

Prix Charles Defforey de l'Institut de France

Imager de Nouveaux Mondes
Préparer la prochaine génération d'imageurs
d'exoplanètes

Porteurs de la demande :

M.	Jean-Luc	BEUZIT	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
M.	Anthony	BOCCALETTI	Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique
M.	Gaël	CHAUVIN	Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble
M.	Thierry	FUSCO	Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
Mme.	Maud	LANGLOIS	Centre de Recherche Astrophysique de Lyon
M.	David	MOUILLET	Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

9 février 2020

1. Résumé

Nous postulons ici au prix Charles Defforey en tant qu'équipe de six personnes possédant une expertise forte et complémentaire dans le domaine de l'imagerie directe des systèmes exoplanétaires. L'observation des exoplanètes a fait un énorme pas en avant au cours des trente dernières années, avec évidemment la première découverte d'un Jupiter chaud par Mayor et Queloz en 1995, utilisant le mouvement réflexe de l'étoile hôte. Rapidement, ces méthodes de détection indirectes ont révélé une diversité inattendue d'exoplanètes dans l'Univers, faisant du Système Solaire un cas très particulier. De nombreuses planètes ont été découvertes, jusqu'à de faibles masses et rayons, à de très faibles séparations de leurs étoiles. Ces techniques indirectes ayant par nature un biais observationnel vers ce type d'objets.

À la fin des années 90, l'imagerie directe par les télescopes spatiaux et au sol était balbutiante et exotique pour la communauté naissante étudiant les exoplanètes, conséquence directe des défis technologiques majeurs à relever pour la détection directe des exoplanètes. À cette époque, notre équipe a joué un rôle pionnier pour concevoir et construire les précurseurs des premiers imageurs exoplanétaires, tout en continuant d'explorer les améliorations et les développements futurs. Cette expertise nous a conduit à réaliser des percées astrophysiques avec les premières images et spectres de jeunes planètes géantes, le suivi direct de leur révolution autour de leur étoile, la détermination de leur fréquence aux longues périodes, et l'étude de la diversité des architectures exoplanétaires lors du processus de formation. Grâce à notre contribution, l'imagerie directe occupe aujourd'hui une place unique et complémentaire dans l'exploration des systèmes exoplanétaires, et représente un tremplin essentiel pour la découverte et la caractérisation future de petites exoplanètes tempérées comme la Terre, susceptibles d'héberger la vie.

Nous avons été pionniers dans le développement des techniques d'imagerie à grand contraste en France, en suivant l'héritage de Bernard Lyot qui avait, en développant le premier coronographe, pu observer la couronne solaire dans les années 1930. En 2002, notre expertise nous a amené à concevoir l'instrument SPHERE mis en service en 2015. Cet instrument s'appuie sur de nouvelles technologies, que nous avons amenées à maturité, comme l'optique adaptative extrême et la coronographie, et la maîtrise des contraintes optiques du système très strictes qui limitent le contraste. Grâce à SPHERE (plus de 120 articles publiés au total), le nombre d'études détaillées des systèmes exoplanétaires en détection directe a littéralement explosé. Nos contributions ont ouvert la voie à de nouvelles découvertes importantes telles que la jeune planète massive HIP 65426 b, les structures en mouvement rapide dans le disque de débris de AU Mic, ou les bras spiraux du disque de transition vue par la tranche RY Lup. Ce succès, et la compréhension fine des limitations actuelles, constituent la meilleure base pour poursuivre l'amélioration des performances, et accéder à une plus grande variété d'exoplanètes. Il s'agit du projet SPHERE+.

Les principaux objectifs de SPHERE+ sont d'augmenter le contraste à des plus petites séparations, ainsi que le nombre d'étoiles sondées afin d'atteindre le gros de la population de planètes géantes probablement concentrées autour de 3 à 5 ua. Ce programme aura une forte synergie avec les grands relevés en vitesse radiale et Gaia, ainsi qu'avec ALMA. SPHERE+ fournira le moyen unique de relier, pour la première fois, la luminosité (et les propriétés atmosphériques) des exoplanètes jeunes à leur masse. SPHERE+ est un projet intermédiaire dans la feuille de route de l'imagerie directe des exoplanètes. Nous sommes tous impliqués dans la préparation des instruments pour le Télescope Extrêmement Grand (ELT) de l'ESO. Ceux-ci se concentreront sur la caractérisation des exoplanètes découvertes avec SPHERE+. Nos travaux auront également des retombées instrumentales et astrophysiques pour les prochaines missions spatiales comme JWST et WFIRST sur lesquels certains d'entre nous sont impliqués, et à plus long terme, pour lancer les projets spatiaux des prochaines décennies, visant à imager et caractériser des exoplanètes telluriques possiblement semblables à la Terre.

Les activités de recherche que nous poursuivons tous les six sont déjà reconnues mais nous souhaitons souligner l'importance à nos yeux de cette association étroite permettant de couvrir les expertises de premier plan de la conception des nouveaux instruments à leur exploitation astrophysique. Ce type d'association a sans doute été déterminante pour placer la communauté française en pointe dans ce domaine. À cet égard, le prix Charles Defforey apportera un atout majeur pour consolider cette position et soutenir les progrès de l'imagerie des systèmes exoplanétaires. Nous souhaitons partager les 10% de cette dotation de manière équitable parmi les six porteurs de cette équipe, alors que les 90% seront gérés par le laboratoire du PI de SPHERE+ (LESIA).

2. Publications

- **Beuzit, J.-L.**, Vigan, A., **Mouillet D.**, et al. (2019). "SPHERE : the exoplanet imager for the Very Large Telescope", *Astronomy and Astrophysics*, 631 (155), 1–36
- **Beuzit, J.-L.**, **Mouillet, D.**, Oppenheimer B., Monnier J.D. "Direct imaging of extra-solar planets", 2007, *Protostars and Planets V* (Hawaii, Oct 2005), 717
- **Beuzit J.-L.**, Ségransan D., Forveille T., Udry S., Delfosse X., Mayor M., Perrier C., Hainaut M.-C., Roddier C., Roddier F., Martin E. L. (2004). "New neighbours. III. 21 new companions to nearby dwarfs, discovered with adaptive optics", *A&A*, 425, 997–1008.
- Rousset G., **Beuzit J.-L.** (1999), "The ESO systems" in *Adaptive Optics in Astronomy*, Cambridge University Press, F. Roddier Ed., pp. 171–203
- **Beuzit J.-L.** et al. (1997), "Adaptive Optics on a 3.6-meter telescope : the ADONIS system", *Experimental Astronomy*, 7, 285–292
- **Beuzit J.-L.**, Mouillet D., Lagrange A.-M., Paufigue J. (1997), "A stellar coronagraph for the COMEON PLUS adaptive optics system. I. Description and performance", *A&AS*, 125, 175–182

- Lagrange, A.-M., **Boccaletti, A.**, **Langlois, M.**, **Chauvin, G.**, Gratton, R., et al., (2019). "Post-conjunction detection of Pictoris b with VLT/SPHERE", *Astronomy and Astrophysics*, 621, L8
- **Boccaletti, A.**, Sezestre, E., Lagrange, A.-M., Thébault, P., Gratton, R., et al., (2018). "Observations of fast-moving features in the debris disk of AU Mic on a three-year timescale : Confirmation and new discoveries", *Astronomy and Astrophysics*, 614, A52
- **Boccaletti, A.**, Thalmann, C., Lagrange, A.M., et al. (2015). "Fast-moving features in the debris disk around AU Microscopii". *Nature*, 526 (7572), 230+.
- **Boccaletti, A.**, Lagage, P.-O., Baudoz, P., Beichman, C., Bouchet, P., et al., (2015). "The Mid-Infrared Instrument for the James Webb Space Telescope, V : Predicted Performance of the MIRI Coronagraphs", *PASP*, 127, 633
- **Boccaletti, A.**, Lagrange, A.-M., Bonnefoy, M., Galicher, R., **Chauvin, G.**, (2013). "Independent confirmation of β Pictoris b imaging with NICI", *Astronomy and Astrophysics*, 551, L14
- **Boccaletti, A.**, Riaud, P., Baudoz, P., Baudrand, J., Rouan, D., et al., (2004). "The Four-Quadrant Phase Mask Coronagraph. IV. First Light at the Very Large Telescope", *PASP*, 116, 1061
- **Boccaletti, A.**, Augereau, J.-C., Marchis, F., Hahn, J., (2003). "Ground-based Near-Infrared Imaging of the HD 141569 Circumstellar Disk", *The Astrophysical Journal*, 585, 494
- **Boccaletti, A.**, Moutou, C., Labeyrie, A., Kohler, D., Vakili, F., (1998). "Present performance of the dark-speckle coronagraph", *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 133, 395

- **Chauvin G.**, Gratton R., Bonnefoy M. et al. (2018). "Investigating the young Solar System analog HD 95086". *A&A*, 617, 76 :
- **Chauvin G.** (2018). "Two Decades of Explanetary Science with AO", *SPIE*, 10703, 05
- **Chauvin G.**, Desidera D., Lagrange A.-M. et al., 2017, *A&A*, 605, L9 (ESO-ANN-17041) : "Discovery of a warm, dusty giant planet around HIP 65426"
- **Chauvin G.**, Vigan A. ; Bonnefoy M. ; Bonavita M. et al. *A&A*, 2015, 573, 127 : "VLT/NaCo large program for the occurrence of exoplanets at wide orbits"
- Rameau, J., **Chauvin G.**, Lagrange A.-M. ; **Boccaletti A.** ; Quanz S. et al., *ApJ*, 2013, 772, L15, (ESO-PR1324) : "Discovery of a 4-5 probable planet to HD95086"
- **Chauvin G.** ; Beust H. ; Lagrange A.-M. ; Eggenberger A., 2011, *A&A* : "Planetary systems in close binary stars : the case of HD 196885. The most extreme planetary system ?"
- **Chauvin G.**, Lagrange A.-M. ; Bonavita M. ; Zuckerman B. ; Dumas C. ; Bessell M. S. ; **Beuzit, J.-L.**, 2010, *A&A*, 509, 52 : "Deep imaging survey of young, nearby austral stars"
- Lagrange A.-M., Bonnefoy M., **Chauvin G.** et al., 2008, *Science*, 329, L57, (ESO-PR0842, ESO-PR1024) : "A giant planet imaged in the disk of the young star β Pictoris"
- **Chauvin G.**, Lagrange A.-M., Dumas, C. et al., 2004, *A&A*, 425, L29, (ESO-PR0428, ESO-PR0515) : "A giant planet imaged in the disk of the young star β Pictoris"

- **Fusco, T.**, Rousset, G., Rabaud, D., **Mouillet, D.** et al. (2004) "NAOS on-line characterization of turbulence parameters and adaptive optics performance", *J. of Opt. A : Pure and Applied Optics*, 6, (6)
- Mugnier, L, **Fusco, T.**, Conan, J.-M. (2004) "MISTRAL : a myopic edge-preserving image restoration method, with application to astronomical adaptive-optics-corrected long-exposure images", *JOSA A* 21 (10), 1841-1854 (2004)
- **Fusco, T.** et al. (2006) "High-order adaptive optics requirements for direct detection of extrasolar planets : Application to the SPHERE instrument", *Optics Express* Vol. 14, Issue 17, pp. 7515-7534
- Sauvage, J.-F., **Fusco, T.**, Rousset, G., Petit (2007) "Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics", *JOSA A* 24 (8)
- Sauvage, J.-F., **Fusco, T.**, Petit, C. et al. (2016) "SAXO : the extreme adaptive optics system of SPHERE (I) system overview and global laboratory performance ", *J. of Astro. Tel., Instr., and Syst.*, Vol. 2,
- **Fusco, T.**, Sauvage, J.F., **Mouillet D.**, et al (2016) "SAXO, (2016)the SPHERE extreme AO system : on-sky final performance and future improvements", *SPIE*, Vol. 9909, Adaptive Optics Systems V
- Fauvarque, O, Neichel, B.,**Fusco, T.**, Sauvage, J.-F., (2016) "General formalism for Fourier-based wave front sensing", *Optica*, 3(12), 1440–1452

- de Boer J., **Langlois, M.**, van Holstein R.G., et al., "Polarimetric imaging mode of VLT/SPHERE/IRDIS. I. Description, data reduction, and observing strategy" (2019), *A&A*, Volume 633, id.A63, 17 pp.
- **Langlois, M.**, et al., "First scattered light detection of a nearly edge-on transition disk around the T Tauri star RY Lupi" (2018) *A&A* 614, A88.
- Maire, A.-L., **Langlois, M.**; Dohlen K., Lagrange A.-M., Gratton R., Chauvin, G, et al., "SPHERE IRDIS and IFS astrometric strategy and calibration", (2016) *SPIE* , 990834-990834-12
- A. -M. Lagrange, **M. Langlois**, R. Gratton, A. -L. Maire, J. Milli, [..], **G. Chauvin**, et al., "A narrow, edge-on disk resolved around HD 106906 with SPHERE" (2015) *A&A*, Vol.11
- **Langlois M.**, Dohlen K., Vigan A., Zurlo A., Moutou C., Schmid H. M., Mili J., **Boccaletti, A.**; et al., "High contrast polarimetry in the infrared with on the VLT" (2014) *SPIE*, Volume 9147
- Vigan, A.,**Langlois, M.**,C. Moutou, K. Dohlen, "Exoplanets characterization with long slit spectroscopy", (2008) *A&A*, Volume 489, Issue 3
- **Langlois, M.**, Burrows, A., Hinz, P. "Ground-based direct detection of close-in extra-solar planets with nulling and high order adaptive optics" (2006) *A&A* 445, 1143-1149
- **M. Langlois, J.-L. Beuzit**, K. Dohlen, I. Egan, A. J. Longmore, L. Martin, **D. Mouillet**, et al. , "The dual-imaging camera for the VLT Planet Finder instrument" (2006), *Proc SPIE* 6269
- **M. Langlois**, D. Sandler, P. Ryan, D. McCarthy, "High frequency wavefront structure and its effects on the detection of faint companions using adaptive optics" (1998) *Proc. SPIE V. 3353*, p. 189-200,

- **Mouillet, D.**, Milli, J., Sauvage, J.-F., **Fusco, T.**, **Beuzit, J.-L.** et al., 2018, "Statistical analysis and lessons learned of SPHERE adaptive optics performance", *Proc. SPIE V. 10703*
- Carlotti, Alexis ; **Mouillet, David**, Correia, Jean-Jacques et al., "Experimental test of a micro-mirror array as an adaptive apodizer for high-contrast imaging", 2018, *Proc. SPIE V. 10703*
- Lovis, C., Snellen, I., **Mouillet, D.**, et al., "Atmospheric characterization of Proxima b by coupling the SPHERE high-contrast imager to the ESPRESSO spectrograph ", 2017, *A&A*, 599, 16
- Cantalloube, F., **Mouillet, D.**, Mugnier, L. et al., "Direct exoplanet detection and characterization using the ANDROMEDA method : Performance on VLT/NaCo data", 2015, *A&A*, 582, 89
- Milli, J., **Mouillet, D.**, Mawet, D. et al., "Prospects of detecting the polarimetric signature of the Earth-mass planet α Centauri B b with SPHERE/ZIMPOL", 2013, *A&A*, 556, 64
- **Mouillet, D.**, Larwood, J., Papaloizou, J. and Lagrange, A.M., et al., 1997, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 292, 896-904, "A planet as the origin of the beta Pictoris warp"
- **Mouillet, D.**, **Beuzit, J.-L.**, **Chauvin, G.**, Lagrange A.M. : "Very accurate imaging of the close environment of bright objects in visible and near-infrared wavelengths" 2002, ESO workshop Scientific Drivers for ESO Future VLT/VLTI Instrumentation , June 2001, p258

3. Membres de l'équipe

Les membres de l'équipe sont les porteurs de la demande. Le prix Defforey bénéficiera plus largement à l'ensemble des membres français du consortium SPHERE+.

M.	Jean-Luc	BEUZIT	Directeur de Recherche au LAM
M.	Anthony	BOCCALETTI	Chargé de Recherche au LESIA
M.	Gaël	CHAUVIN	Chargé de Recherche à l'IPAG
M.	Thierry	FUSCO	Directeur de Recherche à l'ONERA
Mme.	Maud	LANGLOIS	Directrice de Recherche au CRAL
M.	David	MOUILLET	Astronome à l'IPAG

4. Travaux accomplis

4.1 Le contexte de l'étude des exoplanètes

Notre vision et compréhension de l'Univers est entrée dans une nouvelle ère au cours des trente dernières années. La recherche et l'étude d'autres mondes situés au-delà de notre propre Système Solaire a révolutionné nos connaissances et préfigure comme objectif ultime la quête de planètes analogues à la Terre. Les deux prochaines décennies promettent des avancées tout aussi fondamentales dans ce domaine, s'orientant vers la caractérisation fine de la diversité des exoplanètes, jusqu'aux conditions d'émergence de la vie. Ainsi, les observations, principalement par méthodes indirectes (vélocimétrie et transit, depuis le sol et l'espace), ont révélé une riche diversité des systèmes exoplanétaires où les exoplanètes sont fréquentes, dans des architectures variées, avec une large gamme de propriétés physiques parfois très différentes des planètes de notre Système Solaire. On découvre ainsi les Jupiters chauds, massifs et très proches de leur étoile, mais aussi des planètes à faible densité, d'autres dominées par les glaces, un grand nombre de planètes de masses intermédiaires («super-Terres» ou «mini-Neptunes») ou enfin des planètes très massives, pourvues d'une atmosphère complexe incluant aérosols et poussières. Ces éléments nouveaux stimulent une recherche active (observationnelle et théorique) non seulement sur la physique des structures internes et des atmosphères, mais aussi sur les conditions de formation et d'évolution des systèmes planétaires dans leur ensemble. Dans ce cadre, les observations en imagerie directe des systèmes planétaires ont eu un rôle important dans le passé. À l'avenir, ce rôle sera renforcé avec l'amélioration spectaculaire des capacités observationnelles, la détermination de la fréquence des exoplanètes, et enfin avec l'intérêt et l'enjeu croissant pour une caractérisation fine, jusqu'aux conditions physiques et chimiques de ces exoplanètes. L'imagerie directe sera l'approche idéale et incontournable pour orienter des recherches beaucoup plus approfondies (plutôt que statistiques) sur les étoiles les plus proches de nous.

4.2 Des projets instrumentaux précurseurs

Nous soulignons ici, comment notre équipe a contribué dans la durée et en profondeur aux résultats dans le domaine de l'imagerie directe de systèmes exoplanétaires. Cela a demandé non seulement de proposer et maîtriser des techniques innovantes telles que l'optique adaptative et la coronagraphie, mais aussi de concevoir l'ensemble d'un instrument dédié au grand contraste, qui s'est concrétisé avec l'instrument SPHERE aujourd'hui en opération au Very Large Telescope (VLT) (Beuzit et al. 2019). Ce développement était motivé par les objectifs astrophysiques demandant une connaissance élargie des systèmes planétaires, et nécessitant des relevés de très grande ampleur sur des centaines d'étoiles, ainsi qu'une analyse à la fois statistique sur la complétude de ces observations et approfondie dans le cadre de systèmes spécifiques. Les modes instrumentaux devaient également être en mesure de révéler une physique riche et complexe, parfois surprenante, en particulier dans les phases précoces suivant la formation planétaire. L'imagerie directe présente des complémentarités fortes par rapport aux techniques de vélocimétrie et transit, car elle est unique pour sonder les régions externes au-delà de 5 ua, mais également les systèmes jeunes (pendant ou peu après leur formation). Au final, avoir une vision conjointe des planètes géantes (y compris externes) dominant la dynamique des systèmes et des disques de poussières apporte une représentation plus complète des architectures planétaires. Elle permet aussi une étude directe de la lumière émise (et potentiellement réfléchiée) des exoplanètes, de leurs propriétés atmosphériques (potentiellement de surfaces), mais aussi d'explorer les jeunes planètes en formation au sein des grands disques de gaz et poussières qui entourent les étoiles jeunes récemment formées. Elle est donc incontournable pour comprendre les processus de formation des planètes géantes qui ont un impact direct sur l'architecture des systèmes planétaires, en particulier sur la formation des planètes telluriques dans des régions tempérées capables d'accueillir la vie (Morbidelli et al. 2015).

L'imagerie directe des environnements circumstellaires représente un défi formidable : il s'agit d'obtenir un très grand contraste (de l'ordre de 10^6 pour l'imagerie d'exoplanètes géantes jeunes observées aujourd'hui) au plus près de l'étoile, à quelques éléments de diffraction des plus grands télescopes. Nous avons proposé et contribué de manière centrale à l'instrument SPHERE qui est à ce jour l'imageur d'exoplanètes le plus performant sur les grands télescopes au sol (Figure 4.1).

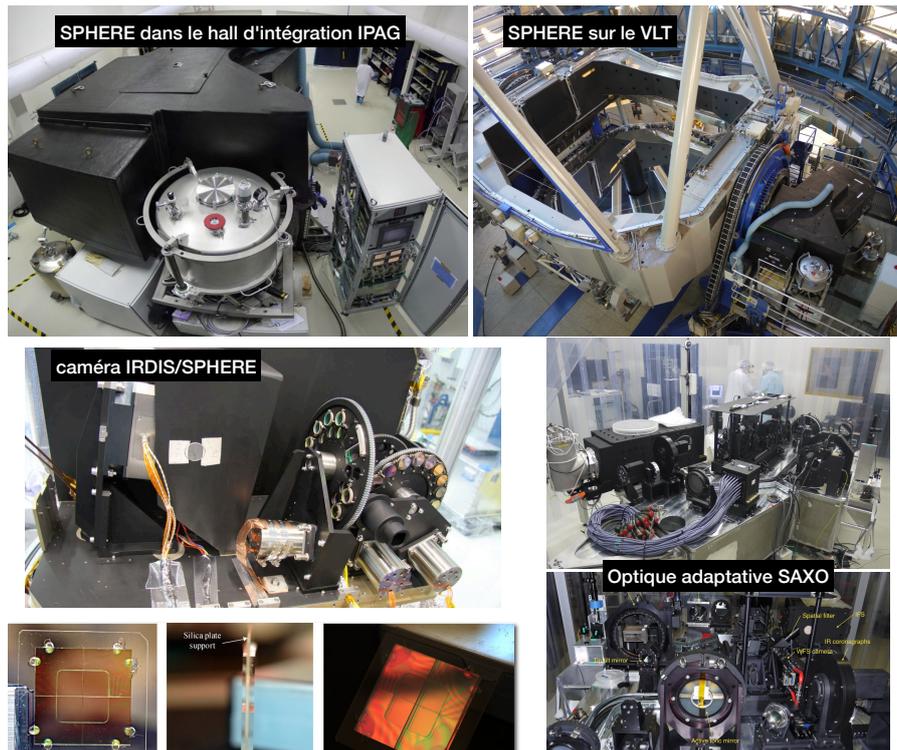


FIGURE 4.1 – Photos de l’instrument SPHERE et des différents composants auxquels notre équipe a fortement contribué (système complet, caméra IRDIS, optique adaptative SAXO et coronographe de phase).

Cette réalisation s’appuie sur le travail de pionnier mené par la communauté française en instrumentation à haute résolution angulaire. Si aujourd’hui, chacun comprend l’importance de corriger la turbulence atmosphérique par optique adaptative pour bénéficier de la performance ultime des grands télescopes dans un grand nombre de modes observationnels, cela a demandé des efforts considérables pour démontrer sa faisabilité en conditions astronomiques. Et plus encore il aura fallu assurer sa fiabilité, son opérationnalité par les observatoires pour satisfaire une grande communauté, et ainsi, souligner son importance par des résultats astronomiques. Nous avons contribué fortement dès les premiers systèmes précurseurs (Beuzit et al 1994, 1997; Mouillet et al 1997a), mais aussi sur le premier système d’optique adaptative sur le VLT équipant l’instrument NaCo (notamment les tests et calibrations, Fusco & Mouillet 2002), tout en continuant d’explorer les améliorations possibles sur les instruments actuels et futurs (Fusco et al, 2005; Fauvarque et al 2014; Fauvarque et al 2016; Neichel & Fusco 2016). Pour les observations à haut contraste (et non pas seulement à haute résolution angulaire), la qualité d’image est cruciale et doit être poussée à de très hautes performances : on parle alors d’optique adaptative «extrême» (Fusco et al 2006; Fusco et al. 2014; Mouillet et al 2018). Mais la qualité d’image seule ne suffit pas, elle doit être associée à une coronagraphie optimisée (au plus proche de l’étoile) avec des nouveaux concepts proposés, testés, et démontrés sur ciel. Cela a motivé des nombreux travaux internationaux auxquels nous avons aussi pris part (Boccaletti et al 2004, 2008), et toute la question d’opération, de calibration, et de traitement du signal pour distinguer une exoplanète du halo stellaire résiduel (Boccaletti et al 2002, Sauvage, Fusco et al 2007, Paul, Fusco et al 2014, Cantalloube, Mouillet et al 2015, Flasseur et al. 2018, Galicher et al. 2018). Plus globalement, nous avons rapidement montré que l’imagerie à haut contraste présente des besoins particuliers, qui nécessitent de concevoir un instrument de manière globale et tout à fait spécifique, dédié à cet objectif, avec de nouvelles métriques définissant ses spécifications, et optimisant ses choix. C’est dans cet état d’esprit nouveau qu’a été proposé et mené à bien l’instrument SPHERE (Mouillet et al. 2001, Beuzit et al. 2019). Les développements instrumentaux ont permis au fur et à mesure des résultats astronomiques importants, guidant les instruments suivants. Cette interaction entre astrophysique et instrumentation a été particulièrement fructueuse.

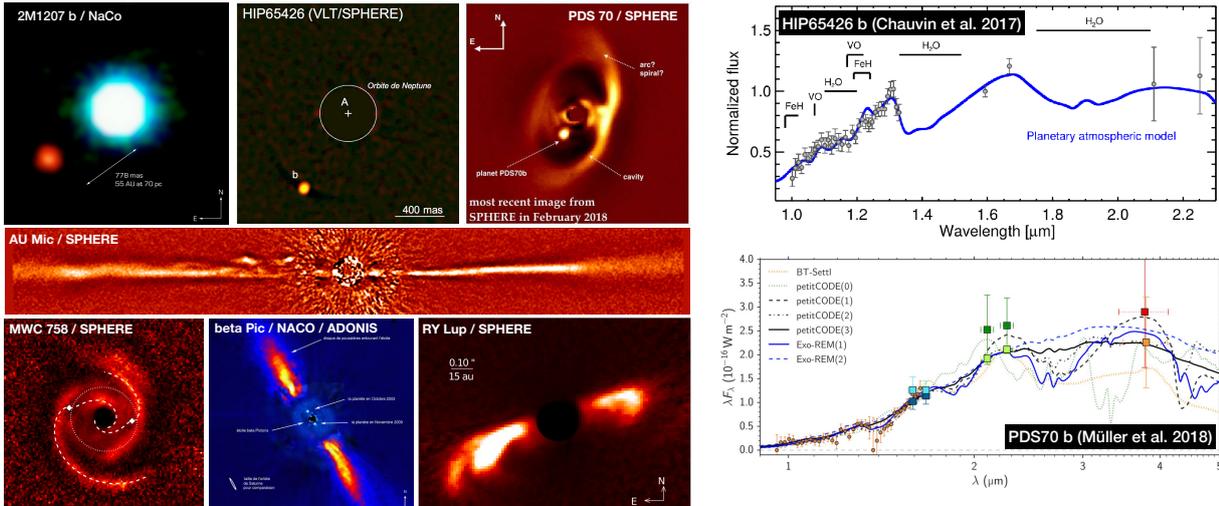


FIGURE 4.2 – Images d'exo-planètes et d'exo-systèmes obtenues par notre équipe en utilisant ADONIS, NaCo et SPHERE. Ces illustrations présentent des systèmes à différents stades d'évolution. A droite, spectres extraits des données SPHERE pour les planètes HIP65426b et PDS70b.

4.3 Des résultats astrophysiques majeurs

Après des résultats enthousiasmants couplant pour la première fois optique adaptative et coronagraphie sur le disque de β Pic (Mouillet et al 1997b), nous avons initié dès les années 2000, des observations systématiques d'étoiles jeunes, à proximité du Soleil (Chauvin et al 2003, 2010). Ces observations ont très vite permis d'étendre la vision de notre propre Système Solaire (jusqu'à la ceinture de Kuiper à une cinquantaine d'ua) à celle de systèmes exoplanétaires possédant des tailles dépassant plusieurs centaines d'ua, autour d'étoiles simples et multiples, de différentes masses (quelques dixièmes à plusieurs fois la masse du Soleil), et situées dans différentes régions de formation. Outre la première image d'un compagnon de masse planétaire 2M1207 b (Chauvin et al. 2004), NaCo puis SPHERE ont permis la découverte d'une dizaine de jeunes exoplanètes incluant notamment β Pictoris b (Lagrange, Bonnefoy, Chauvin et al. 2010), HD 95086 b (Rameau, Chauvin et al. 2013), HIP 65426 b (Chauvin et al. 2017) ou PDS 70 b (Keppler et al. 2018) et c (Mesa et al. 2019). Ces exoplanètes évoluent dans des architectures complexes abritant de multiples ceintures de poussières (Chauvin et al. 2018, Boccaletti et al. 2019) sculptées par ces planètes géantes imagées et nous ramenant d'une certaine manière à la propre formation de notre système solaire dont les ceintures d'astéroïdes et de Kuiper sont les vestiges de ces interactions passées (Figure 4.2, *Gauche*). Ces découvertes ont bousculé les théories de formation et d'évolution planétaire, et confirmé l'existence de plusieurs mécanismes physiques en jeu (mécanisme d'accrétion sur un coeur rocheux ou d'instabilité dans le disque protoplanétaire, migration planétaire et interactions dynamiques), nécessaires pour comprendre la présence de planètes géantes à grande séparation. Les précisions astrométriques obtenues ont permis une mesure fine des mouvements orbitaux de ces exoplanètes (Maire, Langlois et al. 2017), voire d'imager leur révolution presque complète autour de leur étoile comme dans le cas de β Pictoris b (Lagrange, Boccaletti, Langlois, Chauvin et al. 2019). Ces études apportent aussi un éclairage statistique en considérant l'ensemble des étoiles jeunes et proches observées. Cette approche a demandé un effort important et collectif au niveau d'une large communauté, pour observer des centaines d'étoiles. Nous avons contribué ici aussi très concrètement à cet effort, dès la conception instrumentale avec des modes observationnels conçus pour leur efficacité dans de tels relevés (Langlois et al 2015), mais aussi pour l'organisation de l'exploitation collective et coordonnée par une large communauté. De telles campagnes d'observation sur plusieurs années montrent que la population de planètes géantes restait relativement rare au-delà d'une dizaine d'ua. Cela permet d'apporter des contraintes fortes sur les formations à grande distance ou les processus de dispersion dans l'évolution dynamique des systèmes (Chauvin et al. 2015 ; Langlois et al. 2020). En résolvant par ailleurs spatialement les couples "étoile-exoplanète(s)" et en dispersant spectralement les photons de la planète, NaCo, puis surtout SPHERE dès 2014, ont ouvert la voie à une caractérisation précise et systématique des propriétés atmosphériques des jeunes Jupiters massifs (au-delà des observations de transit qui privilégient les Jupiter chauds, à très faible séparation et donc dans des conditions spécifiques de forte irradiation par l'étoile).

Ces observations fournissent des informations inégalées sur les conditions de température et de pression, la présence et la distribution de nuages présents notamment à haute altitude pour expliquer les couleurs particulièrement rouges de ces jeunes Jupiters, leur composition chimique (révélant les différents éléments en présence comme l'eau, le méthane, l'ammoniac, ou le dioxyde de carbone), leur structure interne, mais aussi sur les processus de dynamique atmosphérique des planètes géantes extrasolaires (Figure 4.2, *Droite*). Par exemple, les observations SPHERE de HIP 65426 b (Chauvin et al. 2017) et HD 95086 b (Chauvin et al. 2018), et déjà de 2M1207 b avec NaCo (Chauvin et al. 2004), révèlent des atmosphères planétaires très « rouges », couleur résultant d'une combinaison de faible gravité de surface et de la présence de nuages. Le cas de PDS 70 b (Muller et al. 2018) est encore plus particulier et indique la présence d'un disque circum-planétaire réservoir potentiel de futures lunes. La caractérisation spectrale de ces jeunes exoplanètes est donc fondamentale et devrait s'accélérer dans les prochaines années. La vision plus globale des architectures planétaires et des propriétés physiques des jeunes exoplanètes géantes souligne par ailleurs l'importance d'étudier les conditions de formation planétaire et l'interaction cruciale entre disque et planètes en formation évoluant sur des échelles de temps comparable. La stabilité, les performances et la versatilité de SPHERE apportent des informations précieuses pour l'étude des jeunes disques protoplanétaires, berceaux de jeunes planètes géantes en formation. L'interaction étroite, dans notre équipe, a permis dès les phases de conception de SPHERE d'identifier des éléments essentiels (non couvert par le principal instrument concurrent au monde, GPI) comme : un champ de vue assez large, la possibilité de comparer visible et proche infrarouge, et surtout la capacité d'imagerie polarimétrique, particulièrement adaptée à la lumière réfléchi sur la poussière (De Boer, Langlois et al. 2019). Ces nouvelles capacités révèlent ainsi un véritable zoo de sous-structures inattendues, incluant la présence de spirales, d'ombres, de cavités centrales, de vortex, d'anneaux mais aussi de structures dynamiques traçant potentiellement l'existence de jeunes planètes (Benisty et al. 2015, Van Boekel et al. 2017, Langlois et al. 2019). Avec plus de cinquante nouveaux disques découverts en imagerie (lumière diffusée), SPHERE dépasse largement en seulement 5 ans plus de 30 ans d'étude avec le HST confirmant l'incroyable potentiel de cet instrument pour l'étude et la caractérisation des exoplanètes et des systèmes planétaires. L'une des découvertes inattendues concerne le disque de débris autour de l'étoile AU Mic qui contient de grandes structures de poussières s'éloignant à plusieurs km/s de l'étoile et que l'on pense être dues à l'effet combiné du vent stellaire et d'une planète, encore non détectée (Boccaletti et al. 2015, 2018).

L'ensemble des projets auxquels nous avons participé ou que nous avons menés, qu'ils soient observationnels ou instrumentaux, vont donc nous permettre d'aborder une nouvelle étape dans l'étude et la détection directe des exoplanètes.

5. Travaux en cours

Comme indiqué plus haut, l'imagerie à haut contraste, conçue comme un mode observationnel spécifique et nouveau, a atteint des performances permettant d'entrer dans l'exploration des systèmes planétaires. La dynamique instrumentale et observationnelle ainsi lancée nous permet de proposer de nouveaux projets, dès maintenant et avec des perspectives sur le long terme, où nous pouvons jouer un rôle de premier plan. A l'heure où l'imagerie à haut contraste d'exoplanètes motive des projets de la plus grande ampleur (2 des 4 études de missions NASA ; cas scientifique majeur des ELTs), nous proposons des actions concertées démontrant sur ciel de nouveaux concepts instrumentaux innovants les plus prometteurs (voir par exemple l'ANR WOLF, <https://anr-wolf.com>), apportant des résultats astronomiques cruciaux sur la caractérisation fine d'exoplanètes les plus favorables, dans un domaine de séparations plus proches, à proximité de la zone habitable, rejoignant la fenêtre de détection par vitesses radiales, et en astrométrie par Gaia. Contrairement aux extrapolations des relevés en vitesse radiale (Cumming et al. 2008), les relevés en imagerie haut contraste, avec GPI et SPHERE, ont montré que les planètes géantes jeunes sont rares à des distances au-delà de 10 ua (Nielsen et al. 2019, Langlois et al. 2020, Vigan et al. 2020). Cette caractéristique de la population des planètes géantes impose la nécessité d'obtenir des contrastes élevés ($10^5 - 10^6$) à des séparations physiques plus courtes que celles atteignables aujourd'hui avec SPHERE (3 – 10 ua), et de façon routinière. C'est une étape essentielle pour approfondir notre connaissance des régions de formation planétaire et des populations de planètes géantes proches de la ligne des glaces, ou leur présence devrait être plus grande. Cette feuille de route sera évidemment très longue et nécessitera des étapes intermédiaires pour renforcer notre compréhension des systèmes planétaires.

5.1 Le court terme

SPHERE+, le projet mené par notre équipe, est prévu pour sonder cet espace de paramètres. Il est conçu comme une mise à niveau de l'instrument SPHERE, qui vise à imager directement les jeunes planètes près de la ligne des glaces où elles se forment. Une description complète des cas scientifiques, qui s'étend au-delà des exoplanètes, est disponible [ici](#). Pour ce qui concerne les exoplanètes, les trois objectifs scientifiques principaux de SPHERE+ sont :

- La démographie des planètes géantes jeunes : Nous nous attendons à ce que la population des planètes géantes atteigne un pic près de ~ 5 ua selon les observations en vitesse radiale. Bientôt, Gaia fournira un certain nombre de détections également à 2 – 3 ua et probablement au-delà (< 5 ua). Alors que SPHERE était principalement sensible à la région 10 – 300 ua, SPHERE+ donnera accès à la région $\sim 3 - 10$ ua pour être complémentaire des vitesses radiales et des détections astrométriques, ouvrant ainsi une toute nouvelle fenêtre et, surtout, une forte synergie avec ces programmes. Nous mènerons un relevé de plusieurs centaines de jeunes étoiles avec SPHERE+ et nous identifierons plusieurs dizaines de planètes géantes. Pour celles déjà observées avec Gaia, nous allons pour la première fois étalonner la relation masse-luminosité pour les jeunes Jupiters. SPHERE+ confirmera également certaines planètes suspectées par Gaia.
- L'exploration de la formation planétaire in-situ : la science des disques a été un énorme succès dans le cadre de SPHERE, et SPHERE+ apportera ici une nouvelle dimension. En outre, ALMA a révélé une multitude de disques protoplanétaires contenant des preuves solides de signatures de planètes sous la forme d'anneaux, de cavités et d'autres structures. Beaucoup de ces étoiles sont inaccessibles depuis SPHERE mais comme démontré avec PDS70 (Keppler et al. 2018) la synergie avec ALMA est pertinente pour caractériser ces systèmes planétaires. La combinaison d'informations submillimétriques sur la distribution de la poussière et du gaz avec des images en lumière diffusée de disques ainsi que la détection potentielle de planètes autour de très jeunes étoiles dans le proche infrarouge est essentielle pour comprendre la formation planétaire au sens large.
- Les atmosphères des planètes géantes : L'imagerie directe est avec la technique du transit le seul moyen d'étudier l'atmosphère des exoplanètes tout en sondant des populations très différentes ($> 5 - 10$ ua et

respectivement < 0.1 ua) avec une histoire différente (migration par exemple). L'accès à une résolution spectrale beaucoup plus élevée est désormais indispensable pour mesurer plus précisément les espèces chimiques et les abondances dans les atmosphères planétaires, pour caractériser les propriétés des nuages, pour révéler des signes d'accrétion et établir des diagnostics de formation.

Sur la base de ces objectifs dimensionnants, nous avons déduit les spécifications techniques de haut niveau auxquelles SPHERE+ devra répondre :

- i Contrastes plus profonds à des séparations angulaires plus courtes : environ 10^{-5} à $0.1''$,
- ii Sensibilité plus élevée aux objets plus rouges : gain de 2 magnitudes
- iii Résolution spectrale plus élevée : 5000 à 50000 (au lieu de 50).

SPHERE+ a été sélectionné par l'ESO avec deux autres instruments pour figurer sur la feuille de route du VLT. Nous sommes en train de mettre en place le consortium pour soumettre un « white book » à l'ESO, en préparation d'une phase A qui pourrait démarrer dès la fin 2020. La communauté française a un rôle important à jouer dans SPHERE+, à la fois sur les programmes astrophysiques et sur l'instrumentation. Le succès de ces travaux repose sur notre implication depuis 30 ans dans des projets d'imagerie à haut contraste à plusieurs niveaux (sol, espace, instrumentation, observations, modélisation), et sur l'expertise que nous avons acquise en développant, et en exploitant SPHERE. Notre objectif à court terme est de développer les composants technologiques nécessaires à la construction de l'instrument SPHERE+ et de préparer l'exploitation scientifique en coordination avec d'autres projets (JWST par exemple) ou de futures installations (ELT 1ère lumière et 2nde génération d'instruments). Cependant, les objectifs de SPHERE+ mentionnés ci-dessus seront obtenus grâce à des grands relevés tandis que le futur observatoire ELT sera consacré à la caractérisation des systèmes individuellement. Plus spécifiquement le rôle de nos équipes françaises dans SPHERE+ sera (1) de manager le projet (le présent dossier regroupe le *Principal Investigator*, le *Project Scientist*, et l'*Instrument Scientist*), (2) de concevoir le deuxième étage du système d'optique adaptative extrême, c'est à dire le cœur de l'instrument, et (3) de développer des algorithmes de contrôle de front d'onde et de réduction des données. Parallèlement à l'exploitation de SPHERE au cours des 5 prochaines années et à la préparation de SPHERE+, nous étendrons nos observations à des longueurs d'onde plus grandes avec le JWST et en particulier l'instrument MIRI, dans la conception duquel certains d'entre nous ont été profondément impliqués (Boccaletti et al. 2005, 2015). Aucune planète géante jeune à longue période n'a été observée jusqu'à présent à des longueurs d'onde supérieures à 5 microns, alors que cette gamme spectrale est cruciale pour lever les dégénérescences dans l'interprétation à partir des modèles d'atmosphères des planètes géantes. Associé à la résolution spectrale fournie par SPHERE+, ces instruments nous apporteront une compréhension plus précise des émissions provenant de la photosphère des planètes géantes. En particulier, la question de savoir si le disque circum-planétaire formé au cours du processus d'accrétion contribue au flux émis devient un problème central. Notre expertise s'étend au-delà des exoplanètes avec l'étude des disques protoplanétaires et de débris, et MIRI à cet égard est complémentaire à SPHERE et ALMA pour déterminer la distribution des grains dans ces systèmes planétaires, fournissant ainsi des diagnostics sur l'environnement dans lequel les planètes se forment.

5.2 Le long terme

Détecter la lumière réfléchiée des exoplanètes est une tâche beaucoup plus difficile car la dépendance du flux réfléchi avec la séparation physique à l'étoile est opposée à la capacité de séparer angulairement les planètes des étoiles. Pourtant, la lumière réfléchiée contient un certain nombre d'informations cruciales pour caractériser les atmosphères des planètes, en particulier celles des petites planètes telluriques (Maire et al. 2012). Dans ce contexte, en capitalisant sur les avancées de SPHERE, l'instrument PCS (*Planetary Camera Spectrograph*, Kasper, Beuzit et al. 2008) pour l'ELT sera en mesure de détecter directement les planètes gazeuses similaires à Neptune et aussi les super-Terres. Jusqu'à présent, la grande majorité des planètes détectées par des méthodes indirectes sont situées à moins de 5 ua de leur étoile, une séparation angulaire inférieure à $0.1''$. Cette valeur correspond à la limite inférieure de la résolution angulaire qui peut être sondée par SPHERE et SPHERE+ sur un télescope de huit mètres. Un grand télescope comme l'ELT étendra les capacités de détection en imagerie directe aux planètes plus proches de leur étoile, moins massives et plus froides. Cependant, les défis concernant le développement d'un tel instrument sont encore très nombreux. Un tel projet nécessite des études en amont,

qui concernent les programmes scientifiques, les simulations instrumentales, le développement de prototypes, les démonstrations sur banc et sur ciel en lien avec les nouvelles technologies nécessaires. Le projet de recherche à long terme que nous proposons vise ces défis instrumentaux. L'expérience antérieure acquise par notre équipe lors du développement de l'instrument SPHERE nous donne des atouts uniques pour appréhender les futurs instruments dédiés au très haut contraste et proposer des solutions pour repousser leurs limites. Nous souhaitons renforcer l'expertise française dans ce domaine afin de jouer un rôle central sur l'instrument ELT PCS qui cherchera à détecter et caractériser les exoplanètes en lumière réfléchie en atteignant des contrastes de 10^9 à $10 - 100$ mas. Les cas les plus difficiles de planètes telluriques sont également les plus attrayants. Le spectre visible, même à faible résolution spectrale, montre des signatures de molécules caractéristiques (O_3 , O_2 , H_2O), et de la couverture nuageuse et des propriétés de surface. Une première étape sera réalisée par la mission WFIRST qui embarque un coronographe stellaire dans lequel les équipes françaises sont impliquées. Basé sur des concepts similaires à ceux du projet SPICES que nous avons soumis à l'ESA en tant que mission de classe M en 2010 (Boccaletti et al. 2012), WFIRST, qui doit être lancé dans la décennie, fournira les premières informations directes sur l'atmosphère des vieilles planètes géantes comme notre propre Jupiter. En contribuant à la technologie WFIRST (Potier et al. 2020, accepté), notre objectif est de préparer l'exploitation scientifique d'un tel instrument afin de mettre notre communauté en position de force pour les projets les plus ambitieux des prochaines décennies. Nous soutenons un effort communautaire dans le cadre du programme ESA «Voyage 2050» pour participer à des missions phares de la NASA (HaBEx, LUVOIR) afin d'étudier le spectre des analogues de la Terre.

5.3 Objectifs immédiats

La motivation de notre équipe pour postuler au prix Charles Defforey est liée à notre rôle de leader dans le projet SPHERE+, sélectionné dans la feuille de route VLT-2030, qui est actuellement en lice pour démarrer une phase A à l'ESO, et qui doit permettre à la communauté européenne de conserver sa position d'excellence dans le domaine de l'imagerie des exoplanètes et des systèmes planétaires. Un financement à la hauteur de ce prix serait une opportunité conséquente pour impulser un investissement plus fort de la communauté française en imagerie directe et de consolider notre visibilité vis-à-vis de l'ESO. Au cours des 5 prochaines années, nous allons préparer le programme scientifique dans le domaine des exoplanètes et des systèmes exoplanétaires. Nous élaborerons les spécifications scientifiques et effectuerons des simulations pour prédire en profondeur les capacités de SPHERE+. Les programmes d'observation seront définis très tôt dans le projet. En matière d'instrumentation, les équipes françaises piloteront la phase de conception, le prototypage et la fabrication du système d'optique adaptative, que nous prévoyons de mettre en œuvre comme un deuxième étage de correction dans SPHERE. Ce concept nouveau et ambitieux transformera le domaine de l'imagerie à haut contraste pour la science des exoplanètes et préparera l'avènement des futurs instruments à très haut contraste de l'ELT. Le financement que nous pourrions recevoir avec ce prix couvrira plusieurs aspects. Dans un premier temps il permettra l'organisation du projet et la participation à des ateliers au niveau du consortium. Ensuite la majeure partie du financement permettra de réaliser un travail d'ampleur au niveau du développement instrumental. En effet, l'ambition scientifique et technique du projet SPHERE+ nécessite du prototypage sur banc pour les concepts novateurs proposés dont certains éléments pourront ensuite être réutilisés pour l'instrument final. Ce travail impliquera nécessairement la communauté imagerie d'exoplanètes en France et permettra de soutenir le travail des jeunes chercheurs dans ce domaine.

Le détail des publications citées est disponible [ici](#).

Curriculum Vitae

Jean-Luc BEUZIT

Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (UMR 7326)
38 rue Frédéric Joliot-Curie, 13388 Marseille Cedex 13, France
Tel : 04 95 04 41 70 / Mobile : 06 78 86 78 94
E-mail : Jean-Luc.Beuzit@lam.fr

Faits marquants

Le fil conducteur de mes travaux de recherche est l'**imagerie à haute résolution angulaire et haute dynamique** de l'environnement immédiat d'étoiles proches, dans le but de détecter et de caractériser des compagnons sous-stellaires ou planétaires. L'objectif astrophysique ultime de cette activité est une meilleure compréhension des mécanismes de formation et d'évolution des systèmes planétaires. Pour atteindre ces objectifs, je me suis fortement investi dès le début de ma carrière dans des développements instrumentaux lourds, nécessitant souvent d'initier des **activités de recherche et développement** spécifiques afin de mettre au point les concepts ou composants critiques requis (coronographes, miroirs déformables, etc.). Durant ma thèse, j'ai notamment été responsable de la mise en œuvre du **premier instrument équipé d'optique adaptative et d'un coronographe**, offert à la communauté (ADONIS sur le télescope de 3,60 m de l'ESO). J'ai ensuite été le **Principal Investigator du projet SPHERE**, l'un des tous premiers instruments totalement optimisés pour la détection et la caractérisation de l'environnement des étoiles proches. SPHERE a permis, depuis sa mise en service en 2015 sur le VLT, la détection de nouvelles exoplanètes et de nombreux nouveaux disques, ainsi que leur caractérisation. En parallèle j'ai également été co-responsable de l'étude de Phase A du projet d'instrument dédié à l'imagerie à grand contraste pour le futur ELT de 40 m de l'ESO, EPICS (2006-2008). Je suis depuis janvier 2018 directeur du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

Diplômes et Titres

- 1995 : Doctorat en Astrophysique et Techniques Spatiales, Université Paris VI : « Un système opérationnel d'optique adaptative astronomique : conception et performances. Étude de la matière sombre dans l'environnement des étoiles de la Séquence Principale ».
- 1989 : DEA en Astrophysique et Techniques Spatiales, Université Paris VI.

Parcours

- Janv. 2018 – auj. : Directeur d'Unité, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.
- Oct. 2009 – Déc. 2017 : Directeur de Recherche, IPAG (Grenoble).
- Jan. 2000 – Sept. 2009 : Chargé de Recherche, Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble.
- Jan. 2007 – Déc. 1999 : Chargé de Recherche, Canada-France-Hawaii Telescope, USA.
- Jan. 1996 – Déc. 1996 : Séjour postdoctoral, Observatoire de Genève.
- Oct. 1991 – Déc. 1995 : Thèse, Département de Recherche Spatiale, Observatoire de Paris.

Activités de recherche

- Recherche de planètes extrasolaires et de naines brunes par imagerie à haute résolution angulaire et haut contraste.
- Développement et mise en œuvre d'instrumentation à haute résolution angulaire dans l'infrarouge : systèmes d'optique adaptative, caméras infrarouges et coronographes stellaires.
- Recherche et développement sur de nouveaux composants pour l'instrumentation astronomique, en particulier micro-miroirs déformables pour les systèmes d'optique adaptative de nouvelle génération.
- Publications : 145 articles de rang A, 3 contributions (chapitres) à des ouvrages de référence, plus de 280 articles de colloques. H-Index = 48.

Responsabilités scientifiques et instrumentales

- *Principal Investigator* du projet "SPHERE" d'instrument de seconde génération pour le VLT (système à haute résolution angulaire et à haut contraste pour la détection directe et la caractérisation de planètes extrasolaires), offert à la communauté depuis avril 2015.

- *Co-Principal Investigator* de la Phase A du projet « EPICS » pour l'E-ELT (détection directe de planètes extrasolaires par imagerie à haut contraste).
- Responsable scientifique de plusieurs activités de R&D liées à l'optique adaptative dans le cadre des programmes Européens Opticon FP6, FP7 et H2020.
- Coordinateur du groupe de travail du SAC du CFHT assurant le suivi du développement et de la mise en œuvre de la caméra d'imagerie infrarouge grand-champ WIRCam (1998 à 2005).
- Membre du *European ELT Adaptive Optics Working Group* de 2006 à 2010 (groupe de travail mis en place par la direction de l'ESO pour impliquer la communauté dans la conception de l'ELT européen).

Animation et administration de la recherche

- Directeur d'Unité du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille depuis janvier 2018 (mandat de 5 ans).
- Chargé de mission à temps partiel auprès du directeur adjoint scientifique de l'INSU pour l'astronomie et l'astrophysique en charge du suivi de l'instrumentation ESO et du suivi des très grands équipements de recherche de l'astrophysique de 2009 à 2017.
- Membre du Conseil Scientifique (SAC) du Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) de 2000 à 2005.
- Membre élu du Conseil National des Astronomes et Physiciens (section astronomie) de 2003 à 2007.
- Membre de la Commission Spécialisée Astronomie et Astrophysique de l'INSU de 2007 à 2011.
- Membre extérieur du Conseil de l'Observatoire Astronomique Marseille-Provence de 2009 à 2011.
- Membre extérieur du Conseil de l'Observatoire de Lyon de 2010 à 2016.
- Membre élu du Conseil de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble de 2012 à 2017.

Expertises scientifiques et techniques

- Président des revues programmatiques du CNES pour les missions M3, M4 et M5 du programme *Cosmic Vision* de l'ESA.
- Expert pour l'AERES de 2017 à 2011, puis le HCERES depuis 2019. A ce titre participation à divers comités de visite comme membre ou président.
- Expert pour l'ANR, l'ERC, le NRC et le NSERC (Canada), la NSF (USA), etc.
- *Referee* pour différentes revues : A&A, MNRAS, PASP, Applied Optics, JOSA.
- Participation à de nombreux jurys de thèse et HDR.
- Membre de comités scientifiques de diverses conférences internationales (SPIE, AO4ELT, etc.).

Activités de valorisation de la recherche

- Co-inventeur d'un brevet décrivant une technique d'actionnement électromagnétique pour la réalisation de micro-miroirs déformables (brevet CNRS FR0452342 du 12/10/2004).
- Deux licences d'exploitation de ce brevet sont en cours (sociétés ALPAO et Imagine Eye).

Encadrement de jeunes chercheurs

- Direction ou codirection des thèses de Wilfrid Schwartz (1999-2003), Guillaume Montagnier (2004-2008), Marie Ygouf (2009-2012).
- Supervision de séjours postdoctoraux : R. Conan (2002-2005), A. Blanc (2002-2004), A. Eggenberger (2006-2011), A. Costille (2009-2012), P. Martinez (2010-2012).

Diffusion de la culture scientifique et technique

- Engagement associatif : président de 2003 à 2017 de la délégation régionale Rhône-Alpes de Planète Sciences, association nationale dont le but est le développement de la pratique des activités scientifiques expérimentales pour les jeunes de 6 à 18 ans, notamment dans les domaines de l'astronomie, l'environnement, la météorologie, la robotique, les fusées, les ballons stratosphériques...
- Conférences grand public, interventions scolaires, café des sciences, etc. : 3 à 5 par an.
- Expert scientifique auprès du maire de Vaulx-en-Velin pour la mise en place d'un pôle régional « Astronomie et Culture Spatiale » (Le Planétarium, inauguré en 2012).

Curriculum Vitae

Anthony Boccaletti

Laboratoire d'Etudes et d'Instrumentation en Astrophysique (UMR 8109)

5 place Jules Janssen, 92915, Meudon.

Tel : 01 45 07 77 21 / Mobile : 06 5 46 55 83

E-mail : anthony.boccaletti@obspm.fr

Faits Marquants

J'étudie à la fois des méthodes de détection directe d'exoplanètes, et je mène aussi un travail observationnel des systèmes exo-planétaires avec l'instrument SPHERE.

J'ai commencé ce travail dès la découverte de la première exoplanète par Mayor et Queloz, notamment par un travail de thèse sur la **méthode des speckles noirs** proposés par A. Labeyrie. Mes travaux instrumentaux se sont prolongés avec l'étude de nouveaux systèmes coronographiques en particulier le concept du coronographe de phase inventé par D. Rouan.

Je me suis ensuite spécialisé dans la simulation des performances d'instruments à haut contraste pour la détection d'exoplanètes et j'ai pu ainsi prendre part à deux projets majeurs dans le domaine des exoplanètes: la caméra **MIRI** sur le **James Webb Space Telescope** et l'instrument **SPHERE** au **VLT**. J'ai également porté la proposition de télescope spatial **SPICES** à l'ESA en 2010.

Parallèlement à ces travaux instrumentaux, J'ai mené plusieurs observations de systèmes jeunes en mettant par exemple en évidence des bras spiraux multiples dans un disque protoplanétaire, ou des structures de poussières en mouvement rapide dans un disque autour de l'étoile **AU Mic**, deux phénomènes vraisemblablement liés à la présence de planètes, et en participant fortement au suivi de la planète **β Pic b** avec A.M. Lagrange.

Plus récemment je me suis investi dans l'organisation du projet **SPHERE+**.

Diplômes, Titres, Prix

- Prime Encadrement Doctoral et de Recherche (CNRS) : 2017-2020
- 2016 : Habilitation à Diriger les Recherches (Observatoire de Paris)
- Prix La Recherche 2016, mention Astrophysique
- Prime Excellence Scientifique (CNRS) : 2010-2013
- 1999 : Doctorat en Astrophysique et Techniques Spatiales, Université Nice. "Recherche de planètes extrasolaires par la méthode des Speckles Noirs"

Parcours

- Janv. 2019 – auj. : Directeur adjoint LESIA
- Oct. 2006 : Chargé de Recherche 1^{ère} classe, LESIA.
- Oct. 2002 : Chargé de Recherche 2^e classe, LESIA
- Jan. 2002 – Sep. 2002 : postdoc CEA/Saclay & LESIA/Meudon
- Oct. 2000 – Déc. 2001 : Postdoc au California Institute of Technology, Pasadena
- Jan. 1999 – Sep. 2000 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche au Collège de France

Activités de recherche

- Astrophysique : Planètes extrasolaires et disques circumstellaires : détection directe par imagerie, caractérisation (photométrie, spectroscopie, astrométrie, morphologie), interaction planète/disque
- Techniques observationnelles : Imagerie Haute Résolution Angulaire, Imagerie Haute Dynamique, Coronographie, Imagerie différentielle, Simulations, Traitement de données.
- Projets instrumentaux : Conception instruments haut contraste, spécifications haut-niveau, définition des cas scientifiques
- Publications : +300 publications, dont 169 publications de rang A (H=44), dont 20 en 1^{er} auteur.

Responsabilités scientifiques et instrumentales

- *Principal Investigator* du projet "SPHERE+", projet d'upgrade de SPHERE
- *Co-Investigator* du projet "SPHERE", instrument au VLT, recherche d'exoplanètes par imagerie directe
- *Co-Investigator* de la Phase A du projet « EPICS » pour l'E-ELT (détection directe de planètes extrasolaires par imagerie à haut contraste)
- *Co-Investigator* du projet ANR "GIPSE"
- *Chair* de la conférence "In the Spirit of Lyot : Detection and characterization of exoplanets and circumstellar disks", Paris, 25- 29 Oct. 2010
- *Co-Chair* de la conférence " Thirty years of β Pic and debris disks studies", Paris, 8-12 Sept. 2014

Animation et administration de la recherche

- Directeur adjoint du LESIA depuis janvier 2019 (mandat de 5 ans). Chargé de communication.
- Conseil Scientifique (SAC) du Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) depuis 2018
- Groupe thématique CNES Exobiologie, Exoplanètes, Protection Planétaire, depuis 2016
- Comité Service d'Observation ANO2 de 2015 à 2019
- Astronomical Working Group (AWG), ESA, de 2014 à 2017
- SPICA science study advisory team (E3SAT), ESA, de 2011 à 2013
- ExoPlanet Research Advisory Team (EPRAT), ESA, de 2008-2010
- Blue Dot Team, de 2008 à 2010
- Commission des Spécialistes de l'Observatoire de Paris, de 2005 à 2008

Expertises scientifiques et techniques

- Expertise de dossiers pour : Swiss National Science Foundation, Fondation Canadienne pour l'Innovation, ERC, Projets Emergence de l'Université de Toulouse, Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Initiatives de Recherche Stratégiques, German Research Foundation.
- Referee : ApJ, AJ, A&A, PASP, Opt. Com., Opt. Exp., Nature, JATIS, Phys. Rev.

Encadrement de jeunes chercheurs

- Co-Direction de la thèse de Céline Cavarroc (2004-2007). "Caractérisation d'un coronographe pour la détection d'exoplanètes avec MIRI/JWST".
- Co-Direction de la thèse de Patrice Martinez (2005-2008). "Coronagraphs characterization for high-contrast imaging in the context of extremely large telescopes".
- Co Direction de la thèse d'Anne Lise Maire (2009-2012), "Caractérisation des exoplanètes par imagerie depuis le sol et l'espace : Application à la mission SPICES et à l'instrument VLT/NaCo"
- Co-Direction, de la thèse de Jean Loup Baudino (2012-2015). "Analyse des données photométriques et spectroscopiques infrarouges d'exoplanètes obtenues avec l'instrument SPHERE du VLT".
- Co-Direction de la thèse de Clément Perrot (2014-2017). "Imagerie directe des systèmes planétaires avec SPHERE et prédiction des performances de MICADO pour l'E-ELT".
- Direction de la thèse de Trisha Bhowmik (2016-2019). "Resolved spectroscopy of protoplanetary and transition disks with SPHERE/VLT".
- Co-Direction de la thèse d'Axel Potier (2017-2020). "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".
- Supervision de séjours postdoctoraux : François Assémat, Tobias Schmidt, Benjamin Charnay, Elsa Huby, Garima Singh, Flavien Kiefer

Diffusion de la culture scientifique et Enseignement

- Conférences: Université de la Ville de Paris, Rencontres du Ciel et de l'Espace, Sciences Ouvertes.
- Enseignements : Méthodologie M2, 42h/an (2005-2014); cours Exoplanètes M1 10h/an (>2016).
- Parrainage de classe depuis 2015 (Système Solaire, exoplanètes).
- Animateur à l'Observatoire Astronomique de Bauduen (83), 1993 à 1998

Curriculum Vitae

Gaël Chauvin

Laboratoire Franco Chilien pour l'Astronomie (UMI 3886)
Département d'Astrophysique, Université du Chili, Casilla 36-D, Santiago, Chile
E-mail : gael.chauvin@univ-grenoble-alpes.fr, Tel : 09 5226 8197

Faits Marquants

Je suis un expert en imagerie directe des exoplanètes se dédiant à l'étude de leurs propriétés physiques et atmosphériques, de leurs processus de formation et d'évolution, de la diversité des architectures planétaires pour notamment comprendre l'origine même de notre système solaire et de l'émergence de la vie. Je suis à l'origine des premières découvertes d'exoplanètes en imagerie, l'obtention de leurs premiers spectres pour contraindre leurs propriétés physiques et atmosphériques, les premières études statistiques sur la démographie des planètes géantes jeunes dans les parties externes des architectures planétaires et l'exploration des systèmes exoplanétaires extrêmes dans les étoiles multiples. Je me suis fortement impliqué dans la préparation et l'exploitation scientifique des instruments de haut contraste (ADONIS, NaCo et SPHERE), particulièrement dans le cadre du consortium SPHERE pour animer scientifiquement au niveau national et européen son exploitation et son rayonnement. Je me suis plus récemment investi dans l'organisation du projet SPHERE+ dans le cadre de la feuille de route du VLT lors des 10 prochaines années. Dans la perspective du projet de télescope européen extrêmement grand, bientôt sur le ciel, je m'implique fortement dans l'animation de la communauté française et européenne pour la préparation scientifique et la définition des instruments de première lumière autour de la thématique des exoplanètes.

Diplômes, Titres, Prix

- 2016 : Habilitation à Diriger les Recherches à l'UGA (Université Grenoble Alpes),
- 2011 : Prix Jeune Chercheur, Société Française d'Astronomie & d'Astrophysique,
- 2004 : Image de la première exoplanète parmi les 10 plus grandes découvertes de l'Observatoire Européen Austral. <https://www.eso.org/public/science/top10/>
- 2003 : Doctorat en Astrophysique à l'UGA. Titre : "*Etude des environnements circumstellaires en imagerie à haut contraste et à haute résolution angulaire*",

Parcours

- 2017 – auj. : Directeur adjoint du Laboratoire Franco Chilien pour l'Astronomie (LFCA)
- 2013 – 2016 : Chargé de Recherche du CNRS à l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG). Co-responsable de l'équipe *Exoplanètes* de l'IPAG avec Xavier Delfosse.
- 2011 – 2012 : Chercheur invité au Max Planck Institute for Astronomy (MPIA), Heidelberg,
- 2007 – 2011 : Chargé de Recherche du CNRS à l'IPAG, membre de l'équipe *FOST*
- 2004 – 2007 : Astronome de support ESO sur les instruments NaCo, SINFONI, ISAAC, VISIR et FORS1/2 du *Very Large Telescope* (VLT) pour un total de 240 nuits sur 4 ans, membre du groupe ESO Adaptive Optics et de l'opération NaCo & SINFONI Équipe scientifique.

Activités de recherche

- Astrophysique : Mécanismes de formation et d'évolution, physique et atmosphères des planètes géantes. Architectures planétaires. Origine du système solaire.
- Techniques observationnelles : Imagerie à haute résolution angulaire et à haut contraste. Coronagraphie, imagerie différentielle et cartographie moléculaire. Spectroscopie à basse, moyenne et haute résolution en visible en en infrarouge. Interférométrie. Traitement de données.
- Publications : 164 publications de rang A (H=44), dont 19 en 1^{er} auteur, 33 comme second ou troisième auteur incluant 16 direction d'étudiants.

Responsabilités scientifiques et instrumentales

- *Project Scientist* du projet SPHERE+, projet *d'upgrade* de SPHERE au VLT,
- *Project Scientist* (Phase Exploitation, 2014 – auj.) de SPHERE, instrument au VLT, recherche d'exoplanètes par imagerie directe, et *Co-Investigator* du projet SPHERE (2014 – 2017),

- *Principal Investigator* du grand relevé SHINE (*SpHere INfrared survey for Exoplanets*, 200 nuits de télescope sur le VLT) pour la recherche et la caractérisation d'exoplanètes avec l'instrument SPHERE, rassemblant 60 scientifiques de 9 instituts européens,
- *Principal Investigator* de grands programmes d'observations dédiés à la recherche et caractérisation d'exoplanètes en imagerie directe (JYNS, NaCo-LP, DUSTIES, SCALP, X-SHYNE, X-Tremes) représentant plus de 80 nuits sur le VLT/VLTI (SPHERE, X-Shooter, CRIRES, NaCo, SINFONI, Gravity, Pionier, Amber, HARPS, SOFI), LBT (LMIRCam), CFHT (PUE'O), ESO3.6m (ADONIS) menant à de nombreuses découvertes clés, des dizaines de publications et communiqués de presse dans le domaine des exoplanètes.
- *Principal-Investigat*or du projet ANR-GuEPARD (2010 - 2015) portant sur l'étude de la formation et des propriétés physiques et atmosphériques des exoplanètes géantes,
- *Principal-Investigat*or de l'action coordonnée SPHERE des programmes de Planétologie et de Physique Stellaire (2014 - 2017),
- *Principal-Investigat*or du programme CNRS-PICS *Dust2Planets* (2013 - 2017).

Animation, administration & expertise de la recherche

- Equipe scientifique du Télescope Européen Extrêmement Grand (E-ELT) rassemblant des experts européens pour définir et conseiller les objectifs et choix scientifiques des instruments de l'E-ELT (MICADO-MAORY, HARMONI, METIS, HIRES et MOSAIC),
- Sous-comité scientifique et technique de l'ESO pour l'Observatoire de La Silla - Paranal avec pour mission de suivre les opérations et développements des instruments du VLT,
- Conseil Scientifique du Large Binocular Telescope pour la 2^{nde} génération d'instrument (2016-2019),
- Expertise de dossiers pour : *Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada* (NSERC), *National Commission for Scientific and Techno-logical Research* (CONICYT, Chili), les programmes *Starting Grant program & Consolidating Grant program* du *European Research Council* (ERC) et *Swiss National Science Foundation* (SNSF),
- Rapporteur de revues scientifiques: ApJ, AJ, A&A, PASP, MNRAS, Science & Nature,
- Comité de Temps d'allocation: Gemini (fast-track, 2009 - 2018), HST (2012, 2017), ESO CNRS-VLTI-INSU Time (2012-2013), ESO (2009-2010), ALMA (2018) et JWST (2020).

Encadrement de jeunes chercheurs

- 2 chercheurs en position post-doctorale : Philippe Delorme (auj. Astronome CNAP) & Mickael Bonnefoy (auj. Chargé de Recherche CNRS)
- 6 direction ou co-direction de thèses : Sebastian Jorquera (cotutelle UGA-UCHile), Simon Petrus (2018 - auj., UGA), Maxime Cudel (2014-2017 à l'UGA), Julien Rameau (à l'UGA, aujourd'hui Chair d'Excellence Origine de la Vie), Mickael Bonnefoy (à l'UGA) et Mariangela Bonavita (à l'Université de Padoue, Professeur Assistante à Edinburgh)
- 24 étudiants de niveau licence et master : Paulina Rama (M1), Anna Luashvilli (M2), Sebastian Jorquera (M1, M2), Nathan Florent (M1), Célia Desgrange (M1), Simon Petrus (M2), Aurélien Lagarrigue (M1), Maxime Lombart (M2), Cyril Pannetier (L3), Maxime Cudel (M2), Yohan Merien (L3), Justine Lannier (M2), Hugo Gilardy (M1), Julien Rameau (L3, M2), Mickael Bonnefoy (M2), Mariangela Bonavita (M2), Xavier Haubois (M1), Elisabeth Crespe (L3), Tania Sauma (L3), Loïc Maisonnasse (L3), Mitchell Thomson (L3, M1).

Diffusion de la culture scientifique et Enseignement

- Cours pour des écoles avancées d'astronomie pour des étudiants en thèse et master (imagerie haut contraste, optique adaptative, turbulence atmosphérique, et formation planétaire),
- "Qualification Maître de Conférence" obtenue à l'UGA (2006) et Monitorat à l'UGA (2000 - 2003),
- Plus d'une dizaine de conférences grand public, deux interventions par an en moyenne dans des écoles, responsable des visites scolaires à l'IPAG de 2007 à 2011, animateur pour de nombreux événements grand public (transit/éclipse de Soleil, Vénus, Mercure, fêtes de la science...), parrain du projet aux pieds des étoiles pour sensibiliser des jeunes lycéens au principe de détection en astronomie avec un voyage de découverte des grands télescopes européens du VLT et de ALMA, participation à une douzaine d'articles de vulgarisation scientifique (*La Recherche*, *Science & Avenir*, *Pour La Science*, *Ciel & Espace*, *Sky & Telescopes*) et à une douzaine de communiqués de presse (ESO, CNRS/INSU, FOCUS, OSUG & IPAG).

Curriculum Vitae

Thierry Fusco

ONERA, Département d'Optique et Techniques Associées
29 Avenue de la Division Leclerc
Tel : 01 46 73 47 37 / Mobile : 06 62 48 48 36
E-mail : thierry.fusco@onera.fr

Spécialiste en Optique Adaptative

A la pointe de la recherche et des développements en Optique Adaptative (OA) en France et en Europe depuis plus de 20 ans, j'ai effectué une thèse dédiée à la proposition de concepts théoriques, numériques et opérationnels pour s'affranchir des deux limitations fondamentales de l'optique adaptative, *la correction partielle et l'anisoplanétisme*, je me suis ensuite investi dans la communauté astronomique pour réaliser les systèmes d'OA qui ont conduit **aux premières images de planètes extrasolaires sur le VLT**.

J'ai été au coeur de l'intégration, des tests et du commissioning de **NAOS la première OA du VLT**, j'ai ensuite pris la responsabilité de **SAXO, l'OA extrême de SPHERE** que j'ai portée pendant 10 ans, des toutes premières idées conceptuelles à sa mise en œuvre opérationnelle sur le télescope, en en faisant le **système d'OA le plus performant au monde**. En parallèle de mes activités instrumentales, je suis à la pointe de la recherche en traitement d'images (avec en particulier le développement de l'algorithme MISTRAL) et je propose des nouveaux concepts d'analyse de front d'onde (analyseurs à Filtrage de Fourier) pour améliorer encore **la précision, la sensibilité et le contraste final des futurs systèmes de recherche et caractérisation de planètes extrasolaires**.

Enfin, je m'investis aujourd'hui dans les optiques adaptatives de **SPHERE+** et du **futur télescope Européen Géant (ELT) dans le cadre du projet HARMONI** où je suis à nouveau en charge du développement des optiques adaptatives qui permettront d'obtenir la performance ultime de l'instrument et du télescope pour ouvrir la voie à de nouvelles découvertes en particulier dans le domaine de la détection et caractérisation de planètes extrasolaires.

Diplômes, Titres, Prix

- 2019 : Directeur de recherche, ONERA (équivalent DR 1^{ière} classe)
- 2012 : Maître de recherche 2, ONERA (équivalent DR 2^{ième} classe)
- 2009 : Prix Fabry de Gramont (Société Française d'Optique)
- 2008 : Habilitation à diriger les recherches : "*Optique adaptative et traitement d'images pour l'astronomie : de nouveaux enjeux et de nouvelles solutions*"
- 2000 : Doctorat en physique de l'université de Nice – Sophia Antipolis : "*Correction partielle et anisoplanétisme en optique Adaptative*". Félicitations du Jury
- 1996 : DEA en "Astronomie, Imagerie et Haute Résolution Angulaire", Université Nice.

Parcours

- 2011 –auj. : Chercheur invité au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
- 2000 – auj. : Ingénieur / Chercheur à l'ONERA, Département d'Optique et Techniques Associées
- 2000 – 2001 : post doc, Intégration de NAOS, le premier système d'OA du VLT, LESIA/Meudon

Activités de recherche

Mes activités de recherche se caractérisent ici par une position unique à l'interface entre les applications astronomiques et les développements technologiques complexes avec une sensibilité « système » et une approche constante de type co-conception (instrumentation - traitement du signal/images associés). Cela se traduit par 4 grands thèmes étroitement liés

- **Instrumentation pour la haute résolution angulaire** : développement de nouveaux concepts OA pour les applications « imagerie haut contraste » et « imagerie grand à grand champs » : du concept théorique jusqu'à la validation ciel et l'intégration dans des instruments astrophysiques opérationnels
- **Analyse de surface d'onde** : Amélioration de concepts existants (centre de gravité pondéré pour le Shack-Hartmann et Shack-Hartman Filtré, Diversité de phase) et proposition de nouveaux concepts (LIFT, Analyseurs à Filtrage de Fourier). Développement théoriques et validations expérimentales (voir ANR WOLF)
- **Propagation et maîtrise du front d'onde** : caractérisation du canal de propagation, mesure et prédiction des phénomènes turbulents (propagation et pré-compensation laser, propagation en milieux complexes ...)
- **Traitement du signal et des images** : Déconvolution Myope (algorithme MISTRAL), reconstruction de PSF. Développements théoriques et applications pratiques (collaborations étroites avec les astronomes pour le traitement d'images depuis plus de 20 ans)

Publications : 180 publications de rang A dont 15 en 1^{ier} auteur, 48 dans les 3 premiers auteurs et 17 en dernier auteur.
H_{index} = 45 +400 conférences internationales avec actes donc 41 en 1^{ier} auteur et 133 dans les 3 premiers auteurs

Responsabilités scientifiques et instrumentales

2019 – 2023	PI de l'ANR WOLF, Analyseurs de front d'onde innovant pour l'imagerie à haut contraste
2015 – 2026	« <i>AO scientist</i> » d'HARMONI, Spectro-Imageur de première lumière de l'ELT
2006 – 2015	« <i>AO scientist</i> » de SPHERE, recherche d'exoplanètes par imagerie directe sur le VLT chef de projet SAXO (Sphere AO for eXoplanet Observation)
2009 – 2011	PI de projet du projet ATLAS : étude de phase A d'un système de « Laser Tomographic AO » dans le cadre de l'E-ELT
2006 – 2010	Responsable de la définition du système d'OA (MOAO) du projet EAGLE étude de phase A dans le cadre de l'E-ELT
2004 – 2005	Responsable de l'OA dans l'étude de phase A du projet Planet Finder (futur projet SPHERE)
2017 – 2020	Responsable scientifique du Projet de Recherche VASCO (Visible AO and Sky Coverage Optimisation)
2013 – 2015	Responsable scientifique du Projet de Recherche NAIADE (Nouvelles Approches d'Imagerie par optique Adaptative et DEconvolution)
2008 – 2011	Responsable scientifique du Projet de Recherche Fédérateur CASSIOPEE : coordination interne ONERA des efforts sur l'E-ELT
2011 – 2013	Responsable scientifique du projet ODISSEE : suivi et imagerie de satellites en orbite basse depuis le sol
2001 – 2002	Mise en œuvre sur le ciel de NAOS, la première OA du VLT
2000 – 2001	Intégration, tests et validations en Europe (Observatoire de Meudon) de NAOS

Animation et administration de la recherche

- Membre du Conseil Scientifique de Département du DOTA
- Membre du CS de la branche Physique de l'ONERA
- Membre CS du Labex FOCUS (2012 à 2018)
- Membre du CS GIS-PHASE regroupant les équipes traitant de haute résolution angulaire à l'ONERA et dans les Observatoires de Paris, Grenoble et Marseille (2008 à 2014)
- Feature editor JOSAA (vol 21) et Applied Optics (vol 49) special issues on AO
- Chairman (2009) et co-chairman (2011 à aujourd'hui) de la conférence internationale « *AO for ELT* »
- Chairman (2016) et co-chairman (2017 à aujourd'hui) de la conférence « *Wavefront Sensing in the ELT era* »
- SOC de la conférence SPIE « *Astronomical Telescope* » (2008 à 2018)
- SOC de « *AO workshop week* » (2018 à aujourd'hui)
- Expertise de dossiers pour : NSF, HRC, STFC, ANR, H2020, Pole de compétitivités (France et Belgique) ...
- *Referee* pour différentes revues : JOSAA, App. Opt., Opt. Let., A&A, MNRAS, Opt. Com., Opt. Exp., JATIS ...
- Participation à des jurys de thèse et HDR (~3 par an).

Encadrement de jeunes chercheurs

- Direction ou co-direction de 18 thèses (dont 3 en cours actuellement)
- Encadrement de 11 séjours post-doctoraux

Collaborations nationales et internationales

- Principaux collaborateurs : J-F Sauvage, L Mugnier, C Petit, JM Conan et V Michau (ONERA), B Neichel, J-L Beuzit, K Dohlen, K El-Hadi et A Costille (LAM), D Mouillet (IPAG), R Bacon (CRAL)
- Collaborations internationales majeurs : STScI, ESO, LBT, ESO, INAF-Arcetri, INAF-Padova, Oxford Univ, Durham Univ, Porto Univ, UK-ATC

Diffusion de la culture scientifique et Enseignement

- Film CNRS « Un œil sur les exoplanètes » (<https://lejournel.cnrs.fr/videos/sphere-un-oeil-sur-les-exoplanetes>)
- Interview radio (France inter et France info, podcasts ONERA)
- Presse écrite : Le Monde, Le Figaro, Photoniques
- Participation à l'élaboration du stand ONERA pour les journées du Ciel et de l'Espace
- Présentations grand public : ONERA, Journées de la Science
- Conférence au collège de France
- Conférences grand public (nuit des étoiles, Journées de la Science)
- Participation à l'émission « C'est pas sorcier » sur le VLT

Curriculum Vitae

Maud LANGLOIS

Centre de Recherche Astrophysique de Lyon (UMR 5574)

9 avenue Charles André, 69230 Saint Genis Laval, France

Tel : 04 78 86 83 97 -- E-mail : maud.langlois@univ-lyon1.fr

Spécialiste en instrumentation pour la détection directe des exoplanètes

Mon profil allie une **expertise en instrumentation avec une spécialité sur l'imagerie directe d'exoplanètes**. J'ai travaillé dès ma thèse sur la détection directe des exoplanètes avec l'optique adaptative au moment où cette perspective semblait encore irréaliste. J'ai, durant cette période, montré l'impact des tavelures pour l'imagerie directe des exoplanètes par de premières observations avec optique adaptative dans le proche infrarouge au télescope militaire américain (Starfire Optical Range 3.6m)). J'ai ensuite pris la responsabilité, comme **responsable scientifique, de l'instrument IRDIS** que j'ai portée pendant plus d'une décennie, du début du projet SPHERE à sa mise en œuvre au VLT. Je suis un des piliers de l'exploitation scientifique de l'instrument SPHERE dans le cadre du grand relevé SHINE (200 nuits au VLT), dédié à la recherche et la caractérisation des exoplanètes en imagerie directe. Cette implication en tant que **co-responsable des observations et de la réduction de donnée SHINE** m'a permis de contribuer aux **découvertes de nouvelles exoplanètes et de nouveaux disques** mais aussi à la caractérisation des systèmes exoplanétaires. Dans ce contexte, j'ai développé, en co-encadrement une thèse pluridisciplinaire, une **nouvelle méthode d'analyse de données qui permet d'améliorer la sensibilité en détection** pour ouvrir la voie à de nouvelles découvertes en particulier dans le domaine de la détection et de la caractérisation de planètes extrasolaires.

Diplômes, Titres et Prix

- 2017 : HDR Université Claude Bernard Lyon 1
- 2001 : Doctorat en Astrophysique et Techniques Spatiales, Steward Observatory (University of Arizona, Etats-Unis) et Université Paris VII : « Optique adaptative à hauts ordres appliquée à la détection de compagnons d'étoiles proches peu lumineux »)
- 1996 : DEA en Astrophysique et Techniques Spatiales, Université Paris VII
- 1988 : Maîtrise de Physique, Ecole Normale Supérieure (ENS-ULM) et Université Paris VII
- Prime Encadrement Doctoral et de Recherche (CNRS) : 2014 – 2017 et 2019 – 2022

Parcours

- Oct. 2018 – auj. : Directrice de Recherche 2^e classe, CNRS (CRAL-YON)
- Oct. 2009 – Sept. 2018 : CR 1^{ère} classe, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon
- Oct. 2005 – Sept. 2009 : Chargée de Recherche 1^{ère} classe, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
- Jan. 2002 – Jan. 2005: Associée de Recherche, National Solar Observatory & NJIT, USA
- Jan. 2001 – Oct. 2002 : Associée de Recherche, University of Durham, UK
- Oct. 1991 – Déc. 1995 : Thèse, Steward Observatory, University of Arizona, Etats-Unis

Activités de recherche

- Astrophysique : Planètes extrasolaires et disques circumstellaires : détection directe par imagerie, caractérisation (photométrie, spectroscopie, astrométrie, morphologie), interaction planète/disque
- Techniques observationnelles : Imagerie Haute Résolution Angulaire, Imagerie Haute Dynamique,
- Techniques numériques : Simulations instrumentales, traitement de données innovants (Défi interdisciplinaire du CNRS "IMAG'IN")
- Projets instrumentaux : Conception instruments haut contraste, spécifications haut-niveau, définition des cas scientifiques, développement et mise en œuvre d'instrumentation à haute résolution angulaire et a grand contraste (systèmes d'optique adaptative, caméras infrarouges, polarimétrie)
- Recherche et développement sur de nouveaux composants pour l'instrumentation astronomique, en particulier analyseur de front d'onde pour la très haute précision et calculateur temps réel pour les systèmes d'optique adaptative de nouvelle génération (SPHERE+).
- Publications : +230 publications, dont 160 publications de rang A (H=32), dont 30 en 1^{er} auteur.

Responsabilités scientifiques et instrumentales

- IRDIS / SPHERE Instrument Scientist (2006 - ...)
- Co-responsable des observations et du traitement des données du grand relevé SHINE de l'instrument SPHERE/VLT (200 nuits) (2014 - ...)
- Co-Investigatrice du projet ANR "Live-Mirror"
- Responsable scientifique de plusieurs activités de R&D liées à l'optique adaptative dans le cadre des programmes Européens Opticon et de projets régionaux.

Animation et administration de la recherche

- Membre de la Commission Spécialisée Astronomie et Astrophysique de l'INSU de 2015 à 2019.
- Coordinatrice des services d'observation de l'ANO2 et membre du «groupe ad hoc SNO» pour la Commission Spécialisée Astronomie et Astrophysique de l'INSU (2018 - ...)
- Coordinatrice locale d'un service d'observation en ANO5: centre de données SPHERE (2018 - ...)
- Membre du conseil scientifique du Programme National de Physique Stellaire (2020- ...)
- Membre du panel d'experts 2019 de l'OPC / ESO (catégorie C)
- Membre de plusieurs comités de recrutement de Maître de conférence et de professeurs (l'Université de NICE, Sorbonne Université, PSL,...)
- Membre élu du conseil de laboratoire CRAL (2010 - 2015) et de l'Observatoire de Lyon (2017-2018)
- Membre élu du Comité National, section 17 du CNRS (2012 - 2016)
- Contribution à la prospective française (prospective INSU AA et prospective INSU) – (2015, 2020)

Expertises scientifiques et techniques

- Experte pour l'AERES (2013), et l'ANR
- Experte étranger auprès, de la NSF américaine
- *Referee* pour différentes revues : A&A, MNRAS, PASP, Applied Optics, JOSA.
- Participation à 7 comités de thèse (A. Vigan, G. Sinh, C. Perrot, S. Vievard, I Goncalves, T. Bhowmik, O. Flasseur) et 2 comités HDR (P. Martinez, F. Cassaing)

Encadrement de jeunes chercheurs

- Direction de la thèse de A. Vigan, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, France (embauché comme chercheur permanent CNRS en 2014) (2006 - 2009)
- Supervision de séjour postdoctoral de C. Delacroix sur l'optique adaptative extrême avec le capteur de front d'onde Mach-Zehnder, Labex LIO et CRAL, France
- Direction de la thèse de M. Grau, sur l'optique adaptative extrême avec le capteur de front d'onde Mach-Zehnder, Labex LIO et CRAL, France (2016 - 2017)
- Co-direction de la thèse de O. Flasseur, Détection et caractérisation d'objets à partir de signaux faibles en images: applications en astronomie et microscopie (2017 - 2020)
- Direction de la thèse de L. Denneulin, Approche inverse en imagerie à contraste élevé des disques circumstellaires (2017 - 2020)
- Supervision de séjour postdoctoral de O. Flasseur, reconstruction d'objets étendus en faible rapport signal-sur-bruit application aux planètes extrasolaires et disques circumstellaires
- De plus, au cours de la dernière décennie, j'ai supervisé 2 étudiants TIPE, 3 étudiants Master 1 et 6 étudiants de Master 2.

Diffusion de la culture scientifique et technique

- Conférences grand public, interventions scolaires dans les écoles primaires de la région Rhône Alpes
- Formation des enseignants du secondaire et du secondaire (formation continue / éducation nationale)
- Encadrement des Stages pour collégiens et lycéens (stages, TPE, TIPE)
- Responsable du projet "Lumière sur les femmes en astrophysique" financé par SF2A et soutenu par le Ministre des Familles, de l'initiative Enfance et Droits des femmes
- Intervenante lors de la Semaine d'astrophysique 'Un Peu de Bon Science'

Curriculum Vitae

David Mouillet

Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (UMR 5274)
414 rue de la Piscine, Domaine Universitaire. 38400 Saint Martin d'Hères.
Tel : 04 76 63 56 98 / Mobile : 06 6010 5390
E-mail : David.Mouillet@univ-grenoble-alpes.fr

Imagerie à grand contraste : de la R&D aux instruments opérationnels sur les grands télescopes

J'ai été dans les premiers observateurs à exploiter **l'imagerie à haute résolution angulaire couplée à la coronagraphie** pour sonder la partie interne des environnements planétaires d'étoiles proches, au sol avec optique adaptative ADONIS, ou depuis l'espace HST. Ces observations apportent des résultats astrophysiques importants tels que le **gauchissement du disque de β Pictoris** ou la structure en anneau sur le disque de transition autour de HD141569. Elles soulignent aussi les limitations et besoins de ce mode observationnel très demandeur et pousse à la conception d'un instrument dédié, avec une analyse système totalement revue et orientée en ce sens. C'est ce qui a été mené **de la proposition initiale jusqu'à la validation sur ciel, du projet SPHERE** au VLT, incluant une vue globale (spécifications, calibrations, modes opérationnels), l'inclusion de nouvelles possibilités technologiques (détecteurs, optiques, coronagraphie, mesure de front d'onde), jusqu'au traitement du signal. L'imagerie à haute dynamique est maintenant totalement reconnue comme un domaine spécifique. Ces actions ont apporté une reconnaissance large et internationale sur les techniques et perspectives en instrumentation à haute résolution angulaire et grand contraste, avec la capacité de dialogue constructif croisés des astronomes observateurs et théoriciens jusqu'aux spécialistes en instrumentation (direction ASHRA, éditeur A&A, étude NASA/HabEx). Cette vision est aussi porteuse de **nouvelles pistes de R&D pour l'instrumentation** de demain, couplant l'imagerie et la spectrométrie à haute résolution.

Diplômes, Titres, Prix

- 2010 : Habilitation à Diriger les Recherches (Université J. Fourier) "Systèmes planétaires extra-solaires. Observation et instrumentation en imagerie directe"
- 1998 : Prix Paul Doisteau- Emile Blutet de l'Académie des Sciences
- 1997 : Doctorat en Astrophysique et Techniques Spatiales, Université Paris 7 "Environnement circumstellaire d'étoiles de la séquence principale"
- 1994 : DEA en Astrophysique et Techniques Spatiales (Paris 7)
- 1993 : Diplôme de l'Ecole Polytechnique

Parcours

- 2007 - maintenant : Astronome à l'IPAG (Université J. Fourier)
- 2002 - 2006 : Directeur du Télescope Bernard Lyot (USR 5026) à l'Observatoire Midi-Pyrénées (délégation CNRS puis détachement au CNAP)
- 1997 - 2001 : Maître de conférences à l'université J. Fourier

Activités de recherche

- Conception, réalisation et test de nouveaux instruments d'imagerie à haut contraste : analyse système globale, optimisation, tests sur ciel, adéquation aux besoins scientifiques
- R&D instrumentale : traitement du signal, couplage imagerie et spectrométrie à haute résolution
- Observation : Planètes extrasolaires et disques circumstellaires
- Publications : 130 articles à comité de lecture et 200 actes de conférences

Responsabilités scientifiques et instrumentales

- SPHERE : Responsable Scientifique (Project Scientist) de la proposition initiale du projet à la validation sur ciel

- Autres instruments : NAOS (premier système d'optique adaptative au VLT : simulations, validation de performances), AMBER (interféromètre proche IR 3 télescopes au VLTI : définition des outils logiciels), NARVAL (spectro-polarimètre copie d'ESPADONS : réalisation et mise sur ciel au TBL)
- Programmes observationnels : imagerie à grand contraste de disques et recherche de compagnons de faible masse
- R&D sur le couplage de l'imagerie à grand contraste à un spectromètre fibré à haute résolution optimisé en transmission et résolution.

Animation et administration de la recherche

- 2020 - maintenant : Président du Conseil Scientifique du LabEx FOCUS
- 2019 - maintenant : éditeur associé à la revue Astronomy&Astrophysics (thématique principale : instrumentation)
- 2018 - maintenant : membre du Haut Conseil Scientifique (HCS) de l'Observatoire de Paris
- 2016 - 2019 : Participation à la "Science and Technology Definition Team" (STDT) pour le projet NASA/HabEx (observateur pour le CNES)
- 2015 - 2020 : Directeur de l'Action Spécifique Haute Résolution Angulaire (ASHRA) pour l'INSU
- 2012 - 2017 : membre du bureau de la section 17 du CNRS
- 2012 - maintenant : Président du Conseil Scientifique du Télescope B. Lyot
- 2003 - 2006 : Directeur du Télescope B. Lyot (USR 5026)

Expertises scientifiques et techniques

- Expertise de dossiers pour : HCERES, ANR, DIM ACAV, revues de projet ESO
- Editeur A&A

Encadrement de jeunes chercheurs

- Co-Directions de thèses : Gael Chauvin (2001-2003). Marie Ygouf (2009-2012). Julien Milli (2011-2014), Faustine Cantalloube (2014-2017).

Diffusion de la culture scientifique et Enseignement

- Enseignement académique de la Licence au Master : physique générale, optique, instrumentation, traitement du signal
- Conférences grand public et MOOC ("A la recherche de planètes habitables")