: Le composant principal du suiveur de frange SPICA-FT, installé dans MIRCx, est un chip d'optique intégré permettant de combiner les faisceaux issus des 6 télescopes CHARA. C'est un généralisation à 6 télescopes du chip utilisé dans GRAVITY. Haut: design du chip réalisé par P. Labeye à l'IPAG, Milieu: Chip en cours de test à l'Observatoire de la Côte d'Azur, Bas: Image des 60 sorties du chip présentant des franges d'interférence sur certaines bases.

doivent être abordée sans idées préconçues, sous des angles différents: 1) celui de la réalisation de délais optiques kilométriques, 2) celui du transport de faisceau sur de grandes distances, 3) celui de la comparaison entre schémas de recombinaison et détection interférométriques classiques directs et d'alternatives telles que la conversion paramétrique, l'interférométrie d'intensité ou la détection hétérodyne, 4) enfin celui du traitement du signal dont les considérations devront être au cœur de toute concept initial. On notera également que l'application des techniques interférométrie d'intensité sur le réseau CTA est toujours en considération.

**Augmenter la sensibilité** L'augmentation de la sensibilité des interféromètres du futur passera par une réflexion poussée sur les trains optiques et les revêtements utilisés. Le développement de télescopes équipés de systèmes d'optiques adaptatives robustes, éventuellement couplées à des étoiles laser, le tout à bas coût doit être exploré en partenariat avec des industriels. Par ailleurs, les stratégies de co-phasage d'un interféromètre à bases kilométriques et un grand nombre de télescopes qui sont au cœur de la sensibilité sont à ce jour très faiblement explorées. La segmentation de la pupille et la dilution du signal en présence d'un grand nombre de télescopes appellent des solutions originales qui ne sont pas des extrapolations de l'existant. Le concept de recombinaison hiérarchique combinée au bootstrap de lignes de base est la proposition la plus avancée à ce jour mais elle nécessite des validations conceptuelles, du prototypage technologique et une réflexion poussée sur les algorithmes de contrôle. Toute idée en rupture comme une "étoile laser interférométrique" serait la bienvenue. Par ailleurs, comme mentionné plus haut la modélisation de l'atmosphère sur des échelles kilométriques et l'étude du potentiel de cophasage hors-axe en présence d'une ou de plusieurs sources doivent être explorés. Enfin au cœur de la plupart de ces développements doit s'intégrer, le plus tôt possible des considérations de traitement du signal.

**Interférométrie spatiale** Bien que les réflexions actuelles sur le futur de l'interférométrie portent souvent sur une infrastructure sol le domaine spatial apporte un potentiel scientifique remarquable. Plusieurs propositions ont été faites lors de l'appel à idée Voyage 2050 de l'agence spatiale européenne (ESA) qui incluent un interféromètre dans l'espace: un interféromètre destiné à la recherche de biosignatures dans les exoplanètes, un hypertélescope spatial, un interféromètre solaire UV ainsi qu'un interféromètre d'intensité à base Lune-Terre. Tout ces projets reposent sur des ruptures technologiques majeures mais l'on remarquera que le panorama a beaucoup changé par rapport aux propositions DARWIN. Les projets de détecteur d'ondes gravitationnelles LISA ainsi que l'interféromètre imageur THz IRASSI (DLR) sont autant d'exemples de précurseurs qui aideront à faire progresser la technologie.

**Un fort besoin de recherche et technologie** L'effort important requis par l'exploitation des instruments existants ne doit pas éclipser le besoin d'avancer sur les concepts et l'exploration de technologies nouvelles (souvent menés par les mêmes équipes). Progresser dans ce domaine sera très certainement l'un des défis de la discipline dans les prochaines années. Sans être exhaustif on peut relever des besoins 1) en concepts optiques et systèmes pour de la recombinaison d'imagerie à grands nombre de télescopes, le cophasage ou l'interférométrie annulante, 2) d'explorer l'importance et les limitations des technologies photoniques (transport, circuits 2D, 3D), 3) en détecteurs à comptage de photons pour l'interférométrie d'intensité, 4) d'étudier l'application des lasers à peigne de fréquence, horloges et détecteurs haute cadence pour la détection hétérodyne infrarouge, 5) d'exploration des techniques de génération retard optiques inventées dans d'autres disciplines, 6) de technologies pour le moyen infrarouge, conversion paramétrique, circuits photoniques, détecteurs améliorés, 7) vol en formation et les problématiques liées à l'interférométrie spatiale. La communauté française HRA est déjà porteuse de nombreux projets de recherche dans le domaine et il est important qu'elle puisse continuer à le faire.

### 4.3 Haute Dynamique

Entre les capacités des instruments actuels et les objectifs scientifiques ambitieux de détection et caractérisation de planètes rocheuses, il y a encore un progrès considérable à réaliser (jusqu'à plus de 4 ordres de grandeur à gagner sur le contraste pour ce qui est des planètes telluriques en zone habitable autour d'étoiles de type solaire). C'est un défi majeur, identifié comme atteignable, que ce soit au sol sur l'ELT (peut-être dans quelques cas marginaux les plus favorables avec les premiers instruments, mais demandant un instrument dédié pour aborder un échantillon de cibles, principalement des étoiles M proches), ou depuis l'espace tel qu'envisagé dans l'exercice de prospective ESA Voyage2050<sup>17</sup>, ou bien à la NASA, pour deux des quatre études de "flagship concepts" (HabEx<sup>18</sup> et LUVOIR<sup>19</sup>), au-delà du démonstrateur technologique de l'instrument à grand contraste CGI sur WFIRST.

Leux travaux à mener, dès maintenant et dans une perspective à long terme, peuvent se structurer sur 3 points principaux (Fig 14) :

- Le soutien d'une R&D spécifique à des questions incontournables pour les objectifs finaux et éventuellement la démonstration de nouveaux concepts.
- La poursuite de l'utilisation de SPHERE et son amélioration pour démontrer la mise en oeuvre opérationnelle au télescope de solutions plus haute performance testées en laboratoire.
- La maîtrise et exploitation de modes 'haute dynamique' des instruments de première lumière sur ELT pour préparer PCS, l'instrument dédié à la très haute dynamique sur l'ELT.

#### 4.3.1 Opportunité et importance (astronomique et instrumentale) de démonstrateur poussé sur ciel

La démonstration sur ciel de nouvelles solutions, suffisamment solides et éprouvées en laboratoire, présente des intérêts multiples. Premièrement, avec un gain en performance significatif, les résultats astrophysiques atteignables constituent une motivation intrinsèque importante, justifiant l'engagement de ressources correspondantes. Avec un continuum d'objets à observer (exoplanètes géantes, systèmes planétaires en formation), croissant en nombre et en intérêt avec le contraste, d'une part, et des nouveaux composants technologiquement disponibles maintenant, ces résultats ne font pas de doutes et permettent de rassembler un consortium international. Deuxièmement, instrumentalement, des pistes d'améliorations importantes sont proposées, sont maintenant mûres du point de vue de l'étude conceptuelles ; elles paraissent également incontournables pour les instruments de génération future. Une phase de test opérationnelle est donc nécessaire et opportune maintenant. Plutôt que d'initier un projet indépendant au coût matériel et humain important, il semble opportun de profiter de l'existence des instruments XAO de première génération et de l'expertise opérationnelle acquise lors de leur mise en oeuvre. On peut s'appuyer sur SCEXAO qui permet de tester de nouvelles solutions techniques mais surtout sur l'instrument SPHERE qui restera encore pendant plusieurs années le principal instrument d'imagerie à haute dynamique à la disposition de la communauté Française. Le programme **SPHERE+**<sup>20</sup> de mise à niveau de SPHERE est donc une étape importante dans la prospective en haute dynamique et en incluant en particulier de :

- améliorer la qualité de correction turbulence, par une cadence accrue de la boucle de correction et l'implantation de nouveaux algorithmes de contrôle prédictif, tout en conservant ou en améliorant la magnitude limite en particulier sur objets rouges, par un senseur de type "pyramide" et fonctionnant en infrarouge. Cela inclut des éléments nouveaux en

<sup>17</sup>Snellen et al, 2019 "ESA Voyage 2050 White Paper: Detecting life outside our solar system with a large high-contrast-imaging mission", arXiv:1908.01803

<sup>18</sup>HabEx : <https://www.jpl.nasa.gov/habex/pdf/HabEx-Final-Report-Public-Release.pdf>

<sup>19</sup>LUVOIR: [https://asd.gsfc.nasa.gov/luvoir/reports/LUVOIR\\_FinalReport\\_2019-08-26.pdf](https://asd.gsfc.nasa.gov/luvoir/reports/LUVOIR_FinalReport_2019-08-26.pdf)

<sup>20</sup>Boccaletti et al, 2020, "SPHERE+: Imaging young Jupiters down to the snowline", 2020arXiv200305714B

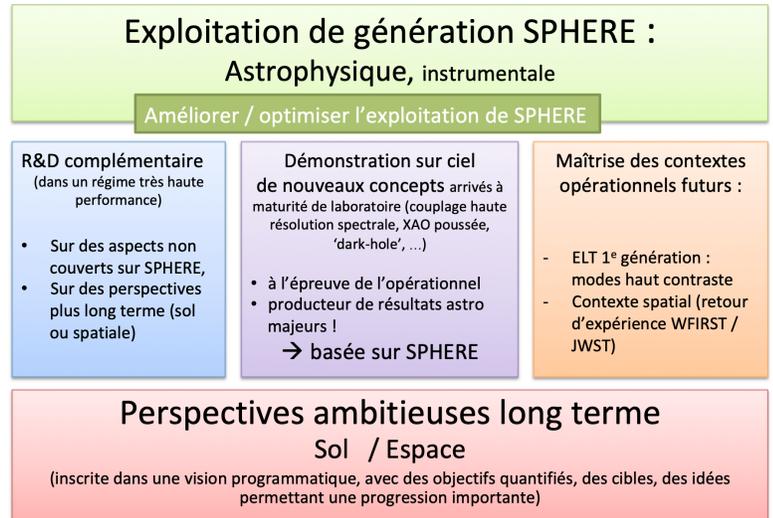
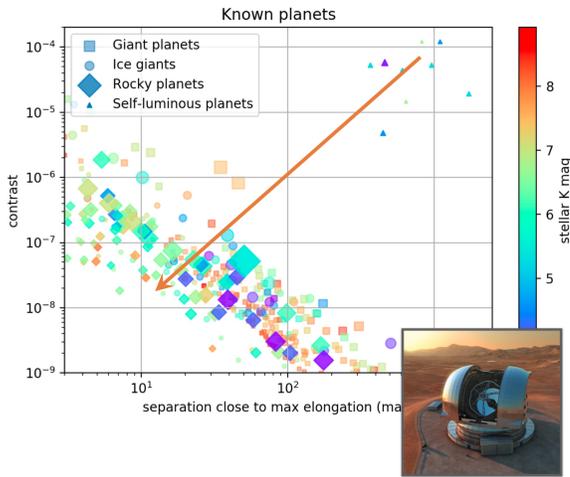


Figure 14: **Gauche** : contraste en fonction de la séparation angulaire des exoplanètes connues et selon leur type, déjà imagées (en émission propre pour les systèmes encore jeunes) en haut à droite du diagramme, ou connues par mesures de vitesses radiales. Alors qu'une population intermédiaire (incluant en particulier des exoplanètes géantes de contrastes et séparations intermédiaires et d'âge variés) sera révélée par les mesures astrométriques de GAIA, on mesure le gain en performance pour caractériser les atmosphères exoplanétaires en lumière réfléchie, particulièrement pour le cas des planètes rocheuses en zone tempérée. **Droite** : Mise en perspective des développements HRA-haute dynamique complémentaires, fondés sur la génération d'instruments actuels tels que SPHERE jusqu'à l'ambition sol et espace de caractérisation de planètes telluriques en zone habitable

termes de RTC et de senseur de front d'onde. Nécessaires dès maintenant, la maîtrise de ces éléments est également incontournable pour les instruments ELT, dès la première lumière. Ce point d'amélioration réduit d'un facteur 5 à 10 l'intensité du halo stellaire. Elle donne aussi tout son sens et son intérêt aux autres éléments d'amélioration envisagés

- mettre en place une boucle de rétroaction modifiant le point de fonctionnement de l'optique adaptative à partir des informations de météorologie disponibles dans le plan focal. Permettre cette boucle de rétroaction, c'est se donner les moyens de s'affranchir des erreurs de chemin optique non-commun (NCPA) et des speckles quasi-statiques en amont du traitement de données.
- mettre à jour les coronagraphes. L'amélioration des performances de la XAO alimentant l'imageur haut-contraste permet d'envisager l'utilisation de coronagraphes plus agressifs à la fois en terme d'IWA et de réjection.
- coupler le signal prélevé dans le halo à grand contraste, à la résolution spectrale, moyenne (plusieurs milliers) sur un petit champ, ou haute (environ  $10^5$ ) sur un point. En plus de l'information astrophysique sur la caractérisation des atmosphères planétaires, ce mode permet de lever la confusion possible entre l'intensité de la planète et celle du halo stellaire, pour n'être plus limité que par le bruit de photon stellaire (fortement réduit grâce aux points précédents, et extrapolable de manière très favorable dans le cas futur de l'ELT).

#### 4.3.2 Aborder la haute dynamique sur l'ELT ou dans l'espace

Preuve que l'imagerie à haute dynamique a atteint une maturité technique et une efficacité scientifique reconnue, les 3 premiers instruments de l'ELT (MICADO, HARMONI, METIS) intégreront un mode coronagraphique. Avec des capacités en imagerie et spectroscopie dans l'infrarouge proche (MICADO et HARMONI) sont des instruments généralistes qui ne sont pas optimisés pour la haute dynamique mais permettront, grâce à l'optimisation des choix de coronagraphes et un contrôle spécifique des aberrations instrumentales amont, d'obtenir des résultats scientifiques importants par l'augmentation de la résolution angulaire, par la résolution spectrale pour HARMONI et la sensibilité pur MICADO. Avec une longueur d'onde d'observation plus grande en infrarouge moyen, Le spectro-imageur METIS bénéficiera de résidus de phase plus favorable à la haute dynamique et complémentaire, sans pourtant aborder des séparations aussi courtes et la lumière réfléchie.

Du point de vue de l'expertise instrumentale, ces exigences motivées astrophysiquement de haute dynamique pousseront à révéler, bien plus précisément que la recherche de la seule résolution angulaire, les propriétés fines de correction du front d'onde obtenue sur l'ELT, sur une multitude d'aspects tels que la stabilité d'alignement de pupille, les effets résiduels de vibration, les

effets de la pupille segmentée à cette échelle, les questions d'étalonnage et de stabilité dans le temps... et tout effet éventuellement inattendu mais possible lors du passage à un télescope à tel point différent de ses prédécesseurs.

Ces expériences de l'ELT couplées aux nouvelles solutions instrumentales ou opérationnelles intégrées dans les mises à niveau des instruments ITHD sur les télescopes de 8m permettra d'aborder sereinement la préparation de l'instrument ELT dédié à la caractérisation des planètes extrasolaires en lumière réfléchie.

Dans une approche parallèle, le démonstrateur technologique prévu sur WFIRST (instrument à grand contraste CGI), avec une pupille modeste en diamètre et surtout très inappropriée à la haute dynamique dans sa forme, sera loin de couvrir les objectifs d'un instrument conçu pour l'imagerie d'exoplanètes d'un futur plus lointain. Il marque une étape néanmoins essentielle pour avancer vers des performances encore plus ambitieuses, en incluant en particulier la mesure et correction fine des aberrations résiduelles par plusieurs miroirs déformables spatiaux, une revue et validation de l'approche système du budget d'erreur, un comportement coronographique en milieu spatial ... Bien que principalement américain, le projet fait appel aux compétences françaises, en particulier sur des composants optiques spécifiques, et à l'algorithme définissant le "dark-hole". La poursuite de collaborations actuelles actives entre France et Etats-Unis sera particulièrement bénéfique et riche de perspectives dans ce cadre.

### 4.3.3 Une R&D dédiée pour gagner 4 ordres de grandeur

Les étapes de démonstration sur ciel sur 8-m, et de retour d'expérience des premiers modes réellement haut contraste dans les contextes nouveaux du spatial ou de l'ELT, sont nécessaires mais ne couvrent toutefois pas toutes les actions de développement à couvrir pour obtenir dans un avenir un peu plus lointain un instrument de grande pupille, probablement segmentée, offrant des contrastes au-delà de  $10^8$  au sol ou  $10^{10}$  dans l'espace à quelques éléments de résolution de l'axe, et de manière stable et routinière. Des actions de R&D spécifique doivent être menées, dans le régime de performance visé. Elles doivent être menées maintenant car leur résultat conditionne le lancement des autres actions au long terme, concernant des développements technologiques, ou encore le dimensionnement général du système.

Alors qu'on dispose de solutions théoriques capables de répondre aux objectifs de contraste cités plus haut, la mise en oeuvre pratique, même en laboratoire est délicate. Le niveau de performance effectif dépend principalement de la qualité du contrôle de la surface d'onde. Malheureusement dans une image instantanée, l'effet des résidus de diffraction est indistinguable de la présence d'une source astrophysique dans une seule image coronographique.

Il est possible d'introduire une source de diversité dans l'image, par modulation délibérée de la surface d'onde et ainsi lever la dégénérescence en utilisant des algorithmes comme le speckle-nulling ou la diversité de phase coronographique<sup>21</sup>. Ces stratégies d'observation sont cependant généralement peu efficaces, passant trop de temps à moduler. Une approche alternative consiste à faire inclure une modélisation plus fine de l'instrument haut contraste qui permet l'utilisation d'algorithmes non-linéaires à la convergence plus rapide. Il faut maintenant rendre ce type d'approche plus robuste et moins sensible aux imperfections de modélisation.

On peut aussi chercher la mise au point de solutions haut-contraste intrinsèquement plus robustes aux résidus de surface d'onde amont. C'est ce qui a motivé le développement du concept de kernel-nuller (voir Sec. 3.4.1): une solution haut contraste dans le contexte d'un interféromètre. Le concept initial doit être validé expérimentalement et démontrer qu'il offre des avantages nouveaux avant d'être déployé sur un observatoire. Il faut indépendamment également explorer la possible généralisation du concept et sa transposition dans le domaine pupille unique.

Enfin étant donné l'émergence d'une nouvelle niche observationnelle couplant l'imagerie haut-contraste à la haute résolution spectrale (molecular mapping), un effort doit être mené pour garantir le comportement des techniques haut-contraste sur des bandes spectrales larges.

### 4.3.4 La haute dynamique comme lien entre les thèmes ASHRA

Rappelons explicitement que la haute dynamique est fortement liée aux autres thèmes ASHRA. Les liens à l'OA sont essentiels aussi bien depuis le sol (XAO) que dans l'espace où les besoins de stabiliser le champ électrique avec des précisions sub-nanométriques est très proche des enjeux de l'OA. Les contributions du traitement du signal sur la haute dynamique ont également fortement contribué à la réussite de SPHERE (voir 4.4 ?). Des nouvelles pistes sont aujourd'hui étudiées pour appliquer des concepts interférométriques pour améliorer les performances des instruments à haut contraste (concept de kernel). L'intégration dans une vision globale de toutes ces composantes ASHRA au service d'un problème technique (la haute dynamique) et de la science principale qui lui est liée (les exoplanètes) est très structurant pour la communauté. La France est un lieu unique capable

<sup>21</sup>Herscovici-Schiller et al, "Experimental validation of joint phase and amplitude wave-front sensing with coronagraphic phase diversity for high-contrast imaging", A&A, 614, A142 (2018)

de réunir l'ensemble de ces expertises en se basant sur les développements antérieurs d'instrument comme SPHERE ou les coronographes de JWST, le lien développement-exploitation des ces instruments, mais aussi des objectifs à long terme ambitieux et motivants des R&D de pointe. Ces développements sont naturellement organisés autour d'une feuille de route incluant des étapes intermédiaires intéressantes en termes de résultats scientifiques potentiels et de montée en maturité instrumentale progressive.

## 4.4 Signal

L'astronomie, et la HRA en particulier, bénéficie largement des avancées en TS. Au delà de ce constat et d'une évolution naturelle des interactions TS–HRA (un certain nombre d'évolutions en lien avec le TS sont d'ailleurs évoquées dans les sous-sections précédentes), nous pouvons anticiper d'autres pistes prometteuses mais qui demanderont des changements culturels ou des investissements spécifiques.

**Étalonnage de la réponse instrumentale** Ingrédient indispensable du traitement des données astronomiques, la réponse instrumentale (PSF) doit être déterminée de la façon la plus précise possible pour exploiter correctement les observations. Avec l'évolution des instruments vers plus de complexité (grands champs, spectrographes à intégrale de champ, ...) cette réponse instrumentale devient non-stationnaire et ne peut plus être étalonnée d'après les observations d'une ou de quelques sources ponctuelles. Heureusement, une démonstration de plus en plus claire est que, grâce au TS, la connaissance de la PSF peut assez largement être apprise des données déjà existantes, les données scientifiques notamment. Les avantages potentiels sont multiples (meilleure estimation de la PSF réelle et donc meilleure exploitation des données, utilisation du temps d'observation, ...) mais, au delà de la preuve de concept, il reste à diffuser et à développer ce genre d'approche pour une mise en œuvre effective sur les instruments. Cela demandera un investissement significatif pour développer, à la fois, des modèles de PSF adaptés aux spécificités des instruments et des algorithmes s'appuyant sur ces modèles pour étalonner la PSF et l'exploitant pour traiter les données. Gageons que l'appropriation de ce savoir-faire aura des retombées non seulement sur le traitement des données *a posteriori* mais aussi sur le contrôle temps-réel<sup>22</sup> et sur la conception instrumentale.

**Aspects méthodologiques** Les interactions HRA–TS sont amenées à se diversifier et à se développer pour intégrer des transitions méthodologiques liées au TS. C'est le cas, par exemple, des tests d'hypothèses robustes en grande dimension ou de l'exploitation d'intelligence artificielle qui ont des applications naturelles en HRA pour la détection de sources dans des données MUSE ou SPHERE<sup>23</sup>. Par ailleurs, avec l'acquisition de grands volumes de données hétérogènes et abstraction faite des effets de mode, l'exploitation d'outils de “*machine learning*” semble particulièrement prometteuse et concerne maintenant tous les laboratoires. Pourtant, les premiers résultats de l'utilisation “*en aveugle*” d'algorithmes de “*machine learning*” s'avèrent peu concluants. Ce pose donc le problème de la prise en main de ces approches pour la maîtrise de la fiabilité des résultats qui sont automatiquement extraits de grands volumes de données. On le voit, le bénéfice que tirera la HRA des nouvelles méthodologies venant du TS repose sur la maîtrise de ces approches et donc sur l'efficacité de la collaboration des chercheurs de plusieurs communautés.

**Du *data science* au *big data science*** Un autre aspect de l'interaction HRA–TS–numérique grandissante concerne les aspects de simulations lourdes et de réduction/synthèse d'information massives (c'est déjà le cas pour MUSE au VLT et le sera aussi pour l'ELT, pour les simulations d'images et de reconstruction de PSF par exemple). Ce contexte impose des moyens humains et une expertise pour appréhender et modéliser la complexité des données, développer et prototyper des *pipelines*, les rendre efficaces (la création de certains cubes MUSE se compte en semaines), les documenter et les faire évoluer après mise en service. Il y a donc clairement un couplage entre les méthodes de TS qu'il sera nécessaire/possible d'inventer et d'implanter pour exploiter les informations produites (en termes de temps et de puissance de calcul), et d'autre part la sophistication instrumentale et le volume de données qu'on peut se permettre de produire<sup>24</sup>. La pertinence du dimensionnement instrumental dépendra de plus en plus fortement de l'efficacité du couplage HRA–méthodes de TS associées et de la qualité de l'intelligence entre les différentes parties.

---

<sup>22</sup>un des paris faits pour l'OA de Themis est d'étalonner en continu la réponse du système et d'intégrer son évolution temporelle dans le contrôle temps-réel

<sup>23</sup>cf. par exemple l'*Exoplanet Imaging Challenge* <https://exoplanet-imaging-challenge.github.io>

<sup>24</sup>Un exemple frappant, en radio, est celui de SKA, où l'instrument produira des données à une telle cadence que les informations — champs électriques et visibilité complexes — ne pourront être stockées qu'un temps très court, ce qui impose un traitement “*en ligne*” avec toutes ses limitations, et des espoirs qui se tournent vers le TS pour lever au maximum ces limitations.

## 5 Structure ASHRA : rôle et perspectives

Les sections précédentes présentent les activités passées et en perspective dans le domaine HRA. La question abordée ici est celle du rôle et de la valeur ajoutée d'une structure telle que l'Action Spécifique dédiée sur ce périmètre. Cette question est d'abord discutée par l'analyse du rôle effectif sur les dernières années, en regard du contexte et du mandat défini en 2015 (6.1) ; elle est étendue par des réflexions sur des enjeux futurs et de possibles évolutions.

Le CS a opéré avec un objectif triple d'*animation*, de *stimulation* et de *coordination* de la communauté. Il était aussi conscient de dangers potentiels à éviter comme par exemple : éviter d'induire une lourdeur excessive en termes de demandes, de rapports ou de consultations ; ne pas confondre animation et pilotage réducteur ; ne pas confondre expertise fournie sur un sujet possible technique et prise de décision (en lieu et place des intérêts astro venant des PN, arbitrage des agences, ou initiatives des projets et des acteurs premiers) ; ou encore ne pas confondre synergies et uniformisation. Sans prétendre un fonctionnement idéal, notre perception est celle d'un effet très positif de cette structure pour la communauté concernée, répondant à l'essentiel des éléments du mandat défini en 2015. Loin de s'épuiser, les motivations pour cette structure s'avèrent toujours (ou plus encore) vives et pertinentes : **nous suggérons un renouvellement de cette structure avec un fonctionnement dans la continuité face à des défis toujours renouvelés, et certaines pistes de réflexion sur l'ouverture aux interfaces (5.3).**

### 5.1 Pour une communauté motivée, cohérente

Les échanges et la vision commune que permet ou favorise l'ASHRA a pour objectif premier celui de **l'animation, pour la communauté HRA elle-même**. Ainsi, au-delà de l'appui financier fourni par l'ASHRA (5.2), les *demandes de fonctionnement* sont l'occasion de l'expression d'avancement des activités et l'exercice nous est apparu bénéfique. Les demandes sont ainsi discutées, avec une volonté de critique constructive, avec des suggestions souvent, qui dépassent la simple question d'arbitrage d'attributions. Ont émergées aussi l'*organisation d'ateliers*, en particulier sur le mandat, pour ce qui a concerné la question de *feuille de route* dans les (nombreuses) actions possibles sur le domaine du grand contraste, avec des échelles de temps et des contextes hétérogènes. Si le CS est une bonne échelle pour une identifier/stimuler de tels ateliers, s'assurer d'en tirer des conclusions, il est important d'élargir les ateliers à des audiences bien plus vastes. L'ASHRA a également proposé ou stimulé des *mini-ateliers en petits groupes d'experts* autour de bancs expérimentaux (sans aucun enjeu d'attribution de moyens, mais directement comme lieu d'échange d'expertise). Cela a été fait dans le passé autour de bancs ITHD (LESIA) ou FFREE (IPAG) pour le contraste. Un tel atelier est défini autour de l'analyse de front d'onde spécifique par interférométrie (CRAL) pour un futur proche. Ce même esprit a motivé la stimulation d'*échanges directs et répétés entre experts* impliqués dans les premières optiques adaptatives pour l'ELT, sans aucune obligation de résultat autre que l'objectif de gagner plus par ces échanges que perdre en temps. Sans chercher à perturber les organisations propres à chaque consortium, les participants expriment un retour très positif que ce soit pour conforter des choix, se rassurer sur des analyses de risques, ou parfois bénéficier de travaux déjà fournis.

Ces échanges ont aussi une vocation **vers l'extérieur du domaine HRA**. La sollicitation par l'INSU de l'ASHRA pour son expertise collective fait partie du mandat. L'intérêt est de permettre des discussions suffisamment expertes pour saisir, critiquer les points cruciaux, tout en apportant un point de vue global, consensuel ou non, différent du point de vue potentiellement partisan interne à chaque projet. Le pilotage du groupe AO4ELT, regroupant des membres de tous les projets OA pour ELT à contribution française, ainsi que de sujets de R&D connexes, se place naturellement dans cette approche. Les analyses de priorités, difficultés envisagées, besoins, ou impossibilités programmatiques, telles que par exemple rédigées à l'automne 2017 puis en janvier 2020, cherchent par construction à émettre une vue d'ensemble fondée, agréée par tous. C'est aussi le cas d'interventions comme par exemple l'accompagnement des discussions sur la structure en PTN du JMMC et l'émergence du service SUV ; c'est bien sûr le cas des avis rendus sur l'examen des demandes CSAA à composante HRA : ces avis sont rédigés de manière à être communiqués et constructifs pour les proposant.

Enfin, toujours à destination des acteurs ou agences extérieures à la communauté HRA, nous pensons que l'identification de feuilles de route, la mise en perspective d'actions immédiates ou locales dans un contexte plus large, et donc la visibilité des priorités, doit pouvoir avoir une portée des demandes que nous évaluons directement. Non seulement cette réflexion doit pouvoir aider directement l'argumentaire des proposant, mais cela devrait pouvoir aussi renforcer la pertinence de choix d'attribution par des instances moins proches de notre discipline, et dont nous avons besoin. Ces sources peuvent être locales mais interdisciplinaires (universités, régions), associées au milieu non académique, ou bien sûr international. Pour cela, il nous semble important de poursuivre ce travail entrepris d'analyse des grandes lignes d'actions et priorités, fondé sur une expertise fine.

Le bénéfice de ce travail pourrait sans doute être encore renforcé, avec un effort modéré atteignable, en améliorant d'une part la visibilité extérieure à commencer par un site web actif et à jour, diffusant les éléments de réflexion en cours, et d'autre part la communication interne à la communauté HRA, plus largement qu'au sein du CS.

## 5.2 Soutien de fonctionnement : animation et incitations

L'ASHRA dispose d'un budget annuel abondé par l'INSU et le CNES, de manière relativement stable dans le temps, pour un total de l'ordre de 100 k€. Nous avons rappelé ci-dessus que l'intérêt de cet exercice d'attribution en termes de suivi, critique et animation des activités HRA dans la communauté ; le rôle direct d'appui aux activités de R&D, de soutien de collaboration et d'actions incitatives est bien sûr essentiel.

Comme soutien aux activités de recherches, ce budget apporte une contribution significative pour permettre la valorisation et la communication des résultats de recherche en conférences. Elles sont essentielles pour maintenir la vocation de recherche en instrumentation dans les laboratoires, associant bien sûr étudiants et ingénieurs, au-delà des actions qui restent toujours prioritaires sur la réalisation d'instruments. Nous accordons une place importante également, et dans le même esprit, aux actions de soutien aux collaborations et aux écoles. Enfin, une partie du soutien concerne des actions de recherche et développement expérimentales "avec des buts de validation de concept ou démonstration technologique pour la HRA". Il est entendu que le montant des financements ASHRA ne permet pas de porter seul et dans la durée des actions de R&T/R&D importantes, ou d'accompagner de manière récurrente des actions longues ; ces actions incitatives restent néanmoins importantes pour le démarrage d'une nouvelle expérience, en amont du relais par une source de financement plus importante, ou bien en aval pour une valorisation spécifique.

## 5.3 Réflexions sur les perspectives de l'ASHRA

Sur la base de ce bilan auto-évalué positivement, et en constatant le bouillonnement de pistes de R&D prometteuses, et même nécessaires, à coordonner avec l'ambition d'engagements pris ou en perspectives sur les grands instruments de la communauté, nous pensons importante la poursuite de cette structure. Nous suggérons le renouvellement en continuité dans sa forme. Le périmètre nous semble pertinent : assez vaste pour concerner une population importante, couvrir des interactions qui nous semblent essentielles et se renforçant entre thèmes ; pas trop large permettant de préserver une culture commune dans les méthodes, les problématiques et donc la richesse d'échanges effectifs.

En termes d'évolution, nous notons une tendance dans le sens de l'intensification des intérêts et préoccupations communs entre *sol et espace*. Les échanges entre les domaines d'application sol et espace existent bien sûr depuis longtemps. Les conditions quantitatives de tests et d'expérimentations sont spécifiques (en termes de vitesse d'évolution, niveaux de précision visée) mais les concepts et les analyses système bénéficient de réflexions communes et de nombreux acteurs (ici en Europe, de même qu'aux Etats-Unis en particulier) travaillent sur les deux aspects. Nous soulignons que la maturité acquise sur des instruments sols, rebondit aujourd'hui sur des projets spatiaux. C'est le cas pour des projets à vocation proprement HRA (comme par exemple WFIRST-CGI) ; c'est aussi de plus en plus pertinent pour l'utilisation de techniques "HRA" pour d'autres projets : outre atlantique la mise en route du JWST exige un savoir-faire spécifique de cophasage même pour une utilisation générale ; mais aussi, de plus en plus télescopes pourront bénéficier d'expertise HRA de télémétrie, vol en formation, filtrage spatial, optique active ou adaptative, ... pour simplifier ou simplement rendre possible de nouveaux design. Rechercher les meilleures synergies motivera une attention particulière.

Au-delà du périmètre actuel de l'ASHRA, nous remarquons des liens importants avec des sujets connexes, en termes de technologies mises en œuvres, de méthodologies ou de domaines d'application :

- les évolutions *technologiques* doivent être bien sûr suivies (là où le cœur d'expertise de l'ASHRA est plutôt sur des analyses "système"). Ces évolutions technologiques sont bien sûr susceptibles non seulement d'accroître les performances obtenues mais de revoir parfois qualitativement le principe des mesures, ou les designs possibles, cela concerne la détection, l'optique intégrée, l'optique ou opto-mécanique avec des capacités de formes, adaptation, ou de production bas cout en évolution rapide.
- *HRA en radio-astronomie* : dans le passé, un lien potentiel fort avait été évoqué entre interférométrie radio et optique. Dans les faits, peu de relations fructueuses ou de synergies ont effectivement pris réalité, peut-être pour des raisons circonstancielles, certainement aussi en raison des différences importantes dans les concepts et la nature du signal : moins d'ouvertures en optique, absence de l'information de phase, difficulté de la maîtrise du piston, jeux de données beaucoup plus réduits... Pour autant, la question pourrait être revue aujourd'hui, où la recombinaison cohérente en optique est beaucoup plus mûre, et des études se rejoignent entre interférométrie longue base ou mono-pupille avec par exemple des recombinaisons de sous-ensembles non-redondants de pupille, le filtrage spatial ou le sous-échantillonnage de la pupille pour relaxer les spécifications optiques, mieux connaître la phase ou s'affranchir des défauts. En parallèle, la perspective de SKA en radio-astronomie, préparée par des précurseurs déjà opérationnels, renouvelle le domaine de l'imagerie interférométrique complexe avec un regard nouveau et des défis différents, revenant aux fondamentaux de la formation d'image et du lien entre signal initial et information astronomique recherchée. Sans voir d'analogie proche et immédiate, un intérêt spécifique pourra être porté sur des échanges nouveaux entre communautés en évolution.

- on peut noter *des approches méthodologiques similaires en dehors du domaine HRA*, avec cette approche système rappelée plus haut, appliquées pour le développement de nouveaux concepts et instruments. Cela peut concerner l'utilisation de fonctions photoniques différentes, de conceptions de nouveaux types de spectro-imageurs (pas nécessairement à haute résolution angulaire), polarimètres.
- enfin, de manière plus large encore, ce types de développements peut également concerner des *applications en dehors du domaine astronomique*.

Ces remarques n'ont pas pour objet de remettre en cause le périmètre actuel de l'ASHRA qui nous semble être une échelle pertinente permettant cohésion et animation fructueuses. Elles pourront néanmoins stimuler une attention particulière, susceptible d'encourager des échanges, mettre en évidence des opportunités porteuses d'enrichissement mutuel.

## 6 Annexes

### 6.1 Rappel du mandat (2015)

Est rappelé ci-dessous in extenso le mandat de l'ASHRA tel que défini par l'INSU en 2015.

**Préambule.** L'exercice de prospective 2015-2020 de l'INSU/AA a permis de confirmer le pavage thématique de la discipline par les programmes nationaux et a réaffirmé le rôle clé joué par l'ASHRA pour l'ensemble des activités de haute résolution angulaire en France. Après plus de 15 ans d'existence il est naturel de mettre à jour le mandat de l'ASHRA ainsi que ses objectifs.

**Mandat.** L'ASHRA 2015-2020 a pour mandats 1/ de coordonner la recherche et organiser les développements en haute résolution angulaire en optique : interférométrie optique, optique adaptative, imagerie très haute dynamique et 2/ d'accompagner l'ensemble de la communauté astronomique française dans leur utilisation scientifique.

**Objectifs.** Le mandat de l'ASHRA se décline selon les objectifs suivants :

1. Piloter et soutenir les développements sur le VLT et l'E-ELT pour les différents travaux en optique adaptative, imagerie très haute dynamique.
2. Piloter et soutenir les développements sur le VLTI et sur CHARA pour les instruments en exploitation, ceux en développement ainsi que pour la poursuite des efforts en direction des performances ultimes.
3. Piloter et soutenir de manière transverse les développements en traitement du signal associé aux méthodes HRA.
4. Associer le maximum de scientifiques à ces opérations, notamment des jeunes chercheurs instrumentalistes (praticiens et théoriciens) qui utiliseront ces nouveaux moyens et devront donc les maîtriser
5. Diffuser ces techniques au sein de la communauté astrophysique et développer leurs domaines d'exploitation
6. Mener une réflexion prospective moyen- et long-terme notamment en interférométrie optique au sol.
7. Accompagner la réflexion prospective haute résolution angulaire dans le domaine spatial.

Ces objectifs devront continuer à renforcer la position de la France dans ce domaine en Europe et au niveau mondial. Les objectifs de l'ASHRA s'appuieront sur des actions d'expertise, d'évaluation, d'incitation, d'animation et de coordination.

#### Actions prioritaires

1. Coordonner le groupe AO4ELT et animer les actions issues de cette réflexion ; rendre compte à la coordination ELT-France
2. Coordonner le groupe HRHD4ELT ; rendre compte à la coordination ELT-France
3. Dresser le bilan des actions en cours en OA et ITHD complémentaires des travaux sur les instruments E-ELT ; coordonner ces activités.
4. Participer aux côtés de l'INSU à l'animation de la convention avec l'ONERA.
5. Favoriser l'émergence d'un plan d'action pour disposer rapidement des moyens nécessaires au cophasage performant du VLTI.
6. Animer la réflexion française et coordonner les contributions au niveau européen et international pour la prospective VLTI post-Gravity et Matisse et pour le plus long terme.
7. Participer aux côtés de l'INSU au comité directeur du JMMC
8. Maintenir un lien étroit avec les programmes nationaux au moyen d'actions communes à définir et animer
9. Contribuer en amont aux réflexions prospectives des grandes thématiques astrophysiques pour ce qui concerne les techniques HRA au sol et dans l'espace
10. Renforcer et animer les liens entre l'instrumentation HRA, les développements en traitement de signal et les objectifs astrophysiques.

11. Maintenir et développer un rôle d'expertise auprès de l'INSU pour la CSAA, les comités de suivi, les revues de projets
12. Favoriser l'émergence et la valorisation des technologies innovantes
13. Favoriser la recherche de cofinancements nationaux et européens pour de l'instrumentation et des positions doctorales ou postdoctorales

## 6.2 Liste des thèses

La table 1 ci-dessous présente la liste des thèses dans le domaine HRA. Elles sont présentées par institut. Un nombre important de thèses implique un co-encadrement (explicité 3e colonne) soit dans un autre institut présentant une forte activité HRA en France, soit avec d'autres instituts en France, dans les entreprises, ou à l'étranger. Ce nombre de co-encadrements est indicatif d'un fort niveau de collaborations en France et à l'étranger, et d'un caractère interdisciplinaire dans de nombreux cas. Pour permettre une visibilité et analyse des sujets abordés dans chaque institut, un même thèse présentant un co-encadrement dans deux instituts listés ci-dessous apparaît deux fois dans cette table (sauf dans le cas de l'ONERA, présentant beaucoup de co-encadrements avec le LAM qui ne sont pas dupliqués), mais cet effet est corrigé pour l'analyse de nombre de thèse présenté en section 2 et Fig. 1. Les dernières colonnes indiquent le thème du sujet ('O' pour optique adaptative, 'I' interférométrie, 'C' grand contraste, 'S' sciences de données, et 'A' dans le cas de lien fort en dehors des domaines précédents).

Table 1: Liste des thèses

Prénom	Nom	Co-tutelle	Titre	Soutenance	O	I	C	S	A
CRAL									
Laurence	Denneulin	ENS-Lyon LaHC	Imagerie polarimétrique astrophysique à très grand contraste	sept. 20				x	
Samuel	Thé		Détection et reconstruction de sources faibles en imagerie multi-spectrale à haut contraste	sept. 23			x	x	
Olivier	Flasseur	LaHC	Object detection and characterization from faint signals	nov. 19			x	x	
IPAG									
Faustine	Cantalloube	ONERA	Détection et caractérisation d'exoplanètes dans des images à grand contraste, par la résolution de problème inverse	sept-16			x	x	
Cyprien	Lanthermann	LIPHY	Mise en oeuvre de détecteurs à avalanche pour l'interférométrie astronomique en proche infra-rouge : Application à la multiplicité des étoiles massives	2019		x			
Guillaume	Bourdarot		Détection hétérodyne cohérente infrarouge pour l'étude des disques protoplanétaires	2021		x			
Marc-Antoine	Martinod	OCA	Développement et exploitation scientifique d'un nouvel instrument interférométrique visible en optique guidée	2018		x			
Mathieu	Coquand	Perpignan	Méthode de rétrovisée pour la caractérisation de surfaces optiques dans une installation solaire à concentration	mars-18					x
LAGRANGE									
Marc-Antoine	Martinod	IPAG	Développement et exploitation scientifique d'un nouvel instrument interférométrique visible en optique guidée	2018		x			
Pierre	Janin-Potiron	IPAG	Correction active des discontinuités pupillaires des télescopes à miroir segmenté pour l'imagerie haut contraste et la haute résolution angulaire	oct-17			x		
Eric	Cottalorda		Imagerie post-OA à court temps de pose	mars 22	x			x	
Alohotsy	Rafalimanana	IPAG	Prédiction de la turbulence atmosphérique pour l'optimisation des observations astronomiques et des liens optiques en espace libre	oct 22		x			
Romain	Laugier		Combining the powers of interferometry and coronagraphy.	oct 20			x		
Alban	Ceau	IPAG	Kernel: application et potentiels scientifiques de l'interférométrie pleine pupille	juin 20			x	x	
Mathilde	Beaulieu		Imagerie optique à très haut contraste: une approche instrumentale optimale	juin 17			x		
Gaetan	Della Vedova	IPAG	Imagerie et analyse hyperspectrale d'observations interférométriques d'environnements circumstellaires	sept 16		x		x	

Table 1: continued.

Prénom	Nom	Co-tutelle	Titre	Soutenance	O	I	C	S	A
Flavien	Blary		Caractérisation et modélisation de la turbulence optique en espace confiné	déc 15	x				x
Rakshit	Suwendu		Differential Interferometry of the Broad Line Region of Quasars	juil 15		x			
Hadjara	Massinissa		Observations et modélisations spectro-interférométriques longue base des étoiles et de leur environnement proche	juil 15		x			
Boskri	Abdelkarim	Marrakech	Etude d'un nouveau suiveur de franges pour l'interférométrie optique	dec. 19		x			
LAM									
Lucie	Leboulleux	ONERA, STSCI	Contrôle de front d'onde optimal pour l'imagerie à haut contraste - Application au cophasage de miroirs segmentés	dec-18			x	x	x
Christophe	Gaschet	CEA	Capteurs courbes : applications multi-disciplinaires	dec-18					x
Wilfried	Jahn		Aménagements de plans focaux - optiques freeforms et détecteurs courbes	dec-17					x
Romain	Alata	H2020	Instrumentation pour l'astronomie et métrologie à l'aide de MOEMS	nov-17					x
Anais	Bernard	ONERA	Development of new data reduction and analysis tools for Wide Field Adaptive Optics	oct-17	x			x	
Olivier	Fauvarque	ONERA	Optimization of Fourier based wave front sensors.	sept-17	x				
Clément	Escolle	ONERA	Space active Optics for observations at high resolution	dec-15	x				x
Cedric	Heritier	ONERA, ESO, INAF	New calibration schemes for AO ELT instruments	dec-19	x				
Anne-Laure	Cheffot	ESO	Alternative approach for cophasing of the ELT	avr-20	x				
Romain	Fetick	ONERA, DGA	Deconvolution and PSF models. Application to asteroids observations	dec-20	x			x	
Grégoire	Hein	Thales, PACA	Compact focal planes for earth and planet observations	dec-20					x
Sabri	Lemared	Thales-SESO	Grand miroirs allégés	dec-20					x
Mélanie	Roulet	ERC	Impression 3D de miroirs pour l'astronomie	dec-20					x
Mathieu	Vachey	Icarus							
Loic	Barbot	TAS-LAM	Spectro-imageur future génération pour l'observation de la terre et de l'espace	dec-20					x
Vincent	Chambouleyron		Senseur Stellaire et inertiel à haute précision pour la navigation maritime	dec-21					x
		PACA, ONERA	Optimisation d'analyseurs de front d'onde à filtrage de Fourier pour des systèmes d'OA à haute performance	dec-21	x				
Louis	Duveau	DGA, ONERA	Optique Freeform pour l'imagerie multi-spectrale	dec-21					x
Kelly	Joaquina	ERC	Capteurs courbes pour l'instrumentation Astrophysique	dec-21					x
Zibo	Ke	Icarus							
		ONERA, Chine	Analyseur de front d'onde optimal pour les étoiles	dec-21	x				
Iva	Laginja	ONERA, STSCI	Laser guide des Extremely Large Telescopes	dec-21					
			Cophasage de miroirs segmentés au sol et dans l'espace pour l'imagerie à haut contraste	dec-21				x	
LESIA									

Table 1: continued.

Prénom	Nom	Co-tutelle	Titre	Soutenance	O	I	C	S	A
Axel	Potier		Comparaison des techniques d'analyse de surface d'onde en plan focal dédiées aux missions spatiales d'imagerie directe et de spectroscopie des planètes extrasolaires	sept-20			x		
Arielle	Bertrou-Cantou		Validation des composants clefs de l'optique adaptative de première lumière de l'instruments MICADO pour l'ELT	sept-21	x				
Vincent	Deo		Démonstration d'une optique adaptative à très hauts ordres pour l'E-ELT	oct-19	x			x	
Nicolas	Doucet		Conception d'un module de supervision optimisé pour l'optique adaptative sur les ELT	oct-19	x			x	
Mathias	Nowak		Réalisation test et exploitation d'un Nanosat pour observer le transit de Beta Pictoris b en 17	juin-19		x			
Lisa	Bardou		Analyse de front d'onde sur étoile laser allongée pour l'optique adaptative de l'ELT	sept-18	x			x	
Florian	Moura Ferreira		Budget d'erreur en optique adaptative : Simulation numérique haute performance et modélisation dans la perspective des ELT	oct-18	x				
Clément	Perrot		Imagerie directe de systèmes planétaires avec SPHERE et prédiction des performances de MICADO sur l'E-ELT	oct-17			x		
Jacques-Robert	Delorme		Imagerie haute dynamique en larges bandes: coronagraphie et minimisation des tavelures en plan focal	sept-16			x		
Lucien	Gauchet		Haut contraste par réarrangement de pupille pour la détection d'exoplanètes	jan. 17		x			
Coira	Gustavo		Exploration du centre galactique avec GRAVITY	oct-20		x			
Boris	Trahin		Etalonnage de l'échelle des distances des Céphéïdes dans l'ère Gaia	sept-20		x			
ONERA									
Sebastien	Vivard		Development and validation of a focal plane wavefront sensor for multiple aperture systems	sep.17		x			
Kassem	Saab		Adaptive optics for free space optical communication	sep. 17	x	x			
Olivier	Herscovici-Schiller		Post-coronagraphic wavefront sensing and control for exoplanet imaging	oct-18			x	x	
Joel	Teixeira		Development of a new sensorless wavefront sensing approach for two photon microscopy: application to in vivo imaging of the hippocampus	oct-17	x			x	x
Remi	Juvenal	IDGS	Modeling and control for VLT and ELT adaptive optics: from performance assessment to on-sky validation	oct-17	x				
KL	Nguyen	OCA	Optical measurements of atmospheric turbulence profiles for next adaptive optics systems and the environment	dec-18	x			x	x
E	Salas	IDLV	Manipulation of the illumination of an Adaptive Optics Flood Illumination Ophthalmoscope for functional imaging of the retina in-vivo	2019	x			x	x
Pedro	Baracal	IDLV	4D exploration of the retina for Adaptive Optics-assisted Laser Photocoagulation	2018	x			x	x
Léonard	Prengere	IDGS	Commande à haute performance des systèmes d'optique adaptative pour les ELT	2020	x				

### 6.3 Liste des communiqués de presse

Table 2: Communiqués de presse dans le domaine HRA (avec implication française)

Date	Titre	Source	Instrument
20/05/2020	Le télescope de l'ESO observe les signes de la naissance d'une planète	ESO	SPHERE
16/04/2020	Première observation d'une étoile qui 'danse' autour d'un trou noir supermassif	CNRS/ESO	GRAVITY
14/02/2020	Les télescopes de l'ESO scrutent la baisse de luminosité de surface de l'étoile Bételgeuse	ESO	SPHERE
28/10/2019	Un télescope de l'ESO révèle l'existence de ce qui pourrait bien être la plus petite planète naine du Système Solaire	ESO	SPHERE
28/03/2019	L'instrument GRAVITY innove dans le domaine de l'imagerie exoplanétaire	CNRS/ESO	GRAVITY
14/03/2019	Le Grand Nuage de Magellan est à 1.53 milliard de milliards de kilomètres	CNRS	PIONIER
19/12/2018	HARMONI ouvre la voie pour l'exploitation scientifique de l'ELT	CNRS	HARMONI
12/12/2018	Danser avec l'ennemi	eso1840	SPHERE
01/12/2018	Du gaz au plus près du trou noir	Pour la Science	GRAVITY
01/12/2018	NAOMI voit sa première lumière	ESO UGA	NAOMI
29/11/2018	Une nouvelle balance pour peser les trous noirs super-massifs	CNRS	GRAVITY
27/11/2018	Gravity -France Culture La méthode scientifique	Radio France	GRAVITY
31/10/2018	Du gaz sur le point d'être englouti par un trou noir supermassif de la Voie Lactée	Sciences et Avenir	GRAVITY
31/10/2018	Les observations les plus détaillées de la matière orbitant à proximité d'un trou noir	CNRS/eso1835	GRAVITY
21/10/2018	Zoom inédit sur le gargantuesque trou noir central de notre Galaxie	Le Figaro	GRAVITY
20/09/2018	La relativité générale validée au centre de la Voie Lactée	La Science	GRAVITY
26/07/2018	Gravity confirme une des prédictions de la relativité générale d'Einstein : le rougissement gravitationnel	Sciences et Avenir	GRAVITY
26/07/2018	Premier test réussi de la théorie de la relativité d'Einstein à proximité d'un trou noir supermassif	eso1825	GRAVITY
02/07/2018	Première image confirmée d'une protoplanète acquise par le VLT de l'ESO	eso1821	SPHERE
11/04/2018	SPHERE révèle une formidable variété de disques autour de jeunes étoiles	eso1811	SPHERE
01/04/2018	Le cœur de notre Galaxie sous haute surveillance	La Recherche	GRAVITY
05/03/2018	Les avancées de l'instrument MATISSE installé au VLT, au Chili	CNRS/eso1808	MATISSE
20/12/2017	D'énormes bulles à la surface d'une étoile géante	CNRS/eso1741	PIONIER
04/12/2017	L'instrument SPHERE révèle les petits mondes rocheux et glacés de notre système solaire	CNRS	SPHERE
25/09/2017	L'instrument MATISSE fin prêt pour mieux comprendre la formation de la Terre et des planètes	CNRS	MATISSE
02/08/2017	Grâce à un nouveau dispositif, Muse devient un des instruments les plus puissants jamais construits pour l'astronomie au sol	CNRS	AOF/MUSE
06/07/2017	Première découverte d'une exoplanète pour Sphère	CNRS	SPHERE
05/12/2016	Une nouvelle technique de détection pour l'astronomie infrarouge	CNRS	R&D
09/11/2016	Sculpter des Systèmes Solaires	CNRS/eso1640	SPHERE
23/06/2016	GRAVITY observe avec succès les abords du trou noir de la Voie Lactée	CNRS/eso1622	GRAVITY
09/03/2016	L'image la plus détaillée à ce jour d'un disque de poussière autour d'une étoile vieillissante	CNRS	PIONIER
13/01/2016	Première lumière de GRAVITY : la future machine à étudier les trous noirs a été testée avec succès sur le VLTI	CNRS/eso1601	GRAVITY
08/10/2015	Découverte de mystérieuses ondulations au travers d'un disque de poussière	eso1538	SPHERE
30/09/2015	Première observation directe d'un tore de poussières	CNRS	SPHERE
10/06/2015	SPHERE dévoile les prémices de la formation d'une nébuleuse planétaire	eso1523	SPHERE

## 6.4 Liste des conférences internationales co-organisées par la communauté HRA

Table 3: Liste des conférences internationales co-organisées par la communauté HRA

Titre Conférence	Date & Lieu	Participants	Rôle ASHRA
SPIE Astronomical Telescopes	Juin 2018, Austin, USA	2000	Membres du SOC
SPIE Astronomical Telescopes	Juin 2016, Edinburgh, UK	2000	Membres du SOC
SPIE Astronomical Telescopes	Juin 2014, Montreal, Canada	2000	Membres du SOC
WFS Workshop1	Novembre 2016, Marseille	60	Chair et Initiateur
WFS Workshop2	Octobre 2017, Padoue, Italie	60	Co-Chair
WFS Workshop3	Octobre 2018, Paris	60	Chair
AO4ELT4	Octobre 2015, Lake Arrowhead, USA	250	Co-Chair et SOC
AO4ELT5	Juin 2017, Tenerife, Espagne	300	Co-Chair et SOC
AO4ELT6	Juin 2019, Quebec, Canada	300	Co-Chair et SOC
Spirit of Lyot	Juin 2015, Montreal, Canada	150	Membres du SOC
AO4ASTRO	Mars 2019, LAM , Marseille	60	Organisateur
Turbulence Profiling	Mars 2017, LAM, Marseille	30	Organisateur
AO Tomography	Mars 2016, Heidelberg, Allemagne	40	Co-Chair
LGSWFS for ELT	Décembre 2015, LAM, Marseille	20	Organisateur
Freeform days	Octobre 2017, Marseille	40	Organisateur
Atmospheric Parameter Characterization	Marseille	20	Organisateur
AO data processing	Mai 2015, Marseille	35	Organisateur
Tools for AO simulations	Avril 2015, Marseille	20	Organisateur
Journée Polissage	2015, Bordeaux	35	Co-organisateur
VLTI community days	janvier 2014, Grenoble	40	Organisateur
Journées scientifiques de l'ONERA	2016, Châtillon	30	Organisateur
Atelier ITHD	Mai 2016, Nice	25	Organisateur
Workshop Week 2018	Mars 2018, Durham, UK	110	Membres du SOC
Inverse problems: methods, applications and synergies	Janvier 2019, Chili		Membre du SOC
Journées en analyse et traitement d'images astronomiques	Janvier 2019, Strasbourg		Membre du SOC
HPC4Astro	2019, Singapour		Co-Chair
Optimal Optical Coronagraphs	2017, Pays-Bas		Membre du SOC
Adaptive Optics and Wavefront Control in Microscopy and Ophthalmology	2015, France		Membre du SOC

## 6.5 Liste des acronymes

Table 4: Liste des acronymes

Acronyme	
AGN	Active Galactic Nuclei
ALMA	Atacama Large Millimeter Array
AMBER	Astronomical Multi-BEam combineR (VLTI)
AO4ELT	Adaptive Optics for ELT
AOF	Adaptive Optics Facility
ARC	ALMA Regional Center
ASHRA	Action Spécifique Haute Résolution Angulaire
AT	Auxiliary Telescope (1,8-m)
BLR	Broad Line Region
CHARA	Center for High Angular Resolution Astronomy
CS	Conseil Scientifique
ELT	Extremely Large Telescope
ETP	Equivalent Temps Plein
FINITO	Fringe-tracking Instrument of Nice and TORino (VLTI)
FLUOR	Fiber Linked Unit for Optical Recombination (CHARA)
FRIEND	Fibered spectrally Resolved Interferometer - New Design
GAIA	voir <a href="http://www.cosmos.esa.int/gaia">http://www.cosmos.esa.int/gaia</a>
GPI	Gemini Planet Imager
GRAV4MAT	Senseur de frange Gravity for Matisse (VLTI)
GRAVITY	(VLTI)
HARMONI	High Angular Resolution Monolithic Optical and Near-infrared Integral field spectrograph (ELT)
HRA	Haute Résolution Angulaire
ITA	Ingénieur Technicien Administratif
ITHD	Imagerie à Très Haute Dynamique
IWA	Inner Working Angle
JMMC	Jean-Marie Mariotti Center
JWST	James Webb Space Telescope
LGS	Lager Guide Star
LTAO	Laser-Tomography Adaptive Optics
MAORY	Multi-conjugate Adaptive Optics RelaY (ELT)
MATISSE	Multi-purpose Advanced Tool for Instruments for the Solar System Exploration (VLTI)
MCAO	Multi-Conjugate Adaptive Optics
METIS	Mid-infrared E-ELT Imager and Spectrograph (ELT)
MICADO	Multi-adaptive optics Imaging CAmera for Deep Observations (ELT)
MIRC	Michigan InfraRed Combiner (CHARA)
MOAO	Multi-Object Adaptive Optics
MOIO	Méthodes et Outils pour l'Interférométrie Optique (JMMC)
MOSAIC	Multi-Object Spectrograph on the ELT (ELT)
MUSE	Multi Unit Spectroscopic Explorer (VLT)
NAOMI	New Adaptive Optics Module for Interferometry (VLTI)
NGS	Natural Guide Star
OA	Optique Adaptative
PIONIER	Precision Integrated-Optics Near-infrared Imaging ExpeRiment (VLTI)
PLATO	PLANetary Transit and Oscillations (mission ESA)
PN	Programme National
R&D	Recherche et Développement
RTC	Real-Time Computer
SCAO	Single Conjugated Adaptive Optics
SCEAO	Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics (Subaru)
SNO	Service National d'Observation
SOC	Scientific Organisation Comitee

Table 4: continued.

SPHERE	Spectro-Polarimetric High contrast imager for Exoplanets REsearch (VLT)
SPICA	Stellar Parameters and Images with a Cophased Array (CHARA)
SUV	Service aux Utilisateurs du VLTI (JMMC)
THEMIS	Télescope Héliographique pour l'Étude du Magnétisme et des Instabilités Solaires
TS	Traitement du Signal
UT	Unit Telescope (8-m)
VEGA	Visible spEctroGraph and polArimeter for the CHARA array (CHARA)
VLT	Very Large Telescope
VLTI	Very Large Telescope Interferometer
WFIRST	Wide Field Infrared Survey Telescope, maintenant renommé Nancy Grace Roman Space Telescope (NASA)
WHT	William Herschel Telescope
XAO	eXtreme Adaptive Optics