

Action Spécifique Haute Résolution Angulaire (ASHRA)



Mandat 2020 -2025

Bilan et Prospective

Le Conseil Scientifique :

Philippe BÉRIO¹, Yann CLÉNET², Élodie CHOQUET³ (présidente), Anne COSTILLE³, Sylvestre LACOUR², Lucie LEBoulleux⁴ (2024-2025), Jean-Baptiste LE BOUQUIN⁴, Frantz MARTINACHE¹ (Directeur), David MARY¹, Johan MAZOYER², Julien MILLI⁴ (2020-2024), Florentin MILLOUR¹, Benoit NEICHEL³, Jean-François SAUVAGE⁵, Ferréol SOULEZ⁶.

-
1. Laboratoire J-L Lagrange (Lagrange)
 2. Laboratoire d'Instrumentation et de Recherche en Astrophysique (LIRA)
 3. Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM)
 4. Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG)
 5. Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA)
 6. Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (CRAL)

Table des matières

1	Introduction : La recherche en HRA en France	5
1.1	Bref historique	5
1.2	Présentation de la communauté	7
1.3	Thématiques de recherche	10
1.4	Méthodologies et plateformes de Recherche	11
1.5	Une communauté au service des projets	13
1.6	Les liens avec les thématiques A&A et hors-A&A	18
2	L'Action Spécifique HRA	23
2.1	L'ASHRA : Un organisme qui fédère une communauté cohérente	23
2.2	Mandat 2020-2025 : Lettre de mission	24
2.3	Mandat 2020-2025 : Bilan des actions du CS	24
2.3.1	Animation de la communauté HRA	24
2.3.2	Soutien à la recherche instrumentale HRA	26
2.3.3	Expertise pour l'INSU	28
2.3.4	Recherche et obtention de financements structurants	29
2.4	Contexte programmatique des 5 prochaines années	31
2.4.1	Accompagner la mise sur ciel des premiers instruments ELT	31
2.4.2	Coordonner les activités pour l'instrument PCS	31
2.4.3	Soutenir l'émergence de nouvelles technologies en interférométrie	32
2.4.4	Coordonner les activités pour les missions spatiales HWO et LIFE	34
2.4.5	Organiser la réflexion pour le prochain observatoire ESO	35
3	Bilan 2020-2025 de la communauté HRA	37
3.1	Bilan des recrutements en HRA	37
3.2	Bilan des thèses soutenues et des brevets en HRA	39
3.3	Bilan des grands résultats marquants et prix en HRA	40
3.4	Bilan des grands financements obtenus en HRA	43
4	Prospective post-2025 en HRA	45
4.1	Thématique : Optique Adaptative	45
4.1.1	Contexte de la thématique	45
4.1.2	Question 1 : Quels défis à relever pour l'OA sur les ELT ?	46
4.1.3	Question 2 : Comment étendre les cas d'utilisation de l'OA ?	47
4.2	Thématique : Imagerie à Haut Contraste	48
4.2.1	Contexte de la thématique	48
4.2.2	Question 3 : Comment optimiser les futurs imageurs d'exoTerres ?	48
4.3	Thématique : Interférométrie	51
4.3.1	Contexte de la thématique	51
4.3.2	Question 4 : Vers une interférométrie optique sur des bases kilométriques ?	51
4.3.3	Question 5 : Quelles technologies pour optimiser l'interférométrie à haute sensibilité ?	52
4.3.4	Question 6 : Comment étendre au mieux l'interférométrie à de nouvelles bandes spectrales ?	54

4.4	Thématique : Science des données	56
4.4.1	Question 7 : Quel gains et méthodes explorer avec l'IA en HRA ?	56
4.5	La R&D ASHRA au delà de l'astrophysique	59
4.5.1	Les apports de l'ASHRA en dehors du domaine AA	59
4.5.2	Les apports d'autres champs d'application	59
4.5.3	Pertinence de la démarche HRA dans le contexte environnemental	59
4.5.4	Formation à destination au delà du cercle académique!	60
5	Conclusion et recommandations	61
5.1	Analyse SWOT de l'ASHRA	61
5.2	Les recommandations pour le prochain mandat	63
5.2.1	Conclusion	65
	Appendices	67
A	Lettre de mission ASHRA 2020-2025	69
B	Liste des thèses soutenues en HRA pendant le mandat	73
C	Résultats marquants de la communauté HRA	83
	Bibliographie	91

Executive Summary

L'ASHRA est une force du paysage astrophysique français qui existe depuis plus de 25 ans (voir Sec. 1.1) pour animer, soutenir et piloter les activités en astronomie à haute résolution angulaire (HRA), internationalement reconnue comme un domaine d'excellence de la France. Cette structure est au service d'une communauté importante de plus de 200 personnels (voir Sec. 1.2), répartis sur 9 laboratoires de recherche, qui dédient une part majoritaire de leur temps de recherche, de service d'observation et/ou d'enseignement à la thématique de la HRA. Ces activités sont aujourd'hui structurées autour de quatre grandes thématiques (voir Sec. 1.3) : optique adaptative, interférométrie optique, imagerie à très haute dynamique et traitement du signal. La HRA est avant tout un sujet de recherche à part entière (voir Sec. 1.4), avec des moyens et méthodes qui lui sont propres et qui contribue en moyenne à la production d'une quinzaine de thèses de doctorat par an. La communauté HRA est extrêmement visible dans le domaine AA pour ses nombreuses contributions instrumentales, notamment dans la série des instruments de première lumière de l'ELT, à la fois dans des missions de type SNO (voir Sec. 1.5) ainsi que dans des postes de leadership (voir Table. 1.1). La nature transverse de la HRA et la maturité des infrastructures qui en bénéficient lui confère des liens de plus en plus forts avec les thématiques astrophysiques (voir Sec. 1.3) : l'étude des petits corps du système Solaire, l'observation des étoiles du voisinage Solaire et des régions de formation stellaire, le centre Galactique et de plus en plus, la physique extragalactique.

L'ASHRA fédère une communauté très structurée, partageant malgré des applications distinctes, un langage et des outils méthodologiques qui confèrent une forte cohérence globale. Le mandat 2020-2025 (voir Sec. 2.3.4) aura été marqué par plusieurs actions d'animation scientifique et de coordination : la création d'une liste de diffusion nationale ashra-france@groupe.renater.fr, la mise en place d'un nouveau site internet <https://ashra-insu.fr>, le soutien à une quinzaine d'ateliers thématiques, des actions promotion de son activité dans des formations en optique, et l'arbitrage annuel d'un budget (voir Sec. 2.3.2) qui favorise l'émergence de nouveaux concepts instrumentaux. L'ASHRA remplit également une mission récurrente de conseil et d'expertise au service de l'INSU (voir Sec. 2.3.3) : les comités de suivi des projets instrumentaux communautaires (instruments VLT, VLTI et ELT), la revue critique de demandes pertinentes soumises à la CSAA. Les membres de la communauté HRA française jouent également un rôle essentiel dans la recherche et l'administration de financements d'envergure, tel l'Equipex+ F-CELT, le PEPR Origins et la réponse EXOSHARE à l'appel d'offre INFRA-TECH de la commission Européenne. La communauté HRA fait face à un contexte programmatique (voir Sec. 2.4.5) incroyablement riche. Avec une première lumière prévue avant la fin du prochain mandat, l'ASHRA va continuer d'accompagner la mise sur le ciel des instruments de première lumière de l'ELT, continuer à suivre les activités préparatoires au lancement de l'instrument ELT/PCS de seconde génération, soutenir un effort de réflexion prospective pour l'interférométrie optique à l'aube de l'ère post-ELT et coordonner les activités préparatoires aux missions spatiales stratégiques HWO et LIFE.

Sur les 5 dernières années, notre communauté a réussi à recruter (voir Sec. 3.1) 4 chercheurs · se · s en Section 17, un astronome adjoint et un chargé de recherche en CID 55. Si on remarque avec satisfaction qu'un équilibre paritaire a été atteint dans cette vague de recrutements, on s'inquiète de constater l'absence de recrutement CNAP en soutien aux nombreux projets instrumentaux en cours, ce qui nuit en particulier aux thématiques de l'optique adaptative et de l'interférométrie optique. La communauté est particulièrement active : un total de 91 thèses en lien avec la HRA (voir Sec. 3.2) ont en effet été soutenues entre 2020 et 2024, 7 brevets ont été déposés (voir Table 3.2), 26 prix (voir Table 3.3) et distinctions reçues et pas moins de 46 financements (voir Table 3.4) décrochés par des membres de la communauté HRA.

Le challenge du prochain mandat pour la thématique de l'optique adaptative reste celui de l'ELT, dont l'architecture complexe (miroir segmenté, pupille fragmentée, dimensions inédites) rend les performances effectives encore incertaines : risques de petalling, de turbulence auto-générée, d'inadaptation des solutions actuelles d'analyse de surface d'onde, et risques induits par le partage de la responsabilité de correction entre le télescope et les instruments via le M4 du télescope. Pour l'instrument PCS encore à l'état de design, la capacité à faire de la XAO dépend de la disponibilité de moyens d'actuation, de mesure et de calcul bien plus grands que l'état de l'art ne le permet aujourd'hui. Les développements en optique adaptative du domaine contribuent à d'autres applications : dans le domaine des télécommunications optiques et de la défense.

Pour l'imagerie à très haute dynamique (voir Sec. 4.2), qui a maintenant bien fait ses preuves depuis le sol avec SPHERE et l'espace avec JWST, la question est de déterminer les améliorations à apporter pour permettre la détection directe prochaine d'exo-Terres (voir Sec. 4.2.2), et la caractérisation spectrale de leurs atmosphères, qui sont encore plusieurs ordres de grandeur au delà de ce que permet l'état de l'art. Le lancement à venir du coronographe embarqué dans le Roman Space Telescope, la concrétisation de l'upgrade SAXO+ de SPHERE et les instruments de première lumière de l'ELT permettront d'informer les orientations techniques qui seront nécessaires au succès de l'instrument ELT/PCS au sol ainsi qu'au projet de futur grand observatoire spatial HWO. Il faudra également veiller à la bonne intégration de toutes les briques de la chaîne en favorisant une approche système (voir Sec. 4.2.2).

L'interférométrie optique (voir Sec. 4.3) voit ses infrastructures principales du VLTI et de CHARA atteindre un niveau avancé de maturité et de fiabilité avec de l'optique adaptative et du suivi de franges permettant la recombinaison de 4 ou 6 télescopes. Loin de se conforter dans cette situation, il est temps de se poser la question des chantiers à mettre en oeuvre pour aller vers une interférométrie optique avec des bases kilométriques (voir Sec. 4.3.2). Indépendamment, il faut également examiner les pistes qui permettront de repousser la limite de sensibilité des observations - en terme de magnitude limite ainsi qu'en terme de contraste atteignable dans les observations (voir Sec. 4.3.3) ; ainsi que les pistes qui permettront d'ouvrir l'accès à de nouvelles bandes spectrales (voir Sec. 4.3.4).

Les experts HRA de la science des données se préparent au raz de marée sociétal de l'IA et des conséquences de son acceptation en tant qu'outil au service de nos problématiques (voir Sec. 4.4). Si on peut assez facilement pointer vers plusieurs aspects émergents : le problème de fusion des données multi-modales et le cas de l'IA aidée par la physique, la question de l'enseignement de l'IA en master et la question de l'IA de confiance, notre analyse est beaucoup plus nuancée que ce que les annonces grand public des progrès des outils d'IA générative suggèrent. L'adoption généralisée d'outils IA intégrés sous forme de toolboxes sans prise de recul nous confronte à des risques potentiels éthiques et méthodologiques importants qui méritent d'être suivis plus attentivement.

Une analyse des forces et faiblesses (voir Sec. 5.1) caractérisant notre communauté et notre thématique, croisées avec les menaces et opportunités que l'on anticipe aujourd'hui permettent d'identifier plusieurs recommandations (voir Sec. 5.2) pour le prochain mandat. Un message clé mérite d'être rappelé : La R&D instrumentale menée en HRA reste comme un sujet de recherche à part entière, et relève de la "science", au même titre que les thématiques astrophysiques auxquelles elle contribue. La R&D ressort renforcée de l'exercice de prospective INSU/AA : cette réalité doit être communiquée dans les labos pour encourager la sanctuarisation d'un temps dédié au près des personnels impliqués dans les projets. Face au contexte programmatique très riche qui se profile, il va falloir lancer un exercice de feuille de route communautaire sur plusieurs sujets stratégiques : l'instrumentation haut contraste sur l'ELT et spatiale, ainsi que la question du post-VLTI.

Chapitre 1

Introduction : La recherche en HRA en France

1.1 Bref historique

Les grandes découvertes astrophysiques sont presque toujours rendues possibles par l'arrivée de nouveaux instruments et observatoires qui marquent une rupture technologique majeure par rapport aux générations précédentes. Ces avancées permettent d'explorer des objets ou des phénomènes jusqu'alors inobservables. L'histoire de l'astronomie en est jalonnée d'exemples, depuis la découverte des lunes de Jupiter et des cratères lunaires grâce à la lunette de Galilée il y a plus de 400 ans, celle de l'astronomie infrarouge par Herschel 200 ans plus tard, jusqu'à celle de la première exoplanète autour d'une étoile, révélée par Mayor et Queloz en 1995 (prix Nobel 2019) grâce aux efforts soutenus d'amélioration de la stabilité des spectrographes à corrélation croisée, ou encore la confirmation de la présence d'un trou noir central dans notre Galaxie avec l'avènement de l'optique adaptative et l'interférométrie sensible (prix Nobel 2020). La recherche de pointe en astrophysique ne se limite donc pas à des programmes d'observation ambitieux : elle repose également sur une quête permanente d'innovations technologiques et méthodologiques, visant à repousser sans cesse les limites de nos capacités d'observation.

Une limitation clairement décrite dès le début du XVIII^{ème} siècle par Newton concerne la détérioration de la qualité des images induite par l'atmosphère Terrestre et la topographie locale du site d'observation. Indépendamment de sa taille réelle, la résolution angulaire effective d'un observatoire est en effet équivalente à celle d'un télescope d'environ 10 cm de diamètre dans le visible. Le remède proposé par Newton lui même est de rechercher "l'air le plus calme et serein tel qu'on peut en faire l'expérience aux sommets de plus hautes montagnes et au dessus des nuages", une consolation qui a guidé l'astrophysique observationnelle depuis plus de 250 ans. Si on continue aujourd'hui de placer les observatoires dans des lieux adaptés (y compris en orbite autour de la Terre), il a fallu depuis déployer tout un arsenal de mesures de correction active qui ramènent la qualité d'image à la limite théorique, imposée par la diffraction.

Atteindre ou approcher cette limite, par la maîtrise du front d'onde tout au long de sa propagation dans l'instrument, est un enjeu stratégique majeur. Il se traduit non seulement par un gain en résolution angulaire, mais a également un impact majeur sur les limites de détection des instruments. La combinaison d'une surface collectrice accrue, proportionnelle au carré de la taille de l'ouverture (D^2) et la maintenance d'une fonction d'étalement de point (PSF) dont la taille est dominée par la diffraction (λ/D) se traduit par une sensibilité qui croît proportionnellement à D^4 . L'enjeu est donc d'autant plus critique que l'observatoire est de grande taille.

Bien que des travaux fondateurs pour l'astronomie à haute résolution angulaire se soient développés dès les années 1960 en France notamment (optique atmosphérique, interférométrie de tavelures, interférométrie longue base), le besoin de structurer et coordonner, à l'échelle nationale, les activités de développement technologique dans ce domaine a émergé au début des années 1990. Cette dynamique a été impulsée par la naissance du projet européen du Very Large Telescope (VLT), constitué de télescopes de

8 mètres de diamètre, et par la volonté visionnaire de les combiner de manière cohérente pour multiplier leur pouvoir de résolution via l'interférométrie à longue base, donnant ainsi naissance au VLTI. Ce besoin s'est concrétisé, au sein de l'INSU, par la création en 1993 du **Programme National Astronomie à Haute Résolution Angulaire** (PN AHRA), sous l'impulsion et la présidence de Pierre Léna. Cette coordination nationale a joué un rôle fondamental pour faire passer les premiers prototypes d'optique adaptative à des systèmes opérationnels, capables de fonctionner sur des pupilles de 8 mètres, et pour soutenir l'émergence des premiers concepts de recombinaison interférométrique.

Après la première lumière du premier *Unit Telescope* du VLT, le PN AHRA a évolué en 1999 pour devenir l'**Action Spécifique Haute Résolution Angulaire** (ASHRA), avec pour mission de poursuivre la coordination et le soutien aux technologies innovantes et aux activités de R&D rendues possibles par ces nouvelles infrastructures. Créée avec un mandat initial de cinq ans, l'ASHRA a été systématiquement renouvelée depuis, témoignant du besoin constant de structuration, d'animation et d'accompagnement de cette recherche instrumentale. Son évolution a été marquée et enrichie par l'émergence de nouvelles thématiques de recherche, notamment l'imagerie à très haute dynamique à partir des années 2000, puis le traitement avancé du signal dans les années 2010, en grande partie motivées par les défis techniques liés à l'observation directe des exoplanètes.

Ce rôle de coordination de l'ASHRA s'est révélé crucial pour transformer des innovations technologiques en instruments opérationnels, parmi lesquels on peut citer NACO, VINCI, AMBER, SPHERE, PIONIER, MATISSE ou encore GRAVITY sur à l'ESO/Paranal. La riche expertise instrumentale de la communauté française en haute résolution angulaire, ainsi que le succès de ces réalisations majeures, ont également permis une reconnaissance internationale importante, facilitant la participation à de grands projets internationaux tels que CHARA, JWST ou le Roman Space Telescope. La coordination de ces efforts demeure aujourd'hui tout aussi essentielle, à l'aube de la mise en service de l'Extremely Large Telescope (ELT) pour lequel les équipes françaises sont à pied d'œuvre dans la réalisation des optiques adaptatives et des instruments HRA, et alors que les prochains télescopes spatiaux (HWO, LIFE) intégreront des technologies à haute résolution angulaire sur lesquelles la communauté HRA française s'est illustrée. Notre implication dans ces projets, qui domineront la scène astrophysique mondiale des prochaines décennies, sera une contribution majeure aux découvertes astrophysiques permises par ces moyens.

1.2 Présentation de la communauté

La “communauté HRA”, que l’ASHRA a vocation à animer, est constituée des personnes intéressées par les activités de recherche et par les développements instrumentaux visant la résolution angulaire ultime des télescopes utilisés en astronomie, au sens large. Comme on le verra plus bas, le cœur de cette communauté est constitué de chercheurs et chercheuses dédiées et dédiés à la recherche instrumentale, mais elle inclut également des ingénieurs, des observateurs, ainsi que des chercheurs en dehors du domaine de l’astronomie. Le fil rouge qui rassemble ces profils variés est son intérêt pour les instruments et technologies à la pointe de la résolution angulaire, tant en tant que développeurs qu’utilisateurs.

Méthodologie – Le recensement de la communauté HRA est effectué chaque année par l’ASHRA au moyen de son appel d’offre. Il se fait sur la base des personnels identifiés en interne par chaque laboratoire concerné par des activités en HRA. Ce recensement est utilisé par l’ASHRA pour maintenir à jour la liste de diffusion ashra-france@groupe.renater.fr, qui sert à transmettre des informations à la communauté HRA. Étant assemblé à partir des informations partagées individuellement par chaque laboratoire, ce recensement peut présenter des disparités de traitement, certains laboratoires incluant plus facilement des profils “observateurs / utilisateurs de HRA”, ou des profils ingénieurs, que d’autres laboratoires. Afin de cerner finement les activités de cette communauté, un sondage a été réalisé en 2025 via la liste de diffusion ashra-france, qui a obtenu 75 réponses (35% de la communauté). La participation par laboratoire et par genre au sondage est fidèle aux proportions de la communauté. Les titulaires-recherche sont par contre sur-représentés (+17% par rapport au recensement), et les ingénieurs et ingénieurs titulaire sous-représentés (−11%). Certains résultats sont indiqués dans cette section.

Poids de la communauté – En l’an 2025, la communauté HRA est constituée de **214 personnes**. Ce recensement peut varier d’une année sur l’autre de ± 25 personnes (12%), du fait majoritairement de la balance entre les thèses se concluant et celles commençant (ex. +22 personnes en 2023, −27 personnes en 2024). Il s’agit ainsi d’une communauté importante au sein de l’Astrophysique française, comparable à celles des Actions Thématiques. Toutes ces personnes ne consacrent pas l’ensemble de leurs activités à la HRA, que ce soit du fait de missions d’enseignement, de SNO, ou de recherche transverses entre différents domaines de l’astrophysique. Selon le sondage, les personnels HRA dédient en moyenne 74% de leur temps à des activités purement HRA, les personnes en CDD étant généralement dédiées à ces activités (pour 95% de leur temps), et les personnes titulaires y consacrant en moyenne 67% de leur temps.

Laboratoires impliqués – La communauté HRA se répartit sur **9 laboratoires de recherche**. Les quatre laboratoires les plus représentatifs (> 10% de la communauté HRA) sont : le Laboratoire Lagrange, le LIRA, le LAM, et l’IPAG, qui regroupent ensemble près de 80% de la communauté. À ceux-ci s’ajoutent les représentations notables de l’ONERA (21 membres du Département Optique et Techniques Associées) et du CRAL (15 personnes de l’équipe AIRI). Enfin, on note également une petite représentation de trois autres laboratoires non-INSU (CEA-AIM, Laboratoire Charles Fabry (LCF), Laboratoire XLIM) avec 3-4 personnes. Parmi ces 214 personnes, 5 doctorants et 1 post-doctorant sont affiliés à deux laboratoires (3 personnes ONERA-LAM, 2 personnes Lagrange-LIRA, 1 personne ONERA-LIRA).

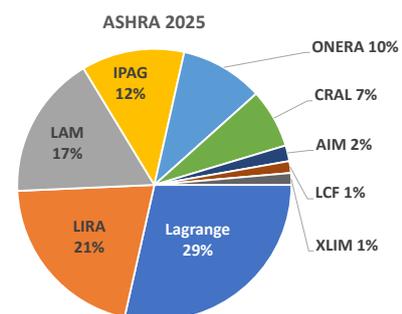


FIGURE 1.1 – Répartition de la communauté HRA par laboratoire en 2025 (214 personnes)

Analyse par type de poste – Cette communauté est constituée majoritairement de personnels de recherche titulaires (postes CNRS section 17, CNAP, CNU 34, 100 personnes). À ces personnes s’ajoutent 37 personnels ingénieurs permanents, un chiffre potentiellement sous-estimé par la méthode de recensement. Les personnels sous contrats (doctorants, postdocs, ingénieurs CCD) représentent 36% de

la communauté HRA. La répartition de la communauté HRA par type de poste est illustrée en Fig. 1.2. La ventilation par laboratoire des postes titulaires et non-titulaires est présentée en figure 1.3, avec à gauche tous les personnels confondus (recherche et ingénierie), et à droite un focus sur les personnels de *recherche* uniquement. La participation du CRAL, du LIRA, et du LAM dans les activités d'intégration des instruments SPHERE+, MICADO, et HARMONI entraîne une forte représentations de personnels non-titulaires dans ces équipes (> 40%). Spécifiquement pour la recherche, la communauté HRA a un vivier de 71 jeunes chercheurs et chercheuses, bien répartis sur les principaux laboratoires. Le taux d'encadrement moyen (LCF, AIM, et XLIM exclus) est de un étudiant ou une étudiante pour deux titulaires de recherche, une proportion très responsable.

Analyse par genre – En ce qui concerne la répartition par genre, la communauté HRA est composée à 25% de femmes et 75% d'hommes. La proportion de femmes est plus élevée chez les jeunes non-titulaires (35%) que chez les titulaires (20%), comme illustré en Fig. 1.4. Cette proportion est encourageante pour espérer un rééquilibrage sur le long terme, à condition que des efforts constants soient faits pour soutenir les jeunes femmes tout au long de leur carrière avec des opportunités de poste permanents. La proportion de femmes parmi les non-titulaires reste malgré tout assez loin de la parité, ce qui pointe des efforts à faire pour promouvoir la filière instrumentale auprès des jeunes femmes dans les universités et écoles d'ingénieurs, voire bien avant, la fraction de femmes dans ces dernières étant **aussi faible**. La ventilation par laboratoire (tous personnels confondus à gauche, et pour les titulaires uniquement à droite) est indiqué en Fig. 1.5.

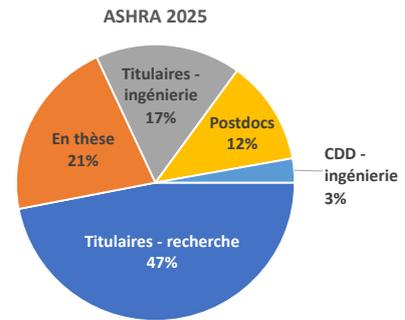


FIGURE 1.2 – Répartition de la communauté HRA par type de poste (214 personnes).

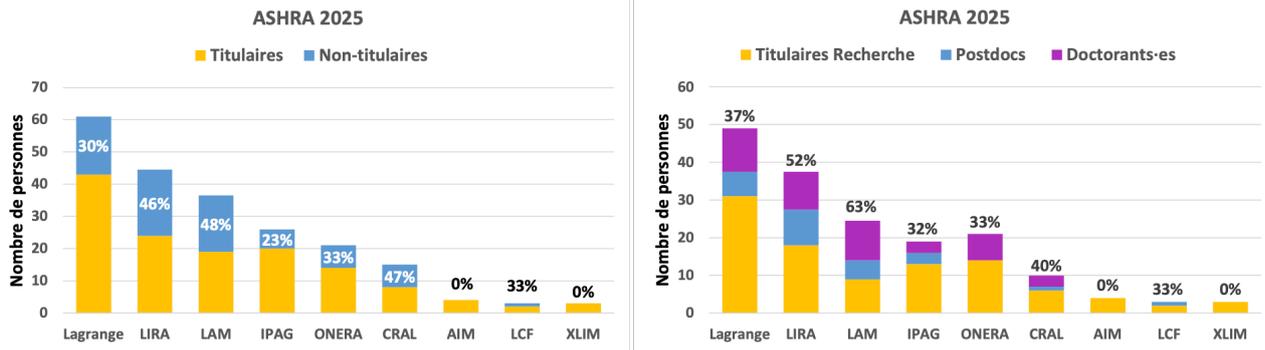


FIGURE 1.3 – Ventilation par laboratoire des personnels titulaires et non titulaires, indicatif du taux d’encadrement. Le pourcentage affiché indique la proportion de personnel non-titulaire parmi tous le personnel HRA du laboratoire. Gauche : personnels de recherche et ingénieurs confondus. Droite : personnels de recherche uniquement.

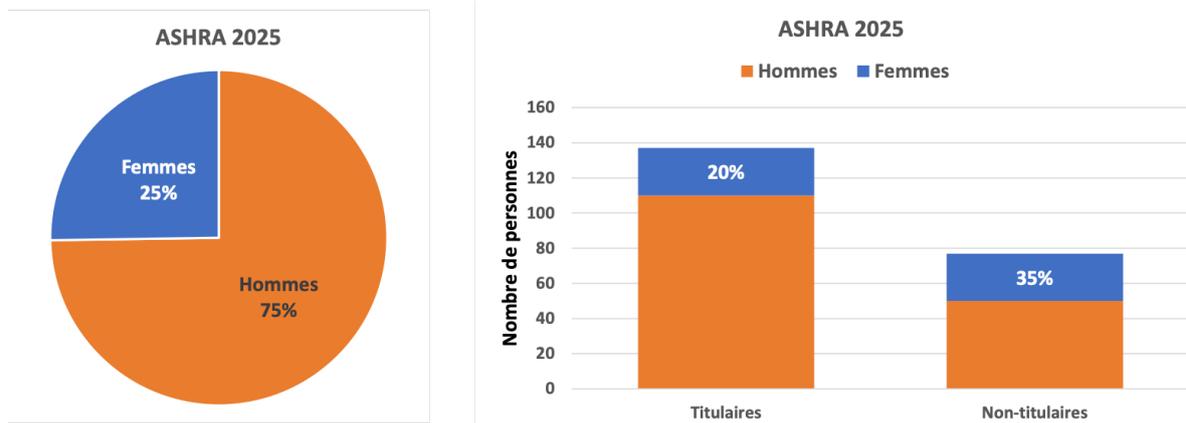


FIGURE 1.4 – Gauche : Répartition de la communauté HRA par genre. Droite : Répartition des genres parmi les titulaires et les non-titulaires (recherche et ingénierie confondus).

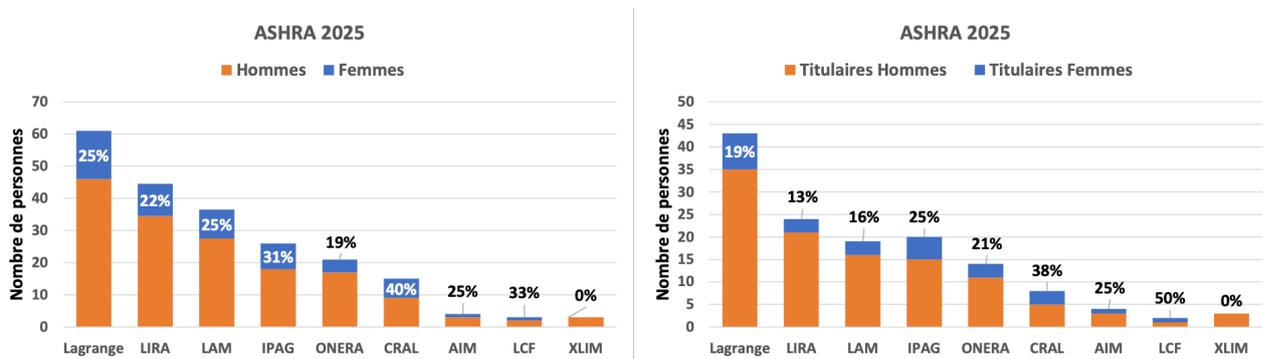


FIGURE 1.5 – Ventilation par laboratoire des personnels hommes et femmes de la communauté ASHRA. Le pourcentage affiché indique la proportion de femmes. Gauche : tous personnels confondus. Droite : personnels titulaires uniquement.

1.3 Thématiques de recherche

Les activités de recherche et de développement en HRA s'articulent aujourd'hui autour de 4 grandes thématiques, qui sont apparues et se sont enrichies avec l'évolution de la discipline au fil des années : l'**optique adaptative**, l'**interférométrie optique**, l'**imagerie à très haute dynamique**, et le **traitement du signal**.

Historiquement, la démarche HRA est née dans les années 1960 de travaux fondateurs sur l'optique atmosphérique. Cette description quantitative de l'impact de l'atmosphère sur la formation des images a rapidement donné naissance à deux chantiers initialement distincts mais aux frontières aujourd'hui très poreuses : l'optique adaptative (OA), une approche qui permet de recouvrer la résolution théorique d'un télescope optique, et l'interférométrie optique, ouvrant l'accès à une résolution angulaire potentiellement sans limite $\approx \lambda/B$ où B est la distance séparant deux ouvertures. L'histoire de ces deux approches, très riche, ne peut pas être résumée simplement ici. Le lecteur et la lectrice intéressés pourront se référer aux ouvrages de Pierre Léna ([Une histoire de flou](#)) et de Daniel Bonneau ([Mieux voir les étoiles](#)).

La mise en service par l'ESO de grands moyens d'observation : le VLT, le VLTI et le chantier actuel de l'ELT, ont canalisé une grande partie de la puissance créatrice d'une communauté particulièrement motivée. La démarche HRA a manifestement porté ses fruits. De sujet de curiosité pour experts, la maîtrise du front d'onde est devenue un élément dimensionnant d'une grande variété d'instruments astrophysiques (e.g. : SPHERE, ERIS, BlueMuse, ...) et est aujourd'hui un élément dimensionnant des observatoires eux mêmes, avec un miroir adaptatif M4 faisant par exemple partie intégrante de la prescription optique de l'ELT. L'interférométrie optique, disposant depuis quelques années d'un suivi de franges de haute qualité ainsi que d'optique adaptative sur chaque télescope, est en train de s'ouvrir à l'observation de sources intrinsèquement faibles, telles les planètes extrasolaires et les sources extragalactiques.

Ce succès général de la maîtrise du front d'onde a conduit à l'émergence d'une thématique à part entière : l'imagerie à très haute dynamique (ITHD), également appelée imagerie à haut contraste, visant à exploiter la technique maintenant centenaire de la coronagraphie Solaire, à l'observation des étoiles lointaines. Ce mode d'observation, désormais troisième grand domaine de la HRA, est aujourd'hui valorisé sur de nombreux grands observatoires et est au coeur de nouveaux grands projets structurants au sol avec par exemple l'upgrade SAXO+ de SPHERE et le projet d'instrument ELT/PCS, et dans l'espace avec l'instrument CGI du Roman Space Telescope, du futur grand observatoire HWO, et de l'interféromètre annulant LIFE.

Le succès de la démarche active de contrôle temps réel optimal et de la bonne exploitation des données produites par ces observatoires innovants dépend fortement de techniques du signal idoines, qui se sont imposées au fil des 15 dernières années, comme le quatrième pilier thématique de la recherche en HRA.

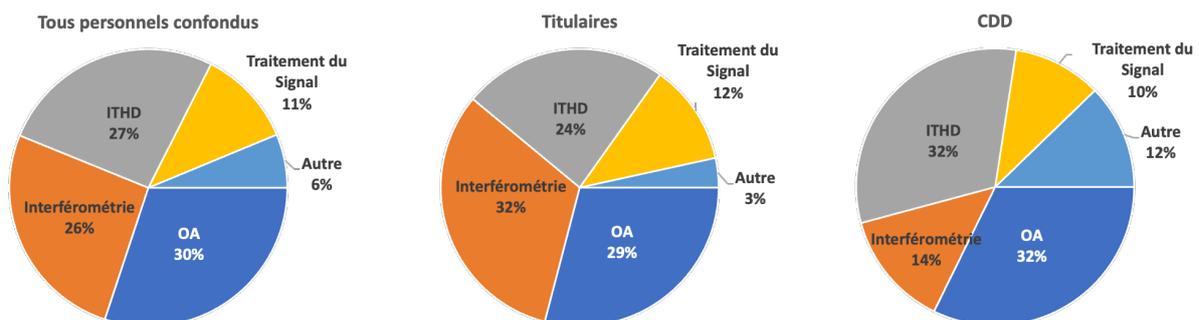


FIGURE 1.6 – Répartitions des thématiques de travail de la communauté HRA. Gauche : tous personnels confondus ; Centre : répartition parmi les titulaires ; Droite : répartition parmi les CDD.

Les activités de la communauté HRA¹ se répartissent assez équitablement entre ces 4 thématiques, avec globalement 30% de son temps dédié à l’optique adaptative, 27% à l’imagerie à très haute dynamique, 26% à l’interférométrie, et 11% au traitement du signal (voir Fig. 1.6, gauche). Cette dernière sous-représentation tient probablement de l’émergence assez récente de cette thématique dans notre discipline, et de son caractère transverse au-delà de la HRA. On note une disparité importante entre les titulaires et les personnels CDD sur deux thématiques : l’interférométrie, où les titulaires sont sur-représentés (+6%, Fig. 1.6, centre), et l’imagerie très haute dynamique, où les CDD sont sur-représentés (+5%, Fig. 1.6, droite). Ces écarts s’expliquent par deux phases de développement différentes sur ces deux thématiques :

- Les activités actuelles en interférométrie optique sont dominées par la finalisation de projets instrumentaux (GRAVITY+, MATISSE) et d’exploitation d’instruments existant, entraînant peu de R&D amont sur de nouveaux concepts, et donc relativement peu de thèses en cours. Le renouvellement de ces activités est l’un des enjeux des 5 prochaines années souligné en Sec. 2.4.5.
- À l’inverse, les activités de recherche en imagerie haut contraste sont dynamisées par les perspectives long-terme de nouveaux instruments (PCS, HWO) qui demandent des développements technologiques amonts importants, générant ainsi un plus grand nombre de thèses.

Il faut cependant souligner que les personnels de la communauté HRA, en particulier les titulaires, sont particulièrement polyvalents et s’intéressent facilement à plusieurs thématiques : seuls 18% d’entre elles et eux ne dédient leurs activités qu’à une seule thématique HRA. Cette observation témoigne aussi de la porosité entre les différentes applications de la HRA, caractérisées par la mise en oeuvre d’approches méthodologiques communes pour répondre au défi partagé de la maîtrise du front d’onde.

1.4 Méthodologies et plateformes de Recherche

Les activités de *recherche en instrumentation* sont à distinguer clairement des activités de *développements instrumentaux* dans la communauté HRA.

- La recherche instrumentale consiste comprendre les phénomènes physiques et optiques qui limitent ou améliorent la performance en résolution angulaire, puis à sourcer et concevoir des nouvelles technologies ou de nouvelles méthodologies, à les expérimenter pour en comprendre l’intérêt et les limites, et à les mûrir par un processus de R&D en vue de les utiliser pour des applications astrophysiques. C’est un thème de recherche à part entière, avec ses tâtonnements et ses découvertes. Il se produit en moyenne **15 thèses par an** en France sur des sujets de recherche en instrumentation HRA (voir Sec. 3.2).
- Les développements instrumentaux, quant à eux, consistent en la conception et la fabrication de nouveaux instruments pour les grands télescopes et observatoires, motivés par des programmes astrophysiques. La participation de notre communauté dans les projets instrumentaux, indépendamment de ses activités de recherche, est décrite dans la section suivante (Sec. 1.5).

La recherche instrumentale est un processus qui se développe sur le temps long. Il nécessite en général entre 6 et 10 ans de travaux entre l’émergence d’un nouveau concept technologique ou méthodologique et son éventuelle intégration dans un projet d’instrument. La communauté HRA a développé un **processus de maturation** maintenant bien rôdé pour développer de façon efficace de nouveaux concepts. Il s’appuie sur un ensemble de moyens de **plateformes de maturation**, qui sont décrites ci-dessous.

Processus de maturation — De même que les projets de recherche observationnels suivent un processus établi (développement théorique, simulations numériques, observations, analyse et interprétation), la recherche instrumentale est aussi jalonnée par des étapes clés de développement.

1. **Étude conceptuelle** : L’identification d’un nouveau concept, qu’il s’agisse d’une nouvelle technologie de composants ou d’une nouvelle méthode algorithmique, commence par une phase de *simulations numériques* permettant d’en estimer d’une part le gain instrumental, et d’autre part l’intérêt astrophysique. Le niveau de détail de ces simulations peut varier d’une simple étude dimensionnante de composants à des simulations bout-à-bout d’un système complexe entier sur un cas scientifique.

1. Source : sondage 2025 à la communauté HRA, voir Sec.1.2.

2. **Prototypage en laboratoire** : Une fois le concept et son intérêt démontré, un prototype ou une démonstration *en laboratoire* est généralement organisée. Pour cette phase également, le niveau de détail d'expérimentation et de qualification en laboratoire peu varier d'un concept à l'autre. Elle peut aller de la simple caractérisation de propriétés de composants innovants, à la démonstration d'un système complet sur banc optique dans des conditions d'observations réalistes (ex. turbulence, aberrations optiques...).
3. **Démonstration sur ciel** : Enfin, le prototype de laboratoire ou sa version améliorée est portée *sur un télescope* pour une démonstration sur ciel de ses performances, de son apport pour les cas astrophysiques visés, et de sa faisabilité sous conditions réelles.

Chacune de ces étapes nécessite souvent des itérations pour raffiner et améliorer le concept entre les versions, au fur et à mesure que la compréhension de ses spécificités s'améliore et que l'expertise de l'équipe de recherche se développe.

Plateformes de maturation – La recherche instrumentale se distingue par la nécessité de moyens non seulement numériques, mais également opto-mécaniques pour ses développements.

Plateformes de simulation : La communauté HRA a développé un certain nombre de plateformes numériques pour les applications d'optique adaptative modernes, poussées par les besoins extrêmes de l'ELT (grand nombre de degrés de liberté à contrôler, compromis taille de pupille / échantillonnage...). On peut ainsi citer les développements HPC pour les RTC qui ont abouti à l'adoption du RTC de 3 instruments : MICADO, MAVIS et SAXO+ et le développement du code de simulation COMPASS largement utilisé dans la communauté.

Bancs de tests : Les laboratoires français sont riches de plusieurs bancs de test, qui se sont développés au fil des années grâce au soutien de l'INSU, du CNES, et des ressources locales et régionales. L'existence et le maintien de ces bancs sont *fondamentaux* pour la recherche en HRA. Ils constituent l'ossature même de nos capacités expérimentales, en permettant de réaliser des caractérisations et des démonstrations en laboratoire de manière rapide et efficace, en capitalisant sur l'équipement et l'expertise existants. La maintenance régulière de ces bancs (remplacement des composants vieillissants) ainsi que la pérennisation du personnel d'appui à la recherche (ingénieurs optiques, mécaniques, logiciel, etc.) sont essentielles pour garantir la pérennité d'une recherche instrumentale de haut niveau. Dans une logique d'optimisation des ressources et de coordination nationale, ces moyens sont mutualisés autant que possible, même si une duplication partielle reste une source de richesse. Parmi les bancs phares de la communauté, on notera le banc THD2 (LIRA) et le banc SPEED (Lagrange), deux bancs d'imagerie haut-contraste reconnus à l'international, spécialisés respectivement pour les applications spatiales et pour les télescopes segmentés type ELT.

Plateformes ciel : L'accès au ciel pour réaliser les démonstrations technologiques nécessaires à la validation de nos travaux de R&D est un besoin crucial pour la communauté. Ces démonstrations s'effectuent en fonction des opportunités offertes par les grands télescopes de classe 8m, à travers des modes ou instruments visiteurs (ex. PIONIER, HiRISE), par l'insertion de composants dans des roues à filtres d'instruments existants (ex. NACO, SPHERE), ou encore via une implication stratégique dans des projets instrumentaux ouverts aux démonstrations technologiques (Subaru/SCEXAO, SAXO+, Roman/CGI, CHARA). Ces démonstrations sur ciel sont toutefois soumises à l'attribution de temps technique sur ces observatoires, un processus compétitif, avec des créneaux souvent très limités, alors même que les expérimentations instrumentales nécessitent des phases de préparation conséquentes (mise en place, alignements, ajustements). Dans ce contexte, l'accès démultiplié à des télescopes nationaux de classe 1m, moins sollicités, peut s'avérer très efficace pour certaines applications (ex. OHP/Papyrus, OCA/C2PU).

Ces plateformes, qu'elles soient au sol ou sur le ciel, constituent les fondations indispensables de la recherche en instrumentation à haute résolution angulaire. Leur maintien, leur évolution, et leur coordination à l'échelle nationale sont des leviers stratégiques pour envisager des futurs instruments en rupture avec les précédents et capables de répondre aux grands défis scientifiques à venir.

1.5 Une communauté au service des projets

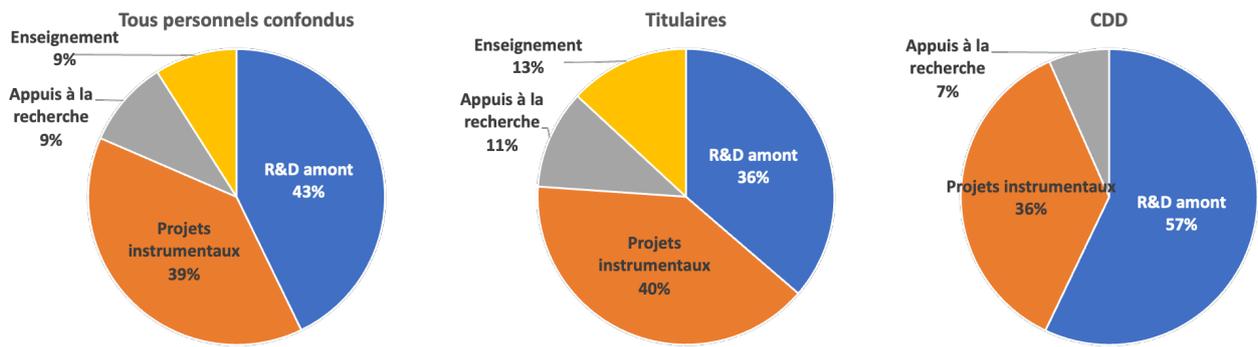


FIGURE 1.7 – Répartitions des activités de la communauté HRA par thématique. Gauche : tous personnels confondus ; Centre : répartition parmi les titulaires ; Droite : répartition parmi les CDD. Source : sondage 2025.

La communauté HRA est très impliquée dans le développement des instruments. De manière globale, près de 40% de ses activités sont dédiés à des projets instrumentaux, une proportion comparable à ses activités de recherche, voire plus importante dans le cas des titulaires, comme le montre la figure 1.7.

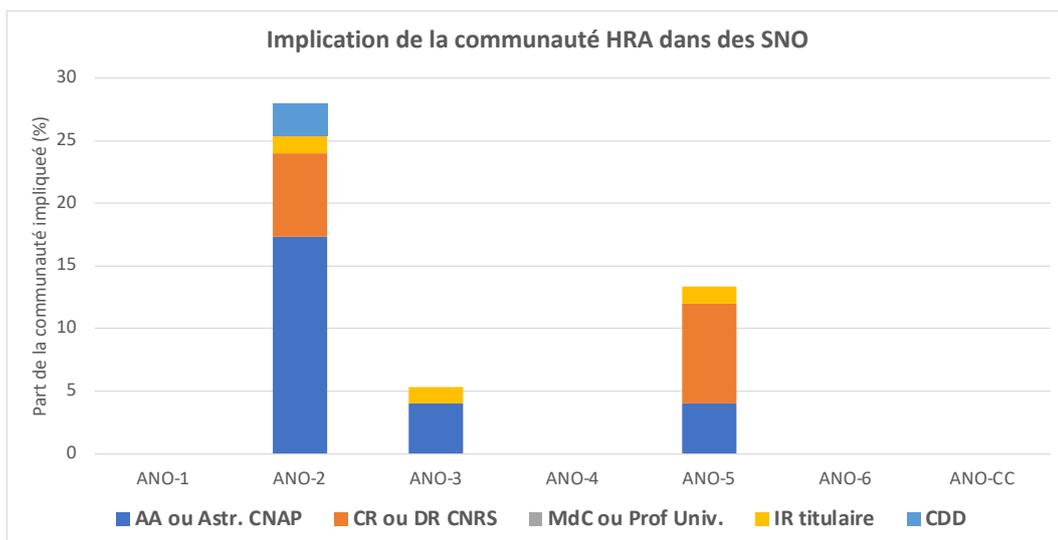


FIGURE 1.8 – Implication de la communauté HRA dans les Service Nationaux d’Observation (source : sondage 2025).

Cette implication se traduit naturellement dans la participation à des Services Nationaux d’Observation (SNO). Selon le sondage réalisé en 2025 auprès de la communauté HRA, **39% des répondants déclarent contribuer à au moins un SNO**. Il faut souligner ici que ces services ne sont pas effectués que par des astronomes (adjoints · es) dans le cadre de leur mission CNAP au hauteur de 31% de leurs ETP, mais également **par une part importante de personnels CNRS, à hauteur de 52% de leurs effectifs et en moyenne pour 36% de leurs ETP, et par des ingénieurs · es titulaires, à hauteur de 43% de leurs effectifs et 85% de leurs ETP en moyenne**. Ces implications importantes soulignent bien la volonté et l’engagement de la communauté HRA au service de la communauté Astronomie-Astrophysique en général.

Comme le montre la figure 1.8, la très grande majorité de ces services s’effectuent sur des activités de type ANO-2 (Instrumentation des grands observatoires au sol et spatiaux), avec 28% de la communauté HRA impliquée. Ces services concernent des travaux sur les instruments ELT (HARMONI, MICADO-MORFEO), VLT/VLTI (GRAVITY(+), MATISSE, SPHERE), CHARA, ou de l’instrumentation ESO.

Une part notable des services est également faite sur des activités de type ANO-5 (Centres de traitement, d'archivage et de diffusion de données, 13% de la communauté HRA), notamment pour les services JMMC, MOIO, et HC-DC. Enfin, une petite fraction de la communauté (5%) impliquée dans le Service aux Utilisateurs du VLTI (SUV) de l'ANO-3 (Stations d'observation). À noter que 8% de la communauté est impliquée sur des services relevant de deux ANO différentes.

La forte implication de la communauté HRA dans ces services, en particulier de type ANO-2, est naturelle et s'explique par deux raisons :

- D'une part, les projets instrumentaux concernés incluent tous des technologies ou méthodologies qui sont le fruit de travaux de recherche amont développés pendant les décennies précédentes (Sec. 1.4). Cela entraîne naturellement l'implication des chercheurs et chercheuses experts·es de ces technologies dans les projets concernés, et explique notamment la forte participation de personnels CNRS dans ces SNO.
- D'autre part, la nature même des activités de R&D des personnels de la communauté HRA induit souvent une forte expertise en instrumentation qui est particulièrement utile aux développements de projets instrumentaux.

Cette double-expertise présente dans la communauté HRA se traduit à plusieurs occasions par des sollicitations sur des postes à responsabilité dans ces projets (PI, Deputy-PI, Co-I, AO Scientist, System Engineer, Project Manager... voir Tableau 1.1), nouvelle preuve de la dévotion au service de la communauté AA. Cette implication est d'autant plus critique pour le développement des instruments de première lumière ELT, sur lesquels la France, via l'INSU-AA, a pris des engagements forts.

Cet engagement important dans les projets instrumentaux est devenu une facette particulièrement saillante de l'activité de la communauté HRA. Cette forte visibilité a une double conséquence négative :

- On constate une confusion globale du reste de la communauté AA, qui ne voit désormais la communauté HRA essentiellement que via ses contributions aux grands projets, au service des thématiques astrophysiques, oubliant que la HRA reste une thématique de recherche à part entière. Le vocabulaire employé est révélateur, certains et certaines astronomes utilisant par exemple l'étiquette "la Science" pour désigner l'astrophysique par opposition à la recherche instrumentale, l'excluant de fait de ce terme. On observe également une tendance à disperser les personnels HRA dans des équipes à dominante astrophysique dans certains laboratoires, au risque d'un affaiblissement de cette thématique.
- L'accompagnement des grands projets est une responsabilité lourde à porter, alors que les projets instrumentaux ont tendance aujourd'hui à s'allonger. Avec l'ELT, les projets ont des temps caractéristiques comparables à ce qui se fait dans le spatial. Il se fait maintenant sentir un épuisement et un certain ressentiment face au manque de reconnaissance, qui se traduit par la montée d'une envie de sanctuariser une fraction de temps de travail aux activités de R&D, tout aussi louables.

Cette situation est paradoxale, compte-tenu de la forte reconnaissance à l'international de l'expertise en HRA de la communauté française, qui est sollicitée dans nombre de projets d'envergure.

La communauté est également très impliquée dans les services de type ANO-3 (Stations d'observation), notamment via le Service Utilisateur du VLTI (SUV), et de type ANO-5 (Centres de traitement, d'archivage et de diffusion de données), à hauteur de 19% de la communauté. La contribution à ces SNO est une évolution naturelle pour notre communauté une fois les instruments à haute résolution angulaire construits et mis sur ciel (services ANO-2). Ces instruments de pointe nécessitent en général un accompagnement par des spécialistes pour réaliser un traitement optimal de leurs données lors de la phase d'exploitation scientifique. Les personnes qui ont conçu et réalisé ces instruments sont ainsi les plus à même de fournir un meilleur service à la communauté. Parmi ces services, on retrouve en particulier les SNO HC-DC, dédié aux instruments d'imagerie à haut contraste (SPHERE, possible évolution pour les instruments ELT), et JMMC, dédié aux outils de préparation de programmes et d'analyse de données pour l'interférométrie optique longue base.

Projet	Observatoire	Rôle	Nom	Laboratoire
HiRISE	VLT	PI	A. Vigan	LAM
SAXO+	VLT	PI	A. Boccaletti	LIRA
SAXO+	VLT	Co-I	M. Langlois	CRAL
SAXO+	VLT	Co-I	A. Vigan	LAM
SAXO+	VLT	Co-I	M. N'Diaye	Lagrange
SAXO+	VLT	AO Scientist	M. Langlois	CRAL
SAXO+	VLT	SE	M. Loupias	CRAL
MAVIS	VLT	Co-I	B. Neichel	LAM
NAOMI	VLTI	PI	JP. Berger	IPAG
SPICA	CHARA	PI	D. Mourard	Lagrange
SPICA	CHARA	IS	N. Nardetto	Lagrange
MATISSE	VLTI	PI	B. Lopez	Lagrange
MATISSE	VLTI	IS	R. Petrov	Lagrange
MATISSE	VLTI	PM, SE	S. Lagarde	Lagrange
GRAVITY+	VLTI	Co-I	T. Paumard	LIRA
GRAVITY+	VLTI	Co-I	JB. Le Bouquin	IPAG
GRAVITY+	VLTI	Lead AIT	F. Millour	Lagrange
ASGARD	VLTI	Co-I	F. Martinache	Lagrange
MICADO	ELT	Co-I	Y. Clénet	LIRA
MORFEO	ELT	Co-I	D. Mouillet	IPAG
HARMONI	ELT	Deputy PI	B. Neichel	LAM
HARMONI	ELT	Deputy PM	D. Le Mignant	LAM
HARMONI	ELT	Deputy Lead SE	A. Costille	LAM
HARMONI	ELT	AO Scientist	JF. Sauvage	ONERA
HARMONI	ELT	AO Scientist	T. Fusco	ONERA
PCS	ELT	Co-Lead WP	A. Potier	LIRA
PCS	ELT	Co-Lead WP	M. Langlois	CRAL
PCS	ELT	Co-Lead WP	E. Stadler	IPAG
PCS	ELT	Co-Lead WP	A. Vigan	LAM
GNAO	Gemini	Co-I	B. Neichel	LAM
AOB-WAN	Gemini	Co-PI	T. Fusco	ONERA
PAPYRUS	OHP	PI	V. Chambouleyron	LAM
PAPYRUS	OHP	PM	R. Fetick	ONERA
PROVIDENCE	OHP	PI	T. Fusco	ONERA
PROVIDENCE	OHP	PM	N. Vedrenne	ONERA
PROVIDENCE	OHP	IS	C. Petit	ONERA
PROVIDENCE	OHP	SE	JF. Sauvage	ONERA
CASTLE	Calar Alto	PI	E. Hugot	LAM
AIRFLOW	 multiples	PI	O. Lai	Lagrange
I2C	C2PU	Co-I	O. Lai	Lagrange
IC4STAR	VLTI	Co-I	O. Lai	Lagrange
ANAtOLIA	ELT, VLTI	PI	A. Ziad	Lagrange
Footeam	ELT, VLTI	PI	A. Ziad	Lagrange
PSAUM	ELT, VLTI	PI	A. Ziad	Lagrange

TABLE 1.1 – Responsabilités de membres de la communauté HRA dans les projets instrumentaux au cours du mandat 2020-2025. PI = Principal Investigator. Co-I = Co-Investigator. PM = Project Manager. IS=Instrument Scientist. SE = System Engineer. En gras : PI-ship d'instruments.

Enfin, cet engagement de la communauté se traduit au delà de l'implication de ses membres dans les projets instrumentaux, par une implication active dans nombre de comités en tant que représentants INSU, CNES, ESA... Une liste de ces représentations et participations est donnée dans le tableau 1.2. Parmi celle ci, on note en particulier des participations stratégique dans des comités ou bureau de gestion stratégique d'observatoires (ESO, CHARA) et d'instruments (OHANA, Roman CGI), ainsi que dans des consortium menant les études de conception de nouveaux instruments (PCS, HWO).

Projet		Rôle	Nom	Laboratoire
Instrumentation ESO	Optique	Déléguée Scientifique INSU-AA	K. Perraut	IPAG
		Délégué Scientifique DIIRO	B. Neichel	LAM
Equipex+ FCELT		Coordinatrice	K. Perraut	IPAG
Conseil de l'ESO		Rep. France	K. Perraut	IPAG
Steering committee ANDES		Rep. INSU-AA	K. Perraut	IPAG
Conseils de CTAO, ESO et SKAO		Rep. de l'État, Chef de délégation	G. Perrin	LIRA
Board of Government representatives CTAO		Rep. de l'État, Chef de délégation	G. Perrin	LIRA
Conseil de l'ESO		Rep. INSU-AA	G. Perrin	LIRA
Conseils de CFHT, IRAM, EGO-Virgo, JIVE		Rep. CNRS	G. Perrin	LIRA
Astronet		Rep. français	G. Perrin	LIRA
EXOSHARE		Porteur de la proposition	F. Martinache	Lagrange
EXOSHARE		Co-porteuse de la proposition	C. Kulcsár	IOGS
EII		Rep. INSU	F. Millour	Lagrange
IRP TARPIN		Co-PI	M. Ferrari	LAM
IRP TARPIN		Co-I	M. N'Diaye	Lagrange
Prospective INSU AA		Resp. GT II.2	M. N'Diaye	Lagrange
CHARA ExecCom		PI Français	D. Mourard	Lagrange
OHANA Committee		Chariman	O. Lai	Lagrange
PEPR		Gouvernance	M. Langlois	CRAL
PEPR		Resp. Axe 1	A. Boccaletti	LIRA
PEPR		Resp. Axe 1	M. N'Diaye	Lagrange
PEPR		Resp. Axe 5	M. Langlois	CRAL
LIOM era IAC		Advisory board	M. Langlois	CRAL
PCS		Rep. INSU	M. Bonnefoy	IPAG
PCS		Rep. INSU	P. Martinez	Lagrange
PCS		Rep. INSU	A. Vigan	LAM
PCS		Rep. INSU	A. Boccaletti	LIRA
CPP Roman CGI		Rep. CNES	A. Vigan	LAM
CPP Roman CGI		Rep. CNES (adjoint)	J. Mazoyer	LIRA
STDT HaBEX		Rep. CNES	D. Mouillet	IPAG
STDT LUVOIR		Rep. CNES	M. Ferrari	LAM
START HWO		Rep. ESA	D. Mouillet	IPAG

TABLE 1.2 – Représentants · es issus · es de la communauté HRA dans des comités nationaux ou internationaux.

1.6 Les liens avec les thématiques A&A et hors-A&A

Objet de référence	Distance	Télescope de 8m (25 mas à 1 μ m)	Interféromètre (base 200m) (1 mas à 1 μ m)
Ceinture d'astéroïdes	3 AU	50 km	2 km
Etoiles du voisinage Solaire	10 pc	0.25 UA	0.01 UA
Régions de formation stellaire	150 - 400 pc	4 - 10 UA	0.15 - 0.4 UA
Centre Galactique	8.5 kpc	212 UA	8 UA
Galaxie supergéante M87	16 Mpc	2 pc	0.1 pc
Quasar 3C 273	750 Mpc	100 pc	4 pc

TABLE 1.3 – Résolution angulaire théorique des moyens sol de la HRA visible/IR actuels (pour une longueur d'onde de 1 μ m), projetée aux distances caractéristiques d'objets emblématiques des thématiques du domaine A&A.

Pour comprendre l'apport essentiel de la démarche HRA aux différentes thématiques astrophysiques pavant le domaine A&A, il suffit de projeter la limite de résolution angulaire théorique, observant dans le proche infrarouge ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) d'un télescope de 8 m (0.025") et d'un interféromètre avec une base de 200 m (0.001") sur des distances caractéristiques nous séparant d'objets astrophysiques emblématiques des différents anciens programmes nationaux (maintenant actions thématiques) - en gardant en tête que sans HRA, le pouvoir de résolution limité par le seeing atmosphérique est, dans les meilleurs sites disponibles au sol à $\sim 1''$. Les échelles résolubles sur quelques objets représentatifs sont résumées dans la table 1.3. En partant des objets les plus proches dans le Système Solaire et en allant jusqu'aux sources extragalactiques les plus lointaines, on peut voir que la HRA permet de sonder les phénomènes et objets à des échelles pertinentes.

Pour les objets du système Solaire mobilisant une partie des efforts du programme national de planétologie, on voit qu'à une distance de 3 UA, représentative de la ceinture principale d'astéroïdes, les moyens HRA sol actuels, offrent la possibilité de résoudre et d'imager les petits corps du système Solaire avec une résolution projetée de quelques dizaines de kilomètres. Arriver à ce domaine de performance aux courtes longueurs d'onde requiert l'utilisation d'OA de très haute qualité (dite extrême), combinée à des techniques de déconvolution qui permettent de compenser les imperfections de la correction. Un large programme VLT/SPHERE conclu en 2021 aura par exemple permis d'obtenir des images haute résolution de 42 des objets les plus proéminents de la ceinture d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter (voir <https://www.eso.org/public/france/images/eso2114g/>).

L'amélioration continue des performances de l'OA et des techniques de traitement du signal permet d'envisager des observations aux plus courtes longueurs d'onde dans le domaine visible. L'arrivée de l'ELT, avec sa résolution ($\times 5$) et sa sensibilité ($\times 625$) accrue par rapport au VLT va décupler ce potentiel d'observation, augmentant la finesse de notre compréhension distante des objets les plus importants, et permettra d'étendre le rayon d'observation aux astéroïdes troyens et aux objets de la ceinture de Kuiper. De telles observations, distantes mais en très grand nombre, des astéroïdes offrent un complément important aux missions d'exploration qui ne peuvent dans le meilleur des cas, que cibler une poignée d'objets. Les observations résolues des petits corps permettent d'en déterminer la morphologie, ce qui, combinée aux informations de composition physico-chimique résultant de spectroscopie, et de cinématique, continue de contraindre le modèle de la formation du système Solaire.

Toute action de R&D instrumentale visant à améliorer la qualité des algorithmes de déconvolution, à augmenter ou à transposer la performance de l'OA à de plus courtes longueurs d'onde sur les moyens actuels, permettra de décupler d'autant plus l'impact des futures infrastructures au service de l'observation des objets du Système Solaire.

Pour les étoiles du voisinage Solaire, qui sont des objets stratégiques des thématiques de la physique

stellaire et de la formation planétaire, ces mêmes moyens offrent théoriquement la possibilité de sonder la présence de structures dans les disques et de planètes, bien en deça de l'échelle de l'unité astronomique (UA). Sur le VLT, c'est encore une fois l'instrument SPHERE qui est à l'avant garde et qui a contribué à une caractérisation exhaustive des systèmes planétaires actuellement observables depuis l'hémisphère Sud et produit une impressionnante collection d'images de disques protoplanétaires riches en enseignements pour notre compréhension de la formation planétaire. Sur le VLTI, les deux instruments de seconde génération MATISSE et GRAVITY contribuent également à ce cas astrophysique majeur.

Ici, le challenge est de dépasser la difficulté du haut-contraste entre l'étoile centrale brillante et ces structures typiquement entre 10^4 et 10^{10} fois plus faibles, et à des séparations angulaires de quelques éléments de résolution par le VLT seulement. C'est un exploit technique qui n'est possible qu'en réunissant ensemble plusieurs briques qui sont autant de piliers de la thématique HRA. La condition *sine qua non* reste le contrôle du front d'onde par l'OA extrême, qui atteint actuellement sa meilleure performance dans l'infrarouge à près de $2 \mu\text{m}$. Une qualité de correction suffisante permet de mettre en oeuvre les techniques de coronagraphie stellaire pour atténuer optiquement le signal stellaire et des techniques de traitement du signal adaptées pour pousser les limites de détection qui seraient autrement limitées par des biais instrumentaux.

A la résolution du VLTI, les planètes détectées par imagerie directe peuvent être directement pointées par l'interféromètre en utilisant la technique de double champ. De façon comparable à ce que fait l'optique adaptative à l'échelle d'un télescope, un des champs peut utiliser la lumière de l'étoile centrale pour asservir un suiveur de franges tel qu'implémenté dans GRAVITY, pendant que l'autre peut être utilisé pour pointer l'objet d'intérêt dont la position est connue. Cette observation bénéficie du filtrage de la lumière stellaire par la résolution intrinsèque importante du VLTI et des spectres infrarouges de qualité ont ainsi été obtenus. Les capacités astrométriques de GRAVITY permettent de contraindre très rapidement les paramètres orbitaux et d'anticiper la détection de nouveaux objets au sein du même système. L'instrument MATISSE peut désormais également bénéficier de ce mode double champ et compléter les observations directes de planètes dans le moyen infrarouge, venant compléter son programme d'observation des disques protoplanétaires.

Pour dépasser cet état de l'art, il faut continuer à améliorer la qualité de la correction et prévoir la correction optique des biais instrumentaux. La mise en oeuvre d'un deuxième étage de correction, alimenté par une information en provenance du capteur astrophysique central permettra de répondre à cet enjeu. C'est le but de la démarche d'amélioration SAXO+, étape importante de démonstration de ce que pourrait être l'instrument imageur haut contraste ELT/PCS. Cette perspective motive la mise au point d'analyseurs de surface d'onde alternatifs, de coronagraphes optimisés ou de solution haut contraste intrinsèquement plus robustes aux résidus de contrôle de front d'onde. Pour l'interférométrie, il faut continuer à améliorer l'infrastructure : les systèmes d'OA GPAO récemment commissionnés sur les UTs, qui bénéficieront de capacités de "dark hole", et les tentatives de mitigation des vibrations du VLTI vont contribuer à réduire les résidus de cophasage, améliorer le rapport signal sur bruit des observables interférométriques et ultimement, le potentiel de détection/caractérisation des instruments qui en bénéficieront.

Les régions de formation stellaire les plus proches : situées entre 150 (Rho Ophiucus, Taurus) et 400 (Orion) parsec permettent d'observer les conditions de formation individuelle des systèmes extrasolaires dans les nuages moléculaires ainsi que les interactions entre les différents systèmes, ce qui en fait des cas d'étude importants de la physico-chimie du milieu interstellaires. A ces distances, on voit que les moyens sol disposent d'un potentiel HRA puissant, permettant de décrire les systèmes avec une résolution allant de la fraction à la dizaine d'UA, compatible avec l'observation directe de la ligne des glaces où on s'attend à observer le pic de la formation planétaire.

Le régime de distance orbitale pouvant être exploré sur les objets proches avec un seul télescope requiert désormais le pouvoir de résolution de l'interférométrie. Si l'instrumentation actuelle du VLTI, en particulier MATISSE, permet de faire des observations spectro-interférométriques qui contraignent

la physico-chimie et la structure des disques, la détection de planètes dans ces objets lointains reste un challenge qui a été relevé avec l'avènement du mode GRA4MAT hors axe. Le retour d'expérience de l'instrument visiteur VLTI/ASGARD qui déploiera pour la première fois au VLTI dans l'année à venir, des solutions haut-contraste dans le champ primaire, permettra de s'assurer de ce qui est effectivement faisable au VLTI. En parallèle de ces développements, la mise en oeuvre de l'ELT va encore une fois bouleverser notre compréhension de ces objets.

Pour les instruments de première lumière et première génération, on est cependant encore loin de la transposition du niveau de performance de l'OA extrême actuellement en service sur les télescopes de la classe 8-m. Quelques obstacles sont encore sur le chemin critique de tous les projets, notamment le risque de fragmentation de la pupille (island effect diagnostiqué depuis ~ 2016 sur les télescopes de 8-10 mètres) qui a fait l'objet de plusieurs thèses récentes. C'est un phénomène difficile à compenser de façon optique, et dont les effets seraient dévastateurs avec une perte de résolution et sensibilité potentielles respectivement d'un facteur 6 et 36.

Aux grandes distances nous séparant du centre galactique et des autres galaxies, pertinentes aux thématiques de la cosmologie & de l'étude des galaxies dont la notre, la HRA est clairement en train de monter en puissance. Les observations des étoiles les plus proches du centre Galactique, d'abord en OA sur les télescopes et plus récemment avec le VLTI et l'instrument GRAVITY motivé par ce cas astrophysique, ont fortement compté dans l'attribution du prix Nobel de 2020, récompensant la compréhension du trou noir supermassif au centre de notre Galaxie.

Cette thématique astrophysique a déjà bien bénéficié des apports de la HRA, grâce à plusieurs relevés boostés par OA par SINFONI/VLT ou MUSE/VLT - répondant aux besoins de contraindre les problématiques d'évolution des galaxies et de la formation stellaire qui y a lieu. L'instrumentation du VLTI a également permis d'observer plusieurs noyaux actifs de galaxies (AGN) en plus du centre Galactique, et permis d'estimer la masse du trou noir qui leur est associé.

La difficulté dans le déploiement de l'arsenal HRA au service de l'observation des sources distantes et intrinsèquement faibles est attribuable au manque d'étoiles de référence suffisamment brillantes nécessaires à l'analyse de surface d'onde et à des besoins d'observation sur des champs importants, dépassant largement la seconde d'arc. Pour faire des contributions majeures dans l'observation des galaxies lointaines et des sources cosmologiques, il faut déployer des constellations d'étoiles guide laser artificielles (LGS) et des stratégies de contrôle de front d'onde dédiées. L'upgrade GRAVITY+ en cours au VLTI va permettre le déploiement de systèmes LGS qui vont augmenter la couverture du ciel de l'interférométrie optique, qui est en train de s'ouvrir à une très grande communauté.

C'est également dans cette optique que sont développés les OA tomographiques de MICADO, HARMONI et MOSAIC sur l'ELT dont la sensibilité accrue va bien entendu bouleverser le champ des possibles de cette thématique astrophysique. L'un des défis de la science des données HRA sera d'apporter des estimations précises de la PSF OA variable dans le champ des instruments - pour permettre d'en déconvoluer les images.

Cette imbrication forte de la démarche HRA dans les thématiques astrophysiques des nouvelles actions thématiques se constate également dans les informations démographiques collectées pendant notre enquête. Les chercheurs et chercheuses de la communauté HRA montrent deux profils, en parts égales : 50% sont des chercheurs et chercheuses purement instrumentalistes dont la recherche est dédiée au développement de technologies et méthodologies en HRA, tandis que les autres 50% ont un profil transverse et travaillent activement sur des thématiques astrophysiques, à hauteur de 40% de leur recherche en moyenne². Pour ces profils pluri-disciplinaires, les activités en instrumentation HRA sont systématiquement un atout pour leur recherche sur des applications astrophysiques. En effet, de même qu'un support spécialisé est souvent utile pour aider la communauté à exploiter au mieux les instruments utilisant des

2. Source : Sondage 2025 de la communauté HRA, voir sec 1.2

technologies de pointe en HRA (via des services d'observations ANO-3 et ANO-5, cf. Sec. 1.5), leur maîtrise et la connaissance approfondie des techniques liées à la HRA permet aux chercheurs et chercheuses de notre communauté d'en exploiter les subtilités, d'en connaître finement les limites, et d'en tirer le maximum pour leurs applications astrophysiques.

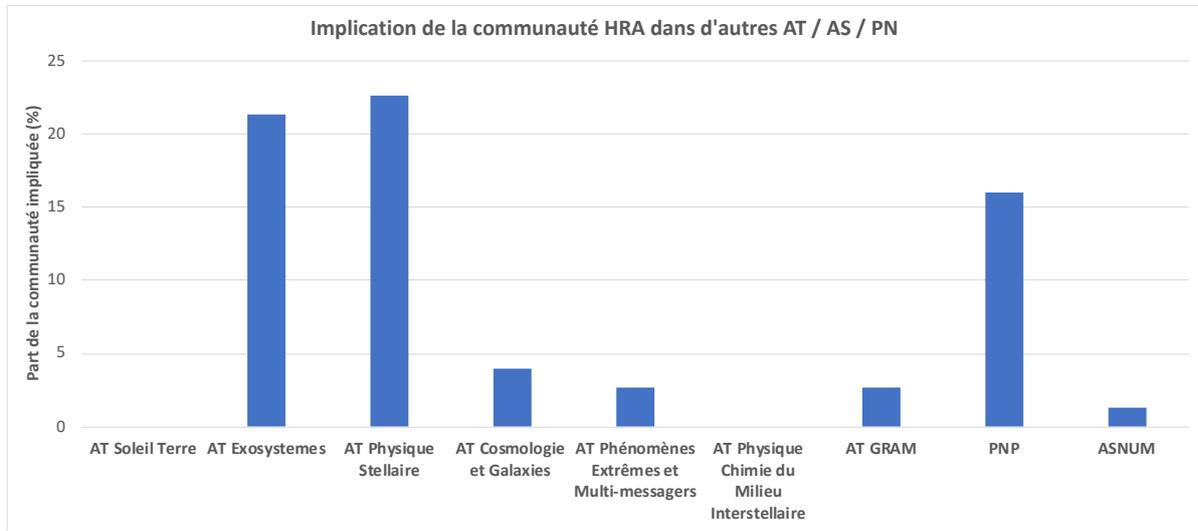


FIGURE 1.9 – Implication de la communauté HRA dans les AT, AS et PN en plus de l'ASHRA (source : sondage 2025).

Concrètement, que ces thématiques soient une part active de leur recherche ou simplement à titre d'information, 47% de la communauté HRA émerge dans au moins un autre Programme National / Action thématique / Action Spécifique que l'ASHRA³, et 15% émerge même dans plusieurs de ces PN/AT/AS. Ces émargements se font en majorité sur l'AT Physique Stellaire (23% des réponses au sondage), l'AT Exosystèmes (21% des réponses), et au PNP (16%), ce qui correspondant aux trois champs d'application historiques des instruments HRA, comme rappelés ci-dessus. On note également une participation marginale à l'AT Cosmologie et Galaxies (4% des réponses), à surveiller dans les prochaines années avec le développement des applications extragalactiques de l'interférométrie longue base avec GRAVITY et MATISSE.

Enfin, une petite fraction de la communauté HRA effectue aussi une partie de ses recherches sur des sujets en dehors du domaine A&A (14% selon le sondage 2025). Cette pluridisciplinarité s'explique par le fait que, les applications astrophysiques étant extrêmement exigeantes en terme de sensibilité et de précision, les technologies HRA développées au sein de notre communauté peuvent servir et être adaptées à d'autres applicatifs. Ceux-ci concernent le bio-médical en premier lieu (utilisation d'optique adaptative pour l'imagerie de la rétine et la microscopie équipée d'OA pour l'imagerie de cerveaux de rongeurs, et utilisation de détecteurs courbes pour l'imagerie grand champ de cerveau de macaque), pour les télécommunications (optique adaptative pour la communication avec les satellites), ainsi que pour la défense (optique adaptative pour l'imagerie de satellites).

3. Source : Sondage 2025 de la communauté HRA, voir sec 1.2

Chapitre 2

L'Action Spécifique HRA

2.1 L'ASHRA : Un organisme qui fédère une communauté cohérente

La communauté HRA contribue aujourd'hui à quatre grandes thématiques distinctes, décrites en Section 1.3. Malgré ces frontières apparentes, la communauté forme bien un tout cohérent, notamment à travers le partage d'un vocabulaire et d'outils méthodologiques communs qui permettent d'aborder le problème central de la maîtrise du front d'onde :

- l'optique astrophysique, en particulier l'optique diffractive, qui permet de décrire par le formalisme de Maxwell, Fresnel et Fourier, les observations rendues théoriquement possibles par les observatoires. À cette optique qualifiée de classique, on intègre aujourd'hui l'optique fibrée et intégrée, l'optique non-linéaire et l'optique quantique, peut être en passe de donner naissance à un nouveau pilier thématique.
- la prise en compte des phénomènes stochastiques, en particulier ceux induits par la turbulence atmosphérique : non seulement la turbulence naturelle inhérente aux observations conduites depuis la surface de la Terre, mais aussi la turbulence auto-induite par les moyens d'observation eux mêmes, qui sont aujourd'hui une source de perturbation dominante des observations.

Ces deux briques fondamentales donnent toute leur cohérence à la démarche et à la communauté de la HRA française. Cette origine commune explique la porosité de plus en plus évidente entre les quatre thématiques ainsi que les rapprochements qu'on observe aujourd'hui.

L'Action Spécifique Haute Résolution Angulaire – l'ASHRA – est l'organe qui donne corps auprès de l'INSU-AA à cette communauté cohérente et soudée. L'ASHRA sert ainsi de représentant de la communauté vis à vis des instances, et permet de mettre ses compétences et son expertise instrumentale à leur service dans un rôle de conseil. En parallèle, l'ASHRA a également un rôle important d'animation de cette communauté, en favorisant le partage d'informations et l'organisation d'atelier sur la thématique HRA, et de coordination de ses activités à l'échelle nationale pour optimiser ses ressources et maximiser son impact et implication dans les projets internationaux.

Historiquement un Programme National à sa création, la communauté est, depuis 1999, représentée dans les instance par une Action Spécifique, plus représentative de ses activités de recherche transverses aux thématiques astrophysiques, sur des mandats de 5 ans. À chaque fin de mandat, son bilan est présenté à la CSAA, qui statue de son éventuel renouvellement sur la base d'une lettre de mission. Le directeur ou la directrice de l'ASHRA est nommé · e par le président de la CSAA, et le Conseil Scientifique (CS) de l'ASHRA est constitué de 13 membres nommés · es, en veillant à la bonne représentation des différentes thématiques HRA et des laboratoires concernés (voir démographie en Sec. 1.2). Un ou une président · e est en général désigné · e par le directeur · trice ASHRA pour partager les tâches, décisions, et réflexions incombant à cette fonction. Deux personnalités sont membres invités au CS de l'ASHRA : Le ou la Chargé · e de mission INSU sur l'instrumentation optique ESO, ainsi que le ou la directeur · trice du Centre Jean-Marie Mariotti (JMMC).

2.2 Mandat 2020-2025 : Lettre de mission

La lettre de mission de l'ASHRA est incluse telle quelle en annexe de ce document (annexe B). Les grandes lignes de cette lettre sont résumées ici : “L'ASHRA 2020-2025 a pour mandats 1/ de coordonner la recherche et organiser les développements en haute résolution angulaire (HRA) en optique : interférométrie optique, optique adaptative, imagerie très haute dynamique et 2/ d'accompagner l'ensemble de la communauté astronomique française dans son utilisation scientifique de l'instrumentation HRA. Plus généralement, l'ASHRA exerce une fonction de conseiller expert dans le domaine de la haute résolution angulaire en optique auprès de l'INSU.”

Ce mandat se décline en plusieurs objectifs spécifiques :

- de soutien et d'animation des développements techniques sur les quatre thématiques identifiées plus haut, avec un effort particulier à destination des plus jeunes membres de notre communauté.
- de réflexion prospective moyen et long terme, notamment en interférométrie optique et dans le domaine spatial.
- d'encouragement de l'émergence et la valorisation des technologies innovantes et du renfort des liens entre l'instrumentation et le traitement du signal.
- de diffuser ces techniques et idées au sein de la communauté AA et de contribuer à leur exploitation.
- de continuer à exercer sa fonction de conseiller expert auprès de l'INSU.

L'ambition est de renforcer la position de la France dans ce domaine en Europe et dans le monde - en jouant un rôle pilote dans la recherche de financements nationaux et européens au service de l'instrumentation et l'emploi des ressources humaines qu'elle mobilise.

2.3 Mandat 2020-2025 : Bilan des actions du CS

2.3.1 Animation de la communauté HRA

L'une des missions fondamentales de l'ASHRA est de contribuer au dynamisme, à la cohésion et à la visibilité de la communauté française en haute résolution angulaire (HRA). Cet objectif se traduit par des actions d'**animation scientifique**, de **coordination** autour de thématiques structurantes, et de **promotion** des activités HRA auprès d'autres communautés scientifiques ou de nouveaux publics. Au cours de son mandat 2020–2025, le Comité Scientifique (CS) de l'ASHRA a ainsi initié et soutenu un ensemble d'actions visant à renforcer les liens au sein de la communauté, à favoriser l'émergence de nouvelles idées et à encourager l'implication des jeunes chercheurs et chercheuses dans le domaine.

Création de la liste de diffusion ASHRA-France – En 2022, l'ASHRA a mis en place une nouvelle liste de diffusion nationale, ashra-france@groupe.renater.fr, qui faisait jusque-là défaut à la communauté. Constituée exclusivement de personnels affiliés à des laboratoires français et impliqués dans des activités en HRA, cette liste rassemble entre 200 et 240 personnes et est mise à jour de façon annuelle. Elle constitue aujourd'hui un outil central de communication, permettant à l'ASHRA de diffuser des informations importantes ou stratégiques, tel que son appel d'offre annuel, des annonces d'assemblées générales, des invitations à contribuer ou à se coordonner pour des projets structurants (PEPR, INFRA-TECH), ou encore des appels à s'impliquer dans des groupes de travail liés à des projets instrumentaux majeurs (ELT-PCS, NASA Roman, HWO). La liste relaie également les annonces de séminaires, thèses, ateliers et conférences organisés dans les laboratoires, contribuant à une meilleure circulation de l'information et à la mise en réseau active des acteurs de la communauté HRA.

Mise en place d'un nouveau site web de l'ASHRA – En 2022, l'ASHRA a lancé un nouveau site internet, sobre mais moderne et vivant, accessible à l'adresse <https://ashra-insu.fr/>. Cette vitrine essentielle a pour objectif de renforcer la visibilité de la communauté HRA, de valoriser ses actions, et de faciliter l'accès à l'information. Le site permet au CS de publier et de garder une trace de son appel

d’offre annuel ainsi que des nouvelles marquantes de notre communauté, telles que les prix reçus par ses membres, des hommages à des personnalités disparues, des résultats marquants, ou encore des actions du CS ASHRA.

Soutien financier aux ateliers de travail – L’émergence de nouveaux concepts technologiques et méthodologiques repose grandement sur l’émulsion d’idées suscitée par des rencontres ciblées. L’ASHRA soutient activement l’organisation d’ateliers de travail, en y consacrant en moyenne 10% de son budget annuel (voir Fig. 2.2). La liste des ateliers soutenus par l’ASHRA est reportée dans le tableau 2.1. L’ASHRA porte une attention particulière à la diversité au sein de ces ateliers, en veillant notamment à la représentation de femmes chercheuses ou ingénieures dans les comités d’organisation (SOC), ainsi qu’à l’inclusion active de jeunes chercheurs · euses (en thèses ou postdoc). Ce soutien s’est également traduit par l’appui à trois écoles thématiques à destination des jeunes membres de la communauté : l’atelier NYRIA, l’école VLTI et l’AO Summer School.

Année	Nom de l’atelier/Sujet	Nbr	Thématique	Organisateur · trice
2021	Revisiting IR Heterodyne Interferometry	49	Interférométrie	J.P. Berger
2021	Conférence AO4ELT7	311	OA, ELT	B. Neichel
2021	AO4ASTRO2	~ 40	OA	O. Martin
2022	ExoELT	50	OA, ITHD, ELT	G. Chauvin
2023	NYRIA	31	HRA	A. Lau
2023	Coherent Differential Imaging Workshop	~ 25	ITHD, TS	P. Baudoz
2023	JWST Exoplanet Proposal Preparation	25	ITHD, TS	L. Leboulleux
2024	ExoELT 2	55	OA, ITHD, ELT	E. Huby, L. Leboulleux
2024	HALO	46	ITHD	A. Vigan
2024	VLTI School	42	Interferometry	A. Matter
2024	R&D for Space HCI Europe	37	ITHD	I. Laginja
2024	Imagerie pour l’observation de l’espace	100	OA	T. Fusco
2024	ExoSystèmes V (reporté à 2025, en prep.)	TBD	ITHD	I. Boisse
2024	AO Summer School 2024	85	OA	C. Kulczár
2025	51 Peg b 30th Birthday Conference	100	ITHD	I. Boisse

TABLE 2.1 – Liste d’ateliers et de conférences soutenus financièrement par l’ASHRA.

Organisation d’un atelier de prospective sur l’interférométrie – À l’occasion des Journées SF2A 2024, le CS de l’ASHRA a organisé un atelier de prospective consacré à la thématique de l’interférométrie optique (“[S05: Status & prospects in Optical Interferometry](#)”). Cet atelier d’une demi-journée avait pour objectifs :

1. Faire un point sur le statut et les programmes de développement des principales infrastructures interférométriques optiques dans lesquelles la communauté HRA française est impliquée,
2. Dresser le panorama des activités de R&D en cours dans la communauté HRA sur des nouvelles technologies émergentes et les opportunités instrumentales à venir,
3. Ouvrir une discussion collective sur les priorités de développement R&D et d’implication de la communauté sur les futurs projets instrumentaux.

La session a rassemblé 55 participants · es et a permis des échanges structurants entre les acteurs du domaine. Elle a donné lieu à la rédaction d’un proceeding synthétique, publié dans les actes de la SF2A 2024 : [Proceeding](#).

Promotion de la R&D en Astronomie dans les formations en optique – À une époque où la communauté entre dans une phase décisive de construction des instruments de l’ELT et d’autres grands projets, il est devenu vital de renforcer la visibilité de l’astronomie instrumentale comme débouché attractif et stimulant pour les étudiant · es en optique et instrumentation. Dans ce contexte, l’ASHRA a engagé plusieurs actions ciblées auprès des formations d’excellence en optique, afin de promouvoir les

opportunités qu'offre notre domaine, tant en recherche qu'en ingénierie. Deux initiatives marquantes ont été menées par des membres du CS ASHRA : une conférence au sein du Master Europhotonics d'Aix-Marseille Université (2023, par L. Leboulleux), et une journée d'échange avec les étudiants de l'Institut d'Optique Graduate School ("SupOptique") sur son campus de St Etienne, consacrée à la présentation des activités de R&D instrumentale pour l'astronomie (cf. figure 2.1). Ces interventions ont mis en lumière la richesse technologique et scientifique du domaine de l'instrumentation HRA, dans le but de susciter un intérêt concret pour ces filières auprès des étudiants · es. Une liste de stages, thèses, et contrats d'ingénieurs ouverts dans la communauté HRA leur a également été transmise à cette occasion. En 2024, une troisième action de promotion a été menée à l'occasion de l'atelier NYRIA (*Network of Young Researchers in Instrumentation for Astronomy*), organisé au LAM en parallèle d'une réunion du CS de l'ASHRA. Cette rencontre a permis de renforcer les liens avec la communauté internationale des jeunes chercheurs · euses en instrumentation, et de valoriser la structuration nationale de la communauté française autour des enjeux instrumentaux.



FIGURE 2.1 – Action de promotion de la recherche instrumentale en astronomie à l'Institut d'Optique Graduate School (SupOptique) Saint Étienne, janvier 2024, par deux membres du CS ASHRA.

L'ensemble de ces actions témoigne de l'engagement constant de l'ASHRA pour fédérer, soutenir et dynamiser la communauté HRA française. Cette animation collective reste un levier essentiel pour favoriser l'émergence de nouvelles idées, encourager les vocations, et renforcer la visibilité de la communauté au sein de l'astronomie nationale et internationale.

2.3.2 Soutien à la recherche instrumentale HRA

La seconde mission fondamentale du CS ASHRA, et certainement la plus concrète auprès de notre communauté, est la répartition des crédits qui lui sont alloués. Le budget annuel de fonctionnement de l'ASHRA est de l'ordre de 100k€, venant pour 80% l'INSU et pour 20% du CNES. L'ensemble de ces crédits est redistribué à la communauté HRA via un appel d'offre publié chaque année courant septembre.

Si la majorité des organes de l'INSU (CSAA, programmes nationaux et actions thématiques) sont là pour assurer majoritairement la mise en oeuvre de la prospective du domaine AA, la politique de l'ASHRA est de favoriser l'émergence de nouvelles idées de technologies ou de méthodologie en HRA, et de soutenir leur développement par des activités de R&D. Pour ce faire, l'ASHRA ouvre son appel aux postes suivants :

- Participation à des conférences et ateliers (45% des attributions du mandat),
- Activités de R&D ciblées (23% des attributions),
- Actions de collaboration (22% des attributions),
- Organisation d'ateliers ou de conférences (10%)

Les attributions moyennes sur le mandat sont indiquées par type de poste et par laboratoire dans la figure 2.2. Ces attributions sont faites exclusivement sur des projets de recherche qui ne sont pas financés par ailleurs (ERC, ANR, PEPR), à moins d'une situation dûment justifiée.

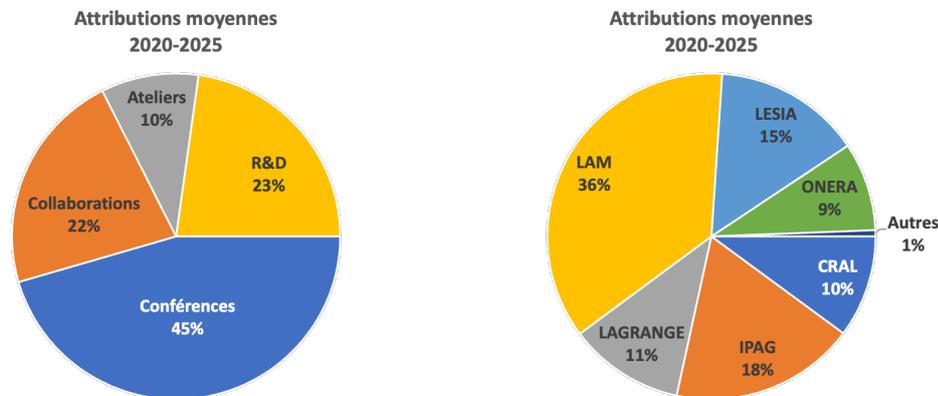


FIGURE 2.2 – Attributions budgétaires de l'ASHRA, par type de poste (gauche) et par laboratoire (droite).

Participation aux conférences et ateliers – Comme souligné précédemment, la participation à des conférences et ateliers sur des thématiques instrumentales sont des sources fondamentales pour identifier de nouveaux concepts technologiques. Consciente de l'importance stratégique de ces événements, en particulier dans un contexte de réduction du soutien de base des laboratoires, l'ASHRA fait le choix volontaire de soutenir activement les missions scientifiques associées. Ces conférences sont de plus vitales pour la carrière des jeunes scientifiques, en leur offrant l'opportunité de valoriser leurs travaux, d'élargir leur réseau professionnel, et de se former aux avancées les plus récentes dans leur domaine. L'ASHRA conditionne son soutien financier à la présentation orale des travaux, et, en période de forte pression budgétaire, réserve ce soutien prioritairement aux scientifiques en début de carrière.

À l'image de notre communauté scientifique, lors du mandat, le CS de l'ASHRA est devenu particulièrement attentif à l'impact environnemental de ces déplacements. Ainsi, dès son premier appel en 2020, des consignes explicites ont été mises en place pour encourager une prise de conscience écologique, qui se retrouvent encore dans le dernier appel publié à la rentrée 2024 (voir [notre site internet](#)). Pour encourager la prise de conscience, chaque demande de mission doit inclure une estimation du coût carbone, réalisée à l'aide des outils du collectif Labo1point5 ou des calculatrices fournies par les compagnies de transport et le cas échéant, être accompagnée de commentaires de justification de la stratégie de déplacement proposée. L'ASHRA n'accorde de plus qu'un soutien partiel, sous forme de tickets forfaitaires fixes (typiquement 400€ pour une mission en Europe, 800€ hors Europe), impliquant un co-financement obligatoire. Les missions soutenues couvrent un large éventail d'événements scientifiques, allant de grandes conférences internationales comme SPIE, AO4ELT ou Spirit of Lyot (environ 54% des missions), à un plus grand nombre de petits ateliers thématiques ciblés (environ 46%).

Appui à la R&D – Bien que l'ASHRA n'ait pas vocation à financer seule des activités de recherche et développement (R&D) ou de recherche technologique (R&T) de grande ampleur ou de long terme, elle joue cependant un rôle important pour accompagner ponctuellement des initiatives stratégiques. Le CS peut ainsi apporter un soutien financier ciblé dans plusieurs cas de figure :

- pour valider ou démontrer un concept technologique innovant,
- pour accompagner le démarrage d'une nouvelle expérience ou d'un banc expérimental,
- pour permettre une réaction rapide à un imprévu technique ou logistique.

En moyenne, environ un quart du budget annuel de l'ASHRA est consacré à ces actions de soutien à la R&D. La liste des projets financés dans ce cadre sur le mandat 2020–2025 est présentée dans le tableau 2.2.

Année	Activité de R&D	Thématique	Laboratoire
2021	Synthèse d'ouverture (FIRST-5T)	Interférométrie	IPAG & LESIA
2021-2025	Composants photoniques	Interférométrie, OA	IPAG, Lagrange
2021-2025	Interférométrie hétérodyne	Interférométrie	IPAG
2021	SPICA-VIS	Interférométrie	Lagrange
2021	GRAVITY+	Interférométrie	Lagrange
2021	Banc d'OA pyramide à l'OHP (PAPYRUS)	OA	LAM
2022	Cophasage de segments	OA	LAM, CRAL
2022	Dark Hole et XAO pour GRAVITY+	OA, ITHD	IPAG
2023	OA solaire, RTC	OA	CRAL
2023	Métrologie optique	OA, interférométrie	IPAG
2023	Senseur de front d'onde grand champ	OA	Lagrange
2023	Support HiRISE	ITHD	LAM
2023	Concept de télescope déployable CubeSat	OA	ONERA
2024	Modulateur senseur de front d'onde pyramide	OA	IPAG
2024	Voie infrarouge de PAPYRUS	OA	LAM
2025	Senseur de front d'onde Zernike	ITHD	Lagrange
2025	Spectrographe compact VIPA + PAPYRUS	OA, ITHD	LAM, IPAG
2025	RISTRETTO + PAPYRUS	OA, ITHD	LAM

TABLE 2.2 – Liste des R&D soutenus financièrement par l'ASHRA.

Soutien aux collaborations scientifiques – Pour favoriser l'émergence de nouveaux concepts technologiques et leur dissémination dans des projets instrumentaux, des collaborations étroites sont nécessaires, à la fois avec des experts des technologies ciblées et avec des porteurs de projets. L'ASHRA joue un rôle clé dans l'amorçage de telles synergies en finançant des actions collaboratives, en particulier lors des phases initiales où les financements sont souvent les plus difficiles à mobiliser. En moyenne, ces soutiens représentent 22% du budget annuel.

Appui à l'organisation d'ateliers – Comme mentionné précédemment, l'ASHRA apporte un soutien financier à l'organisation d'ateliers thématiques et de certaines conférences nationales dans le domaine de la haute résolution angulaire. Ces actions, qui représentent environ 10% du budget, sont essentielles pour structurer les échanges au sein de la communauté et faire émerger de nouvelles idées. L'ASHRA encourage systématiquement la mise en place de dispositifs de participation à distance, afin d'élargir l'accès à ces événements tout en réduisant leur impact environnemental.

2.3.3 Expertise pour l'INSU

Durant le mandat 2020-2025, l'ASHRA a poursuivi sa mission de conseil et d'expertise auprès des instances de l'INSU sur les questions relative à l'instrumentation HRA et aux projets instrumentaux associés. Cette mission s'est déclinée sur plusieurs axes.

Comités de suivi des instruments ELT – Une part significative de cette activité repose sur la participation du Directeur de l'ASHRA aux comités de suivi des instruments de l'ELT dans lesquels l'INSU est engagé (MICADO, HARMONI, METIS, MORFEO, MOSAIC & ANDES) et qui constituent des priorités stratégiques de long terme. Compte tenu de leur durée de développement (plus d'une décennie), un suivi étroit est indispensable pour en assurer le bon déroulement, anticiper les risques (financiers, techniques, humains, plans de charge des labos), et accompagner les équipes projet. Une part importante des contributions françaises repose sur des technologies issues de développements HRA passés. La présence de l'ASHRA dans les comités de suivi contribue à éclairer les décisions de l'INSU et soutenir efficacement ces projets structurants.

Évaluation du projet GRAVITY+ – Au début de son mandat actuel, le projet GRAVITY+ du

VLTI est entré en phase A. Impliquant fortement des laboratoires et personnels HRA français, il a fait l'objet d'un suivi par un comité ad hoc mis en place par l'INSU en 2021. L'ASHRA a été sollicitée pour fournir à ce comité une expertise technique sur les choix envisagés, en particulier pour le nouveau système d'optique adaptative GPAO. Un panel de six membres du CS a mené cette évaluation, identifiant des risques concernant la performance de l'OA vis-à-vis des objectifs astrophysiques, la clarté des responsabilités institutionnelles, et le réalisme du calendrier. Des recommandations techniques ont été transmises au comité pour accompagner le projet dans ses premières phases. Quelques années plus tard, GPAO est en place et est une contribution essentielle à l'infrastructure du VLTI.

Suivi du projet SAXO+ – Le projet SAXO+ constitue une évolution majeure de l'instrument SPHERE, avec l'ajout d'un second étage d'optique adaptative rapide fonctionnant dans l'infrarouge, en cascade avec le système SAXO actuel. Ce développement est essentiel pour démontrer, sur le ciel, les technologies nécessaires à la conception de PCS, l'instrument de seconde génération de l'ELT dédié à l'imagerie haut-contraste d'exoplanètes rocheuses dans la zone habitable d'étoiles M proches. Ce projet est soutenu par l'ASHRA depuis le précédent mandat. Porté sous PI-ship français, SAXO+ engage directement la responsabilité de l'INSU, en tant qu'institut coordinateur du projet vis-à-vis de l'ESO. Ce statut renforce la nécessité d'un accompagnement étroit du projet, tant sur le plan technique qu'organisationnel. À ce titre, l'ASHRA a été sollicitée par l'INSU à deux moments clés du développement : en octobre 2023, à la suite d'une redistribution importante des responsabilités au sein du consortium, puis en avril 2024, en préparation de la revue de consolidation menée par l'ESO. Lors de ces deux revues, auxquelles quatre membres du CS ASHRA ont participé, des recommandations fortes ont été formulées, notamment sur les aspects de contractualisation avec l'ESO, de gestion du plan de charge des laboratoires impliqués également dans les instruments ELT, et sur le renforcement des compétences de l'équipe AIT au CRAL. Ces actions visent à sécuriser les étapes critiques du projet et à assurer sa réussite à la hauteur des enjeux scientifiques et stratégiques qu'il représente.

Avis pour la CSAA – Comme les autres AS, l'ASHRA est sollicitée pour avis sur les demandes budgétaires à la CSAA relevant de son périmètre. Le CS a ainsi évalué 6 projets instrumentaux (SPICA-VIS, HiRISE, ANDES, GRAVITY+, SPHERE+, MATISSE) et 5 projets de R&D (XAOMZ, ALOHA MIR, PAPHYRUS, V2HET, HFT-6T) durant son mandat actuel. Le CS a toutefois noté un recul des demandes pour des projets de R&D en HRA depuis 2023, possiblement en lien avec l'arrivée du PEPR Origins, dont plusieurs lots portent sur des développements de technologies en HRA (mesure de front d'onde, contrôle prédictif, calculateurs temps réel, miroirs déformables, composants photoniques, spectrographes compacts, intelligence artificielle). Par ailleurs, l'ASHRA a participé à la réflexion sur le regroupement des SNO, en soulignant certaines articulations (évolutions des besoins de type ANO-2 vers ANO-5) ou synergies (expertises transverses entre instruments et thématiques) entre les SNO de sa communauté.

Représentation de la communauté HRA dans les instances – L'ASHRA a poursuivi son rôle de représentation de la communauté HRA dans diverses instances nationales. Son directeur et sa présidente ont participé en tant qu'invités aux réunions de la CSAA, où ils ont pu chaque année présenter les résultats marquants et défendre les intérêts de sa communauté. Lors de la création de Comité Exoplanète Transverse (CET), deux membres du CS ASHRA ont été désignés pour y siéger et contribuer ainsi aux évaluations de projets, à l'analyse des forces HRA dans le domaine des exoplanètes, à la prospective de cette thématique, et à la réflexion globale sur la place de cette thématique dans le paysage AA. Enfin, chaque année l'ASHRA est invité par la SF2A à désigner une personne de sa communauté pour une présentation en session plénière des Journées de la SF2A, pour laquelle l'ASHRA s'attache à mettre en valeur les dernières recrues de sa communauté.

2.3.4 Recherche et obtention de financements structurants

La structuration des activités de la communauté HRA à l'échelle nationale autour des instruments de première lumière de l'ELT d'une part, et autour des activités de R&D amont pour les prochains instruments, d'autre part, repose en grande partie sur l'obtention de financements d'envergure.

Instruments de première lumière de l'ELT – Compte-tenu des enjeux, la coordination des efforts a été prise en charge directement par l'INSU, via sa Déléguée Scientifique “Instrumentation Optique ESO”, Karine Perraut. Cette action a conduit à l'obtention de l'Equipex+ FC-ELT, un financement structurant à hauteur de 7.77M€ sur la période 2021-2029. Ce programme soutient les développements des instruments MICADO, MORFEO, HARMONI, METIS, et MOSAIC. Il couvre notamment le financement d'équipements pour l'intégration et les tests des instruments, la maintenance des installations cryogéniques et de vide, des CDD pour des ingénieurs · es, certains livrables du projet MOSAIC, ainsi qu'une partie des missions des membres des consortiums ; offrant ainsi un complément à la capacité de financement du budget annuel administré par la CSAA.

R&D pour les futurs instruments SAXO+ et PCS – L'ASHRA a joué un rôle moteur tout au long de son mandat pour structurer les efforts nationaux autour des projets SAXO+ et PCS. Elle a notamment contribué de manière déterminante à la conception du PEPR Origins, un programme stratégique de 53,6 M€ sur six ans financé par l'ANR, centré sur les ruptures technologiques, sociétales et épistémiques liées à la question des origines, de la formation des planètes à l'apparition de la vie. Le volet astrophysique du programme est entièrement consacré aux technologies en Haute Résolution Angulaire, avec un axe dédié à l'imagerie directe d'exoplanètes en lien avec les besoins scientifiques de SAXO+ et de PCS. Grâce à l'action de coordination de l'ASHRA, toutes les équipes de recherche françaises concernées ont pu être intégrées dans ce projet structurant.

Coordination européenne EXOSHARE – L'ASHRA s'est également fortement mobilisée pour fédérer la communauté HRA à l'échelle européenne autour des infrastructures de recherche du VLT, VLTI, et ELT, en réponse aux appels Horizon Europe INFRA-TECH (10 M€ sur 4 ans). En 2022, la direction du CS avait contribué à la proposition OPTICON22, porté par le Royaume-Uni (PI G. Gilmore) dans la continuité de l'ancien réseau OPTICON, en oeuvrant activement pour élargir sa base et impliquer l'ensemble de la communauté HRA française. Suite à l'échec de cette proposition, l'ASHRA, via son directeur, a repris la coordination Européenne du projet en 2023. Une nouvelle mouture, recentrée autour d'un objectif scientifique clair — la caractérisation d'exoplanètes tempérées — avec un appel à participation ouvert, une gouvernance plus inclusive et une structure plus convaincante, a été soumise au printemps 2024. Bien que cette version ait obtenu une évaluation nettement améliorée (environ + 15%), elle n'a pas encore été retenue, et une nouvelle proposition est en cours de préparation pour l'appel 2025.

Une difficulté des appels à projet européens au service des infrastructures est que la commission européenne place de plus en plus d'importance à la formalisation d'un écosystème entre académiques et industriels. Pour l'appel qui vient de sortir en mai 2025, une demande de la commission est que les projets s'appuient systématiquement sur une “roadmap technologique” (impliquant la mise en place d'une réflexion amont) co-construite entre les infrastructures (principalement l'ESO), les partenaires académiques et les industries - ce qui rend la réponse à l'appel d'offre extrêmement compliquée à formuler. On peut s'attendre à ce que cette tendance s'amplifie avec le programme qui suivra Horizon Europe, qui se terminera prochainement. Comme on voit également émerger la même tendance au niveau national avec les appels à projet type PEPR, il faut être vigilant et s'organiser pour travailler en conséquence. Des discussions avec les acteurs des infrastructures ont déjà commencé à l'actif de l'ASHRA.

2.4 Contexte programmatique des 5 prochaines années

2.4.1 Accompagner la mise sur ciel des premiers instruments ELT

Au moment de la rédaction de ce document, la construction de l'ELT est largement avancée, le point symbolique du dépassement des 50% des engagements du projet ayant été franchi en juillet 2023. La communauté se prépare à une première lumière technique au début de 2029 et aux observations par les instruments de première lumière dès la fin 2030. Avec un tel calendrier, le prochain mandat du CS sera fortement marqué par cette période charnière pour les projets d'instruments concernés dans lesquels la communauté HRA française joue un rôle moteur : MICADO, MORFEO, HARMONI et dans une moindre mesure METIS, qui seront alors en majoritairement phase d'AIT/AIV.

Pour ces projets avancés, le rôle de l'accompagnement de l'ASHRA continuera via une participation à leurs comités de suivi annuel respectifs. Un point de vigilance est le rescope de l'instrument HARMONI proposé par l'ESO suite à une réorganisation de la structure projet - y compris un changement de PI (responsabilité temporairement assumée par le Deputy PI, français, cf. Table. 1.1). Ce rescope impacte fortement non seulement les équipes des laboratoires impliqués dans HARMONI mais aussi les équipes de MORFEO et MICADO, qui selon toute vraisemblance vont maintenant devoir partager des interfaces optiques alors que ça n'était pas initialement prévu. Le rôle d'accompagnant neutre de l'ASHRA dans ce contexte permet généralement de faciliter le transfert d'information et d'offrir un espace de discussion qui se veut le plus serein possible, malgré les inévitables tensions que cette situation induit.

Si ces projets sont bien soutenus à la fois financièrement (en synergie avec les ressources obtenues auprès des structures régionales) et (dans la mesure du possible) en termes de ressources humaines par l'INSU/AA, notamment grâce au financement Equipex+ F-CELT, certaines équipes françaises sont également en train de s'engager fortement dans la série des instruments de première génération MO-SAIC et ANDES. L'instrument identifié comme prioritaire par les deux derniers exercices de prospective INSU/AA et dans lequel le PI-ship est français est MOSAIC. Cet instrument est, incidemment, le seul instrument sans véritable enjeu HRA. Une partie de la communauté HRA est par contre en train de se regrouper autour de l'instrument ANDES. Ce spectrographe à haute résolution spectrale est en effet particulièrement pertinent à la thématique des planètes extrasolaires qui motive une part importante de la communauté HRA (cf. Fig. 1.9). Des études préliminaires ont achevé de convaincre l'équipe projet de l'impact scientifique qu'apporterait un mode haut-contraste, pour la caractérisation spectroscopique des atmosphères planétaires et cette idée est en train de s'imposer au sein du consortium projet. Ce mode constituerait une contribution à haute valeur ajoutée pour l'INSU, et serait une nouvelle reconnaissance de l'expertise ITHD forte de la communauté HRA française. Ce projet contribuerait à exacerber la forte pression qui s'exerce sur la communauté HRA française et impose de se poser la question, de la capacité à mener de front plusieurs projets ELT (voir Sec. 2.4.2). Le prochain défi pour ce projet est de sécuriser les fonds nécessaires à sa réalisation, en amont de la tenue d'une funding review organisée par l'ESO.

Plus généralement, avec des instruments ELT en phase de finalisation, il devient critique d'assurer qu'une communauté motivée et qualifiée saura faire bon usage de ce moyen d'observation exceptionnel, en exploitant au mieux l'opportunité offerte par l'accès au temps garanti et/ou en se positionnant sur des larges programmes d'observation. Un chantier important d'animation de la communauté AA se met déjà en place à l'INSU, auquel l'ASHRA contribue, en communiquant auprès des communautés (interventions lors de la SF2A, Exo-ELT, ...) les capacités apportées par l'ELT et son instrumentation aux différents cas astrophysiques les motivant. Cette dynamique est vouée à monter en puissance dans les années à venir et l'ASHRA devra continuer à s'impliquer dans cette démarche.

2.4.2 Coordonner les activités pour l'instrument PCS

L'instrument ELT/PCS mérite une mention à part dans cette discussion du contexte programmatique lié à l'ELT. Cet instrument, encore dans un état amont, se profile comme une transformation du

spectaculaire essai marqué avec l'instrument SPHERE sur le VLT, qui est un des triomphes de la HRA française. La transposition de l'architecture de SPHERE (XAO & solutions ITHD) sur un télescope 5 fois plus grand, pourrait nous mener à la détection/caractérisation depuis le sol des premières planètes rocheuses de type Terrestre (Kasper et al. 2021).

Un kick-off meeting, organisé par l'ESO en septembre 2024 a justifié la mise en route d'un groupe de travail avec des représentants français mandatés pour remplacer la communauté HRA française. L'ASHRA a joué son rôle de conseil et lien avec la communauté en identifiant des représentants rassemblant les expertises sur les cas astrophysiques et l'instrumentation. La gestion de ce groupe par l'ESO a peut être été maladroit, avec une organisation initialement fermée dans laquelle sécuriser des sièges semblait stratégique, pour voir au final une ouverture totale et des représentations au final pas nécessairement au niveau souhaité.

L'ESO dont certains personnels s'impliquent fortement dans le projet, a souhaité mettre en place une pré-phase A, véritablement organisée comme une phase A, dont le but est de réaliser une vision finalement très conforme à ce qui était présenté par Kasper et al. (2021). Sans pouvoir influencer sur ce choix et ce mode de pilotage, on peut regretter une forme de conservatisme dans la vision. Le calendrier de l'instrument, encore lointain et incertain, aurait été compatible avec le lancement d'une vraie étude de pré-phase A, pendant laquelle des concepts différents auraient pu être évalués en parallèle et dont les mérites respectifs auraient pu être comparés pendant une conférence ou un évènement spécial organisé par l'ESO. La structure actuelle de lots de travaux proposée laisse peu la place à une vision alternative tirant avantage d'avancées technologiques et méthodologiques (notamment photonique et IA) qui rafraîchiraient pourtant la ligne directrice actuelle.

Il reste que même dans cette vision conservatrice, cet instrument demeure un véritable défi astrophysique et instrumental. Sa réalisation repose sur des composants technologiques à une échelle qui n'existe pas encore et qui requiert un développement en collaboration avec des industriels. La réalisation d'un miroir déformable avec un grand (> 12000) nombre d'actionneurs (appelé XAO DM) motive ainsi en grande partie la participation de l'ESO en tant que partenaire de la proposition EXOSHARE, dont le pilotage est devenu, dès le début 2023, la responsabilité du directeur de l'ASHRA.

Cette proposition en réponse à un appel INFRA-TECH du programme Horizon Europe, non retenue pour être financée en 2024 (bien que très positivement évaluée), reste d'actualité et va être mise à jour pour être soumise à nouveau à la rentrée 2025. S'il est obtenu, ce financement de ~ 10 M€ contribuera à financer des actions de R&D amont chez plus d'une vingtaine de partenaires en Europe. Une grande partie de ces travaux se destine à répondre aux défis technologiques et méthodologiques de la "roadmap PCS".

2.4.3 Soutenir l'émergence de nouvelles technologies en interférométrie

Après une période incertaine encore au début de notre mandat, le VLTI est aujourd'hui sur une vague montante, bénéficiant encore de l'aura positive du prix Nobel de 2020 reconnaissant les apports de l'interférométrie à la caractérisation du trou noir supermassif au centre de notre Galaxie. Avec de l'optique adaptative de qualité sur les ATs comme les UTs et un suivi de franges qui permet des temps d'intégration longs, l'ambition qui était à l'origine du VLTI est maintenant en train de se réaliser. Cela se traduit par un potentiel d'ouverture à de nouveaux cas astrophysiques - notamment des observations extragalactiques qui connaîtront leur plein essor une fois les UTs équipées d'étoiles guide laser artificielles. Pour assurer que l'utilisation de l'interférométrie optique s'ouvre effectivement à une plus grande communauté, les centres d'expertise VLTI, dont le JMMC, vont continuer de jouer un rôle stratégique.

Entre 2024 et 2025, plusieurs ateliers et moments de discussion prospective ont eu lieu, à l'initiative de l'ASHRA (Choquet et al. 2024) ou de celle d'acteurs de la communauté qui se sont tenus à l'Observatoire de Paris et à l'Observatoire de la Côte d'Azur, ainsi qu'à l'étranger. Ces ateliers de réflexion sont motivés par la question du futur et du post VLTI tel qu'on le connaît aujourd'hui. Deux visions concurrentes

se dessinent : une extension de l'infrastructure actuelle du VLTI, principalement via l'installation d'un 5ème UT, et la création ex-nihilo d'une infrastructure nouvelle, encore à inventer. Incrémentale en étant loin d'être anodine et acceptée par la plus large communauté, l'idée d'un 5ème UT fait encore débat. Si elle est en grande partie captée par le MPE, elle demanderait des ressources financières non triviales et impacterait le fonctionnement de la plate-forme de Paranal, qui parce qu'elle se veut généraliste, n'est pas optimisée pour l'interférométrie. Le remplacement des ATs actuels par des télescopes plus grands de la classe 4 mètres qui seraient exclusivement utilisés pour l'interférométrie semble être une alternative également pertinente. Une nouvelle infrastructure interférométrique ambitieuse - à l'image des réseaux interférométriques sub-millimétriques ALMA et radio SKA reste une autre option qui mérite de s'y pencher. La question est complexe et présente de multiples niveaux :

- Quelle astrophysique pour un interféromètre optique/IR avec une base kilométrique - qui semble être le saut quantitatif majeur à faire pour que la prochaine génération fasse vraiment la différence ? Le focus doit-il être l'imagerie - au même titre que les réseaux ALMA et SKA, ce qui tendrait vers un réseau avec un plus grand nombre d'ouvertures, de diamètre ? Ou faut-il insister sur le potentiel astrométrique de haute précision démontré par GRAVITY qui appelle à une infrastructure avec moins d'ouvertures mais éventuellement de plus grande taille ?
- Quels développements technologiques nécessaires ? Pour un réseau dédié à l'interférométrie, des télescopes de la classe 4m, produits en masse et intégrant de l'optique adaptative (logique d'injection fibrée) semblent être la brique de base dont le coût actuel reste prohibitif. Ce besoin de production pourrait bénéficier d'une synergie concomitante avec le besoin sociétal croissant de communication optique sol-espace et potentiellement sol-sol ? Une telle opportunité économique pourrait avoir un effet comparable à celle qu'a permis le GPU (motivé par les besoins du rendu graphique des jeux vidéo) pour le calcul HPC et le deep learning.
- Quelle approche méthodologique ? Un recombineur optique direct exhaustif pour un grand nombre d'ouvertures (produisant au total $N \times (N - 1)/2$ lignes de bases) devient sans doute trop compliqué à mettre en oeuvre dans le domaine optique et est impacté par une sensibilité dégradée. Des modes de recombinaison partiels ou une approche hiérarchique permettant de recombinaison avec une complexité moindre des mesures interférométriques à des échelles spatiales différentes semble pertinente et devrait permettre à infrastructure égale, de dépasser les limites en sensibilité. La reconstruction optique d'images avec un recombineur à pupille densifiée reste également une proposition pertinente.

On observe en parallèle de cette réflexion stratégique sur le futur des infrastructures, un bouillonnement d'idées et de concepts alternatifs :

- boostée par des progrès technologiques, et portée par des physiciens hors INSU, l'interférométrie d'intensité remonte en puissance et un projet observationnel utilisant les télescopes du Mauna Kea et associant des chercheurs INSU pourrait conduire à une première mesure interférométrique du diamètre de la naine blanche Sirius B.
- Portée au sein de l'INSU cette fois, mais à un niveau amont qui n'a pas encore bénéficié d'un financement de taille, l'interférométrie hétérodyne MIR demeure une voie possible pour l'interférométrie sur des bases kilométriques - apportant une solution à la difficulté des lignes à retard.
- Porté en dehors de l'INSU mais régulièrement soutenu par l'ASHRA depuis 2015, l'interférométrie exploitant des cristaux non-linéaires pour faire de la conversion de fréquence offre encore une approche qui permet de répondre à certaines limitations de l'interférométrie directe dans l'infrarouge.
- La question de l'interférométrie stellaire optique spatiale revient dans le paysage avec les projets LIFE et C4Life (voir Sec. 2.4.4) - et certains des développements en photonique et/ou en lien avec l'instrument visiteur ASGARD/NOTT au VLTI semblent particulièrement pertinents.

L'ASHRA est là pour continuer à accompagner les développements émergents mais le soutien récurrent sur du long terme dans des phases avancées de qualification dépasse notre capacité de financement. Pour s'engager dans l'une de ces voies au delà de la logique de R&D, il faut évaluer le potentiel astrophysique et le comparer à ce que l'approche directe actuelle permet d'accomplir. Quoi qu'il en soit, ici encore, un

succès de la proposition EXOSHARE viendrait alimenter de façon plus conséquente une partie de cette R&D amont.

Le moment semble opportun pour la mise en route d'un accompagnement et une forme de pilotage par l'ASHRA ou par un groupe mandaté par l'ASHRA du bouillonnement de cette communauté capitalisant les succès récents du VLTI. L'objectif serait de mettre au point une feuille de route nationale, répondant aux enjeux actuels des observatoires existant en Europe et aux USA et complétant les apports astrophysiques de l'ELT. On observe en effet que les infrastructures interférométriques portées par un seul établissement ou un consortium resserré côté USA (NPOI, CHARA, MROI) font face aux limites financières et RH, qui ne sont pas à la hauteur des ambitions scientifiques. Le modèle collectif d'une interférométrie Européenne centrée sur l'ESO se distingue par sa réussite. S'inspirer de cette réussite collective pour mener un projet international de grande envergure (type SKA) qui permettra de faire un vrai saut quantitatif et qualitatif.

On note enfin la problématique actuelle de financement de l'EII et des centres d'expertise de l'interférométrie qui contribuent à démocratiser l'utilisation de l'interférométrie optique. Sans disposer des clés à ce niveau de la politique scientifique européenne, il semble important de faire du lobbying auprès de la commission européenne pour que des appels à projets compatibles avec cette forme d'animation scientifique de la communauté, continuent d'être proposés.

2.4.4 Coordonner les activités pour les missions spatiales HWO et LIFE

Dans le domaine spatial, deux missions prospectives avec un coloriage haut-contraste sont présentes occupent le paysage. Côté NASA, se pose la question du prochain grand observatoire optique qui succédera à HST et à JWST. Cet observatoire, dont le nom de développement actuel est HWO (Habitable Worlds Observer), même s'il est ultimement destiné à devenir un observatoire généraliste, est dans sa motivation initiale fortement dimensionné par le cas des exoplanètes. A cet observatoire NASA s'ajoute côté ESA un projet plus prospectif d'interféromètre annulant réminiscent de la dynamique Darwin et appelé LIFE, dimensionné pour être capable de détecter dans le moyen infrarouge des biomarqueurs dans les atmosphères de planètes extrasolaires.

En collaboration avec la proposition LIFE, une proposition à l'ESA, C4Life, a été soumise pour supporter le travail de ces missions long terme sur le plus court terme, avec un objectif de caractériser l'abondance de Carbone dans les zone habitables où se forment les planètes.

La communauté exoplanète et ITHD française semble assez clairement investie dans la dynamique HWO, avec des acteurs représentant le CNES dans les études pilotes HaBEX et LUVOIR (cf. Table 1.1) et/ou servant d'interfaces avec l'ESA. L'IRP [Tarpin](#) qui rassemble des équipes du françaises avec le STsCI offre un cadre de collaboration privilégié. Cette communauté semble convaincue de la forte chance de voir ce projet (bénéficiant de la force de frappe de la NASA) aboutir - alors que la démarche LIFE, inscrite à l'arrachée sur la feuille de route Horizon 2050 de l'ESA, même si elle suscite également beaucoup d'enthousiasme, semble au futur moins certain.

Il semble prématuré cependant de décider de négliger ce deuxième projet au profit du premier. Quelques éléments allant dans ce sens : contre toutes attentes, le contexte de politique intérieure actuelle des Etats-Unis rend la situation des projets NASA beaucoup moins sereine que ce qu'elle était au moment du lancement de JWST. Il est impossible de garantir qu'on pourra maintenir une collaboration scientifique et technique aussi forte qu'elle le mériterait dans l'environnement politique très incertain que nous connaissons aujourd'hui.

De plus, le paysage français semble bien occupé par les perspectives du spectro-polarimètre imageur UV Pollux qui n'est pas l'instrument ITHD qui fait rêver la communauté, même s'il serait caractérisé par des contraintes opérationnelles (notamment de qualité optique) comparables à celles d'un instrument

imageur haute performance. Ainsi en pratique, il semble difficile d'imaginer un PI-ship sur un instrument ITHD sur HWO en France, où est pourtant situé une partie importante des experts mondiaux. Malgré cela, la prise en charge d'un mode d'utilisation haut-contraste dans une bande spectrale complémentaire d'un des autres instruments semble encore envisageable et n'est bien entendu pas à négliger.

Contrastant avec HWO, LIFE qui n'a pas encore bénéficié d'un appel d'air clair directement motivé par l'ESA est à un niveau de maturité moindre. Ce contexte plus incertain mais plus ouvert permet d'envisager des contributions beaucoup plus importantes - et la force de la communauté HRA française reconnue en Europe serait un atout indéniable. L'état de l'art technologique est vraiment différent de ce qu'il était au moment de l'arrêt de la proposition Darwin en 2011. Le sol avec le cophasage actif, et dans pas très longtemps, la mise en oeuvre du nulling, contribue à qualifier beaucoup des technologies et méthodologies qui sont sur le chemin critique de LIFE. Reste la question du domaine de longueur d'onde - pour lequel des solutions optiques restent encore à développer. Un des freins à Darwin était la question du vol en formation et du contrôle fin du cophasage requis pour le nulling. Cette objection semble désormais caduque, à un moment où l'Europe est engagée dans la réalisation de l'interféromètre spatial LISA pour la détection d'ondes gravitationnelles, qui aura une instrumentation beaucoup plus complexe et exigeante en terme de métrologie que celle prévue dans LIFE. Dans ce contexte, prévoir de préparer une mission de moindre envergure et à plus court terme, avec un focus sur un cas scientifique plus accessible, semble pertinent.

On peut noter au passage le rôle stratégique que peut jouer le PEPR Origins qui finance la R&D sur la thématique de la photonique pour l'interférométrie. Les architectures de kernel-nuller généralisant les concepts de Bracewell et étendues un temps par d'autres (Angel et al, etc) qui sont nées dans notre communauté sont en effet le mode de recombinaison préconisé par LIFE ([Hansen et al. 2022](#)).

Les deux dynamiques HWO et LIFE mériteraient d'être poursuivies de concert. Si HWO comme signalé plus haut sera un observatoire généraliste qui fera entre autres de la HRA, un interféromètre spatial comme LIFE serait le premier observatoire spatial 100% HRA. Établir les complémentarités scientifiques entre les deux projets et identifier là où chacun apporte une exclusivité. Pour LIFE, chercher une possible extension de l'objectif astrophysique pour mobiliser une communauté élargie? Un interféromètre IR spatial infrarouge avec une base allant jusqu'à plusieurs centaines de mètres semble un outil puissant pour un grand nombre de cas astrophysiques de la physique stellaire (étoiles jeunes, étoiles évoluées, Céphéides), l'observation des régions internes des disques protoplanétaires. Un recombineur qui ne soit pas nécessairement un nulleur mais un recombineur permettant de faire de la reconstruction d'image peut être à envisager?

2.4.5 Organiser la réflexion pour le prochain observatoire ESO

L'approche de la fin de la construction de l'ELT impose à l'ESO de s'interroger sur la suite de ses activités. Un programme prospectif intitulé "Expanding Horizons" a été mis en place en juillet 2024, dont le but est d'identifier ce que sera sa prochaine infrastructure transformante, qui contribuera à faire progresser la compréhension de la place de l'humanité dans l'Univers dans l'environnement collaboratif qui caractérise son fonctionnement.

Il sera important dans les années à venir de relayer auprès de la communauté (via les ateliers SF2A par exemple), la mise en place de cette démarche prospective et d'encourager les propositions pertinentes à être soumises au process proposé par l'ESO via un site [internet dédié](#). La réflexion prospective en cours autour de l'interférométrie optique évoquée plus haut (voir Sec. 2.4.3) aurait tout intérêt à s'intégrer au cadre de cet exercice.

Chapitre 3

Bilan 2020-2025 de la communauté HRA

3.1 Bilan des recrutements en HRA

Le tableau 3.1 fait le bilan des recrutements sur la période 2020-2025 dans le domaine HRA par les sections 17 et 55 du CNRS, par la section du CNAP. Ne sont comptabilisées que les personnes ayant une activité de recherche sur les thématiques de recherche instrumentale HRA (optique adaptative, interférométrie, imagerie haute dynamique, science de la donnée). Il n’y a eu qu’un recrutement universitaire dans le domaine HRA dans la période (A. Potier, Université Paris Cité/LIRA, ITHD).

Année	CNRS section 17		CNAP		CNRS CID 55	
	Personnes recrutées	Nombre de postes ouverts	Personnes recrutées	Nombre de postes ouverts	Personnes recrutées	Nombre de postes ouverts
2020	F. Cantalloube (LAM, ITHD)	6	-	2	N/A	N/A
2021	-	5	-	5	N/A	N/A
2022	L. Leboulleux (IPAG, ITHD)	6	-	6	O. Flasseur (CRAL, Science des données, ITHD)	5
2023	-	6	-	4	-	4
2024	M. Nowak (LESIA, interférométrie)	6	M. Montargès (LESIA, GRAVITY+)	4	-	4
2025	I. Laginja (Lagrange, ITHD)	5	(en cours)	5	-	2
Total	4	34	1	26	1	15

TABLE 3.1 – Recrutements en HRA sur la dernière mandature (avec l’indication du laboratoire de recrutement ainsi que de l’expertise de la personne recrutée : AO = optique adaptative, ITHD = imagerie à très haute dynamique)

Parité – Sur l’ensemble des sections (recrutement Université Paris Cité inclu), on constate bilan parfaitement paritaire entre les jeunes chercheurs et les jeunes chercheuses en instrumentation. Cet équilibre est remarquable compte-tenu de la relative représentation féminine dans le vivier d’instrumentalistes (35% de femmes parmi les non-titulaires de la communauté HRA, voir Sec. 1.2). Ce bilan des sections, volontaire ou non, envoie un message fort aux jeunes chercheuses instrumentalistes, un domaine identifié comme “technique” et vu, à tort, comme un domaine masculin, préfigurant des biais inconscients. L’ASHRA salue ce bilan des sections, mais souhaite aussi leur envoyer un message fort pour qu’il se maintienne sur la durée afin de tendre au plus vite vers une communauté équilibrée (actuellement 20% de femmes parmi les titulaires). Le CS de l’ASHRA est de son côté proactif sur ce sujet, en promouvant et

en rendant visibles ses chercheuses, tant auprès des filières universitaires en instrumentation (promotion de la R&D en astronomie dans les masters Optique, cf. Sec. 2.3.4) qu'auprès de la communauté dans les projets structurants (40% de femmes dans les responsabilités de WP de la proposition EXOSHARE à l'appel Horizon Europe INFRA-TECH, pilotée par l'ASHRA).

Absence de recrutements CNAP – Il est frappant de constater qu'il n'y a eu aucun recrutement au CNAP en instrumentation HRA sur les 5 dernières années, malgré l'expression de besoins en tâches de service des SNO en lien avec les instruments en cours de développement durant la mandature (ELT, VLT, VLTI). Dans le détail, les recrutements effectués sur des tâches de service ANO-2 pendant cette mandature¹ ont concerné en majorité des missions spatiales (6 recrutements), et seulement un recrutement ANO-2 sur l'ELT (MOSAIC, un chercheur purement observateur). On note également un recrutement sur une tâche de service ANO-2 GRAVITY+, un instrument phare de la communauté HRA, d'un autre chercheur purement observateur. Ce recrutement d'observateurs au détriment d'instrumentalistes sur les SNO de type ANO-2, ajouté au faible nombre de recrutement pour l'ELT et plus largement, pour les instruments à haute résolution optique/IR, est regrettable compte-tenu des expertises développées dans la communauté HRA en accord avec les besoins intenses pour les phases de conception, d'intégration, et de mise sur ciel des instruments. Une raison évoquée par un membre de la section pour cette absence de recrutement serait un vivier de candidats · es instrumentalistes trop faible, les personnes recrutables étant sélectionnées par la Section 17 du CNRS peu avant.

Prédominance de profils ITHD, défaut de profils OA et interférométrie – Un autre point à relever porte sur la thématique d'expertise des personnes recrutées. On note une forte représentation de la thématique imagerie à très haute dynamique (ITHD), une tendance présente depuis une dizaine d'années, sans équivalent pour les thématiques optique adaptative et interférométrie. C'est pourtant sur la période 2020-2025 qu'ont eu lieu les développements des optiques adaptatives des instruments ELT et de GRAVITY+, qui se prolongeront sur la mandature suivante avec l'intégrations de ces OA et leur mise sur ciel à Paranal. En remontant jusqu'en 2014, on ne compte au total que deux recrutements en OA (au CNRS) et un seul en interférométrie (CNRS), toute section confondue.

En retour, on note deux recrutements en OA par l'ONERA (R. Fétick en 2020 et C. Héritier en 2022). Ces deux personnes dédient une partie de leurs activités au développement des OA de l'instrument HARMONI de l'ELT, dans le cadre de la convention AO4ELT passée entre le CNRS-INSU et l'ONERA. Ces deux recrutements constituent à eux seuls plus que les sections CNRS et CNAP réunies sur la mandature sur la thématique Optique Adaptative.

Cette situation est particulièrement préoccupante pour la pérennité des expertises OA et interférométrie au sein des laboratoires de l'INSU, d'autant que les personnes formées dans nos laboratoires sur ces thématiques, tirant les leçons du faible recrutement par les sections, se détournent de plus en plus de la filière académique et ne candidatent plus aux concours après leurs thèses, contribuant à affaiblir le vivier de candidats et de candidates aux concours.

1. Recrutement sur ANO-2 entre 2020 et 2025 : Perseverance/SuperCAM, Solar Orbiter, Ariel, PLATO (×2), SVOM, CTA, SKATE, VISTA/4MOST, GRAVITY+, ELT-MOSAIC.

3.2 Bilan des thèses soutenues et des brevets en HRA

Thèses soutenues en HRA – Un total de 91 thèses ont été soutenues en lien avec la Haute Résolution Angulaire entre 2020 et 2024, auxquelles s’ajoutent 39 thèses en cours, **soit une production de 18 thèses par an**. Parmi celles-ci, on compte 50 thèses purement en instrumentation HRA pour l’astronomie, auxquelles s’ajoutent 22 thèses non-instrumentales mais qui sont entièrement basées sur l’exploitation d’un instrument phare de la communauté HRA (ex. SPHERE, HiRISE, GRAVITY, MATISSE, JWST) –chiffre possiblement sous-estimé, et 19 thèses en instrumentation HRA pour des applications hors-astronomie (Télécommunications, Biomédical, défense). La répartition par année de soutenance donnée dans la figure 3.1.

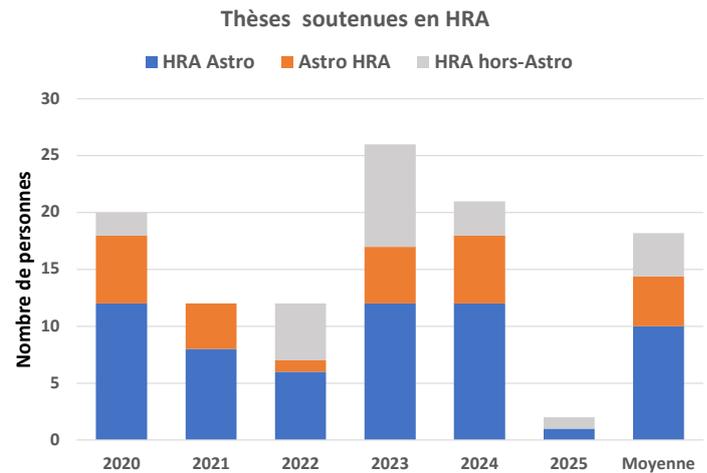


FIGURE 3.1 – Thèses soutenues en HRA entre 2020 et 2025, en instrumentation pour l’astronomie (“HRA Astro”), en exploitation d’instruments HRA (“Astro HRA”), et en instrumentation hors astronomie (“HRA hors-Astro”).

La distribution des thèses est globalement bien répartie entre les principaux laboratoires de recherche (Fig.3.2, gauche). On note certaines spécificités : Une plus forte tendance à l’exploitation astrophysique au LESIA et à l’IPAG, contre une tendance à la R&D en instrumentation HRA plus forte au LAM et à Lagrange. On note aussi la forte dominance à la HRA hors-astronomie de l’ONERA, poussée par les applications pour la défense et les télécommunications. En termes de thématiques de recherche, donnée sur la figure de droite, on trouve une répartition correspondant à l’évolution historique des thématiques HRA, avec une forte implantation des sujets en lien avec l’optique adaptative et l’interférométrie, pour lesquelles on note des évolutions vers des applications nouvelles, hors astronomie pour l’OA, et vers l’exploitation astrophysique pour l’interférométrie. Là encore, la dissonance est frappante entre le grand nombre de doctorants formés en Optique Adaptative et en interférométrie, et l’absence de recrutements sur ces deux thématiques sur les postes CNRS et CNAP (Sec. 3.1).

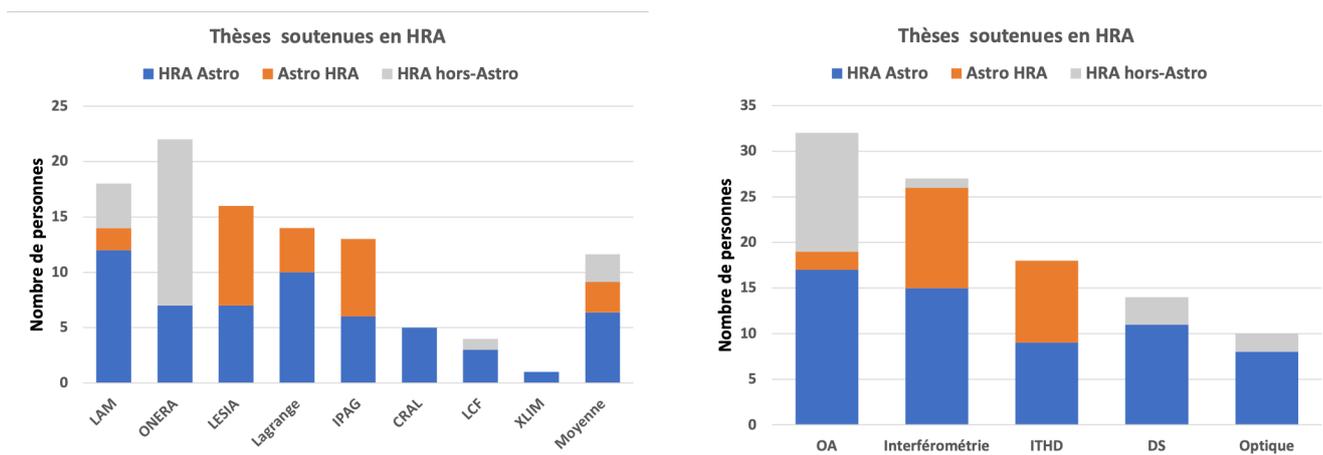


FIGURE 3.2 – Distribution des thèses soutenues en HRA par laboratoire (gauche) et par thématique HRA (droite). La catégorie “Optique” regroupe des sujets de conception optiques ou de technologie avec des applications pour la HRA.

Brevets déposés en HRA – Une autre production scientifique notable de la communauté HRA concerne le dépôt de brevets, qui marque les innovations technologiques de la communauté. Sur la période

du mandat, **7 brevets ont été déposés** par la communauté. Ceux-ci sont listés dans le tableau 3.2. Ils couvrent les sujets les plus prospectifs de notre domaine, sur des sujets variés : interférométrie, analyse de front d’onde, photonique, designs de télescopes.

Année	Porteurs	Laboratoire	Titre du brevet	Pays de dépôt
2020-01	A. Ziad	Lagrange	PSAUM : Moniteur de caractérisation de la turbulence atmosphérique	EU, US
2020-07	A. Spang	Lagrange	Système de contrôle de surfaces d’onde optique par filtre à gradient de densité	FR
2020-09	G. Hein, M. Ferrari, N. Tetaz, W. Jahn, E. Hugot	LAM	Télescope de type Cassegrain à plan focal segmenté	FR, EU, US
2020-12	J.P. Berger, G. Bourdarot	IPAG	Dispositif large bande de mesure de la corrélation croisée de signaux	FR
2021-09	N. Cvetojevic	Lagrange	Photonic spectrum flatteners for laser frequency combs	US
2022-06	M. Langlois, G. Morretto, M. Louprias, C. Graf	CRAL	Dispositif interférométrique Mach-Zehnder	FR, EU, US
2022-10	G. Martin	IPAG	Substrat optique à antennes intégrées et spectromètre le combinant	FR, EU, CN, US

TABLE 3.2 – Liste des brevets déposés au sein de la communauté HRA entre 2020 et 2025.

3.3 Bilan des grands résultats marquants et prix en HRA

Au-delà de la production scientifique quantitative, la communauté HRA a contribué à un certain nombre de résultats particulièrement remarquables entre 2020 et 2025, reconnus parfois par l’attribution de prix à certaines personnalités du domaine.

Résultats marquants – Une liste complète des résultats mis en avant par la communauté HRA est fournie en Annexe 5.2.1, avec le tableau C.1 pour les résultats en instrumentation HRA, et le tableau C.2 pour les résultats astrophysiques ayant mobilisé des instruments à haute résolution angulaire. Parmi les faits saillants, on peut retenir :

- **La mise sur ciel de pas moins de 11 nouveaux instruments et modes d’observation en HRA.** Ces mises en service concernent des instruments du VLT/I – MATISSE (PAC en 2022), les modes GRAVITY-WIDE (2022), GRAV4MAT (2023) et GPAO (2024) –, l’instrument SPICA sur CHARA (2023) et son suiveur de franges SPICA-FT (2024), ainsi que l’instrument visiteur HiRISE (2023). Elles incluent également un mode d’observation du JWST, à savoir le mode coronographique de MIRI (2022), l’optique adaptative de l’instrument solaire THEMIS (2020), intégrant de nouveaux algorithmes de contrôle développés par la communauté HRA, ainsi que deux démonstrateurs R&D mis sur ciel : le VIPA au Mont Wilson et PAPYRUS à l’OHP (2022). Une douzième mise sur ciel est prévue en 2025 avec l’installation en cours de la suite ASGARD, instrument visiteur du VLTI.
- **La revue de conception finale (FDR) de l’instrument MICADO en 2024.** Cette étape décisive pour cet instrument de première lumière de l’ELT, auquel participent activement les équipes françaises, marque le passage en phase de fabrication, en cours jusqu’à la revue d’acceptation européenne (PAE) de l’ESO prévue fin 2027.

- **La livraison de 16 optiques super-polies à la NASA pour le coronographe du *Roman Space Telescope*.** Ces miroirs paraboliques hors axe (8 modèles de vol et 8 de remplacement) ont été fabriqués grâce à une technologie de polissage développée au sein de la communauté HRA française (Roulet et al. 2020), permettant une qualité de surface exceptionnelle, notamment aux fréquences spatiales critiques pour l’imagerie à très haut contraste. Ce partenariat CNES–NASA a permis à la communauté française de rejoindre le *Community Participating Program* (CPP) du coronographe de Roman, et de contribuer activement à la préparation de ses observations.
- **L’obtention du premier “Dark Hole” sur ciel au VLT en 2022, une première mondiale** (Potier et al. 2022). Résultat d’un effort soutenu de R&D et de démonstrations sur bancs optiques (notamment le THD2 du LESIA), cette avancée constitue une étape clé pour l’imagerie d’exoplanètes analogues à celles du Système solaire. Elle renforce les perspectives françaises dans ELT-PCS et dans la mission HWO, où cette approche sera centrale.
- **La découverte de lunes autour d’un astéroïde, rendue possible par une méthode novatrice de déconvolution** (Berdeu et al. 2022). Exploitant astucieusement l’information des données et des approches inverse pour reconstruire une réponse impulsionnelle (PSF) d’une extrême précision, ce résultat illustre la synergie gagnante entre innovations technologiques en HRA et techniques avancées de science des données.
- **L’exploitation scientifique soutenue des instruments GRAVITY et MATISSE du VLTI, qui a ouvert de nouveaux champs d’exploration.** L’énorme gain en sensibilité de ces recombineurs interférométriques — dans l’IR proche pour GRAVITY et l’IR moyen pour MATISSE — a démocratisé l’accès à la très haute résolution angulaire pour les objets du ciel profond. Ces instruments permettent désormais des études dynamiques et spectroscopiques d’exoplanètes, des tests de physique relativiste autour de Sgr A*, ainsi qu’une exploration croissante d’objets extragalactiques. Une liste de résultats scientifiques notables figure en Annexe 5.2.1 dans le tableau C.2.

Ces résultats illustrent la vitalité et la diversité des contributions de la communauté HRA, tant sur le plan instrumental que scientifique. Ils témoignent de la capacité collective à mener à bien des projets complexes, à transférer efficacement les avancées technologiques vers l’observation, et à explorer de nouveaux territoires astrophysiques. En couvrant un large spectre de thématiques — de l’ingénierie optique de pointe à l’astrophysique extragalactique —, ces avancées renforcent non seulement la position de la France dans les grands projets internationaux, mais posent également les fondations des découvertes de demain, à l’ère de l’ELT et des futures missions spatiales.

Prix et distinctions – Forte de ces résultats, la communauté HRA a été distinguée à de nombreuses reprises, avec des prix d’envergure nationale comme internationale, et ce à tout niveau de carrière. Sur la durée du mandat on recense **pas moins de 26 prix ou distinctions**, détaillés dans le tableau 3.3. En particulier, on peut souligner :

- **Cinq médailles CNRS**, récompensant tant des chercheurs et chercheuses en début de carrière (A. Vigan, Bronze) et en milieu de carrière (K. Perraut, Argent), que des ingénieurs (L. Bourgès, S. Lagarde, Cristal). Une médaille d’honneur des cadres du CNRS a également été attribuée à G. Perrin.
- **Deux prix jeunes talents de la Fondation L’Oréal-UNESCO pour les femmes et la science** (L. Leboulleux, N. Skaf), saluant les travaux de R&D de deux jeunes chercheuses prometteuses.
- **Sept prix de thèses**, décernés par des universités, des écoles doctorales, et des organismes comme l’OCA/ESO (Prix Olivier Chesneau), attribués à V. Hocdé, V. Chambouleyron ($\times 2$), M. Nowak, R. Pourcelot, I. Laginja, et T. Santos.
- **Un prix collectif**, le Grand Prix scientifique de la Fondation Charles Defforey de l’Académie des Sciences, attribué à 6 membres de la communauté HRA pour la réalisation de l’instrument SPHERE du VLT (J.L. Beuzit, A. Bocalletti, G. Chauvin, T. Fusco, M. Langlois, D. Mouillet).

Ce palmarès de prix et distinctions reflète la vitalité et le haut niveau d’expertise de la communauté HRA. Il souligne la qualité des travaux menés dans tous les domaines – science, instrumentation, ingénierie – et à toutes les étapes de carrière.

Nom	Prix	Organisme	Année
J.L. Beuzit, A. Bocaletti, G. Chauvin, T. Fusco, M. Langlois, D. Mouillet	Grand Prix scientifique de la Fondation Charles Defforey	Académie des Sciences	2020
E. Hugot	Prix Jean Jerphagnon	Académie des technologies	2020
G. Perrin	Prix Fizeau Lifetime Achievement	OCA et Observatoire Lowell	2020
L. Leboulleux	Prix jeunes talents	L'Oréal-UNESCO pour les femmes et la science	2020
T. Fusco	Prix de l'Excellence Scientifique	Association Aéronautique et Astronautique Française (3AF)	2020
M.T. Velluet	SET Panel Excellence Award Team	OTAN SET 226	2020
F. Martinache	Prix André Lallemand	Académie des Sciences	2021
V. Hocdé	Prix de thèse	ED SFA de l'Université Cote d'Azur	2021
A. Vigan	Médaille de Bronze du CNRS	CNRS	2021
V. Chambouleyron	Prix de thèse	Aix Marseille Université	2021
V. Chambouleyron	Prix de thèse	ED 352 d'Aix Marseille Université	2021
N. Skaf	Prix jeunes talents	L'Oréal-UNESCO pour les femmes et la science	2021
M. Nowak	Prix Olivier Chesneau	OCA / ESO	2021
J.P Berger	Michelson Lifetime Prize	Observatoire Lowell	2022
L. Bourgès	Médaille de Cristal du CNRS	CNRS	2022
G. Perrin	Élu membre	Académie des sciences	2022
P. Kervella (co-lauréat)	Prix scientifique franco-polonais Marie Sklodowska-Curie et Pierre Curie	Académie des sciences et Fondation Polonaise pour la Science	2022
S. Lacour	Michelson Investigator Prize	OCA et Observatoire Lowell	2022
R. Pourcelot	Victoires de la recherche – Prix jeune chercheur	Ville de Nice	2023
I. Laginja	Prix Olivier Chesneau	OCA / ESO	2023
T. Santos	GJI Student Author Award	Geophysical Journal International	2024
K. Perraut	Médaille d'argent du CNRS	CNRS	2024
S. Lagarde	Médaille de cristal du CNRS	CNRS	2024
M.T. Velluet	SET Panel Excellence Award individuel	OTAN SET 226	2024
G. Perrin	Officier	Ordre national du mérite	2025
G. Perrin	Médaille d'honneur des cadres	CNRS	2025

TABLE 3.3 – Liste des 26 prix et distinctions obtenus sur la durée du mandat par des membres de la communauté pour leurs travaux en instrumentation HRA.

3.4 Bilan des grands financements obtenus en HRA

Comme évoqué plus haut, la R&D en instrumentation et le développement de projets instrumentaux nécessite des investissements importants pour développer des plateformes de maturation technologiques ou pour obtenir des composants innovants. La communauté HRA est par conséquent très familière de la recherche de financements et globalement assez efficace dans ses demandes, par la force des choses. Sur la durée du mandat de l'ASHRA, on recense ainsi **46 financements obtenus par des membres de la communauté en PI**, détaillés dans le tableau 3.4. La grande majorité de ces financements concernent des développements ou R&D instrumentaux, avec seulement 8 d'entre eux concernant des applications astrophysiques avec des instruments HRA. En particulier, on recense :

- 6 ERC, tous types confondus (StG, CoG, AdG, SyG),
- 6 lots du PEPR ORIGINS dont les PI sont des personnels HRA,
- Un ensemble de 10 ANR, une ANR JCJC, une ANR ESDIR, et une ANR LabCom,
- 4 financements de la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires (MITI)
- 4 financements du CNES et/ou de l'ESA

Bien que la communauté sollicite également la CSAA de façon ponctuelle, ce taux de succès contribue grandement de façon importante à limiter la pression sur les financements INSU dans un contexte très contraint. Les financements de l'ASHRA sont eux, en général, utilisés en amont de ces projets, pour soutenir l'émergence de nouvelles idées, avant qu'elles soient suffisamment mûres pour un financement national ou européen.

Nom du PI	Type de financement	Nom du projet	Année
B. Neichel	ANR	APPLY	2020
O. Lai (co-PI)	ANR	I2C	2020
M. Ferrari	ANR LabCom	NanoPtoV	2020
A. Carlotti	ERC	EXACT	2020
P. Kervella (co-PI)	ERC	UniverScale	2020
Y. Clénet	MITI 80 Prime	COMMCADO	2020
F. Martinache	MITI 80 Prime	KERNEL	2020
F. Hénaut	Pack Ambition Recherche 2020 - Région	ASONG	2020
Y. Clénet	Région IdF	DEM_NGAO	2020
S. Lacour	ANR	ExoVLTI	2021
M. Langlois	ANR	DDISK	2021
E. Huby	ANR JCJC	FIRST	2021
A. Ziad	Contrat ESA	ANAtOLIA	2021
R. Galicher	Emergence UPCité (I dex)	E-IMUSI	2021
D. Mourard	ERC	ISSP	2021
R. Galicher	iXcore iXlife iXblue	Imagerie biologique	2021
G. Martin	Pack Ambition Recherche 2020 - Région	HIRESPECT	2021
R. Petrov	ANR	AGN_MELBa	2022
A. Meilland	ANR	MASSIF	2022
E. Choquet	ERC	ESCAPE	2022
R. Galicher	MITI	MOACRO	2022
Y. Clénet	Région IdF	PERFCADO	2022
A. Vigan	ANR	MIRAGE	2023
N. Nardetto	ANR	Unlockpfactor	2023
M. Langlois	ANR - PEPR ORIGINS	WP1.1 : XAO-WFS	2023
D. Gratadour	ANR - PEPR ORIGINS	WP1.2 : XAO-RTC	2023
G. Moretto	ANR - PEPR ORIGINS	WP1.3 : FlexSiMirror	2023
F. Martinache	ANR - PEPR ORIGINS	WP1.4 : PHOTONICS	2023
D. Mouillet	ANR - PEPR ORIGINS	WP1.5 : C-SPEC	2023
E. Thiébaud	ANR - PEPR ORIGINS	WP5.1 : UPCA0	2023
T. Paumard	ANR ESDIR	GRAFITY	2023
A. Vigan	PTF CNES	Roman CPP	2023
G. Moretto	EU/EIC Pathfinder	LiveMirror	2023
S. Gousset	IRGA	IHiM-SPOC	2023
R. Galicher	MITI 80 Prime	AMIBE	2023
P. Martinez	R&T CNES	SPEED	2023
P. Baudoz	R&T ESA et CNES	SUPPPPRESS	2023
Y. Clénet	Région IdF	MICADO	2023
M. Langlois	AAP équipement UCBL	XAO4ELT	2024
K. Perraut	ANR	IRYSS	2024
R. Petrov	CSAA INSU	HFT	2024
S. Lacour	ERC	PLANETES	2024
B. Neichel	I-Demo Region	CASSIOPEE	2024
F. Malbet	ANR / UGA IDEXW	FOCUS	2020 et 2025
JP. Berger	Labex FOCUS	Hétérodyne	2021-2024

TABLE 3.4 – Liste des 46 financements décrochés sur la durée du mandat par des membres de la communauté (en PI seulement).

Chapitre 4

Prospective post-2025 en HRA

4.1 Thématique : Optique Adaptative

4.1.1 Contexte de la thématique



FIGURE 4.1 – À gauche : image du banc PAPHYRUS à l’OHP (Fétick et al. 2023). À droite : image du premier banc de la SCAO de MICADO (crédits : Y. Clénet)

La période 2020-2024 a été structurée en grande partie par la conception des premiers systèmes d’OA pour l’ELT pour les instruments MICADO (Clénet et al. 2024) et HARMONI (Bond et al, 2024) ainsi que le développement des analyseurs de surface d’onde laser pour l’instrument MORFEO (Ciliegi et al. 2024). La SCAO MICADO a passé avec succès sa revue de conception finale en 2024 et aborde l’étape de réalisation de l’instrument. La SCAO HARMONI et les modules LGS MORFEO sont eux en préparation des revues de conception finale.

Pour aider à la conception de ces systèmes d’OA, mais aussi dans le cadre de R&D amont de préparation à PCS, la communauté française a mené de nombreuses études numériques (avec une part croissante notable liée aux problématiques d’intelligence artificielle) mais aussi de nombreux prototypages pour valider les nouveaux concepts ou composants (particulièrement l’analyseur pyramide ou le calculateur temps-réel), en laboratoire mais aussi sur ciel avec l’instrument PAPHYRUS (Fétick et al. 2024).

Au-delà des instruments ELT, la communauté française s’est impliquée dans la réalisation de systèmes d’OA de plusieurs instruments : RTC et DM de GPAO (GRAVITY+) au VLTI, et son AIT (Assemblage, Intégration et Tests) en Europe, GNAO pour le télescope Gemini North, RTC de KAPA au télescope Keck I.

Les prochaines années verront la réalisation et la première lumière des premiers systèmes d’optique adaptative de l’ELT mais aussi le lancement formel de l’instrument PCS de l’ELT. Il s’agit d’enjeux majeurs de la communauté française, qui mobilisent un nombre significatif de personnels chercheurs et ingénieurs.

4.1.2 Question 1 : Quels défis à relever pour l'OA sur les ELT ?

Les télescopes géants que sont les ELT constituent un nouveau cadre pour le développement de l'optique adaptative, avec des problématiques propres ou déjà existantes sur la classe des 8-10 mètres mais bien plus prégnantes sur cette classe des 30-40 mètres.

Parmi les défis à relever pour atteindre la performance attendue des systèmes d'OA, on peut citer en premier lieu ceux liés à la complexité de la pupille de ces télescopes, fragmentée en plusieurs miroirs individuels, allant des 7 miroirs de 8,4 mètres du GMT aux 798 miroirs de 1,5 mètres répartis en 6 segments pour l'ELT européen. Cette configuration particulière de pupille introduit une problématique de mesure de pistons différentiels entre les différents segments de la pupille. De nombreuses études menées pour les instruments de première lumière de l'ELT ont abouti à des stratégies efficaces pour la gestion de ces pistons différentiels lorsqu'ils sont d'origine atmosphérique ou interne au système d'OA. Ces stratégies restent à valider pour PCS. Mais surtout, la gestion de ces pistons différentiels quand ils sont créés par le télescope lui-même, en particulier le fameux *low wind effect*, reste une question ouverte. Les premières observations des ELT donneront la mesure du problème.

Un deuxième défi tient à la turbulence propre générée par, et au sein des structures géantes que sont les dômes de ces télescopes (on peut rappeler que le dôme de l'ELT européen est un assemblage métallique de plus de 6000 tonnes culminant à 80 mètres). Ainsi la prise au vent de ces structures génère des aberrations dynamiques d'une amplitude bien supérieure à la turbulence atmosphérique. Si une commande de type prédictive semble bien répondre à la problématique telle que modélisée actuellement, les aberrations qui seront rencontrées par les instruments au sein des dômes des ELT restent encore méconnues, en particulier pour ce qui concerne la turbulence de dôme ou l'échelle externe de la turbulence.

Un autre défi réside dans l'emploi de l'analyseur pyramide et des analyseurs de la nouvelle classe "à Filtrage de Fourier" par la plupart des OA de type SCAO sur les ELT, décidé pour leur très grande sensibilité. Mais la non-linéarité intrinsèque de ces analyseurs les rend plus complexe à gérer, en particulier la gestion des aberrations non communes et sa généralisation rend donc indispensable de maîtriser cette problématique.

Enfin on peut citer un autre défi liée à la performance attendue des systèmes d'OA spécifiquement à l'ELT européen, qui provient de l'architecture choisie pour ce télescope où le premier étage de correction (et le seul pour les SCAO) se trouve au sein même du télescope. Assurer la performance de l'optique adaptative devient alors une responsabilité partagée entre l'instrument et le télescope. Ainsi, au-delà de la responsabilité des instruments, elle résulte aussi d'une bonne maîtrise du front d'onde côté télescope et d'une bonne maîtrise de l'interface logicielle entre instrument et télescope.

Les premiers systèmes d'OA qui seront installés ouvriront ainsi des possibilités d'analyse de ces problématiques, en vue de la préparation des prochains instruments, particulièrement PCS. L'ELT sera aussi un outil unique pour comparer les différentes approches d'implémentation et de types d'OA, puisque présentes sur un même télescope, et ainsi permettre de meilleurs choix pour les instruments futurs.

Le développement de l'ELT européen préfigure aussi une évolution de l'utilisation des instruments et de leur accessibilité à la communauté en vue de réaliser de la recherche expérimentale. Le temps d'accessibilité des instruments sera considérablement réduit. Afin de garantir l'opération de l'observatoire, les instruments doivent aujourd'hui donc être conçus avec une très bonne fiabilité afin de limiter les temps de maintenance. Il s'agit d'un nouveau contexte de développement des instruments qui doivent donc assurer une bonne robustesse et des bonnes performances sur leur durée de vie. Concilier fiabilité et performance est donc l'enjeu principal des équipes dans les prochaines années. Les instruments ELT seront donc encore moins disponibles que les instruments précédentes pour réaliser de la recherche instrumentale. Il est donc crucial de créer, et de développer, des plate-formes de tests avec accès ciel installées sur des télescopes accessibles qui puissent permettre de mener une recherche instrumentale pertinente afin d'améliorer les futurs instruments ELT.

À cela s'ajoute la difficulté d'identifier des nouvelles approches de vérification des systèmes d'optique adaptative développés pour l'ELT. En effet au contraire des systèmes précédemment développés, le principal composant du système, le miroir déformable, est partie intégrante du télescope et non plus du système développé par les consortia. Comment alors vérifier les performances des instruments lors des phases de tests en Europe sans avoir à disposition l'élément coeur de la correction ? Différentes solutions ont été adoptées par les instruments de première lumière (de type jumeau numérique ou d'outils optiques

simulant le télescope) mais il restera à démontrer que ces solutions permettent de limiter les risques au maximum sur les instruments avant leur test sur le télescope. De plus, la calibration des instruments sera un défi, en partie parce que l'ESO a fait le choix de limiter les outils de calibration offerts par le télescope : doit-on calibrer l'instrument sur ciel ? avec quelle périodicité ? Peut-on utiliser des étalonnages basés sur des modèles numériques et ce avec quelle fiabilité ?

La communauté devra aussi anticiper le développement des instruments de seconde génération et probablement développer des composants plus performants et adaptés aux enjeux d'instruments tel que PCS, comme par exemple

- des miroirs déformables à très grand nombre d'actionneurs,
- des calculateurs temps réels conjuguant haute vitesse de boucle et grande bande passante et incluant du contrôle prédictif voire de nouvelles méthodes telles que l'apprentissage profond,
- des senseurs rapides et plus sensibles dans l'infrarouge

Les prochaines années offriront donc des perspectives importantes pour l'OA sur l'ELT puisque les premiers instruments arriveront sur le ciel. Néanmoins, un défi de la communauté française réside sur la disponibilité des expertises avec des instruments arrivant tardivement à l'horizon 2030 alors que de nombreux experts seront proches de la retraite et que le niveau de travail sera significatif pour la communauté. Il sera alors vital d'assurer un recrutement aussi bien chercheurs et ingénieurs pour anticiper les périodes de commissioning des instruments et préparer le futur.

Les activités de R&D joueront un rôle central dans la préparation des concepts d'instrument et la formation des personnels en particulier des étudiants.

4.1.3 Question 2 : Comment étendre les cas d'utilisation de l'OA ?

L'optique adaptative est une brique incontournable de l'instrumentation astronomique à haute résolution angulaire.

Cependant cette thématique instrumentale se nourrit fortement d'applications dans d'autres domaines, ce qui a été vu depuis déjà de nombreuses années avec par exemple les applications défenses (et les développements d'analyseurs infra-rouge), l'imagerie rétinienne. On peut donc mentionner ici une application phare, très liée à l'observation astronomique, qui est l'observation de l'espace proche pour la surveillance, l'imagerie et la caractérisation de satellites artificiels en orbite basse ou la détection d'environnement de satellites géostationnaires. Dans cette application, ce dernier objectif présente de nombreuses similitudes avec la problématique astronomique d'observation à haut contraste illustrant les synergies entre les deux domaines applicatifs. Notons par ailleurs que ces travaux peuvent s'étendre à la détection/caractérisation de géocroiseurs pour la défense planétaire. D'un point de vue instrumental, cette application pose aujourd'hui des questions cruciales pour l'astronomie à très hautes performances de demain. Comment accélérer la correction en OA (défilement rapide de scène), comment améliorer la couverture de ciel (très hautes performances sur étoile laser). Comment atteindre l'imagerie à haut contraste avec une étoile laser ? Le projet PROVIDENCE est un projet de télescope de 2.5m qui sera construit à l'Observatoire de Haute Provence, et qui adressera cette thématique. Il s'agit d'une plateforme de recherche en optique et en instrumentation pour l'imagerie à Haute Résolution Angulaire de l'espace proche.

4.2 Thématique : Imagerie à Haut Contraste

4.2.1 Contexte de la thématique

La communauté HRA Française a un long historique de développements pour l'imagerie à haute dynamique / à haut contraste. Forte de son expertise en optique adaptative et des premières expérimentations menées avec le coronographe de NACO au VLT, elle a assuré en tant que PI le développement de l'instrument SPHERE, mis sur ciel en 2014. SPHERE reste aujourd'hui l'un des imageurs à haut contraste les plus performants et les plus productifs au monde (Beuzit et al. 2019). Parmi ses résultats les plus emblématiques, on peut notamment citer :

- Le relevé SHINE, qui a permis d'établir la démographie des planètes géantes au delà de 10 au (Vigan et al. 2021 ; Chomez et al. 2025),
- La détection directe de plusieurs nouvelles exoplanètes, notamment le système PDS 70 avec ses deux planètes en cours d'accrétion (Keppler et al. 2019), cf. Fig. 4.2 (haut),
- L'étude de nombreux disques protoplanétaires, dont le système complexe AB Aur (Boccaletti et al. 2020, Fig. 4.2, bas).

Grâce à ses performances extrêmes, SPHERE constitue également une plateforme unique pour tester et démontrer sur ciel de nouveaux composants, algorithmes de contrôle, ou méthodes de traitement d'image (ex. Vigan et al. 2019 ; Potier et al. 2022), ainsi que pour analyser les limitations fondamentales du système (ex. Sauvage et al. 2016 ; Vigan et al. 2022). Les travaux pionniers de la communauté sur les coronographes à masque de phase ont par ailleurs permis une contribution notable à l'instrument MIRI du JWST (Boccaletti et al. 2022), ouvrant droit à un temps garanti précieux, et constituant une porte d'entrée stratégique pour les futures applications spatiales de l'imagerie à haut contraste.

L'implication de la communauté HRA dans ces instruments, qui atteignent des contrastes planète/étoile typiques de 10^{-5} à $5-10 \lambda/D$, est un atout majeur pour anticiper et participer au développement de la prochaine génération d'instruments, à savoir PCS sur l'ELT, et la mission spatiale HWO. L'objectif scientifique central de ces futurs observatoires sera la détection et la caractérisation de planètes analogues à celles du Système solaire, en particulier des planètes rocheuses tempérées — les fameuses exoTerres — afin d'étudier leur habitabilité et rechercher d'éventuels biomarqueurs. Atteindre de tels objectifs nécessitera de repousser considérablement les limites instrumentales actuelles, avec des contrastes de l'ordre de 10^{-10} en lumière réfléchiée dans le visible, soit des performances 4 à 5 ordres de grandeur supérieures à celles des instruments haut-contraste existants.

Répondre à ce défi ambitieux appelle une stratégie multidimensionnelle, combinant l'expérience sur les instruments actuels, une recherche technologique et méthodologique ciblée, et une implication forte dans la préparation des futures missions.

4.2.2 Question 3 : Comment optimiser les futurs imageurs d'exoTerres ?

Développer des instruments capables d'atteindre des performances aussi extrêmes nécessite des avancées à plusieurs niveaux, pour lesquels la communauté HRA est déjà partiellement engagée. Nous présentons ici trois axes importants vers cet objectif.

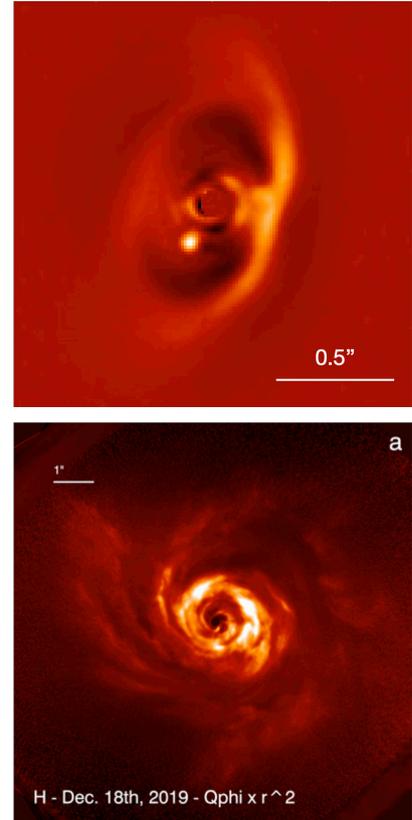


FIGURE 4.2 – Les systèmes PDS 70 (haut) et AB Auriga (bas), vus par l'instrument SPHERE.

Gagner de l'expérience sur les instruments à la pointe du domaine

Forte de son héritage en imagerie haut-contraste, d'une part, et motivée par les forts enjeux astrophysiques d'autre part, la communauté HRA française est déjà très investie dans plusieurs projets en cours de développement :

- **Développement de SAXO+** : mené par la France, cet upgrade de l'optique adaptative extrême de SPHERE est particulièrement stratégique. Installant un second étage de correction fonctionnant de l'IR jusqu'à 3 kHz, il permettra de gagner jusqu'à un ordre de grandeur en contraste sur les sources brillantes. Un système de contrôle similaire étant prévu pour PCS, maîtriser le fonctionnement sur ciel de SAXO+ est fondamental. En tant que démonstrateur technologique, il offre de plus une plateforme unique pour tester des algorithmes de contrôle alternatifs en préparation pour PCS.
- **Implication dans les instruments de première lumière de l'ELT** : tous équipés d'un mode d'imagerie haut-contraste, les instruments MICADO, METIS, HARMONI et ANDES constituent une opportunité clé pour diagnostiquer les performances du télescope et affiner les technologies nécessaires à PCS. Bien que l'expérience acquise avec le VLT permette déjà d'anticiper certaines difficultés, il reste encore beaucoup d'inconnues sur le comportement d'un système OA sur une structure de 39 m, et leur impact sur les modes haut-contraste en aval. Participer activement à ces instruments permettra de caractériser les limitations spécifiques du haut-contraste sur l'ELT, et d'en déduire les solutions optimales pour PCS.
- **Participation au programme du Coronographe du *Roman Space Telescope*** : Démonstrateur technologique pour HWO, cet instrument déploiera pour la première fois dans l'espace des miroirs déformables et des détecteurs EMCCD. Il permettra de tester des algorithmes de *Dark Zone* dans des régimes de contraste inexplorés, de l'ordre de 10^{-9} dans une zone de $3-9 \lambda/D$, dans le visible. L'enjeu est ici d'explorer les performances réelles de ces approches en environnement spatial.

Ces instruments permettront d'ouvrir de nouveaux espaces de paramètres sur les systèmes extrasolaires, allant de la démographie des planètes géantes jeunes à l'intérieur de 10 ua (SAXO+) à la caractérisation atmosphérique d'objets plus froids et matures en lumière réfléchi (Roman), en passant par la caractérisation atmosphérique détaillée des planètes géantes avec l'ELT. L'expérience accumulée sur ces systèmes à la frontière des capacités actuelles sera cruciale pour préparer les prochains imageurs d'exoplanètes.

Développer la R&D et favoriser les approches systèmes

L'imagerie haut-contraste est un domaine historiquement très actif en France, porteur de développements technologiques avancés sur un large éventail de composantes instrumentales. La communauté HRA dispose ainsi d'une expertise reconnue sur des briques technologiques clés : optiques de haute qualité, conception de coronographes innovants, senseurs de front d'onde, algorithmes de contrôle en boucle fermée, injection fibrée, spectrographes compacts, ou encore traitement du signal avancé.

Au-delà de ces développements spécifiques, un enjeu crucial pour le développement de PCS et HWO réside dans la capacité à optimiser le système instrumental dans son ensemble, plutôt que d'améliorer isolément chaque sous-système. Cette approche système vise à atteindre un objectif global de performance (typiquement, les meilleures limites en contraste, ou encore le meilleur *yield* de planètes), en considérant les interactions et les compromis possibles entre sous-systèmes. Une telle stratégie permet par exemple de relaxer les contraintes sur un sous-système critique, en tirant parti des performances ou de la flexibilité d'un autre (e.g., compromis transmission du coronographe vs temps d'exposition, stabilité picométrique vs. post-traitement...). Cette approche conjointe composant–contrôle–traitement est encore peu explorée, mais elle sera indispensable pour concevoir des instruments capables d'atteindre les contrastes extrêmes nécessaires à la détection d'exoTerres, 4 ordres de grandeurs au delà des performances actuelles. Elle repose sur une combinaison étroite de simulations *end-to-end*, d'optimisation des architectures, et de métriques de performance axées sur la science (contraste, transmission planétaire, *completeness*, rendement de planètes, etc.). Dans ce contexte, les investissements déjà réalisés pour le développement des bancs optiques THD2 et SPEED — reproduisant chacun un système haut-contraste complet, en environnement spatial pour le premier et ELT pour le second — devraient prendre toute leur importance.

Parmi les axes de R&D actuellement explorés en France, qui illustrent cette dynamique, on note :

- **Composants innovants** : surfaces optiques à rugosité picométrique, masques coronographiques passivement robustes aux erreurs de fabrication ou d’alignement, coronographes à réponse adaptative, masques hybrides pour la mesure de front d’onde et la réjection stellaire, composants photoniques pour la mesure du front d’onde. . .
- **Contrôle actif** : systèmes de contrôle à deux étages, algorithmes de contrôle prédictif, contrôle de front d’onde en plan focal pour la création et la maintenance de *dark zones*, . . .
- **Couplage avec la spectroscopie** : développement de spectrographes compactes, optimisation de l’injection à l’aveugle dans une fibre, création de mini-dark holes au niveau de la fibre. . .
- **Traitement du signal** : optimisation des stratégies d’observation, utilisation des données télémétriques, exploitation des signatures spectrales par corrélation croisée ou *molecular mapping*
- **Optimisation système** : simulation de performance *end-to-end* intégrant des métriques de rendement scientifique (ex., nombre de planètes détectables), choix optimal des bandes spectrales, prise en compte des contraintes de stabilité et de temps d’observation. . .

Toutes ces idées démontrent le fort dynamisme exploratif de la communauté Haut-Contraste française. Il est important de soutenir ce foisonnement, en favorisant les nouvelles initiatives de R&D, les tests sur bancs, et les démonstrations sur le ciel, tout en encourageant les collaborations entre équipes. Le moment est idéal pour explorer ces différentes pistes, identifier et maturer les plus prometteuses, avant de les proposer pour les futurs instruments.

S’impliquer dans la préparation des prochains instruments

L’implication de la communauté HRA dans le développement de SPHERE, MIRI et des instruments en cours SAXO+ et première lumière de l’ELT, a permis d’acquérir une expertise précieuse pour contribuer aux futurs grands projets que sont PCS (ELT) et HWO (NASA). L’année 2024 a cependant marqué un tournant avec le lancement des premières études de concept pour ces deux instruments. Bien que ce calendrier ait paru prématuré aux yeux de beaucoup dans le cas de PCS, compte-tenu des développements en cours de SAXO+ et des instruments de première lumière de l’ELT, la communauté française a répondu présente et s’est engagée dans ces initiatives stratégiques.

Les cinq années à venir seront déterminantes pour définir les choix des technologies et des architectures de ces instruments. Il est donc crucial de maintenir, voire renforcer, l’implication française dans ces études amont, et encourager l’intégration de nos technologies clés dans ces systèmes en soutenant les activités de R&D, le développement de prototypes en laboratoire, et les démonstrations sur ciel. Ces activités sont indispensables pour peser sur les choix techniques et garantir que les solutions développées soient intègrent des technologies françaises, et ainsi contribuer à la détection et de caractérisation d’exoTerres.

Points de vigilance

Modèles réalistes d’atmosphères d’exoTerres – L’optimisation des futurs instruments par des approches système nécessitent des simulations réalistes, capables de relier les performances instrumentales aux rendements scientifiques. Or, les modèles d’atmosphères d’exoTerres, en particulier en réflexion dans le visible, restent encore très incertains. Ce manque complique le dimensionnement des instruments par les approches système. Ce problème a été clairement soulevé lors des ateliers EXO-ELT2 et HCI-Europe, qui ont également souligné le besoin d’une collaboration plus étroite entre modélisateurs et instrumentalistes, afin de décider des choix techniques sur la base d’hypothèses astrophysiques robustes.

Coordination des efforts en imagerie spatiale – Alors que la France joue un rôle actif dans plusieurs initiatives liées à HWO, il n’existe à ce jour aucune coordination formelle à l’échelle nationale, à l’inverse de l’implication dans PCS, coordonnée par l’INSU. Les contributions actuelles s’appuient sur des réseaux informels ou des groupes en cours de structuration (HALO, HCI-Europe), mais dont la légitimité reste limitée. Dans ce contexte, l’ASHRA, forte de son soutien par le CNES, pourrait prendre un rôle plus actif pour structurer ou coordonner les activités au niveau national, en fédérant les initiatives existantes, et en apportant une légitimité dans les discussions avec les agences et partenaires internationaux.



FIGURE 4.3 – L’ELT en Mars 2025, au sommet du mont Armazones (Chili). Le VLT est visible au milieu en arrière-plan, au sommet du mont Paranal (à 22km à vol d’oiseau). Noter l’échelle, avec un groupe de visiteurs au pied de l’ELT (en vestes jaunes), et un semi-remorque garé à droite au pied des grues.

4.3 Thématique : Interférométrie

4.3.1 Contexte de la thématique

Avec le VLTI en Europe et CHARA sur le territoire américain, la communauté de l’interférométrie optique dispose aujourd’hui d’infrastructures fonctionnelles qui font parmi les moyens d’observation HRA utilisés par une communauté croissante. Le VLTI, bénéficiant du cadre avantageux de développement communautaire permis par l’ESO, est en train de connaître une nouvelle upgrade dans le cadre du projet GRAVITY+. Le VLTI est indéniablement l’infrastructure la plus mature, qui permet en routine, la recombinaison interférométrique de 4 faisceaux cophasés après correction par optique adaptative. Les instruments de seconde génération : MATISSE et GRAVITY, couvrent ensemble des domaines de longueurs d’onde complémentaires, permettant de sonder une grande diversité d’objets astrophysiques - de l’environnement proche des étoiles du voisinage solaire aux sources noyaux actifs de galaxie, du proche au moyen infrarouge. CHARA disposant de moyens bien moindres, permet malgré tout la recombinaison de jusqu’à 6 faisceaux, notamment dans le visible grâce à l’instrument SPICA émanant de la communauté HRA française.

4.3.2 Question 4 : Vers une interférométrie optique sur des bases kilométriques ?

Plusieurs initiatives visant à étendre les réseaux interférométriques du VLTI et de CHARA sont actuellement en cours de réalisation ou à l’étude, dans le but d’améliorer la résolution angulaire et d’atteindre des valeurs inférieures à $500 \mu\text{as}$.

Au sein du réseau CHARA, l’installation d’un septième télescope est en cours (Scott et al., 2024). Ce télescope, conçu pour être mobile, permettra l’exploitation de bases courtes d’environ 17 m ainsi que d’une base longue atteignant approximativement 600 m, soit une extension d’un facteur deux par rapport à la base maximale actuellement disponible. Par ailleurs, un troisième emplacement est à l’étude afin d’étendre la ligne de base au-delà de 1 km. Les applications scientifiques de cette extension concernent principalement la physique stellaire, notamment l’imagerie de surface des étoiles et la caractérisation de leurs paramètres fondamentaux.

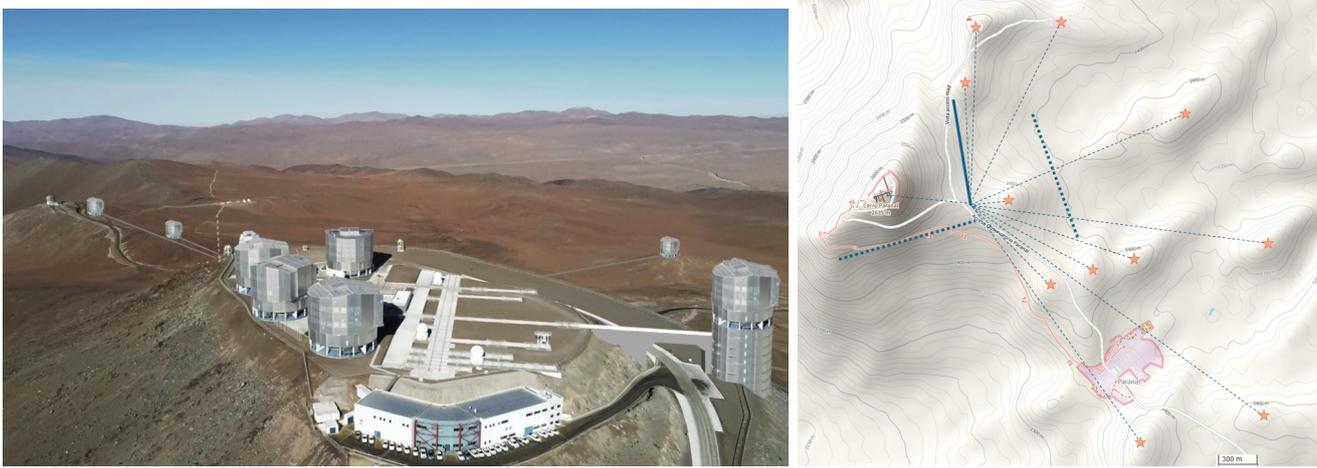


FIGURE 4.4 – Illustrations sur une possible extension du VLTI. A gauche : vue d'artiste montrant un réseau au VLTI comprenant des bases hectométriques et kilométriques. A droite : Sites possibles pour des stations (étoiles) et des bâtiments de lignes à retard (segments continu ou pointillés), avec des vues directes des stations vers un bâtiment de lignes à retard représentées en pointillés. Publié dans [Millour et al. \(2024\)](#).

Au VLTI, deux propositions ont été formulées en 2024. La première consiste à développer un cinquième télescope UT (Lacour et al., 2025), positionné au sud des quatre UT existants à une distance excédant 200 m. La seconde proposition, plus ambitieuse (Bourdarot & Eisenhauer, 2024), vise à établir un réseau interférométrique étendu intégrant les quatre UT, le télescope VISTA, ainsi que deux nouveaux télescopes, permettant ainsi d'atteindre des bases comprises entre 2 et 5 km (illustration de ces deux idées en Figure 4.4). Cette configuration offrirait des perspectives scientifiques novatrices, telles que l'imagerie de trous noirs binaires supermassifs, la résolution de la région d'accrétion de Sgr A*, ainsi que l'étude détaillée des surfaces de naines brunes et d'exoplanètes. L'atteinte des objectifs scientifiques de ces réseaux interférométriques de grande envergure nécessitera la résolution de plusieurs défis technologiques majeurs, parmi lesquels :

- La correction des délais optiques impliquant des lignes à retard de plusieurs kilomètres, se déplaçant à une vitesse de 1 m/s.
- Le transport des faisceaux optiques vers le laboratoire focal, par l'intermédiaire de fibres optiques, de la propagation libre avec optique adaptative, ou de tubes sous vide.
- La correction de la dispersion longitudinale (si propagation dans l'air).
- L'optimisation du double champ afin d'allonger les temps d'intégration et de permettre l'observation d'objets faibles.
- L'optimisation du placement des stations (télescopes) pour bénéficier de la meilleure couverture (u,v) afin de faire bénéficier tous les domaines astrophysiques (et pas seulement ceux mis en avant) identifiés de cette extension

En parallèle de ces projets d'extension, des recherches sont menées sur l'interférométrie d'intensité et l'interférométrie hétérodyne. Ces techniques permettent notamment de contourner les contraintes liées au transport des faisceaux et à la correction des délais, ce qui les rend particulièrement adaptées aux réseaux interférométriques de grande échelle (plusieurs kilomètres). Cependant, ces techniques ne s'adaptent pas bien à tout le domaine spectral entre le visible et l'infrarouge moyen et elles demeurent limitées par des contraintes de sensibilité qui doivent encore être surmontées pour une mise en œuvre efficace.

4.3.3 Question 5 : Quelles technologies pour optimiser l'interférométrie à haute sensibilité ?

Avec respectivement quatre (pour le VLTI) et six (pour le réseau CHARA) ouvertures simultanément exploitables aujourd'hui, les interféromètres optiques sont encore loin de disposer de la puissance d'un

ALMA optique et ont par conséquent une capacité d'imagerie (complexité & contraste des sources) encore très contrainte.

Le mode actuel de recombinaison direct (homodyne) par paire des interféromètres optiques requiert une infrastructure importante avec des lignes à retard et un recombineur dont la complexité est proportionnelle au carré du nombre de télescopes concernés. La complexité de l'infrastructure nécessaire se traduit par une transmission faible (de l'ordre du pourcent) qui limite fortement leur potentiel de sensibilité. Même en prenant en compte cette transmission, les recombineurs actuels n'atteignent pas la sensibilité théorique induite par le bruit de photon uniquement. Une discussion de la sensibilité de l'interférométrie se doit de considérer deux types de sensibilités distinctes :

La magnitude limite de la cible au dessus de laquelle il n'est pas possible d'obtenir des franges, elle est principalement liée à la magnitude limite du suivi de frange et aux performances de l'optique adaptative.

Le contraste ou la dynamique atteignable entre deux objets du champ interférométrique (ou entre deux champs en mode double champ) qui est en partie dû aux incertitudes sur les mesures, dans lesquelles intervient également le bruit de photon.

Le moyen qui semble le plus évident pour améliorer la sensibilité des interféromètres est d'augmenter le flux collecté. D'une part en augmentant le flux arrivant jusqu'au recombineur et d'autre part en améliorant le couplage avec l'instrument proprement dit. On peut améliorer la transmission de l'infrastructure grâce à des revêtements optimisés (coatings), à l'utilisation de lignes à retard sous vide, ou encore en simplifiant le design optique pour réduire les pertes. On peut également augmenter la surface collectrice, en jouant sur le nombre ou la taille des télescopes, de façon à capter davantage de lumière. En corrigeant les effets de la turbulence atmosphérique, l'optique adaptative joue également un rôle clé maximisant le flux arrivant jusqu'à l'instrument comme le montre le gain en sensibilité obtenu avec les OA installés au VLTI dans le cadre de l'upgrade GRAVITY+ de l'infrastructure.

Ensuite, l'efficacité de l'injection du flux lumineux dans l'interféromètre peut être optimisée par un deuxième étage d'optique adaptative, permettant un meilleur contrôle du front d'onde au niveau du couplage. Cela permettra également de mettre en place des techniques de "dark hole" et de nulling permettant de supprimer le signal de l'étoile centrale pour détecter plus facilement des objets faibles à proximité. L'utilisation de lanternes photoniques offre une interface performante entre le faisceau issu du télescope et l'optique guidée. Par ailleurs, le développement de circuits photoniques à faibles pertes, ainsi que de circuits photoniques actifs, constitue une voie prometteuse pour maximiser la transmission et le contrôle du signal dans les systèmes interférométriques.

Toute amélioration de la transmission permet d'améliorer "2 fois" la sensibilité : une première fois en améliorant le rapport signal à bruit sur le détecteur scientifique et une seconde fois en augmentant le flux disponible pour le suivi de franges, enjeu crucial pour la stabilité des observations. Dans ce domaine, des algorithmes avancés, capables de prédire l'évolution des différences de chemin optique (OPD) entre les faisceaux (en utilisant entre autres la télémétrie des systèmes d'optique adaptative) vont permettre un suivi plus robuste. Le contrôle actif des vibrations mécaniques contribuera également à la stabilité du signal. Par ailleurs, de nouveaux types de détecteurs, comme les MKIDS (Microwave Kinetic Inductance Detectors), semblent particulièrement bien adaptés aux besoins spécifiques du suivi de franges grâce à leur sensibilité, leur rapidité et leur capacité à discriminer spectralement les photons.

Cette amélioration du suivi de frange est cruciale pour améliorer le contraste des observations en permettant d'augmenter le temps d'intégration et ainsi d'accumuler davantage de signal utile. Dans l'infrarouge, la sensibilité est également impactée par le fond thermique du ciel et du système optique complet. Réduire ce fond, notamment par l'utilisation du vide, du cryogénie, ou d'écrans thermiques, contribuera encore à abaisser le bruit de fond. L'amélioration des détecteurs — avec un haut rendement quantique, un faible bruit, et de grands formats adaptés à la spectro-interférométrie visible et infrarouge — permettra d'une part de maximiser le nombre de photons effectivement détectés et d'autre part d'améliorer la précision des mesures de phase grâce à une meilleure résolution spectrale.

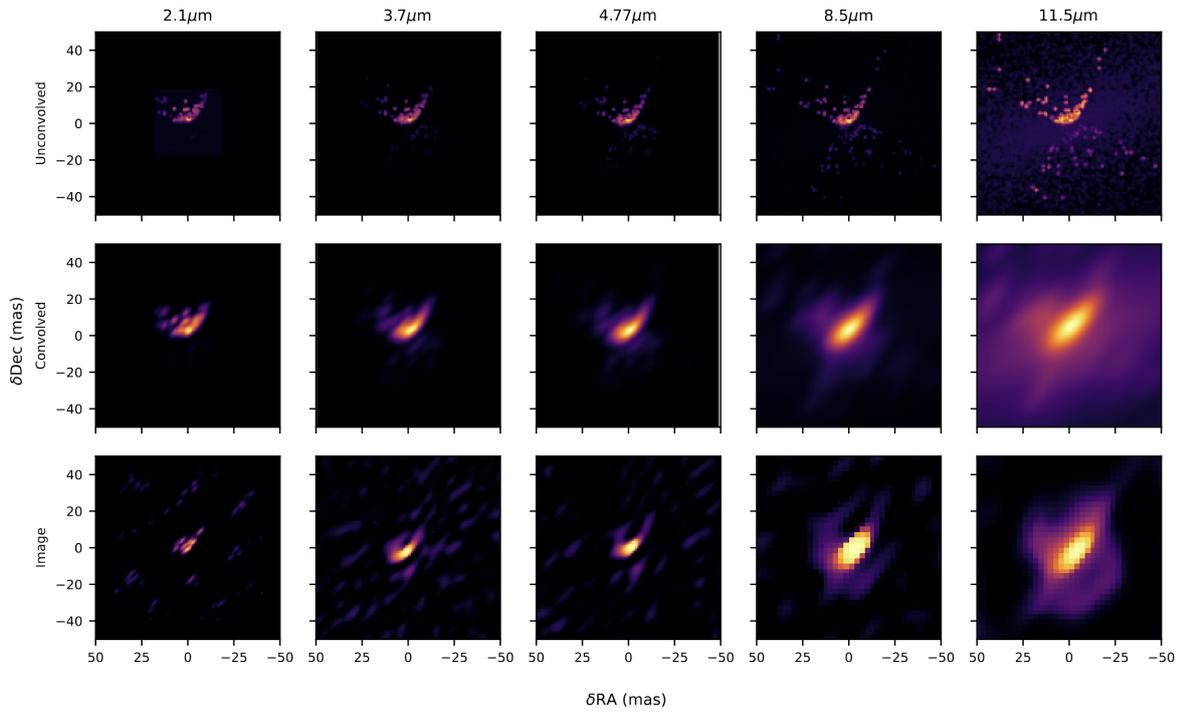


FIGURE 4.5 – La puissance d’utiliser une large bande spectrale illustrée (Leftley et al. 2024). La ligne du bas montre des images interférométriques reconstruites dans deux travaux aux conclusions contradictoires (GRAVITY Collaboration et al. 2020 ; Gámez Rosas et al. 2022). Les deux lignes du haut montrent un modèle physique qui réconcilie les deux jeux de données GRAVITY et MATISSE. Seule la combinaison des deux bandes spectrales permet de comprendre la véritable géométrie de l’AGN.

4.3.4 Question 6 : Comment étendre au mieux l’interférométrie à de nouvelles bandes spectrales ?

La question des bandes spectrales (i.e. de la couverture spectrale) en interférométrie est centrale pour l’interprétation des observations. Un exemple récent concerne l’AGN emblématique NGC1068, dont des images obtenues en bande K ($2.2\mu\text{m}$) avec GRAVITY ont conduit initialement à contredire le modèle unifié des AGN (GRAVITY Collaboration et al. 2020 ; Antonucci 1993). Une deuxième image, qui se base sur des données obtenues dans une autre bande spectrale (L et N - $3\text{-}13\mu\text{m}$) avec MATISSE confirme au contraire ce modèle unifié (Gámez Rosas et al. 2022). Une modélisation conjointe des deux sets de données existants (GRAVITY + MATISSE) confirme le deuxième résultat et démontre l’importance d’utiliser une large bande spectrale pour pouvoir correctement interpréter les observations interférométriques (Leftley et al. 2024), voir Figure 4.5)

Dans ce contexte, il est intéressant de faire une liste (non exhaustive) des bandes spectrales accessibles à l’interférométrie et des instruments ou projets pour les exploiter :

- UBV : Interférométrie d’intensité (prospective),
- R : SPICA (CHARA), iVis (VLTI, prospective),
- IYJ : 2 projets ERC (ASGAARD/BIFROST et PLANETES) sur le VLTI,
- H : PIONIER (VLTI), MIRCX (CHARA),
- K : AMBER (legacy), GRAVITY, GRAVITY+ (VLTI), MYSTIC (CHARA),
- LMN : MIDI (legacy), MATISSE (VLTI), extension MATISSE hors axe (MATISSE wide), Conversion de fréquence (CHARA, prospective), ASGAARD/NOTT (VLTI),
- Q : Extension MATISSE (VLTI) Hétérodyne (prospective).

On voit ici que la plupart des bandes de transparence atmosphériques sont exploitées, un même objet, s’il est suffisamment brillant et placé correctement dans le Ciel, pouvant potentiellement être observé dès à présent en bandes R (CHARA), H (CHARA et VLTI), K (CHARA et VLTI), et LMN (VLTI).

On peut noter qu'il existe trois manques (dont l'un va être comblé bientôt) sur le VLTI : le visible (bande UBVR), la bande J (qui sera bientôt couverte par deux instruments visiteurs BIFROST et PLANETES), et l'infrarouge thermique (bande Q), tandis qu'il manque les bandes J et LMNQ sur CHARA.

On note aussi l'intérêt de développer à nouveau l'interférométrie d'intensité pour ouvrir les très courtes longueurs d'ondes (mais avec une forte limite sur les objets observables, restreints aux étoiles chaudes).

4.4 Thématique : Science des données

Pour les méthodes de mesure et de contrôle du front d'onde comme pour les technique de traitement d'images, notre discipline n'a pas attendu l'IA pour concevoir des méthodes de pointe assistées par ordinateur. Notre thématique compte de nombreux chercheurs dans le domaines de l'automatique, des problèmes inverses, et du traitement du signal, qui traitent de ces questions depuis des décennies. L'IA est une autre façon d'étendre la résolution de problèmes déjà résolus dans des cas simples (linéaires) mais n'apporte pas le même niveau de bouleversement que la production d'écrits par les outils d'IA générative par exemple.

Dès les années 90, [Angel et al. \(1990\)](#) et [Sandler et al. \(1991\)](#) montrent que l'utilisation de réseaux neuronaux (pas encore convolutifs) permet de reconstruire une surface d'onde d'abord en simulation puis en comparant avec les résultats sur ciel d'un analyseur de surface d'once classique. Ces auteurs pointent l'intérêt du *deep learning* pour approximer des problèmes non-linéaires, comme celui de la mesure de la phase en plan focal.

On observe sur la période d'exercice une généralisation de l'utilisation de techniques d'Apprentissage Automatique (AA) et d'Intelligence Artificielle (IA) (réseaux de neurones en particulier), notamment dans les domaines suivants :

- l'extension du domaine de linéarité des analyseurs de front d'onde classiques [Allan et al. \(2020\)](#); [Weinberger et al. \(2022\)](#), ou de l'analyse de front d'onde dans le plan focal [Orban de Xivry et al. \(2021\)](#); [Quesnel et al. \(2022\)](#); [Gutierrez et al. \(2024\)](#); [Dumont et al. \(2024\)](#),
- le contrôle-commande de front d'onde pour l'optique adaptative [Nousiainen et al. \(2022\)](#),
- la modélisation de la PSF ([Jia et al. 2020](#)),
- la réduction des effets des speckles en imagerie
- la détection et l'extraction du signal planétaire (en imagerie à haut contraste) [Flasseur et al. \(2024\)](#); [Cantero et al. \(2023\)](#),
- la déconvolution, et la reconstruction d'image en interférométrie,
- le débruitage ou le suivi de frange en interférométrie,
- le démélange d'images ou de spectres exoplanétaires,
- la programmation intelligente (smart scheduling) d'observations à haut contraste visant à optimiser le choix des cibles en fonction de plusieurs critères (coordonnées, importance scientifique, conditions atmosphériques et météorologiques,...).

Une partie de ces sujets sont prévus d'être explorés avec le WP.5 du PEPR Origins.

4.4.1 Question 7 : Quel gains et méthodes explorer avec l'IA en HRA ?

Prospective : Aspects émergents

- L'importance scientifique et le volume des données multimodales issues d'instruments différents sont toujours croissants (données spatio-spectrales issues d'instruments à des résolution différentes par exemple). La multimodalité pose des problèmes de fusion et/ou de super-résolution pour lesquels des techniques d'AA/IA vont probablement se développer et peut-être se généraliser.
- Un axe émergent qui prend déjà corps concerne l'IA aidée par la physique, où l'entraînement n'est pas envisagé de façon purement aveugle en force brute : on essaie d'injecter dans l'architecture même des réseaux une modélisation physique du problème afin de guider de façon éclairée l'apprentissage.
- Du côté de l'enseignement actuel dispensé en HRA, qui alimentera le domaine en chercheurs d'ici quelques années, la formation à l'IA reste peu approfondie dans les masters d'astronomie¹. Les parcours ne sont pas vraiment multidisciplinaires. Une recommandation émise par le Comité Transverse Exoplanètes (Prospective 2024-2029) est d'évoluer vers des parcours intégrant d'avantage l'IA.

1. L'histoire de Sciences non plus d'ailleurs ; elle sensibiliserait pourtant les jeunes chercheurs aux aspects éthiques de la méthode scientifique.

- Le domaine de l’ “IA de confiance” recouvre l’IA éthique, fiable, transparente, inclusive, et responsable. C’est un point émergent en HRA également par certains aspects, en particulier l’éthique et les coûts de calcul (voir point suivant).

Points de vigilance

Il est devenu trivial de mentionner que les succès de l’IA sont nombreux et spectaculaires dans de nombreux domaines scientifiques. Le début de cette section témoigne de son potentiel en HRA mais il s’agit d’une phénomène de société général, qui donne au monde scientifique dans son ensemble la sensation d’un basculement vers un autre mode de fonctionnement, voire de pensée. En ce qui concerne l’ASHRA, il est intéressant de remarquer a posteriori que dans une prospective précédente (2015), son CS² notait l’apparition d’une nouvelle thématique tous les 10 ans, avec “gestation de nouveaux concepts, suivie d’une période exploratoire de forte activités R&D”. 2010 correspondait à la période d’apparition de la “Science des Données”, avec un nouveau tournant anticipé pour 2020. Force est de constater que ce tournant a bien eu lieu, avec une intensité probablement bien plus grande que ce qui était prévisible, et que cela ne fait que commencer.

Dans le domaine scientifique, et en particulier en HRA, le développement exponentiel de l’IA s’explique probablement par l’extrême facilité d’implémentation (*toolboxes* Python par exemple, couplées à des assistants d’AI comme chatGPT). Cet interfaçage permet un mode d’utilisation essai-erreur en boîte noire très efficace pour n’importe quelle application. L’ensemble permet de produire facilement et rapidement des articles de recherche de qualité professionnelle, au moins en apparence, avec un vocabulaire technique correspondant à un haut niveau d’expertise technologique³. Cependant, ces avancées suscitent également des inquiétudes et posent des questions importantes, voire fondamentales :

- Certains de ces articles scientifiques, d’un haut niveau apparent de technicité et d’innovation, bénéficient d’un effet de halo : le contenu scientifique réel peut ne pas être vraiment innovant, ni efficace en pratique. Il n’est pas rare de voir des “publications Machine Learning ou IA” dispensées de comparer leurs résultats aux techniques existantes (hors IA), ou de vérifier la validité et la robustesse des résultats obtenus dans les conditions réelles de l’application qu’elles prétendent viser. De plus, la facilité de leur prise en main permet à des algorithmes parfois très complexes d’être utilisés par des opérateurs qui peuvent n’avoir qu’une idée très approximative de leur fonctionnement. Ceci peut poser 1) un problème de reproductibilité, 2) un problème environnemental, avec de coûts de calcul énormes et non optimisés, et 3) au delà, cela pose même celui de la responsabilité scientifique, si on considère qu’un.e scientifique est censé connaître ce que fait la machine ou l’instrument qui produit les résultats dont il.elle revendique être l’auteur.trice.
- La vitesse de production : la vitesse à laquelle des résultats peuvent être produits crée, dans un milieu compétitif, une course aux résultats de l’IA appliquée à chaque domaine. Ceci peut se faire au détriment de la profondeur de la réflexion, de l’analyse et de la validation des résultats.

Or, l’esprit critique, l’objectivité scientifique, la comparaison avec l’état de l’art, et la reproductibilité des résultats sont les piliers de la méthode scientifique. Le respect de ces critères font que la science jouit d’un statut particulier dans la création de la connaissance.

L’augmentation progressive de l’utilisation de l’IA (en HRA mais aussi au-delà) semblant s’accompagner d’un nombre progressif de publications délaissant ces critères, il est important de s’interroger sur l’impact potentiel que cela peut avoir sur la science produite, et plus fondamentalement sur les jeunes chercheurs · euses (en master, thèse, postdoctorat et même en poste) qui vont créer la science de demain.

Pour les plus jeunes⁴, il existe une illusion que la production d’une science de haut niveau et facilement publiable devient immédiate grâce à l’IA⁵. Dans un contexte de pression sur le nombre de publications (pression en particulier pour les jeunes candidats aux concours CNRS, CNAP et MCF, mais aussi pour les plus âgés), il peut être très difficile de résister à la production de ce genre d’articles “à

2. par la voix de son directeur Michel Tallon

3. par exemple les noms des types d’architectures de réseaux de neurones, des fonctions non linéaires d’activation, des types de descente de gradient implémentés, etc.

4. Les enseignants-chercheurs parmi nous en auront probablement fait le constat dès le Master

5. Un peu comme si le stéthoscope faisait de celui qui le porte un médecin

moindre coût”. L’interfaçage avec l’IA étant total, depuis la fouille dans la base de données scientifique, l’extraction, le traitement, la production de graphiques, l’analyse et la rédaction de l’article, le temps et la réflexion dédiés par le chercheur ou la chercheuse à la production d’un article publiable peuvent être extrêmement limités. Or, l’essence du rôle des chercheurs · euses reste de réfléchir (avant celui de publier), et leur responsabilité est de se porter garants de la façon dont ont été produits les résultats qu’ils et elles affichent et revendiquent comme les leurs⁶.

En plus de cette apparente facilité d’utilisation et d’interprétation, il existe également une réelle limitation sur l’existence de “training sets” dans notre domaine, dans un contexte où les nuits de télescopes sont chères et où l’accès au télescope n’est pas garanti pour l’entraînement des algorithmes. Concernant les applications en Optique adaptative (algorithmes prédictifs), ce ne devrait pas être un problème trop gênant étant donné que ces systèmes, fonctionnant à ~ 1 Hz produisent des milliers d’images par seconde. Pour les applications de corrections des *non-common path aberrations* (NCPA) et la génération de Dark Holes, à l’inverse, les boucles sont beaucoup plus lentes (du Hz à 0.1 Hz) et ne suffiront pas à générer un training set pertinent. Concernant les applications de Post-processing, l’accumulation de données dans les archives n’est généralement pas non plus suffisante pour entraîner des algorithmes IA, en particulier en HRA qui se concentre sur un petit champ de vue et nécessite de longues poses pour intégrer des photons. Ces algorithmes ne bénéficieront pas tant que ça d’algorithme nécessitant de gros jeu de données pour être entraînés, ou alors dans une perspective de ré-analyse des données. Des pistes pour contourner ce problèmes pourraient se trouver avec des phases d’entraînement sur simulateurs numérique, sur banc optique, ou sur télescope avec une source interne, et en intégrant des méthode de transfert de domaine (“transfer learning”) pour compenser les différences avec les observations réelles.

Synthèse et recommandations

L’IA apporte et va apporter des gains importants dans tous les domaines de la HRA. Cependant, certaines pratiques scientifiques liées à l’IA sont aussi problématiques, notamment vis à vis de la démarche scientifique qu’elles mettent en œuvre. Les chercheurs.euses confirmés.es (*referees* des comités scientifiques éditoriaux, membres de jurys de concours, membres des CS locaux et nationaux, etc.) ont à cet égard une responsabilité forte. À son niveau, le CS de l’ASHRA recommande donc à ses successeurs d’être très attentif à ces questions sur la prochaine période, et d’être très actif vis-à-vis des jeunes scientifiques et des collègues de la communauté ASHRA en général⁷. L’enjeu n’est pas de limiter l’exploitation des outils de l’IA en HRA, mais de garantir que cette exploitation respecte en tous points les critères de la méthode scientifique.

Il faut enfin souligner que le problème de l’intrication des données, des instruments et des algorithmes de traitement a toujours été central et constitutif de l’ASHRA : la thématique Sciences des données y est couplée à chacune des autres thématiques. Lors des prospectives précédentes, la reconnaissance de l’importance de ce couplage s’est historiquement traduite par la stimulation de collaborations fortes entre instrumentation et traitement, puis par la recommandation d’approches amont de co-conception. Dans les années qui vont venir, la nécessité d’un couplage fort et éclairé entre Sciences des données et les autres thématiques de l’ASHRA non seulement demeure, mais apparaît encore plus critique, compte tenu de l’omniprésence d’algorithmes d’IA à diverses étapes de la chaîne des traitements en HRA. L’ASHRA bénéficie d’une culture multidisciplinaire bien établie sur ce point (à la différence de beaucoup d’autres domaines scientifiques où les algorithmes IA sont utilisés sans expertise "de l’intérieur"). C’est sur le plan scientifique un avantage rare et fort, qu’il faut exploiter, soutenir et développer au maximum.

6. En France, l’Office français de l’intégrité scientifique (Ofis, département du Hcéres) a dédié son colloque 2025 (15 avril) sur [les nouveaux enjeux d’intégrité scientifique liés à l’utilisation d’IA](#). Sur le plan européen, [un code de conduite européen pour l’intégrité en recherche](#) a été mis en ligne fin 2024 par la Fédération européenne des académies des sciences et des humanités (All European Academies, ALLEA) pour tenir compte de l’évolution des préoccupations et des domaines émergents en recherche. A un niveau plus large encore, l’UNESCO a pour les aspects enseignements établi deux référentiels de Compétences en IA pour [les apprenants \(2024\)](#) et pour [les enseignants \(2025\)](#) qui constituent le premier cadre mondial de ce type. La pensée critique et l’éthique en constituent des points centraux.

7. Par exemple avec l’organisation d’ateliers dédiés ; ou la recommandation de de dédier systématiquement une session à ces questions sur tout événement "IA".

4.5 La R&D ASHRA au delà de l'astrophysique

4.5.1 Les apports de l'ASHRA en dehors du domaine AA

Les travaux de R&D menés ont une portée qui dépasse très largement les problématiques astrophysiques et se trouvent apporter des solutions concrètes à d'important enjeux sociétaux. La problématique de la juste interprétation de signaux électromagnétiques se propageant à travers un environnement perturbé est en effet partagée plusieurs champs d'application. On peut en particulier citer :

- la communication optique sol-espace,
- la communication optique sol-sol,
- le suivi et l'imagerie à haute résolution angulaire (défense) de satellites artificiels et
- l'imagerie médicale, notamment ophtalmologique.

Dans tous ces cas de figure, les solutions d'analyse et de correction de surface d'onde, ainsi que les méthodes de traitement du signal motivées par des applications astrophysiques trouvent des applications et débouchés directs. Cette extension des applications se retrouve dans les activités de certaines équipes dans les laboratoires. En novembre 2024, le CS ASHRA a par exemple visité des bancs du LIRA à Meudon, contribuant à l'imagerie tri-dimensionnelle du cerveau dans le domaine optique. Cette extension se manifeste également sur les sites d'observation du territoire français comme le site de l'OHP ou le plateau de Calern, qui accueillent de plus en plus d'entreprises - des grands groupes et des startups - pour y installer des stations ou des instruments.

Dans tous ces cas, les méthodologies de mesure/contrôle du front d'onde initialement motivées par l'astrophysique trouvent des applications contribuant plus largement à des enjeux de la société d'aujourd'hui.

4.5.2 Les apports d'autres champs d'application

Ces échanges n'ont pas lieu à sens unique : on voit en effet également des avancées technologiques majeures motivées par d'autres sujets caractérisés par des enjeux commerciaux majeurs venir enrichir le domaine des possibles dans nos projets motivés par l'astrophysique :

- Notre rapport a déjà largement évoqué les perspectives qu'apportent les techniques IA, facilitées par les GPU, qui permettent par exemple d'étendre la portée des algorithmes de mesure/contrôle de front d'onde dans des régimes non-linéaires.
- On voit également la technologie photonique motivée en grande partie par les besoins des télécommunications optiques, offrir des solutions de plus en plus efficaces pour propager des faisceaux à travers des fibres et réaliser des fonctions optiques (dispersion spectrale, contrôle actif de l'amplitude complexe, jonctions et routage).

Ce à quoi se sont par exemple récemment rajoutés des détecteurs de type nouveau appelés "event driven cameras" dont le développement a été motivé par le domaine de la télésurveillance et qui apportent des pistes nouvelles au paradigme de l'analyse de surface d'onde.

4.5.3 Pertinence de la démarche HRA dans le contexte environnemental

Nous avons rappelé qu'amener les moyens d'observation de la limite imposée par le seeing atmosphérique à la limite de la diffraction, c'est un gain très important en efficacité d'observation - d'autant plus qu'on va vers de gros moyens comme l'ELT. On peut ainsi apprécier que la dépense d'énergie que représente l'opération de l'OA (analyse de surface d'onde, éléments de correction et calculateur, ainsi que les éventuelles sources laser artificielle) se traduit par une réduction du temps d'observation pour atteindre un niveau de signal sur bruit donné.

Aller vers des instruments opérant à la limite de diffraction permet également d'envisager une miniaturisation très importante des instruments, dont la taille devient essentiellement indépendante de

l'infrastructure qui l'alimente. Cette perspective peut avoir un impact transformant pour les nombreux grands projets de spectroscopie multi-objet en préparation en dehors de la communauté HRA. Des instruments compacts, pouvant être répliqués en grande quantité à moindre coût nécessitent beaucoup moins d'énergie pour être maintenus à basse température et l'absence de parties mobiles réduit encore les perspectives de coût de fonctionnement. Des travaux en cours visant à améliorer l'efficacité de l'adaptation des faisceaux en provenance des télescopes vers les guides d'onde mono-mode (OA bien sûr mais aussi des composants comme les lanternes photoniques) vont permettre des avancées importantes.

On note enfin que des travaux menés sur la caractérisation de la turbulence, trouvent aujourd'hui des applications dans le domaine de la production d'énergie renouvelable. Des stations de mesure et de prédiction de turbulence atmosphérique, capables d'opérer de nuit comme de jour sont maintenant mises en service sur les sites de production photoélectrique et éolienne pour optimiser la stratégie de distribution et de stockage temporaire de l'énergie produite.

4.5.4 Formation à destination au delà du cercle académique !

A la lumière de ces éléments, il est naturel de voir que l'expertise technique des étudiants formés dans le cadre de projets HRA : optique, mécanique, mécatronique, électronique, informatique, analyse de données, techniques de laboratoire, peut naturellement mener à de l'emploi qualifié en dehors du domaine académique. Il y a ainsi ici l'opportunité de sensibiliser un jeune public ne passant qu'un moment (le temps d'un stage ou d'une thèse) dans notre communauté académique, aux problématiques de l'astrophysique et de propager dans son futur milieu professionnel, des attitudes de travail en collaboration, dans un environnement international.

Chapitre 5

Conclusion et recommandations

5.1 Analyse SWOT de l'ASHRA

En nous basant sur les éléments rapportés dans le rapport dont vous achevez la lecture, nous proposons d'extraire les observations qui nous semblent les plus saillantes, et que nous avons tenté de classer - quelque fois avec difficulté - entre propriétés intrinsèques (les forces et faiblesses) de notre communauté ET de l'AS-HRA et les facteurs extrinsèques (les menaces et opportunités) qui ont déjà ou auront un impact sur ses activités. Le résultat de cette analyse est résumé sur la Figure 5.1. Nous allons utiliser le reste du texte pour passer en revue chacun des facteurs avant de revenir sur les recommandations.

Les forces de l'ASHRA : Notre exercice montre, en particulier à la lumière des éléments quantitatifs apportés par notre enquête bilan, que la communauté HRA française est plus forte que jamais. Héritant de l'investissement dans la durée d'une communauté qui a construit une expertise singulière, la HRA est internationalement reconnue comme une expertise Française, ce qui se manifeste par des collaborations importantes sur des actions stratégiques et des sollicitations à rejoindre des groupes de réflexion amont à l'international. Plus de 200 personnes considèrent que leur activité rentre dans le périmètre HRA et se reconnaissent dans l'histoire collective de l'ASHRA, ce qui en fait une communauté cohérente et soudée. Le focus méthodologique transverse de la HRA fait qu'une bonne moitié de cette même communauté émerge également sur plusieurs ATs (physique stellaire et exosystèmes) ainsi qu'au PNP. Cette communauté démontre sa forte capacité à obtenir des financements importants, ayant enregistré sur la mandature qui se termine 6 ERC et 13 ANR (tout type confondu), et ayant été une contribution majeure à la construction du PEPR Origins.

Les faiblesses de l'ASHRA : Notre connaissance du terrain nous révèle par contre que notre communauté est en grande partie dispersée et fatiguée par une implication forte dans de multiples grands projets structurants particulièrement complexes, faisant appel à des ressources et compétences similaires et donc en compétition - et dont la durée s'allonge avec des calendriers très contraints. Il y a là un double point de vigilance : non seulement sur la qualité de vie des individus impliqués dans ces projets (qui doit faire l'objet d'actions dans les laboratoires concernés) mais aussi une réalité qui pénalise la R&D instrumentale pourtant essentielle (un sujet qui concerne l'ASHRA au premier plan), mais dont la priorité immédiate est souvent moindre. Cette R&D instrumentale s'inscrit dans un temps long : on observe généralement entre 15 et 20 ans entre la mise au point initiale d'une idée et le moment où elle est pleinement exploitée dans le cadre d'un programme observationnel. Nous ne pouvons faire l'impasse sur le fait que depuis 2020, aucun personnel CNAP n'a été recruté pour assurer un service en lien avec la HRA pourtant en première ligne dans la réalisation de plusieurs instruments ELT.

Les opportunités pour l'ASHRA : Une surprise de l'exercice de prospective INSU/AA qui vient de se conclure, est de voir que la R&D en ressort renforcée et véritablement perçue par la communauté AA comme l'investissement qui permettra d'assurer que la prochaine génération d'instruments qui sera mise en service sur un observatoire constitue une avancée quantitative sur l'existant. Incidemment, la mandature qui se termine aura été marquée par plusieurs reconnaissances (5 médailles du CNRS dont

Facteurs intrinsèques	
Forces de l'ASHRA	Faiblesses de l'ASHRA
<p>Identité forte, communauté importante & unie</p> <p>Expertise forte résultant d'un investissement soutenu dans la durée sur la R&D amont</p> <p>Focus méthodologique transverse</p> <p>Communauté de chercheurs & ingénieurs</p> <p>Pérennité de l'AS dans le paysage INSU/AA</p> <p>Capacité à obtenir des financements (ERC, grands projets)</p>	<p>Acteurs très sollicités dans les grands projets - communauté fatiguée et R&D pénalisée</p> <p>Dispersion des forces dans des projets multiples aux enjeux importants</p> <p>La R&D s'inscrit dans un temps long</p> <p>Loin de l'équilibre de genre</p> <p>Pas de personnels CNAP recrutés sur des thématiques HRA depuis 2020</p> <p>Dépendance des calendriers des grands projets - de grands moyens difficiles d'accès</p>
Stratégies d'attaque	
<p>Opportunités pour l'ASHRA</p> <p>La R&D instrumentale ressort renforcée de l'exercice de prospective INSU/AA</p> <p>Restructuration des SNOs - vers un SNO HRA ?</p> <p>Contexte programmatique porteur (VLTH+, HWO, ELT, LIFE)</p> <p>Des applications astrophysiques (exoplanètes, origines, ...) à forte visibilité</p> <p>L'infrastructure du VLT est désormais en mesure d'observer des sources extragalactiques</p> <p>Existence de la DIIRO à l'INSU</p> <p>Reconnaissance avec plusieurs médailles CNRS</p>	<p>Stratégie de renfort</p> <p>Assurer la sanctuarisation d'un temps de R&D HRA pour les chercheurs et ingénieurs.</p> <p>Encourager la porosité entre les ANO2, 3 et 5 pour permettre de la continuité thématique du service CNAP.</p> <p>Besoin de feuilles de route nationales (interféro, ELT, ITHD spatial) et de faire des choix programmatiques concertés.</p> <p>Parler d'instrumentation et de HRA dans les formations en astrophysique et la communication grand public.</p> <p>Assurer que les centre d'expertise du VLT dont le JMMC soient en mesure de répondre à la demande.</p>
Stratégies d'évitement	
<p>Menaces pour l'ASHRA</p> <p>Confusion ingénierie projet & recherche instrumentale</p> <p>Application d'une politique de sobriété carbone sans nuance</p> <p>Appels à projet complexes et besoin d'interfaces avec l'industrie.</p> <p>Difficultés à attirer des étudiants sur nos sujets</p> <p>Difficultés à recruter - en particulier ingés</p> <p>Disruption de la roadmap collective par des influences externes justifiables par opportunisme financier</p>	<p>Stratégie d'adaptation</p> <p>Effort de pédagogie et de communication pour renforcer la visibilité de la R&D instrumentale.</p> <p>Ne pas pénaliser les acteurs sur le terrain et garder l'objectif sociétal global en tête.</p> <p>Une tendance à anticiper. Trouver des moyens de renforcer la co-construction.</p> <p>Déployer et animer une plate-forme d'affichage de jobs/stages en HRA.</p> <p>Publiciser les perspectives et succès des recrutements en dehors du monde académique.</p>
<p>Modèle de pilotage à revoir. Tension entre roadmap communautaire et des influences externes.</p>	

FIGURE 5.1 – Analyse SWOT de l'ASHRA au sortir de la mandature 2020-2025.

2 médailles de cristal). La portée transverse de développements menés par la communauté HRA et la qualité intrinsèque reconnue des projets au sein du domaine AA doit également pouvoir rayonner au delà. La mise en route de la DIIRO et des appels à projets de la CSIIT sont ainsi une opportunité nouvelle dont notre communauté ne s'est pas encore saisie.

Nous faisons aujourd'hui collectivement face à un contexte programmatique très riche, avec des projets ambitieux d'instruments ITHD sol et spatiaux (PCS, ANDES & HWO) ; ainsi qu'une réflexion entamée sur le post VLTI actuel, que ce soit sous la forme d'une extension ou de la création d'une infrastructure encore à imaginer, ce à quoi se rajoute la perspective de l'interféromètre spatial LIFE. La HRA contribue de plus en plus à des applications astrophysiques à forte visibilité, les exoplanètes apparaissant clairement en tête de cortège. Ce cas d'utilisation de la HRA qui est encore loin d'avoir été épuisé, motive de nombreux développements technologiques et méthodologiques qui bénéficient à leur tour à toute l'astrophysique. Une évolution semble à monitorer et à accompagner : les améliorations récentes et encore à venir de l'infrastructure du VLTI permettent en effet d'entrevoir une augmentation potentielle de son utilisation par une nouvelle communauté motivée par des programmes d'astrophysique extragalactiques.

Les menaces pour l'ASHRA : Victime de la visibilité de ses contributions aux infrastructures et aux instruments, on observe à beaucoup de niveaux, au sein des labos/OSUs comme dans les interactions avec les organes de l'INSU, une confusion profonde entre ce qui relève de l'ingénierie projet - une forme de service à la communauté et les travaux de R&D en instrumentation astrophysique HRA, qui est un objet de recherche à part entière, comme en témoigne la complétion d'une moyenne de 17 thèses de doctorat en HRA chaque année. Cette confusion n'est pas sans conséquences : il est en pratique difficile d'attirer les meilleurs étudiants sur nos sujets, ces derniers étant plus attirés par les applications astrophysiques affichées comme la vraie recherche. Le rythme de recrutement des ITs dans les laboratoires répond aux urgences des projets, ce qui affectera les perspectives de la R&D de demain.

Dans un contexte qui tend à généraliser voire imposer une politique de sobriété carbone, les activités instrumentales et matérielles sont trop facilement pointables du doigt. Cette vision négligerait le potentiel impact positif des activités de R&D sur le long terme, avec des nouveaux instruments à la fois moins incrémentaux et plus efficaces. La menace ici pour l'ASHRA serait une application sans nuance de cette politique, en ne tenant pas compte des besoins nécessaires pour la réalisation de ces activités.

Une dernière menace pour la communauté HRA est enfin le risque d'inflexion de sa roadmap par des acteurs (individus, instituts, ou pays), internationaux ou français hors de notre communauté. Des acteurs aisés capables de contribuer ponctuellement une somme importante d'argent ont la capacité de s'octroyer une place prépondérante dans les discussions, et d'imposer une orientation durable sur sa politique instrumentale AA, alors qu'elle devrait rester le résultat d'une construction communautaire.

5.2 Les recommandations pour le prochain mandat

C'est en croisant ces deux types de facteurs (extrinsèques et intrinsèques) entre eux qu'on peut tenter d'identifier quatre types de stratégies (d'attaque, d'adaptation, de renfort et d'évitement) et de proposer, en toute humilité, des recommandations qui devraient permettre de répondre aux enjeux qui se dessinent.

Stratégies d'attaque :

- Ouvrir pour continuer à faire reconnaître les activités de R&D instrumentale menées par la communauté HRA au même niveau que les découvertes astrophysiques qu'elles rendent ultimement possibles. La R&D accompagnée de moyens de proximité, notamment espaces techniques et moyens de validation ciel sur le sol français, permet à moindre coût (€, RH & CO₂), de faire émerger des concepts les plus potents pour les déployer dans des projets instrumentaux d'envergure. La démarche d'amélioration de la performance des instruments permettra de répondre à certains enjeux du réchauffement climatique. Il faut se saisir de cette opportunité pour faire rayonner la recherche et les développements HRA y compris en dehors du domaine AA de l'INSU.
- Pour les développements plus matures en passe de devenir ou d'intégrer des instruments, il est important que les concepteurs d'instruments soient prêts à s'engager sur le long terme dans l'accompagnement de leur exploitation astrophysique, pour continuer à être associés aux découvertes

qu'ils permettront. La période d'approche de la mise en service de l'ELT et des instruments de première lumière est opportune pour se positionner et s'impliquer dans les ateliers de préparation de l'exploitation des instruments.

Stratégies de renfort :

- L'importance de la R&D ayant été soulignée par l'exercice de prospective, il faut propager cette information dans les laboratoires et trouver des moyens de sanctuariser une partie non négligeable (~20 %) du temps des personnels impliqués dans les projets, pour leur redonner un bol d'air, et pour maintenir notre force dans ces activités sur la durée. C'est une démarche qui s'anticipe dans la mise au point des plans de charge et qui doit être intégrée au moment de la contractualisation des projets avec des adaptations de calendrier. Également, afin d'éviter l'épuisement des personnes travaillant une grande partie de leur carrière sur le même projet, anticiper les évolutions de poste et de responsabilité au sein du projet nous semble fondamental. Il semble universellement plus difficile de recruter des ITs sur des compétences critiques (architecture logicielle et contrôle-commande), car des emplois équivalents bien mieux payés existent dans le privé. Insister sur la liberté qu'apporte le travail dans un environnement académique est un levier qui peut permettre de renverser la tendance, tout en œuvrant à une meilleure représentativité de genre et des minorité dans notre communauté.
- Face au contexte programmatique très riche qui se profile, il semble essentiel de se lancer dans un exercice de mise au point de feuilles de route nationales sur au moins trois sujets : l'instrumentation haut contraste sur l'ELT, l'instrumentation haut-contraste spatiale, et la question du post-VLTI (en profitant du contexte prospectif "Expanding Horizons" mis en route par l'ESO). Il semble dangereux pour le bien être collectif d'agir comme si nous allions pouvoir engager les ressources financières et RH nécessaires à toutes les alternatives possibles et des choix concertés doivent être faits. Le CS ASHRA pourra seul difficilement mener ces trois exercices d'envergure au cours du mandat à venir mais en s'appuyant sur des acteurs majeurs de la communauté mandatés pour mener un travail non partisan d'évaluation des différentes options et pistes impliquant la communauté concernée, l'ASHRA pourra identifier un consensus et envisager un futur possible.
- Assurer que les centre d'expertise du VLTI dont le JMMC soient en mesure de répondre à la demande.

Stratégies d'adaptation : La portée transverse des recherches menées en HRA et la symbiose avec les progrès de la technologie en font une thématique à l'interface avec l'industrie. Pour attirer le plus tôt possible les étudiants les plus motivés sur nos thématiques, nous proposons pour le prochain mandat, le déploiement et la mise à jour régulière d'un portail affichant les projets en cours dans les laboratoires et listant les possibilités de stages et d'opportunités de thèses en HRA. Si on déplore la perte de certains de nos jeunes chercheurs talentueux qui ont choisi de quitter le circuit académique, nous pouvons profiter de la particularité de notre thématique et revendiquer sa proximité avec le monde de l'industrie, dans le but d'encourager des incursions temporaires en recherche par des étudiants qui autrement n'envisageraient pas de s'y impliquer. Nous insistons au passage dans la même veine, sur l'idée de co-conception entre académiques et industriels des roadmaps technologiques des infrastructures, en passe de devenir une condition *sine qua non* d'éligibilité aux appels à projet à venir dans le cadre du prochain programme de financement Européen, ce qui demande à être anticipé par les propriétaires des infrastructures.

Stratégies d'évitement :

- Si les acteurs des projets du domaine AA sont tout aussi sensibilisés que les autres membres de la communauté au problème du réchauffement climatique, il nous semble qu'il faille être prudent dans la mise en service d'outils de monitoring pour ne pas impacter encore plus les équipes impliquées dans des grands projets qui font des efforts de mutualisation et qui travaillent déjà dans un environnement complexe et contraint par des règles et des calendriers partagés par les nombreux partenaires des consortia.
- Dans un contexte où les personnels HRA sont déjà très investis dans les développements instrumentaux, avec des besoins financiers et humains qui se font sentir pour terminer leur réalisation, et avec des nouveaux projets qui se profilent, notre communauté a besoin de se recentrer sur une roadmap

décidée collectivement. Ce contexte la rend particulièrement vulnérable aux influences financières externes, pouvant induire une tension entre les choix communautaires et envies des individus. Sans vouloir empiéter sur les prérogatives décisionnelles des agences ou structures locales ou le dynamisme scientifique des individus, l'ASHRA doit continuer de veiller à la bonne articulation de ces nouveautés avec la construction collective.

5.2.1 Conclusion

"If I have seen further than others, it is by standing on the shoulders of giants.", I. Newton.

Plus de 50 ans après la première démonstration pratique d'interférométrie directe à deux télescopes et 25 ans après la mise en service du VLT, l'ASHRA présente aujourd'hui une très riche et impressionnante photographie des activités de recherche et de service menés par les personnels de sa communauté. Ce riche panorama de réalisations résulte d'un investissement soutenu dans la durée d'activités de R&D amont. Des sujets initialement qualifiés de niches comme l'optique adaptative et l'interférométrie optique sont devenues des forces dimensionnantes pour les moyens d'observation de toute la communauté AA, et on voit que les activités de R&D amont menées entre 10 et 15 ans en arrière, sont aujourd'hui en train de se concrétiser avec la mise en service de l'ELT.

Le contexte programmatique auquel la communauté va faire face est incroyablement riche en opportunités, au sol comme dans l'espace. La présence de l'ASHRA dans le paysage AA au service de cette communauté nous semble plus pertinente que jamais et nous espérons que ce rapport convaincra la CSAA de lui confier un nouveau mandat.

Appendices

Annexe A

Lettre de mission ASHRA 2020-2025

La lettre de mission de l'ASHRA a été remise a son directeur, Frantz Martinache, par le président de la CSAA, Jean-Philippe Berger, en septembre 2020, au début de son mandat. Elle jointe ci-dessous.

Proposition

MANDAT ASHRA 2020-2025

Préambule

L'exercice de prospective 2020-2025 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'Action Spécifique Haute Résolution Angulaire (ASHRA) pour l'ensemble des activités de haute résolution angulaire en France. Bien que le mandat de celle-ci ait été reformulé entièrement en 2015 et reste globalement d'actualité il paraît nécessaire de procéder à certaines mises à jour.

Mandat

L'ASHRA 2020-2015 a pour mandats 1/ de coordonner la recherche et organiser les développements en haute résolution angulaire (HRA) en optique : interférométrie optique, optique adaptative, imagerie très haute dynamique et 2/ d'accompagner l'ensemble de la communauté astronomique française dans son utilisation scientifique de l'instrumentation HRA. Plus généralement, l'ASHRA exerce une fonction de conseiller expert dans le domaine de la haute résolution angulaire en optique auprès de l'INSU.

Objectifs

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

1. Animer et soutenir les développements pour les différents travaux en optique adaptative, imagerie très haute dynamique, en prenant en compte la priorité de la communauté pour les instruments de l'ELT et du VLT mais en restant ouvert à des collaborations dépassant ce cadre. Ceci se fera avec l'objectif d'afficher une stratégie commune partagée par tous les acteurs. Pour cela un effort particulier sera fait pour associer un maximum de scientifiques instrumentalistes, notamment les plus jeunes.
2. Animer 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. Ceci se fera avec l'objectif d'afficher une stratégie commune partagée par tous les acteurs. Pour cela un effort particulier sera fait pour associer un maximum de scientifiques instrumentalistes, notamment les plus jeunes.
3. Animer et soutenir de manière transverse les développements en traitement du signal associé aux méthodes HRA. Ceci se fera avec l'objectif d'afficher une stratégie commune partagée par tous les acteurs. Pour cela un effort particulier sera fait pour associer un maximum de scientifiques instrumentalistes, notamment les plus jeunes.

4. Mener une réflexion prospective moyen- et long-terme notamment en interférométrie optique au sol.
5. Accompagner la réflexion prospective haute résolution angulaire dans le domaine spatial.
6. Favoriser l'émergence et la valorisation des technologies innovantes.
7. Renforcer et animer les liens entre l'instrumentation HRA, les développements en traitement de signal et les objectifs astrophysiques définis en lien avec les programmes nationaux.
8. Diffuser ces techniques au sein de la communauté astrophysique et développer leurs domaines d'exploitation. Pour cela, un lien étroit avec les programmes nationaux au moyen d'actions communes à définir et animer sera maintenu.
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. De façon générale, l'ASHRA exerce une fonction de conseiller expert dans le domaine de la haute résolution angulaire en optique auprès de l'INSU.

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. Par ses actions de soutien et de coordination l'ASHRA favorisera la recherche de cofinancements nationaux et européens pour de l'instrumentation et des emplois doctoraux ou post-doctoraux.

Actions prioritaires

1. Coordonner le groupe AO4ELT et animer les actions issues de cette réflexion ; rendre compte à la coordination ELT-France.
2. Coordonner les activités en cours en OA et ITHD complémentaires des travaux sur les instruments ELT. Un bilan sera dressé tous les deux ans et informera l'INSU.
3. Participer aux côtés de l'INSU au comité directeur du JMMC.
4. Maintenir et développer un rôle d'expertise auprès de l'INSU pour la CSAA, les comités de suivi, les revues de projets.

Annexe B

Liste des thèses soutenues en HRA pendant le mandat

Les deux tableaux ci-dessous présentent la listes des thèses soutenues au sein de la communauté HRA entre 2020 et 2025. Le premier tableau (Tab. B.1) dresse la liste des thèses en instrumentation HRA pour l’astronomie. Le second (Tab. B.2) recense les sujets astrophysiques utilisant des instruments HRA, et de l’instrumentation HRA hors-astronomie.

Nom	Sujet	Thème	Direction	Année	Labo.
A. Ceau	Kernel : application et potentiels scientifiques de l’interférométrie pleine pupille	IO	D. Mary, F. Martinache	2020	Lagrange
A.L. Cheffot	Mesure de co-phasage pour miroirs segmentés	OA	E. Hugot	2020	LAM
G. Hein	Focal plane segmentation using free-form optics for high-resolution planetary observation : paving the way for future high-resolution observation space missions	opt	M. Ferrari	2020	LAM
J. Kammerer	Combining Fourier Plane Observables for High-contrast Imaging of Young Giant Exoplanets	DS, IO	M. J. Ireland, F. Martinache, A. Mérand	2020	Lagrange
L. Denneulin	Approche inverse pour la reconstruction des environnements circumstellaires en polarimétrie avec SPHERE	DS	M. Langlois, E. Thiebaut	2020	CRAL
M. Vachey	Next generation MOEMS-based spectro-imagers for Universe and Earth observation	opt	F. Zamkotsian	2020	LAM
M. Roulet	3D printing for astronomical mirrors	opt	E. Hugot, C. Atkins	2020	LAM
A. 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	ITHD	A. Boccaletti, P. Baudoz	2020	LESIA
R. Laugier	Observables robustes pour la détection haut-contraste à faible séparation angulaire	DS, IO	F. Martinache	2020	Lagrange
R. Rougeot	Calculs de diffraction pour les coronographes solaires en vol en formation : Application pour ASPIICS	ITHD	D. Mary, R. Flamary	2020	Lagrange

Suite page suivante

Nom (<i>Suite...</i>)	Sujet	Thème	Direction	Année	Labo.
R. Fétick	Traitement d'image en optique adaptative : estimation paramétrique de la réponse impulsionnelle et déconvolution	DS, OA	T. Fusco, L. Mugnier	2020	ONERA
S. Lemared	Polissage sous-contraintes des grands miroirs allégés spatiaux : observation de l'Espace et de la Terre	Opt	M. Ferrari	2020	LAM
A. Bertrou-Cantou	Validation des composants clefs de l'optique adaptative de première lumière de l'instruments MICADO pour l'ELT	OA	G. Rousset	2021	LESIA
L. Prengere	"Commande haute performance des systèmes d'optique adaptative classique, des grands aux extrêmement grands télescopes (ELT)"	OA	C. Kulcsar, J.M. Conan	2021	LCF
G. Bourdarot	Revisiting heterodyne mid-infrared interferometry for the imaging of protoplanetary environments	IO	H.Guillet de Chatellus, J.P. Berger	2021	IPAG
I. Lajinja	Tolérance des télescopes spatiaux fondé sur le contraste pour l'imagerie d'exoTerres	ITHD	L. Mugnier, R. Soummer, JF. Sauvage	2021	ONERA
K. Joaquina	Curved sensors for ultraviolet aurora monitoring from space	Opt	E. Hugot	2021	LAM
V. Chambouleyron	Optimisation de l'analyse de surface d'onde par filtrage de Fourier pour les systèmes d'optique adaptative à hautes performances	OA	T. Fusco, B. Neichel, O. Fauvarque	2021	ONERA
N.N.B. Trinh	Modélisation asymptotique d'un réseau de micro-miroirs et design de logiciel pour les modèles multi-échelles dérivés automatiquement	Opt	M. Lenczner, F. Zamkotsian	2021	LAM
Z. Ke	Laser guide star wave-front sensing in the extremely large telescopes era : strategies and detectors	OA	T. Fusco, B. Neichel	2021	ONERA
A. Boskri.	Etude d'un nouveau suiveur de franges pour l'interférométrie optique à longue base	IO	R. Petrov, Z. Benkhaldoum	2022	Lagrange
A. Rafalimana	Développement outil de préiction de la turbulence atmosphérique pour les futurs ELTs	OA	A. Ziad, E. Aristidi	2022	Lagrange
R. Pourcelot	Contrôle actif des aberrations de bas ordre base sur les analyseurs de Zernike pour l'imagerie d'exoterres avec les futures observatoires spatiaux	ITHD	M. N'Diaye, M. Carbillet	2022	Lagrange
J. Magri	Interféromètre à conversion de fréquences ALOHA en bande L : Tests en laboratoire et intégration au réseau de télescopes CHARA	IO	Reynaud, François; Grossard, Ludovic	2022	XLIM
N.N. Cerpa Urra	Advanced Control Laws for Exoplanet Imaging Adaptative Optics	OA	C. Kulcsár, H.F. Raynaud, M. Kasper	2022	LCF

Suite page suivante

Nom (<i>Suite...</i>)	Sujet	Thème	Direction	Année	Labo.
H. Jonquière	Étude de la déflectométrie appliquée à la métrologie de surfaces optiques free-form ou de grande taille	opt	L. Mugnier, V. Michau	2022	ONERA
A. Bidot	Détection et caractérisation des atmosphères exoplanétaires par couplage de l'imagerie directe et de la spectroscopie à moyenne ou haute résolution spectrale	DS, ITHD	D. Mouillet, A. Carlotti	2023	IPAG
A. Lau	Développement de méthodes de post-traitement en optique adaptative : déconvolution robuste d'images et de cubes de données hyperspectrales	DS, OA	B. Neichel, T. Fusco	2023	LAM
K. Barjot	Characterization and deployment of Photonic Integrated Circuits for the FIRST fibered interferometer at the Subaru Telescope in the context of accreting protoplanets studies	IO	S. Lacour, E. Huby	2023	LESIA
C. Pannetier	Développement de l'instrument SPICA-VIS et SPICA-FT	IO	D. Mourard, F. Cassaing	2023	Lagrange
C. Xie	Traitement d'images avancé pour la détection directe d'exoplanètes avec les imageurs haut-contraste au sol	DS, ITHD	A. Vigan, E. Choquet	2023	LAM
J. Drevon	Exploitation de l'instrument VLTI/MATISSE : imagerie des étoiles évoluées	IO	F. Millour, P. Cruzalèbes	2023	Lagrange
M. El Morsy	Development of a prototype instrument for the direct characterisation of young giant exoplanets	ITHD	A. Vigan	2023	LAM
N. Levraud	Vers le senseur de front d'onde ultime pour l'imagerie haut contraste : application au Large Binocular Telescope (LBT) et à l'Extremely Large Telescope (ELT)	OA	T. Fusco	2023	ONERA
J. Planté	Enabling technologies for real-time acquisition and processing of large volumes of data and their applications to giant astronomical telescopes and radar systems	OA	D. Gratadour	2023	LESIA
S. Thé	Méthodes de démixage et de déconvolution d'objets dans les images	DS	M. Langlois, E. Thiébaud	2023	CRAL
N. Skaf	Self-optimization of adaptative optics and characterization of exoplanetary systems	OA, ITHD	A. Boccaletti	2023	LESIA
L. Marquis	High-performance adaptive optics control for the Gran Telescopio Canarias	OA	C. Kulcár, I. Montilla García, H.F. Raynaud	2023	LCF

Suite page suivante

Nom (<i>Suite...</i>)	Sujet	Thème	Direction	Année	Labo.
A. Kuznetsov	Vers la prochaine génération d'instruments tomographiques assistés par AO. Techniques d'auto-apprentissage pour l'optimisation du système et l'exploitation scientifique	OA	B. Neichel, T. Fusco	2024	LAM
C. Graf	Analyse de front d'onde de précision nanométrique pour la métrologie optique et la détection d'exoplanètes par imagerie directe	OA	M. Langlois, E. Thiébaud, J. Degallaix	2024	CRAL
C. Cêtre	Élargissement des méthodes et techniques du monde HPC pour répondre aux besoins du monde temps réel et leur application aux télescopes astronomiques géants et aux systèmes embarqués	OA	D. Gratadour	2024	LESIA
H. Nowacki	Observations multi-techniques d'étoiles T Tauri jeunes et perspectives avec l'instrument VLT/GRAVITY+	IO	K. Perraut, JB Lebouquin	2024	IPAG
J. Liu	Optique spatiale innovante basée sur les surfaces optiques "freeforms" et les capteurs d'imagerie courbes	opt	E. Hugot	2024	LAM
J. Dallant	Combinaison d'observations multi-époques pour la détection d'exoplanètes et l'estimation conjointe de leurs orbites en imagerie directe à haut contraste	DS, ITHD	M. Langlois, E. Thibaut, O. Flasseur	2024	CRAL
M. Lallement	Développements astrophotoniques pour l'interférométrie visible : vers la détection H α de protoplanètes avec l'instrument FIRST au télescope Subaru"	IO	E. Huby, S. Lacour	2024	LESIA
M. Cissé	Apprentissage machine et fusion des données pour l'analyse de front d'onde à haute performance appliquée aux Télescopes Astronomiques Géants	DS, OA	T. Fusco, B. Neichel	2024	ONERA
M. Bonduelle	Optique intégrée active dans le moyen infrarouge pour l'instrumentation astrophysique : spectrométrie et interférométrie multi-telescopes en frange noire	IO	G. Martin, A. Morand	2024	IPAG
N. Pourré	Optical interferometric detection of young giant exoplanets at the astronomical unit scale	IO	K. Perraut, J.B. Le Bouquin	2024	IPAG
P.M. Chin-gaïpe	Kernel-nulling pour la détection directe des exoplanètes	IO	F. Martinache	2024	Lagrange

Suite page suivante

Nom (<i>Suite...</i>)	Sujet	Thème	Direction	Année	Labo.
T. Allain	Experimental proof of concept of a mid-infrared heterodyne astronomical interferometer using high bandwidth photonic correlation and quantum well detectors	IO	J.P. Berger	2024	IPAG
T. Santos	Réseaux de neurones génératifs pour la paramétrisation dans les méthodes inverses : applications en astrophysique et géophysique	DS	F. Soulez, T. Bodin	2025	CRAL

Fin

TABLE B.1: Liste des thèses en instrumentation HRA soutenues entre 2020 et 2025 par des membres de la communauté HRA. OA = Optique Adaptative; IO = Interférométrie optique; ITHD = Imagerie à très haute dynamique; DS = Science des données. opt = Optique

Nom	Sujet	Thème	Type	Direction	Année	Labo.
A. Grandjean	Vers une exploration complète de la population des planètes géantes dans les systèmes planétaires extra solaires	ITHD	Astro	A.M. Lagrange	2020	IPAG
E. Saldanha Da Gama De Almeida	Disques et vents autour des étoiles massives : apport de la seconde génération d'instruments HRA au	IO	Astro	A. Domiciano de Souza, A. Meilland	2020	Lagrange
K. Bouchaud	Évolution stellaire en rotation rapide : apport de l'interférométrie et de l'astérosismologie	IO	Astro	A. Domiciano de Souza, D. Reese	2020	Lagrange
G. Rodriguez-Coira	GRAVITY dans le centre galactique : l'exploration du parsec central via l'interférométrie optique	IO	Astro	G. Perrin	2020	LESIA
V. Houdé	L'enveloppe Circumstellaire des Céphéides et l'étalonnage des échelles de distances dans l'univers	IO	Astro	N. Nardetto, E. Lagadec	2020	Lagrange
P. Vermot	Étude spectroscopique et interférométrique du noyau actif de NGC 1068 dans l'infrarouge proche	IO	Astro	Y. Clénet, D. Gratadour	2020	LESIA
A. Salsi	Étalonnage des relations brillance de surface-couleur : distances des binaires à éclipses dans le groupe local et préparation de la mission PLATO	IO	Astro	N. Nardetto, D. Mourard	2021	Lagrange
L. Breuval	L'échelle de distance des Céphéides : de l'étalonnage Gaia local aux galaxies lointaines	IO	Astro	P. Kervella	2021	LESIA
T.L. NGuyen	Étudier les super amas d'étoiles dans les galaxies à l'époque du JWST	OA	Astro	D. Gratadour	2021	LESIA
S. Petrus	Caractérisation des atmosphères exo-planétaires à l'aide d'observations à moyenne et haute résolution spectrale	IO	Astro	G. Chauvin, M. Bonnefoy	2021	IPAG
M. Houllé	Combining high-contrast imaging and high-resolution spectroscopy for exoplanet observations	ITHD	Astro	A. Vigan, P. Figueira, E. Sedghi	2022	LAM
N. Aimar	Astrophysique extrême avec GRAVITY : sursauts énergétiques aux abords de l'horizon des événements du trou noir central de la galaxie	IO	Astro	F. Vincent, T. Paumard	2023	LESIA

Suite page suivante

Nom (<i>Suite...</i>)	Sujet	Thème	Type	Direction	Année	Labo.
A. Bidot	Détection et caractérisation des atmosphères exoplanétaires par couplage de l'imagerie directe et de la spectroscopie à moyenne ou haute résolution spectrale	ITHD	Astro	D. Mouillet, A. Carlotti	2023	IPAG
C. Xie	Traitement d'images avancé pour la détection directe d'exoplanètes avec les imageurs haut-contraste au sol	ITHD	Astro	A. Vigan, E. Choquet	2023	LAM
M. Mâlin	Caractérisation des exoplanètes gazeuses géantes avec l'instrument en infrarouge moyen MIRI du JWST	ITHD	Astro	A. Boccaletti	2023	LESIA
F. Philipot	Vers une recherche exhaustive des planètes géantes autour des étoiles proches de type solaire	ITHD	Astro	A.M. Lagrange	2023	LESIA
A. Chomez	Recherche d'exoplanètes en imagerie Haut Contraste, une nouvelle analyse homogène des données de l'instrument SPHERE sur le VLT	ITHD	Astro	A.M. Lagrange, M. Langlois	2024	LESIA
C. Desgrange	Architectures des systèmes planétaires via l'imagerie d'exoplanètes et de disques avec SPHERE au Very Large Telescope	ITHD	Astro	G. Chauvin, J. Milli	2024	IPAG
D. Demars	Caractérisation des phénomènes d'accrétion sur les objets de masse planétaire	OA	Astro	C. Dougados, M. Bonnefoy	2024	IPAG
H. Nowacki	Observations multi-techniques d'étoiles T Tauri jeunes et perspectives avec l'instrument VLT/GRAVITY+	IO	Astro	Karine Perraut & JB Lebouquin	2024	IPAG
N. Pourré	Optical interferometric detection of young giant exoplanets at the astronomical unit scale	IO	Astro	K. Perraut, J.B. Le Bouquin	2024	IPAG
Lai-Tim, Yann	Imagerie haute résolution de la rétine humaine par illumination structurée assistée par optique adaptative	OA	Biomed	L. Mugnier	2020	ONERA
O. Lévêque	Co-conception de systèmes d'imagerie pour l'extension de profondeur de champ – Application à la localisation de molécule unique	OA	Biomed	F. Goudail, C. Kulcsár	2022	LCF
A. Chen	Confinement laser 3d assisté par optique adaptative en milieu perturbé : application à l'imagerie et la chirurgie rétinienne	OA	Biomed	M. Paques, S. Meimon	2022	ONERA

Suite page suivante

Nom (<i>Suite...</i>)	Sujet	Thème	Type	Direction	Année	Labo.
I. Racicot	Exploration fonctionnelle de l'ensemble du cortex visuel d'un primate non humain par imagerie optique avancée	Autre	Biomed	F. Chavane, M. Ferrari	2022	LAM
L. Krafft	Spatial filtering for flood illumination ophthalmoscope	OA	Biomed	S. Meimon	2022	ONERA
P. Senee	Étude du couplage neurovasculaire rétinien humain à haute résolution par optique adaptative	OA	Biomed	S. Meimon, M. Paques	2024	ONERA
H. Debarry	"Observation de la Terre depuis l'Espace par interférométrie optique"	IO	Defense	X. Berger, V. Michau	2023	ONERA
H. Labriji	Shadow imaging of geostationary satellites	OA	Defense	F. Cassaing, O. Herscovici-Schiller	2023	ONERA
L. Barbot	Projet MARIS STELLA : récepteur stellaire de haute précision pour la navigation maritime	Opt	Defense	M. Ferrari	2023	LAM
E. Klotz	Reconfiguration dynamique d'un réseau de stations sol optique assistée par machine learning	DS	Defense	T. Fusco, C. Musso	2023	ONERA
M. Dumont	Deep Learning pour le phasage de télescope segmenté	DS	Defense	J. F. Sauvage, J. Cardoso	2024	ONERA
A. Vinoy	Wide-field space-awareness imaging design using freeform optics	Opt	Defense	Y. Sortais, M. Ferrari	2025	LAM
L. Rinaldi	Mitigation of atmospheric turbulence effects on optical links by integrated optics	OA	Telecom	V. Michau, G. Martin	2022	ONERA
L. Pailler	Architecture de récepteur cohérent pour les liens optiques satellite-sol avec optique adaptative	OA	Telecom	J. Lebidan	2020	ONERA
A. Yan	Restauration d'images corrigées par optique adaptative pour l'observation astronomique et de satellites : approche marginale par échantillonnage	DS	Defense	L. Mugnier	2023	ONERA
Y. Lucas	Optique adaptative intégrée pour l'atténuation des effets de la turbulence atmosphérique sur les liaisons optiques	OA	Telecom	Jaouen	2024	ONERA
V. Marulanda Acosta	Quantum Key Distribution through atmospheric turbulence : secure satellite-to-ground links	OA	Telecom	E. Diamanti, C. B. Lim, J.M. Conan	2023	ONERA

Suite page suivante

Nom (<i>Suite...</i>)	Sujet	Thème	Type	Direction	Année	Labo.
D. Romero Arrieta	100 Gbps optical coherent transceiver for point-to-point ground-satellite communications : conception, numerical validation and experimental evaluation	OA	Telecom	V. Michau, J.M. Conan, R. Boddeda	2023	ONERA
P. Rodriguez Robles	Optique adaptative pour les liens Télécoms sol-satellite : modélisation, optimisation et experimentation	OA	Telecom	B. Neichel, C. Petit	2023	LAM
P. Lognoné	Optimization of High Data Rate Ground to Satellite Links Pre-compensated by Adaptive Optics	OA	Telecom	G. Rekaya Ben Othman, J.M. Conan	2023	ONERA

Fin

TABLE B.2: Liste des thèses soutenues entre 2020 et 2025 par des membres de la communauté HRA sur des applications de la HRA. OA = Optique Adaptative; IO = Interférométrie optique; ITHD = Imagerie à très haute dynamique; DS = Science des données. opt = Optique

Annexe C

Résultats marquants de la communauté HRA

Année	Résultat marquant	Publication	Communiqué de presse (CP)	de	Thème
2020	Première lumière THEMIS	Thiébaud et al. 2022, SPIE.	CP INSU		AO
2020	IO 5T beam combiner	Martin et al. 2020, SPIE			Interf
2022	Découverte d'une troisième lune orbitant l'astéroïde (130) Elektra	Berdeu et al. 2022, A&A	CP Univ. Lyon		DS
2022	Première lumière de GRAVITY Wide (GRAVITY+)	GRAVITY+ Collaboration et al. 2022, A&A	CP ESO		Interf
2022	Démonstration expérimentale du kernel-nuller	Cvetojevic et al. 2022			Interf
2022	PAC MATISSE (Provisional Acceptance Chili)	Lopez et al, 2022 A&A			Interf
2022	Première lumière du VIPA	Carlotti et al. 2022, SPIE			ITHD
2022	Premier dark-hole sur ciel au VLT	Potier et al. 2022, A&A			ITHD
2022	Commissioning des coronographes de JWST/MIRI	Boccaletti et al. 2022, A&A			ITHD
2022	Première lumière de PAPHOS	Fetick et al. 2024, SPIE	CP CNRS		OA
2022	Livraison OAPs superpolies pour ROMAN CGI	A. Caillat et al. 2022, SPIE	CP CNRS		Optique
2023	Photonic beam combiner for VIS interferometry	Lallement et al. 2023, JATIS			Interf
2023	Première lumière GRA4MAT (MATISSE narrow off axis)	Woillez et al. 2024, A&A			Interf
2023	Qualification du mode kernel-phase imaging sur l'instrument JWST/NIRISS	Kammerer et al. 2023, PASP			Interf
2023	Premières franges 6T visibles sur CHARA/SPICA et Premières opérations simultanées SPICA/MIRCX/MYSTIC (bandes R, H, K) 6T simultanés	Mourard et al. 2024, SPIE			Interf
2023	RAP on sky	Leboulleux et al. (in prep)			ITHD
2023	Mise sur ciel de HiRISE	A. Vigan et al. 2024, A&A	CP CNRS		ITHD
2023	Démonstration en laboratoire du principe d'analyse de surface d'onde multi-objets (V(WF)2S)	Lai et al. 2023, AO4ELT proc.			OA
2023	Développement de la station ANAtOLIA pour l'ESA				Optique
2024	PACOME : Optimal multi-epoch combination of direct imaging observations for joint exoplanet detection and orbit estimation	Dallant et al. 2023, A&A			DS
2024	Heterodyne interferometry demonstration	Allain, 2024, Thèse			Interf
2024	FIRST 3D 5T beam combiner	Martin et al. 2024, SPIE			Interf
2024	Premier fringe tracking 6T bande H avec optique de volume et optique intégrée avec SPICA-FT	Mourard et al. 2024, SPIE			Interf
2024	Première démo d'une optique adaptative en cascade avec un second étage base sur un analyseur de Zernike	N'Diaye et al. 2024, A&A			ITHD
2024	Première lumière GPAO (GRAVITY+)	GRAVITY+ coll. et al. (soumis)			OA, Interf
2024	Première lumière d'un miroir secondaire adaptatif nouvelle génération IRTF	Lee et al. 2024, SPIE	CP DSPE		OA
2024	Revue de conception finale de MICADO	Sturm et al. 2024, SPIE	CP ESO		OA
2025	PAE de l'instrument visiteur ASGAR				Interf

TABLE C.1 – Résultats marquants en instrumentation HRA identifiés par la communauté (2020-2025). OA = Optique Adaptative; IO = Interférométrie optique; ITHD = Imagerie à très haute dynamique; DS = Science des données.

Année	Résultat Marquant	Publication	Communiqué de presse (CP)	Thème
2020	Enfin un modèle réaliste d'Altaïr, étoile en rotation extrême!	Bouchaud et al. 2020, A&A	CP INSU	Interf
2020	Détection de la précession de Schwarzschild sur l'orbite de S2 autour de Sgr A*	GRAVITY Collaboration 2020, A&A		Interf
2020	Détection directe de beta Pic c	Nowak et al. 2020, A&A	CP MPE	Interf
2022	Thermal imaging of dust hiding the black hole in NGC 1068	Gamez-Rosas et al. 2022, Nature	CP ESO	Interf
2022	Signature d'une masse étendue sur l'orbite de S2	Heissel et al. 2022, A&A		Interf
2022	Distribution de masse dans le centre galactique à partir de l'astrométrie interférométrique de plusieurs orbites stellaires	GRAVITY Collaboration et al. 2022, A&A		Interf
2024	Pushing high contrast with GRAVITY	Pourré et al. 2024, A&A	CP ESA	Interf
2024	Mesure dynamique de la masse du trou noir dans un quasar il y a 11 milliards d'années	Abuter et al 2024, Nature	CP ESO	Interf
2024	Chromatically modeling the parsec-scale dusty structure in the center of NGC 1068	Leftley et al. 2023, A&A		Interf
2024	Amélioration des contraintes sur la masse étendue autour de Sgr A*	Gravity Collaboration et al. 2024, A&A		Interf
2025	Premières observation interférométriques VLTI/MATISSE d'une exoplanète, beta Pic b	Houllé et al, A&A 2025 (en cours de revue)		Interf
2025	Premier résultat astrophysique de HiRISE sur AF Lep b	Denis et al. 2025, A&A	CP INSU	ITHD

TABLE C.2 – Résultats astrophysiques marquants utilisant des instruments HRA (2020-2025). La deuxième partie du tableau liste des résultats marquants en instrumentation HRA en dehors de l'astronomie.

Bibliographie

- Gregory Allan, Iksung Kang, Ewan S. Douglas, Mamadou N’Diaye, George Barbastathis, et Kerri Cahoy. Deep neural networks to improve the dynamic range of Zernike phase-contrast wavefront sensing in high-contrast imaging systems. Dans *Proceedings of the SPIE*, volume 11443, pages 743–753. SPIE, décembre 2020. [56](#)
- J. R. P. Angel, P. Wizinowich, M. Lloyd-Hart, et D. Sandler. Adaptive optics for array telescopes using neural-network techniques. *Nature*, 348(6298) :221–224, novembre 1990. ISSN 1476-4687. [56](#)
- Robert Antonucci. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *ARA&A*, 31 :473–521, janvier 1993. [54](#)
- Anthony Berdeu, Maud Langlois, et Frédéric Vachier. First observation of a quadruple asteroid. Detection of a third moon around (130) Elektra with SPHERE/IFS. *A&A*, 658 :L4, février 2022. [41](#)
- J. L. Beuzit, A. Vigan, D. Mouillet, K. Dohlen, R. Gratton, A. Boccaletti, J. F. Sauvage, H. M. Schmid, M. Langlois, C. Petit, A. Baruffolo, M. Feldt, J. Milli, Z. Wahhaj, L. Abe, U. Anselmi, J. Antichi, R. Barette, J. Baudrand, P. Baudoz, A. Bazzon, P. Bernardi, P. Blanchard, R. Brast, P. Bruno, T. Buey, M. Carbillet, M. Carle, E. Cascone, F. Chapron, J. Charton, G. Chauvin, R. Claudi, A. Costille, V. De Caprio, J. de Boer, A. Delboulbé, S. Desidera, C. Dominik, M. Downing, O. Dupuis, C. Fabron, D. Fantinel, G. Farisato, P. Feautrier, E. Fedrigo, T. Fusco, P. Gigan, C. Ginski, J. Girard, E. Giro, D. Gisler, L. Gluck, C. Gry, T. Henning, N. Hubin, E. Hugot, S. Incorvaia, M. Jaquet, M. Kasper, E. Lagadec, A. M. Lagrange, H. Le Coroller, D. Le Mignant, B. Le Ruyet, G. Lessio, J. L. Lizon, M. Llored, L. Lundin, F. Madec, Y. Magnard, M. Marteaud, P. Martinez, D. Maurel, F. Ménard, D. Mesa, O. Möller-Nilsson, T. Moulin, C. Moutou, A. Origné, J. Parisot, A. Pavlov, D. Perret, J. Pragt, P. Puget, P. Rabou, J. Ramos, J. M. Reess, F. Rigal, S. Rochat, R. Roelfsema, G. Rousset, A. Roux, M. Saisse, B. Salasnich, E. Santambrogio, S. Scuderi, D. Segransan, A. Sevin, R. Siebenmorgen, C. Soenke, E. Stadler, M. Suarez, D. Tiphène, M. Turatto, S. Udry, F. Vakili, L. B. F. M. Waters, L. Weber, F. Wildi, G. Zins, et A. Zurlo. SPHERE : the exoplanet imager for the Very Large Telescope. *A&A*, 631 :A155, novembre 2019. [48](#)
- A. Boccaletti, E. Di Folco, E. Pantin, A. Dutrey, S. Guilloteau, Y. W. Tang, V. Piétu, E. Habart, J. Milli, T. L. Beck, et A. L. Maire. Possible evidence of ongoing planet formation in AB Aurigae. A showcase of the SPHERE/ALMA synergy. *A&A*, 637 :L5, mai 2020. [48](#)
- A. Boccaletti, C. Cossou, P. Baudoz, P. O. Lagage, D. Dicken, A. Glasse, D. C. Hines, J. Aguilar, O. Detre, B. Nickson, A. Noriega-Crespo, A. Gáspár, A. Labiano, C. Stark, D. Rouan, J. M. Reess, G. S. Wright, G. Rieke, M. Garcia Marin, C. Lajoie, J. Girard, M. Perrin, R. Soummer, et L. Pueyo. JWST/MIRI coronagraphic performances as measured on-sky. *A&A*, 667 :A165, novembre 2022. [48](#)
- C. Cantero, O. Absil, C.-H. Dahlqvist, et M. Van Droogenbroeck. NA-SODINN : A deep learning algorithm for exoplanet image detection based on residual noise regimes. *Astronomy and Astrophysics*, 680 :A86, décembre 2023. ISSN 0004-6361, 1432-0746. [56](#)
- A. Chomez, P. Delorme, A. M. Lagrange, R. Gratton, O. Flasseur, G. Chauvin, M. Langlois, J. Mazoyer, A. Zurlo, S. Desidera, D. Mesa, M. Bonnefoy, M. Feldt, J. Hagelberg, M. Meyer, A. Vigan, C. Ginski, M. Kenworthy, D. Albert, S. Bergeon, J. L. Beuzit, B. Biller, T. Bhowmik, A. Boccaletti, M. Bonavita, W. Brandner, F. Cantalloube, A. Cheetham, V. D’Orazi, C. Dominik, C. Fontanive, R. Galicher,

- Th. Henning, M. Janson, Q. Kral, E. Lagadec, C. Lazzoni, H. Le Coroller, R. Ligi, A. L. Maire, G. D. Marleau, F. Menard, S. Messina, N. Meunier, C. Mordasini, C. Moutou, A. Müller, C. Perrot, M. Samland, H. M. Schmid, T. Schmidt, V. Squicciarini, E. Sissa, M. Turatto, S. Udry, L. Abe, J. Antichi, R. Asensio-Torres, A. Baruffolo, P. Baudoz, J. Baudrand, A. Bazzon, P. Blanchard, A. J. Bohn, S. Brown Sevilla, M. Carbillet, M. Carle, E. Cascone, J. Charton, R. Claudi, A. Costille, V. De Caprio, A. Delboulbé, K. Dohlen, N. Engler, D. Fantinel, P. Feautrier, T. Fusco, P. Gigan, J. H. Girard, E. Giro, D. Gisler, L. Gluck, C. Gry, N. Hubin, E. Hugot, M. Jaquet, M. Kasper, D. Le Mignant, M. Llored, F. Madec, Y. Magnard, P. Martinez, D. Maurel, O. M ller-Nilsson, D. Mouillet, T. Moulin, A. Origné, A. Pavlov, D. Perret, C. Petit, J. Pragt, P. Puget, P. Rabou, J. Ramos, E. L. Rickman, F. Rigal, S. Rochat, R. Roelfsema, G. Rousset, A. Roux, B. Salasnich, J. F. Sauvage, A. Sevin, C. Soenke, E. Stadler, M. Suarez, Z. Wahhaj, L. Weber, et F. Wildi. The SPHERE infrared survey for exoplanets (SHINE) : IV. Complete observations, data reduction and analysis, detection performances, and final results. *A&A*, 697 :A99, mai 2025. 48
- E. Choquet, F. Martinache, P. Berio, S. Lacour, J. B. Le Bouquin, F. Millour, et I. Tallon-Bosc. Status & Prospects in Optical Interferometry. Dans M. B thermin, K. Bailli , N. Lagarde, J. Malzac, R. M. Ouazzani, J. Richard, O. Venot, et A. Siebert,  diteurs, *SF2A-2024 : Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*. Eds. : M. B thermin, pages 187–191, décembre 2024. 32
- Paolo Ciliegi, Guido Agapito, Matteo Aliverti, Francesca Annibali, Carmelo Aridiacono, Nicol  Azzaroli, Andrea Balestra, Ivano Baronchelli, Alessandro Ballone, Andrea Baruffolo, Federico Battaini, Simone Benedetti, Maria Bergomi, Andrea Bianco, Marco Bonaglia, Runa Briguglio, Lorenzo Busoni, Michele Cantiello, Giulio Capasso, Giulia Carl , Elena Carolo, Enrico Cascone, Ga l. Chauvin, Manal Chebbo, Simonetta Chinellato, Vincenzo Cianniello, Mirko Colapietro, Jean-Jacques Correia, Giuseppe Cosentino, Elia Costa, Domenico D’Auria, Vincenzo De Caprio, Nicholas Devaney, Ivan Di Antonio, Amico Di Cianno, Andrea Di Dato, Simone Di Filippo, Benedetta Di Francesco, Ugo Di Giammatteo, Chiara Di Prospero, Gianluca Di Rico, Andrea Di Rocco, Daphne Diretto, Mauro Dolci, Christian Eredia, Simone Esposito, Daniela Fantinel, Jacopo Farinato, Philippe Feautrier, Italo Foppiani, Matteo Genoni, Enrico Giro, Laurence Gluck, Alexander Goncharov, Paolo Grani, Davide Greggio, Sylvain Guieu, Marco Gullieuszik, Zoltan Hubert, Laurent Jocou, Salvatore Lampitelli, Tommaso Lapucci, Fulvio Laudisio, Vincent Leal, Yves Magnard, Demetrio Magrin, Deborah Malone, Luca Marafatto, Christophe Michel, David Mouillet, Thibaut Moulin, Matteo Munari, Sylvain Oberti, Fabrice Pancher, Giorgio Pariani, Amedeo Petrella, Laurent Pinnard, Cedric Plantet, Elisa Portaluri, Alfio Puglisi, Patrick Rabou, Kalyan Radhakrishnan, Roberto Ragazzoni, Edoardo Maria Alberto Redaelli, Marco Riva, Sylvain Rochat, Gabriele Rodeghiero, Luca Rosignoli, Bernardo Salasnich, Salvatore Savarese, Marcello Scaleria, Pietro Schipani, Danilo Selvestrel, Benoit Sassolas, Rosanna Sordo, Ludovico Teodori, Gabriele Umbriaco, Angelo Valentini, et Marco Xompero. MORFEO at ELT : the adaptive optics module for ELT. Dans Kathryn J. Jackson, Dirk Schmidt, et Elise Vernet,  diteurs, *Adaptive Optics Systems IX*, volume 13097 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 1309722, ao t 2024. 45
- Yann Clénet, Eric Gendron, Fabrice Vidal, Mathieu Cohen, Frédéric Chapron, Arnaud Sevin, Tristan Buey, Sylvain Guieu, Sylvestre Taburet, Bruno Borgo, Jean-Michel Huet, Olivier Dupuis, Kévin Cloiseau, Alexandre Blin, Julien Gaudemard, Claude Collin, Julian Porras, Florian Ferreira, Jordan Raffard, Fanny Chemla, Vincent Lapey re, Eric Meyer, Nicolas Gautherot, Emmanuel Tisserand, Hervé Locatelli, Gilles Fasola, Lahoucine Ghouchou, Camille Gennet, François Meyer, Amal Zidi, Caroline Kulcsár, Henri-François Raynaud, Benoit Sassolas, Laurent Pinard, Christophe Michel, Damien Grataour, Roderick Dembet, Pierre Baudoz, Elsa Huby, Sebastian Rabien, Eckhard Sturm, et Richard Davies. The MICADO first-light imager for the ELT : first steps of the SCAO system MAIT. Dans Kathryn J. Jackson, Dirk Schmidt, et Elise Vernet,  diteurs, *Adaptive Optics Systems IX*, volume 13097 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 1309728, ao t 2024. 45
- Maxime Dumont, Carlos M. Correia, Jean-François Sauvage, Noah Schwartz, Morgan Gray, et Jaime Car-

- doso. Phasing segmented telescopes via deep learning methods : application to a deployable CubeSat. *Journal of the Optical Society of America A*, 41(3) :489–499, mars 2024. [56](#)
- Romain J. L. Fétick, Thierry Fusco, Arnaud Striffling, Eduard Muslimov, Jean-François Sauvage, Cédric Taïssir Héritier, Jonathan Dray, Sylvain Cetre, Vincent Chambouleyron, Idir Boudjema, Edoardo Bellone, Mahawa Cisse, Colin Dartevelle, Alexis Carlotti, Benoît Neichel, Bruno Martin, Jérôme Schmitt, François Huppert, François Dolon, et Marc Ferrari. PAPHYRUS : from an adaptive optics system to an instrumental platform. Dans Kathryn J. Jackson, Dirk Schmidt, et Elise Vernet, éditeurs, *Adaptive Optics Systems IX*, volume 13097 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 1309716, août 2024. [45](#)
- Olivier Flasseur, Théo Bodrito, Julien Mairal, Jean Ponce, Maud Langlois, et Anne-Marie Lagrange. Deep PACO : Combining statistical models with deep learning for exoplanet detection and characterization in direct imaging at high contrast. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 527 :1534–1562, janvier 2024. ISSN 0035-8711. [56](#)
- Violeta Gámez Rosas, Jacob W. Isbell, Walter Jaffe, Romain G. Petrov, James H. Leftley, Karl-Heinz Hoffmann, Florentin Millour, Leonard Burtscher, Klaus Meisenheimer, Anthony Meilland, Laurens B. F. M. Waters, Bruno Lopez, Stéphane Lagarde, Gerd Weigelt, Philippe Berio, Fatme Allouche, Sylvie Robbe-Dubois, Pierre Cruzalèbes, Felix Bettonvil, Thomas Henning, Jean-Charles Augereau, Pierre Antonelli, Udo Beckmann, Roy van Boekel, Philippe Bendjoya, William C. Danchi, Carsten Dominik, Julien Drevon, Jack F. Gallimore, Uwe Graser, Matthias Heininger, Vincent Houdé, Michiel Hogerheijde, Josef Hron, Caterina M. V. Impellizzeri, Lucia Klarmann, Elena Kokoulina, Lucas Labadie, Michael Lehmitz, Alexis Matter, Claudia Paladini, Eric Pantin, Jörg-Uwe Pott, Dieter Schertl, Anthony Soulain, Philippe Stee, Konrad Tristram, Jozsef Varga, Julien Woillez, Sebastian Wolf, Gideon Yoffe, et Gerard Zins. Thermal imaging of dust hiding the black hole in NGC 1068. *Nature*, 602(7897) :403–407, février 2022. [54](#)
- GRAVITY Collaboration, O. Pfuhl, R. Davies, J. Dexter, H. Netzer, S. Hönl, D. Lutz, M. Schartmann, E. Sturm, A. Amorim, W. Brandner, Y. Clénet, P. T. de Zeeuw, A. Eckart, F. Eisenhauer, N. M. Förster Schreiber, F. Gao, P. J. V. Garcia, R. Genzel, S. Gillessen, D. Gratadour, M. Kishimoto, S. Lacour, F. Millour, T. Ott, T. Paumard, K. Perraut, G. Perrin, B. M. Peterson, P. O. Petrucci, M. A. Prieto, D. Rouan, J. Shanguan, T. Shimizu, A. Sternberg, O. Straub, C. Straubmeier, L. J. Tacconi, K. R. W. Tristram, P. Verlot, I. Waisberg, F. Widmann, et J. Woillez. An image of the dust sublimation region in the nucleus of NGC 1068. *A&A*, 634 :A1, février 2020. [54](#)
- Yann Gutierrez, Johan Mazoyer, Laurent M. Mugnier, Olivier Herscovici-Schiller, et Baptiste Abeloos. Image-based wavefront correction using model-free reinforcement learning. *Optics Express*, 32 :31247, août 2024. ISSN 1094-4087. [56](#)
- Jonah T. Hansen, Michael J. Ireland, et LIFE Collaboration. Large Interferometer For Exoplanets (LIFE). IV. Ideal kernel-nulling array architectures for a space-based mid-infrared nulling interferometer. *A&A*, 664 :A52, août 2022. [35](#)
- Peng Jia, Xuebo Wu, Huang Yi, Bojun Cai, et Dongmei Cai. Psf-net : A nonparametric point-spread function model for ground-based optical telescopes. *The Astronomical Journal*, 159(4) :183, apr 2020. [56](#)
- M. Kasper, N. Cerpa Urra, P. Pathak, M. Bonse, J. Nousiainen, B. Engler, C. T. Héritier, J. Kammerer, S. Leveratto, C. Rajani, P. Bristow, M. Le Louarn, P. Y. Madec, S. Ströbele, C. Verinaud, A. Glauser, S. P. Quanz, T. Helin, C. Keller, F. Snik, A. Boccaletti, G. Chauvin, D. Mouillet, C. Kulcsár, et H. F. Raynaud. PCS — A Roadmap for Exoearth Imaging with the ELT. *The Messenger*, 182 :38–43, mars 2021. [32](#)
- M. Keppler, R. Teague, J. Bae, M. Benisty, T. Henning, R. van Boekel, E. Chapillon, P. Pinilla, J. P. Williams, G. H. M. Bertrang, S. Facchini, M. Flock, Ch. Ginski, A. Juhasz, H. Klahr, Y. Liu, A. Müller, L. M. Pérez, A. Pohl, G. Rosotti, M. Samland, et D. Semenov. Highly structured disk around the planet

- host PDS 70 revealed by high-angular resolution observations with ALMA. *A&A*, 625 :A118, mai 2019. [48](#)
- J. H. Leftley, R. Petrov, N. Moszczynski, P. Vermot, S. F. Hönig, V. Gamez Rosas, J. W. Isbell, W. Jaffe, Y. Clénet, J. C. Augereau, P. Berio, R. I. Davies, T. Henning, S. Lagarde, B. Lopez, A. Matter, A. Meilland, F. Millour, N. Nesvadba, T. T. Shimizu, E. Sturm, et G. Weigelt. Chromatically modeling the parsec-scale dusty structure in the center of NGC 1068. *A&A*, 686 :A204, juin 2024. [54](#)
- Florentin Millour, Guillaume Bourdarot, Jean-Baptiste Le Bouquin, Anthony Berdeu, Mathis Houllé, Philippe Berio, Thibaut Paumard, Denis Defrère, Paulo Garcia, Ferreol Soulez, Sebastian Hoenig, Fatmé Allouche, Martin Bachbuecher, Christophe Bailet, Cyrille Blanchard, Olivier Boebion, Henri Bonnet, Amit Brara, Marcel Carillet, Stephan Czempel, Alain Delboulbé, Roderick Dombet, Clémence Edouard, Frank Eisenhauer, Helmut Feuchtgruber, Christoph Furchtsam, Stefan Gillessen, Armin Goldbrunner, Tiago Gomes, Carole Gouvret, Sylvain Guieu, Mike Hartl, Johannes Hartwig, Frank Haussmann, David Huber, Ihsan Ibn Taïeb, Johann Kolb, Stéphane Lagarde, Olivier Lai, James Leftley, Dieter Lutz, Yves Magnard, Aurélie Marcotto, Hugo Nowacki, Sylvain Oberti, Thomas Ott, Christian Rau, Sylvie Robbe-Dubois, Jules Scigliuto, Franz Soller, Pavel Shcheketurov, Daniel Schuppe, Eric Stadler, Sinem Uysal, Felix Widmann, Ekherhard Wieprecht, Julien Woillez, et Šenol Yazici. GRAVITY+ adaptive optics (GPAO) tests in Europe. Dans Jens Kammerer, Stephanie Sallum, et Joel Sanchez-Bermudez, éditeurs, *Optical and Infrared Interferometry and Imaging IX*, volume 13095 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 1309520, août 2024. [52](#)
- J. Nousiainen, C. Rajani, M. Kasper, T. Helin, S. Y. Haffert, C. Vérinaud, J. R. Males, K. Van Gorkom, L. M. Close, J. D. Long, A. D. Hedglen, O. Guyon, L. Schatz, M. Kautz, J. Lumbres, A. Rodack, J. M. Knight, et K. Miller. Toward on-sky adaptive optics control using reinforcement learning. Model-based policy optimization for adaptive optics. *Astronomy and Astrophysics*, 664 :A71, août 2022. ISSN 0004-6361. [56](#)
- G. Orban de Xivry, M. Quesnel, P. O. Vanberg, O. Absil, et G. Louppe. Focal plane wavefront sensing using machine learning : Performance of convolutional neural networks compared to fundamental limits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505 :5702–5713, août 2021. ISSN 0035-8711. [56](#)
- A. Potier, J. Mazoyer, Z. Wahhaj, P. Baudoz, G. Chauvin, R. Galicher, et G. Ruane. Increasing the raw contrast of vlt/sphere with the dark hole technique. ii. on-sky wavefront correction and coherent differential imaging. *A&A*, 665 :A136, septembre 2022. [41](#), [48](#)
- M. Quesnel, G. Orban de Xivry, G. Louppe, et O. Absil. A deep learning approach for focal-plane wavefront sensing using vortex phase diversity. *Astronomy and Astrophysics*, 668 :A36, décembre 2022. ISSN 0004-6361. [56](#)
- Melanie Roulet, Emmanuel Hugot, Carolyn Atkins, Michel Marcos, Simona Lombardo, Anne Bonnefoi, Amandine Caillat, et Marc Ferrari. Off-axis parabolas super polished under stress : the case of the Roman Space Telescope coronagraphic instrument mirrors. *Optics Express*, 28(21) :30555, octobre 2020. [41](#)
- D. G. Sandler, T. K. Barrett, D. A. Palmer, R. Q. Fugate, et W. J. Wild. Use of a neural network to control an adaptive optics system for an astronomical telescope. *Nature*, 351(6324) :300–302, mai 1991. ISSN 1476-4687. [56](#)
- Jean-François Sauvage, Thierry Fusco, Masen Lamb, Julien Girard, Martin Brinkmann, Andres Guesalaga, Peter Wizinowich, Jared O’Neal, Mamadou N’Diaye, Arthur Vigan, David Mouillet, Jean-Luc Beuzit, Markus Kasper, Miska Le Louarn, Julien Milli, Kjetil Dohlen, Benoît Neichel, Pierre Bourget, Pierre Haguenaue, et Dimitri Mawet. Tackling down the low wind effect on SPHERE instrument. Dans Enrico Marchetti, Laird M. Close, et Jean-Pierre Véran, éditeurs, *Adaptive Optics Systems V*, volume 9909 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 990916, juillet 2016. [48](#)

- A. Vigan, M. N'Diaye, K. Dohlen, J. F. Sauvage, J. Milli, G. Zins, C. Petit, Z. Wahhaj, F. Cantalloube, A. Caillat, A. Costille, J. Le Merrer, A. Carlotti, J. L. Beuzit, et D. Mouillet. Calibration of quasi-static aberrations in exoplanet direct-imaging instruments with a Zernike phase-mask sensor. III. On-sky validation in VLT/SPHERE. *A&A*, 629 :A11, septembre 2019. [48](#)
- A. Vigan, C. Fontanive, M. Meyer, B. Biller, M. Bonavita, M. Feldt, S. Desidera, G. D. Marleau, A. Emshenhuber, R. Galicher, K. Rice, D. Forgan, C. Mordasini, R. Gratton, H. Le Coroller, A. L. Maire, F. Cantalloube, G. Chauvin, A. Cheetham, J. Hagelberg, A. M. Lagrange, M. Langlois, M. Bonnefoy, J. L. Beuzit, A. Boccaletti, V. D'Orazi, P. Delorme, C. Dominik, Th. Henning, M. Janson, E. Lagadec, C. Lazzoni, R. Ligi, F. Menard, D. Mesa, S. Messina, C. Moutou, A. Müller, C. Perrot, M. Samland, H. M. Schmid, T. Schmidt, E. Sissa, M. Turatto, S. Udry, A. Zurlo, L. Abe, J. Antichi, R. Asensio-Torres, A. Baruffolo, P. Baudoz, J. Baudrand, A. Bazzon, P. Blanchard, A. J. Bohn, S. Brown Sevilla, M. Carbillet, M. Carle, E. Cascone, J. Charton, R. Claudi, A. Costille, V. De Caprio, A. Delboulbé, K. Dohlen, N. Engler, D. Fantinel, P. Feautrier, T. Fusco, P. Gigan, J. H. Girard, E. Giro, D. Gisler, L. Gluck, C. Gry, N. Hubin, E. Hugot, M. Jaquet, M. Kasper, D. Le Mignant, M. Llored, F. Madec, Y. Magnard, P. Martinez, D. Maurel, O. Möller-Nilsson, D. Mouillet, T. Moulin, A. Origné, A. Pavlov, D. Perret, C. Petit, J. Pragt, P. Puget, P. Rabou, J. Ramos, E. L. Rickman, F. Rigal, S. Rochat, R. Roelfsema, G. Rousset, A. Roux, B. Salasnich, J. F. Sauvage, A. Sevin, C. Soenke, E. Stadler, M. Suarez, Z. Wahhaj, L. Weber, et F. Wildi. The SPHERE infrared survey for exoplanets (SHINE). III. The demographics of young giant exoplanets below 300 au with SPHERE. *A&A*, 651 :A72, juillet 2021. [48](#)
- A. Vigan, K. Dohlen, M. N'Diaye, F. Cantalloube, J. H. Girard, J. Milli, J. F. Sauvage, Z. Wahhaj, G. Zins, J. L. Beuzit, A. Caillat, A. Costille, J. Le Merrer, D. Mouillet, et S. Tourenq. Calibration of quasi-static aberrations in exoplanet direct-imaging instruments with a Zernike phase-mask sensor. IV. Temporal stability of non-common path aberrations in VLT/SPHERE. *A&A*, 660 :A140, avril 2022. [48](#)
- Camilo Weinberger, Felipe Guzmán, Jorge Tapia, Benoît Neichel, et Esteban Vera. Exploration of convolutional neural networks to handle non-linearity estimation issues in pyramid wavefront sensors. Dans *Proceedings of the SPIE*, volume 12185, pages 2576–2581. SPIE, août 2022. [56](#)