



HAL
open science

Optique active pour l'imagerie d'exoplanètes et de disques de débris

Johan Mazoyer

► **To cite this version:**

Johan Mazoyer. Optique active pour l'imagerie d'exoplanètes et de disques de débris. Instrumentation et méthodes pour l'astrophysique [astro-ph.IM]. Observatoire de Paris - PSL, 2024. tel-04523787v1

HAL Id: tel-04523787

<https://hal.science/tel-04523787v1>

Submitted on 27 Mar 2024 (v1), last revised 25 Apr 2024 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Optique active pour l'imagerie d'exoplanètes et de disques de débris

Rapport de synthèse présenté publiquement le 12 mars 2024 par

Johan Mazoyer

Chargé de Recherche au CNRS

pour l'obtention d'une

Habilitation à diriger des recherches

Président :	Yann Clénet	Observatoire de Paris-PSL
Rapporteurs :	Marc Ferrari Christian Marois Laurent Pueyo	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille University of Victoria, Canada Space Telescope Science Institute, USA
Examinatrices :	Caroline Kulcsár Maud Langlois	Institut d'Optique - Graduate School Centre de Recherche Astrophysique de Lyon
Examineur :	Olivier Absil	Université de Liège, Belgique

Unité de Formation et Enseignement
Observatoire de Paris - PSL

À Pascale Créac'h

À Malick N'Diaye

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury et en particulier les rapporteurs Marc Ferrari, Christian Marois et Laurent Pueyo pour leur relecture attentive et leurs rapports très positifs. Je remercie aussi Yann Clénet d'avoir accepté de présider ce jury et Olivier Absil, Caroline Kulcsár et Maud Langlois d'avoir accepté d'y participer. Merci enfin à toutes les personnes qui sont venues écouter la soutenance.

Merci à toute l'équipe IMODEX, Anthony, Anne-Marie, Benjamin, Philippe, Elsa et Elsa, Antoine, Harry, Flavien, Manon, Alice, Clément, Christian, Lucas, et en particulier les jeunes chercheurs qui travaillent avec moi en ce moment, Iva, Vito, Sophia, Yann et bientôt Riccardo, sans oublier celles et ceux qui sont partis récemment Medhi, Mathilde, Kevin, Nour et Florian. Grâce à vous, c'est un vrai plaisir de venir au travail tous les jours. Je n'ai jamais travaillé dans une équipe aussi agréable et où je collabore avec autant de gens différents.

Un mot particulier tout ceux qui m'ont aidé durant l'une des périodes les plus stressantes de ma carrière, mon recrutement au CNRS, en particulier Mamadou J'essaie maintenant de suivre son exemple et d'accompagner mes collègues actuels et futurs dans leur formation et leur carrière.

Une pensée affectueuse à toute l'équipe de Podcast Science, des amoureux de la science de tous horizons, avec lesquels je collabore depuis une décennie, pour que servir la science soit votre joie.

Un immense merci à mes parents qui m'ont donné la curiosité et la persévérance qui sont des qualités indispensables pour ce métier, à ma mère Martine qui m'a montré le chemin de la recherche et à mon père Bernard, en particulier pour sa relecture toujours attentive, il a maintenant 4 relectures de thèse et 2 d'HDRs à son actif! Enfin, un grand merci à ma compagne Balkissa pour son soutien sans faille et ses encouragements quotidiens qui ont tant contribué à ce travail.

Enfin, je tiens à conclure sur les 4 mentors qui ont été particulièrement importants à des stades différents de ma carrière et qui m'ont fait un immense plaisir à être tous présents aujourd'hui! Raphaël, Pierre, Gérard et Laurent, j'ai énormément appris à votre contact, autant en recherche que dans la façon exigeante et bienveillante dont vous m'avez dirigé et j'aspire maintenant à reproduire. Merci pour tout!

Résumé

La plupart des grands télescopes actuels sont équipés d'instruments coronographiques. Des coronographes sont aussi en développement pour les ELTs et le télescope spatial Roman, qui analyseront des Jupiters autour d'étoiles proches. Enfin, ils sont au cœur du futur Habitable Worlds Observatory, récemment sélectionné par le Decadal Survey 2020 de la communauté américaine, qui chercheront à détecter des marqueurs d'habitabilité sur des exoplanètes. Pour développer ces instruments, il faut encore relever d'importants défis, qui forment la base de mon travail instrumental. Les coronographes actuels sont des systèmes fixes, optimisés en simulation pour obtenir les meilleures performances pour un système donné. Ils ne prennent donc pas en compte la réalité des instruments : vibrations, imperfections, désalignements et déformations des optiques, évolution de la pupille du télescope. Ma recherche instrumentale se focalise sur la correction active pour le haut-contraste, élément clé de la prochaine génération d'instruments, pour optimiser en temps réel un coronographe donné à la réalité de l'instrument pour lequel il est développé. J'ai appliqué ces techniques en simulation, sur plusieurs bancs optiques et sur des télescopes.

En parallèle de ma recherche instrumentale, je consacre une partie de mon activité à l'analyse d'images coronographiques de disques de débris. L'étude des disques circumstellaires est d'une importance critique pour comprendre les systèmes planétaires. Tout d'abord, l'observation de la poussière circumstellaire, depuis les disques proto-planétaires jusqu'aux disques de débris, analogues de la ceinture de Kuiper, permet d'étudier la formation et l'évolution de ces systèmes. Ensuite, ils présentent des structures complexes (anneaux, spirales, sur-densités locales) dont l'analyse précise a déjà permis la prédiction d'exoplanètes non détectées. Mais au-delà de cette analyse "géométrique", il est primordial de commencer l'analyse des grains de poussière circumstellaire eux-mêmes : issus de la collision des planétésimaux aussi à l'origine des exoplanètes, les éléments dont ils sont formés sont communs à ceux que nous détecterons à leur surface. Mon apport principal à ce domaine est l'adaptation de méthode de post-processing pour la détection et la caractérisation des exoplanètes aux disques de débris. Ces méthodes sont primordiales pour extraire des informations fiables sur ces objets, au-delà de la simple détection. Ces techniques m'ont permis de corriger les biais spécifiques à ces méthodes et à faire plusieurs analyses multi-instrumentale.

Les aspects instrumentaux et observationnels de mon travail sont complémentaires. À mesure que la complexité des techniques coronographiques augmente, il devient nécessaire pour un observateur de comprendre précisément les limitations de son instrument. À l'inverse, une expérience astrophysique est indispensable pour déterminer les priorités des projets futurs et orienter la recherche instrumentale.

Abstract

Most of today's large telescopes are equipped with coronagraphic instruments. Coronagraphs are also being developed for ELTs and the Roman Space Telescope, which will analyze Jupiters around nearby stars. Finally, they are at the heart of the future Habitable Worlds Observatory, recently selected by the American community's Decadal Survey 2020, which will seek to detect habitability markers on exoplanets. To develop these instruments, we still need to overcome some major challenges, which form the basis of my instrumental work. Current coronagraphs are fixed systems, optimized in simulation to obtain the best performance for a given system. They do not therefore take into account the reality of instruments : vibrations, imperfections, misalignments and deformations of optics, evolution of the telescope pupil. My instrumental research focuses on active correction for high-contrast, a key element of the next generation of instruments, to optimize in real time a given coronagraph to the reality of the instrument for which it is being developed. I have applied these techniques in simulation, on several optical benches and telescopes.

Alongside my instrumental research, I devote part of my time to analyzing coronagraphic images of debris disks. The study of circumstellar disks is of critical importance for understanding planetary systems. Firstly, by observing circumstellar dust, from proto-planetary disks to debris disks analogous to the Kuiper Belt, we can study the formation and evolution of these systems. Secondly, they display complex structures (rings, spirals, local over-densities) whose precise analysis has already enabled the prediction of undetected exoplanets. But beyond this "geometrical" analysis, it's vital to begin analyzing the circumstellar dust grains themselves : the result of the collision of the planetesimals that are also the origin of exoplanets, the elements of which they are formed are common to those we will detect on their surfaces. My main contribution to this field is the adaptation of post-processing methods for the detection and characterization of exoplanets in debris disks. These methods are essential for extracting reliable information about these objects, beyond simple detection. These techniques enabled me to correct the biases specific to these methods and to carry out several multi-instrument analyses.

The instrumental and observational aspects of my work are complementary. As the complexity of coronagraphic techniques increases, it becomes necessary for an observer to understand precisely the limitations of his or her instrument. Conversely, astrophysical experience is essential to determine priorities for future projects and guide instrumental research.

Table des matières

1	Dossier de synthèse	2
1.1	L'imagerie haut-contraste	2
1.1.1	Les défis de l'imagerie directe	2
1.1.2	Deux décennies d'imagerie directe d'exoplanètes	3
1.1.3	Disques de débris : la révolution de l'imagerie	6
1.1.4	Fonctionnement des instruments coronographiques actuels	9
1.1.5	Les algorithmes de traitement d'images coronographiques	12
1.2	Une recherche à l'intersection de l'instrumentation et de l'observation haut-contraste	14
1.2.1	Instrumentation pour le haut-contraste pour le sol et le spatial	15
1.2.2	Imagerie des disques de débris : algorithmes de réduction et propriétés de diffusion	22
1.3	Et maintenant ?	29
1.3.1	Nouvelles méthodes d'observations	29
1.3.2	Utilisation de l'apprentissage automatique pour l'imagerie directe	32
1.3.3	De SPHERE à SPHERE+ : trois boucles valent mieux qu'une	35
1.3.4	Quel futur pour le THD2 ?	37
1.3.5	De Roman à HWO, quelle place pour le haut-contraste spatial en Europe ?	38
2	Note d'accompagnement	41
2.1	Enseignements	41
2.2	Prises de responsabilités dans le laboratoire	41
2.3	Prises de responsabilité dans la communauté	42
2.4	Diffusion des sciences	42
2.4.1	Podcast Science	44
2.4.2	Autres investissements dans la diffusion des sciences	47
2.5	Management de la recherche	48
2.6	Jeunes chercheurs et chercheuses encadrés	50
2.6.1	Post-doctorants et post-doctorantes	50
2.6.2	Doctorants ou doctorantes pour lesquels je suis l'un des encadrants officiels	50
2.6.3	Doctorants ou doctorantes pour lesquels j'ai participé à l'encadrement de manière non-officielle	51
2.6.4	Stagiaires de Master 2	51
	Bibliography	53
	Annexe A Curriculum vitae	66
	Annexe B Liste de mes publications	69

Chapitre 1

Dossier de synthèse

Ce chapitre commence par expliquer le contexte général de mon domaine (section 1.1), puis résume mes travaux de recherche depuis ma thèse (MAZOYER, 2014) dans la section 1.2. Enfin, je décris mes projets de recherche en cours ou que je souhaite développer dans le futur (section 1.2). La mise en contexte n'est pas une revue de mon domaine et ne vise en aucun cas l'exhaustivité, mais tente seulement de donner certains éléments pour comprendre le résumé de mes recherches, pour un lecteur déjà familiers de ces thèmes. Les lecteurs qui souhaiteraient aller plus loin sont invités à consulter GALICHER & MAZOYER (2023), la revue que j'ai récemment écrite sur l'instrumentation haut-contraste et dont ce manuscrit reprend certaines figures. Enfin, pour les disques de débris, je conseille la non moins complète revue de HUGHES et al. (2018).

1.1 L'imagerie haut-contraste

1.1.1 Les défis de l'imagerie directe

Depuis la première détection en 1995 à l'observatoire de Haute-Provence de la première exoplanète autour d'une étoile de type solaire (MAYOR & QUELOZ, 1995), plus de cinq mille exoplanètes ont été imagées, en utilisant quatre méthodes principales : les vitesses radiales, les transits, les micro-lentilles gravitationnelles et l'imagerie directe. Cependant, ces méthodes diffèrent grandement par le nombre et le type d'exoplanètes détectées (Figure 1.1).

L'objectif de l'imagerie directe est d'obtenir des images des environnements circumstellaires des étoiles : exoplanètes, disques de débris et protoplanétaires. L'imagerie permet un accès direct à la position exacte de la source autour de l'étoile ainsi qu'une mesure de la lumière réfléchie ou émise par l'objet. Pour les exoplanètes, cela permet de déterminer à la fois les paramètres orbitaux et les propriétés physico-chimiques de leur atmosphère. Pour les disques, il est ainsi possible de déterminer la forme des objets, leur évolution ainsi que leurs propriétés de diffusion, nous renseignant sur la taille des grains, leur forme et leur composition. L'imagerie directe est cependant un défi en raison du rapport de luminosité important (de 10^4 à 10^{10}) et des faibles séparations angulaires (de quelques centièmes de seconde d'arc à quelques secondes d'arc pour les étoiles les plus proches) entre une planète et son étoile hôte. On parle donc d'imagerie haut-contraste pour ce domaine. Pour ces raisons, moins de 1% des 5000 exoplanètes découvertes à ce jour ont été directement imagées (Figure 1.1, droite) depuis les premières détections il y a deux décennies. Les planètes imagées sont plus massives et plus éloignées que leurs homologues détectées par d'autres méthodes (Figure 1.1, gauche).

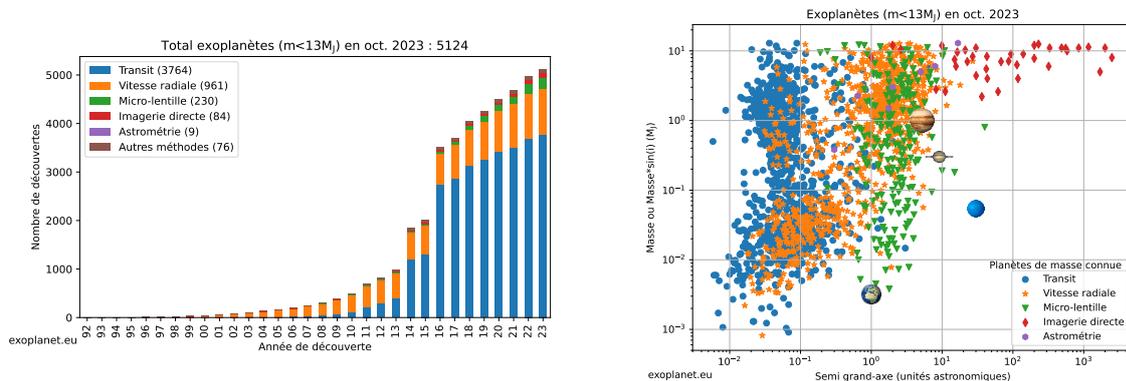


FIGURE 1.1 – **Gauche** : Détections d'exoplanètes au cours des 3 dernières décennies en fonction de la méthode de détection. **Droite** : Graphe masse séparation des exoplanètes détectées jusqu'à 2023. Pour les exoplanètes détectées en vitesses radiales sans confirmation par une autre méthode, la masse minimum est indiquée. Ces figures ont été produites en utilisant les données du site exoplanet.eu.

Le rapport de luminosité entre l'exoplanète et son étoile hôte est plus favorable à l'imagerie dans l'infrarouge, où l'émission de l'exoplanète est maximale (à $10 \mu\text{m}$ pour les planètes du système solaire), mais où la résolution angulaire, qui se dégrade linéairement avec la longueur d'onde, est faible. Dans le visible, la résolution angulaire est meilleure, mais le rapport de flux est très important. Un compromis peut être trouvé avec les jeunes Jupiters dans le proche infrarouge. Une telle planète est plus chaude que les planètes du système solaire et le maximum de son émission se situe donc autour de $1.5 \mu\text{m}$, longueur d'onde pour laquelle la résolution angulaire du télescope est 7 fois plus petite qu'à $10 \mu\text{m}$. C'est pourquoi les instruments actuels d'imagerie des exoplanètes ont été optimisés pour les observations dans le proche infrarouge (bandes Y à L) afin de détecter ces jeunes Jupiters. La Figure 1.2 (gauche) montre clairement ce biais d'observation de l'imagerie actuellement : la plupart des planètes détectées à ce jour sont de jeunes planètes de moins de 100 millions d'années (en bas à droite de l'image). Cependant, ce biais est aussi l'une des forces majeures de cette technique, car l'activité propre des jeunes étoiles tend à rendre les détections par des méthodes indirectes plus difficiles pour ces cibles. L'imagerie directe est donc la méthode privilégiée pour l'étude de la formation planétaire. Les objectifs de ma recherche se situent exactement dans le développement de ce type d'instruments.

1.1.2 Deux décennies d'imagerie directe d'exoplanètes

La plupart des télescopes terrestres actuels de 8-10 mètres hébergent ou ont récemment hébergé des instruments à fort contraste qui incluent un coronographe stellaire. Les instruments pionniers ont été développés à la fin des années 1990 sur la première génération d'imageurs à optique adaptative : VLT/NACO (première lumière en 2001, mis hors service en 2019, LENZEN et al., 2003 ; ROUSSET et al., 2003), Keck/NIRC2 (première lumière en 2001, toujours actif, MCLEAN & SPRAYBERRY, 2003 ; WIZINOWICH, 2006), Subaru/HiCIAO (TAMURA et al., 2006), Gemini South/NICI (première lumière en 2007, mis hors service en 2014, TOOMEY & FTACLAS, 2003) et Gemini North/NIRI (première lumière en 2001 et toujours actif, HODAPP et al., 2003). Les enseignements tirés de ces instruments ont conduit à une deuxième génération

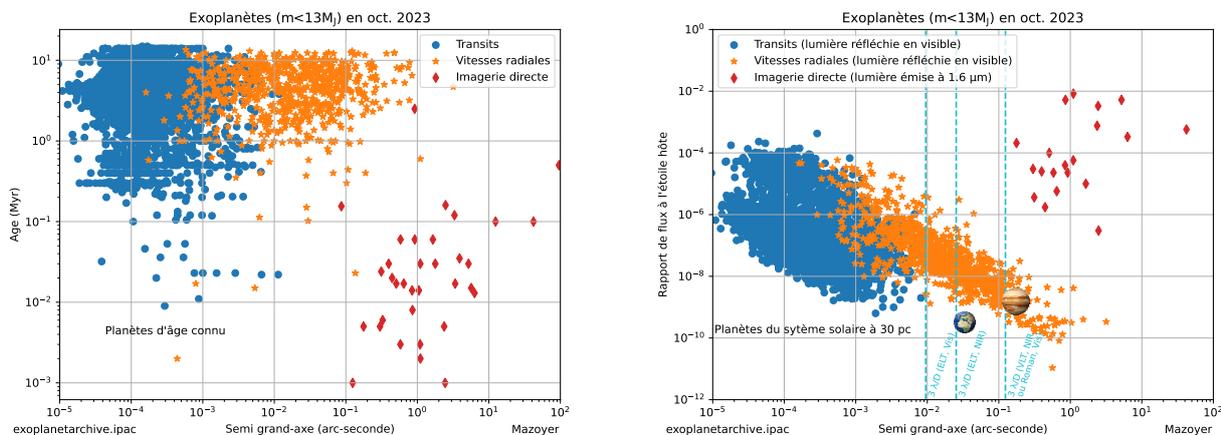


FIGURE 1.2 – **Gauche** : Graphe âge séparation des exoplanètes détectées jusqu’à 2023 dont l’âge est connu. **Droite** : Graphe contraste séparation des exoplanètes détectées jusqu’à 2023. Cette figure a été réalisée avec l’hypothèse que les rayons des planètes suivait une loi log-log linéaire par morceaux de la masse, déterminée par CHEN & KIPPING (2017). Ce rayon a été utilisé pour estimer le flux de lumière réfléchi par les planètes détectées à ce jour, avec un albédo supposé de 0.3. Les mesures de rapports de flux en H pour les planètes imagées, en vert, ont été collectées dans les papiers de détections de ces objets. Ces figures ont été produites en utilisant les données de la [NASA Exoplanet Archive](#).

d’instruments dix ans plus tard. Alors que la première génération d’instruments consistait principalement en des imageurs IR polyvalents assistés par optique adaptative avec, entre autres, un canal coronographique, la deuxième génération a été conçue beaucoup plus spécifiquement pour l’imagerie à haut contraste des exoplanètes, en combinant des systèmes d’optique adaptative extrêmes avec les progrès récents de la coronagraphie : VLT/SPHERE (première lumière 2014, toujours actif, BEUZIT et al., 2019), Gemini South/GPI (première lumière 2014, en cours de jouvence depuis 2020, MACINTOSH et al., 2008), MagAO/Clio2 (SIVANANDAM et al., 2006; CLOSE et al., 2010) and Subaru/SCEXAO (première lumière 2017, toujours actif, JOVANOVIC et al., 2015).

Dans l’espace, l’extrême sensibilité et la stabilité optique du télescope spatial Hubble (HST) en font un outil idéal pour l’imagerie à fort contraste. Trois instruments du HST comprennent un canal coronographique, NICMOS (opérationnel de 1997 à 1999 et de 2002 à 2008, SCHNEIDER et al., 1998), ACS (installé en 2002 et observant dans le visible, toujours actif mais le canal haute résolution comprenant le coronographe a été définitivement désactivé en 2007, KRIST et al., 2003) et STIS (opérationnel de 1997 à 2004 et de 2009 à aujourd’hui, observant dans le visible, GRADY et al., 2003). Les instruments du HST, conçus bien avant que la première exoplanète ne soit imagée, sont polyvalents, avec des coronographes rudimentaires qui ne sont pas optimisés pour l’imagerie des exoplanètes. Enfin, le JWST, récemment lancé, comprend deux instruments dotés de modes coronographiques : NIRCcam (BEICHMAN et al., 2012) dans le proche infrarouge et MIRI dans l’infrarouge moyen (BOCCALETTI et al., 2015).

La figure 1.3 montre deux décennies de planètes imagées par ces instruments. Pour chaque image, nous indiquons la date de publication et l’instrument ayant servi à la première détection. Les échelles de taille croissante des vignettes montrent les progrès de l’instrumentation haut-contraste et des algorithmes de traitement durant cette période, qui nous ont permis de

détecter des objets de moins en moins lumineux et de plus en plus proches de leur étoile. La Figure 1.2 (droite) illustre clairement les limites de performances des instruments actuels ainsi que les objectifs à long terme de cette technique. Le rapport de flux à leur étoile hôte des planètes détectées actuellement en imagerie directe (en vert) se situe entre 10^{-2} et 10^{-6} . Leur détection est intervenue en bande H, où le rapport de flux en émission est le plus favorable. Les rapports de flux estimé en réflexion des planètes détectées indirectement, plus âgées, ont été indiquées en bleu et orange. Ces planètes sont actuellement inaccessibles aux meilleurs instruments haut-contraste. En effet, aux mêmes séparations (0.1 arcsecondes), les émissions réfléchies sont inférieures à 10^{-10} , inaccessibles actuellement. De même, à contraste identique autour de 10^{-6} , la détection de planètes en lumière réfléchie nécessiterait d'obtenir des résolutions angulaires inférieures à 0.01 arcsecondes, totalement impossibles sur les télescopes actuels. Nous avons indiqué sur ce graphe l'objectif des instruments futurs, la détection de planètes équivalentes à celles de notre système solaire, comme Jupiter et la Terre. Il est clair qu'il sera nécessaire, pour cela, d'augmenter à la fois les performances en contraste (vers le bas) et en résolution angulaire (vers la droite) pour y parvenir. L'objectif de ma recherche instrumentale est justement de concevoir de nouvelles méthodes pour y parvenir.

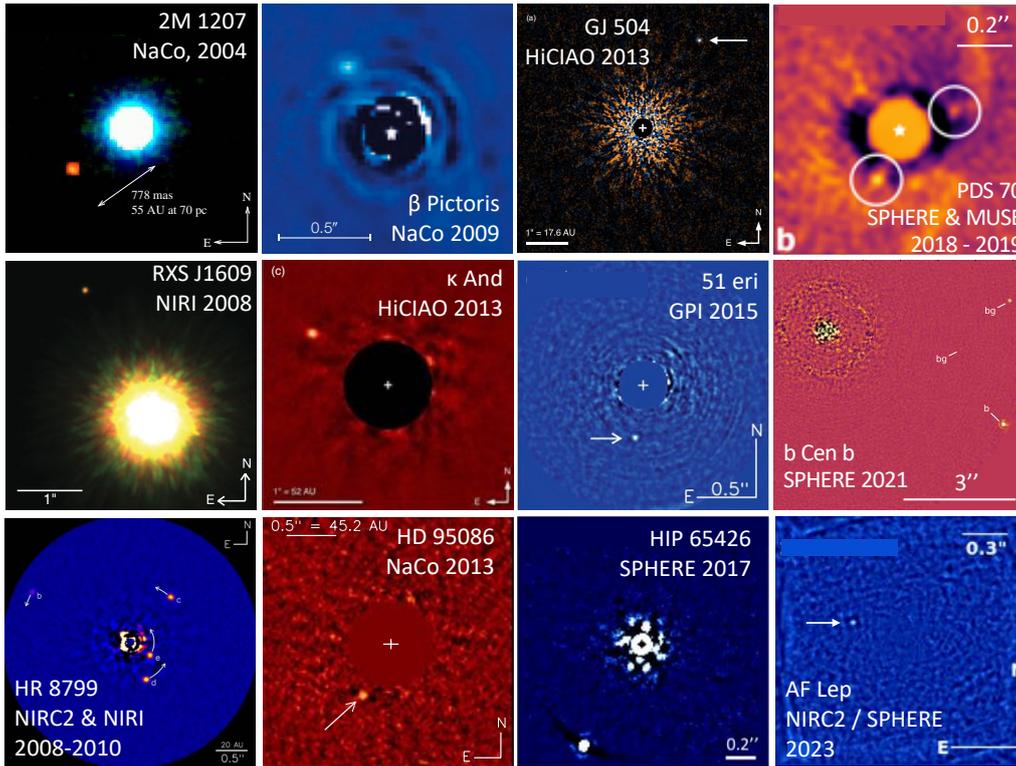


FIGURE 1.3 – Deux décennies d’imagerie d’exoplanètes. 2M 1207 b (CHAUVIN et al., 2004), RXS J1609 b (LAFRENIÈRE et al., 2008), HR 8799 b, c, d (MAROIS et al., 2008) and e (MAROIS et al., 2010), β Pictoris b (LAGRANGE et al., 2009), κ Andromedae b (CARSON et al., 2013), HD 95086 b (RAMEAU et al., 2013), GJ 504 b (KUZUHARA et al., 2013), 51 Eridani b (MACINTOSH et al., 2015), HIP 65426 b (CHAUVIN et al., 2017), PDS 70 b (KEPPLER et al., 2018) and c (HAFFERT et al., 2019), b Centauri b (JANSON et al., 2021), AF Lep b (FRANSON et al., 2023; MESA et al., 2023; ROSA et al., 2023).

L’instrument coronographique CGI (KRIST et al., 2018; MENNESSON et al., 2020) à bord

du futur télescope spatial Nancy Grace Roman aura justement pour objectif d’imager ces Jupiters âgées. Enfin, le but ultime de l’imagerie directe, l’analyse de l’atmosphère des exo-Terres à la recherche de biosignatures, nécessite une performance instrumentale supérieure à 10^{-10} en rapport de luminosité. C’est l’objectif des deux concepts de missions HabEx (GAUDI et al., 2020) et LUVOIR (LUVOIR TEAM, 2019) qui forment la base de la mission Habitable Worlds Observatory (HWO), à l’issue du rapport décennale de la communauté astronomique américaine (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2021). Nous discuterons de ces perspectives à la fin de ce chapitre, dans la section 1.3.5.

1.1.3 Disques de débris : la révolution de l’imagerie

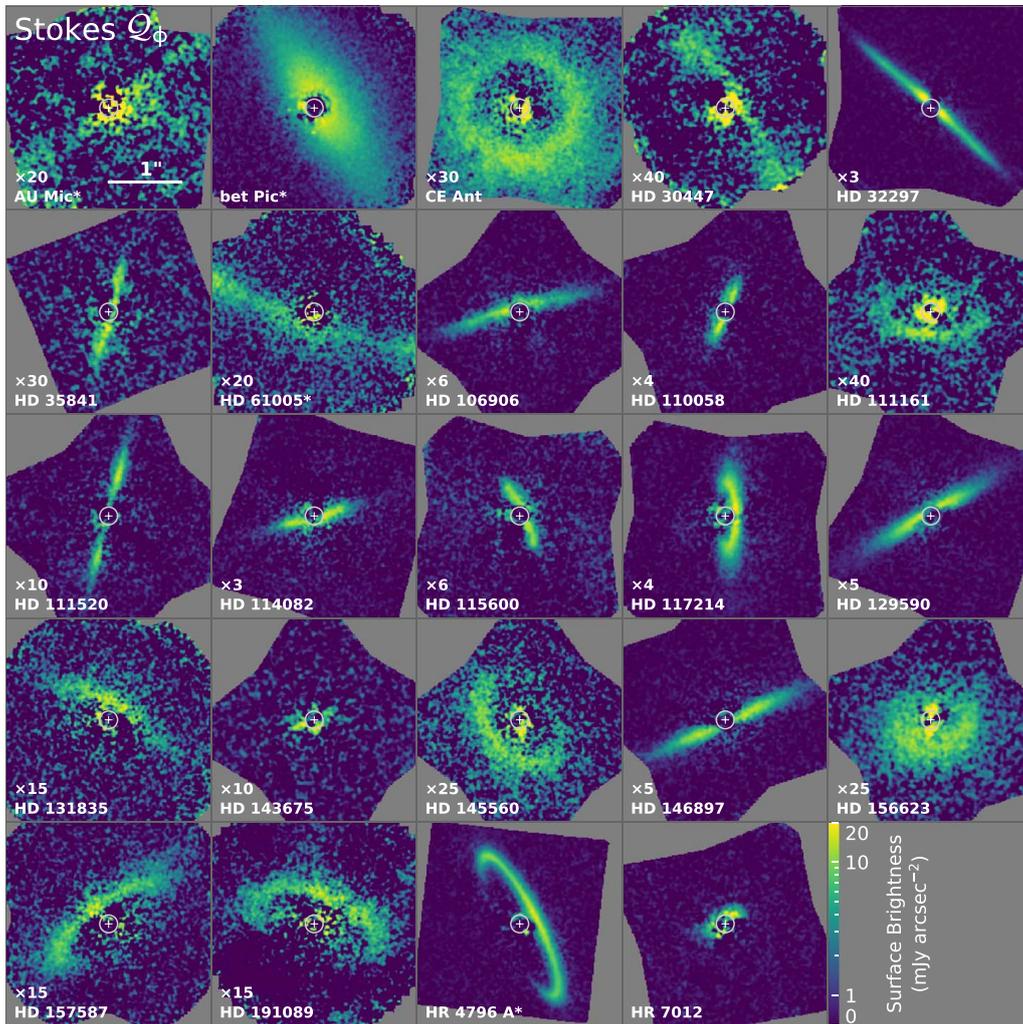


FIGURE 1.4 – Les disques observés durant le relevé GPIES (Gemini planet imager exoplanet survey) en lumière polarisée. Tiré de ESPOSITO et al. (2020b).

Bien que la détection d’exoplanètes de masses de plus en plus faibles soit le moteur principal du développement d’instruments coronographiques de plus en plus performants, la majorité des détections de ces instruments sont des disques circumstellaires. L’instrument GPI, par exemple, a imagé 6 planètes et 3 naines brunes (NIELSEN et al., 2019) mais 26 disques de débris et 3

disques protoplanétaires (ESPOSITO et al., 2020b), représentés dans la Figure 1.4, auxquels on peut ajouter 7 disques non encore publiés (Hom et al., en préparation).

L'étude des disques circumstellaires est d'une importance critique pour comprendre les systèmes planétaires. Seule l'étude des systèmes exoplanétaires, depuis les disques proto-planétaires où les spirales indiquent la présence de planètes en formation, jusqu'aux disques de débris, analogues de la ceinture de Kuiper, où les planètes sont déjà totalement formées et sculptent la poussière, permettra de comprendre la formation, l'évolution et la composition de ces systèmes.

Bien qu'on regroupe souvent ces deux types d'objets sous le nom de disques circumstellaires, la poussière contenue dans les disques protoplanétaires et les disques de débris est de nature fondamentalement différente. Dans les premiers, la poussière est entourée de grandes quantités de gaz qui lui permet de former des structures de plus en plus massives jusqu'à la création des exoplanètes.

Les disques de débris sont eux plus âgés (au-delà d'une dizaine de millions d'années) et apparaissent une fois que les processus de formation planétaires sont achevés. Cependant, il est important de noter que la poussière contenue dans ces disques n'est pas le reste de la poussière présente dans les disques protoplanétaires (poussière primaire) mais une poussière secondaire issue de collisions constantes des corps plus massifs qui se détruisent en grains toujours plus petits (on parle de cascade de collision) jusqu'à atteindre une taille à laquelle ils sont éjectés de l'anneau principal par la pression stellaire.

Il existe une classe intermédiaire entre ces deux processus appelée disques de transition où la densité de poussière est nettement plus faible que dans les disques protoplanétaires, mais qui sont encore caractérisés par une grande quantité de gaz. La présence de gaz était initialement utilisée comme un critère pour différencier les disques de débris des autres disques, mais des observations récentes d'ALMA trouvent du gaz dans un nombre croissant de disques de débris.

De manière observationnelle, la différence entre ces disques est que les disques protoplanétaires sont optiquement épais (la lumière ne traverse pas le disque) alors que les disques de débris sont optiquement fins. Dans ce manuscrit, nous nous concentrerons uniquement sur les disques de débris, dont je suis plus spécialiste.

La première image d'un disque de débris, β -Pictoris, (SMITH & TERRILE, 1984) est la première détection d'un système exoplanétaire, observée grâce à un instrument coronographique (VILAS & SMITH, 1987) à l'Observatoire de Las Campanas (Chili). Cependant, par sa taille impressionnante (>200 au) et sa distance relativement proche (<20 pc), ce disque est une exception et il faut attendre l'arrivée des coronographes d'Hubble (NICMOS et STIS en 1999) pour en trouver de manière plus régulière. La figure 1.4 montre une galerie des disques détectés par l'instrument GPI en lumière polarisée. Ceux-ci partagent quasiment tous une même structure, avec un anneau principal relativement fin radialement, bien visible pour les objets que l'on observe de face comme CE Ant (en haut au milieu), HD 145560 ou HR 4796 (en bas au milieu) mais aussi relativement fin verticalement comme le montre les traits bien formés par les disques observés par la tranche comme HD 32297 (en haut à droite) ou HD 111520 (au milieu à gauche). Cependant, cette uniformité de façade se fissure assez vite, en particulier lorsque l'on observe les structures plus éloignées de l'anneau principal, grâce à Hubble, comme montré par la Figure 1.5. Une grande partie des disques de débris présente des structures variées :

- des "warps" où la partie interne du disque présente une inclinaison différente de sa partie externe, comme β -Pictoris (MOUILLET et al., 1997) ou HD 110058, le disque sur lequel Sophia Stasevic, que j'encadre en doctorat, a récemment mené une étude, (STASEVIC et al., 2023),

Structural Diversity in Debris Disks

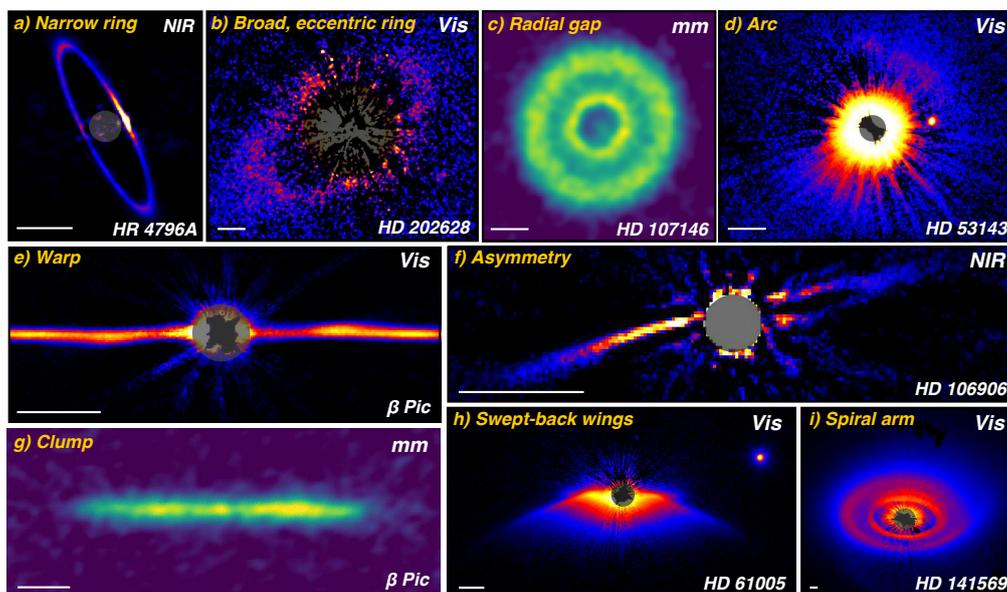


FIGURE 1.5 – Figure tirée de HUGHES et al. (2018) montrant la diversité des structures observées dans les disques de débris (références des images dans la publication originale).

- des asymétries dans l’anneau principal du disque comme HD 15115 (MAZOYER et al., 2014b) ou HD 106906 (KALAS et al., 2015 ; LAGRANGE et al., 2016),
- des "fourches", montrant le disque se séparant en deux composantes, comme HD 15115 à longue séparation (SCHNEIDER et al., 2014) ou encore HD 111520 (CROTTS et al., 2022)
- des "ailes" ou le disque s’étend largement dans une direction perpendiculaire comme pour HD 61005 (SCHNEIDER et al., 2014).

Après la prédiction réussie de MOUILLET et al. (1997) de l’existence d’une planète massive β -Pictoris b à partir de l’analyse du "warp", découverte effectivement par LAGRANGE et al. (2009), il peut être tentant d’expliquer toutes ces structures asymétriques par la présence de planètes massives, mais encore non détectées qui déformeraient la ceinture principale du disque. Cependant, ces structures peuvent parfois aussi être expliquées au moins en partie par des impacts récents de corps massifs dans le disque (JACKSON et al., 2014 ; KRAL et al., 2015) ou plus vraisemblablement une combinaison de ces phénomènes (JONES et al., 2023).

Mais au-delà de cette analyse "géométrique", qui considère souvent que le seul intérêt des disques de débris est d’être des marqueurs de planètes non détectées, l’analyse des grains de poussière circumstellaires eux-mêmes est primordiale : issus de la collision des planétésimaux aussi à l’origine des exoplanètes, les molécules qui les composent sont communes à celles que nous détecterons à la surface de celles-ci. Les instruments coronagraphiques sont particulièrement importants pour cette analyse, car ils permettent de résoudre la poussière circumstellaire et ses structures, tout en mesurant la diffusion par les grains, pour analyser leurs propriétés physiques. Nous reviendrons sur ce point dans la section 1.2.2.3

1.1.4 Fonctionnement des instruments coronographiques actuels

1.1.4.1 Principe du coronographe

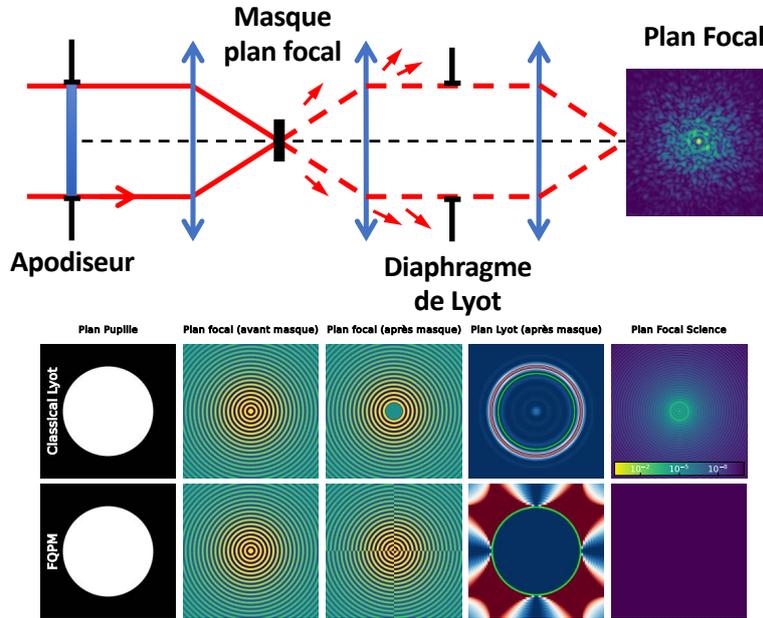


FIGURE 1.6 – **Haut** : Schéma de principe d'un coronographe. **Bas** : Simulations de la distribution de la lumière dans différents plans optiques du coronographe. Figure adaptée de GALICHER & MAZOYER (2023).

La figure 1.6 décrit le principe d'un coronographe stellaire à travers un schéma optique simple (haut) et la distribution de la lumière dans chaque plan optique successif (bas) dans un cas sans aberrations, en prenant comme exemple le coronographe stellaire classique de Lyot (JACQUINOT & ROIZEN-DOSSIER, 1964) et le *Four Quadrant Phase Mask coronagraph* (FQPM, ROUAN et al., 2000). La lumière est collectée par le miroir primaire du télescope, avec une pupille d'entrée de diamètre D . La pupille d'entrée optique du système coronographique est optiquement conjuguée à la pupille du télescope. On y situe généralement un apodiseur de pupille pour modifier la phase et/ou l'amplitude de la surface d'onde entrant afin d'optimiser la forme de la figure de diffraction dans le plan focal suivant. La lumière de la source sur l'axe est focalisée sur un masque de plan focal (deuxième image vignette). Ce masque peut induire des déphasages spatiaux et/ou une transmission différentielle sur le champ électrique. Dans le cas du coronographe de Lyot classique, le masque du plan focal est un petit masque circulaire totalement opaque, tandis que dans le cas du FQPM, un déphasage de π est introduit dans deux des quadrants opposés. L'objectif combiné de l'apodiseur pupillaire et du masque du plan focal est de garantir que la lumière de l'étoile sur l'axe est bloquée et/ou diffractée à l'extérieur de la pupille géométrique dans le plan pupille suivant. Dans ce plan, un diaphragme binaire, appelé diaphragme de Lyot, bloque la majeure partie de la lumière diffractée restante (ce diaphragme est représenté par un cercle vert sur la figure du bas). Enfin, très peu d'énergie stellaire provenant de la source sur l'axe atteint le plan focal de science. Une amélioration de plusieurs ordres de grandeurs est mesurable dans le cas du coronographe classique de Lyot tandis qu'il est démontrable qu'un FQPM idéal peut rejeter l'intégralité de la lumière en dehors de l'axe.

1.1.4.2 Instruments coronographiques au sol

Les performances des coronographes spatiaux ou terrestres sont actuellement limitées par des aberrations de la surface d’onde, en raison des résidus atmosphériques, de la qualité des optiques ou des discontinuités dans la pupille du télescope (monture du secondaire, segmentation). Ces aberrations créent des résidus de lumière stellaire dans le plan focal, appelés tavelures ou *speckles*, qui limitent le niveau de contraste et masquent les planètes. Ces *speckles*, par leur forme et leur taille, imitent les images d’exoplanètes, ce qui rend leur identification d’autant plus difficile. J’ai montré des *speckles* dans le plan focal du coronographe en haut de la figure 1.6.

Les aberrations de phase peuvent être introduites par l’atmosphère terrestre pour les télescopes au sol, et/ou par des imperfections de fabrication dans les optiques du télescope (en réflexion ou en transmission). Dans le contexte de la coronographie, les aberrations d’amplitude doivent également être prises en compte. Il s’agit de différences de transmission locales sur le faisceau. Elles peuvent être causées par de petits trous, de la poussière ou des défauts de revêtement sur l’optique. Il convient de noter qu’une aberration de phase introduite par une optique qui n’est pas conjuguée au plan pupille peut entraîner un mélange d’aberrations de phase et d’amplitude dans le plan de la pupille, en raison de la propagation de Fresnel.

L’intensité et la position des *speckles* changent dans l’image coronographique lorsque les aberrations de phase et d’amplitude varient. Si le temps d’intégration est plus long que la durée de vie des *speckles*, l’image résultante est la moyenne de plusieurs images de *speckles*. Le temps de variations des aberrations dues à l’atmosphère est de l’ordre de la milliseconde, beaucoup plus rapide que le temps d’intégration du détecteur scientifique situé dans le plan focal du coronographe (souvent dicté par des contraintes scientifiques). L’image coronographique résultante est donc la moyenne de milliers de *speckles*, résultant en un halo lisse diminuant à partir du centre de l’image et beaucoup plus lumineux que l’image de l’exoplanète.

Pour cette raison, et bien que les premiers coronographes aient été installés sur des télescopes terrestres dans les années 1980 (détection du disque de débris β -Pictoris en 1984 à l’Observatoire de Las Campanas SMITH & TERRILE, 1984), les premières images d’exoplanètes n’ont été rendus possibles qu’après l’installation de systèmes d’optique adaptative pour compenser les aberrations de phase induites par l’atmosphère (VLT/NACO, Keck/NIRC2, NIRI/Gemini North, etc). La correction **active** (pendant la séquence d’observation, en utilisant des miroirs déformables) de ces *speckles* nécessite de mesurer précisément les aberrations les générant. Le système d’optique adaptative nécessite donc un canal optique spécifique dans l’instrument pour mesurer les aberrations créées par l’atmosphère à l’aide d’un analyseur de surface d’onde travaillant généralement à une longueur d’onde différente de celle de la lumière envoyée dans le coronographe (voir la Figure 1.7). Le principal problème de la mesure de la phase est qu’une simple image de l’étoile ne permet pas de remonter à l’information sur la phase, car il y a une indétermination sur certains modes de la phase. La recherche sur les analyseurs de front d’ondes cherche donc à trouver des dispositifs optiques et/ou des algorithmes pour mesurer cette phase le plus linéairement possible. Cette mesure est ensuite traitée par un ordinateur en temps réel (*real time computer*, en anglais) qui commande un miroir déformable pour corriger ces aberrations. L’optique adaptative, même dans le cadre restreint de la coronographie (souvent qualifié d’optique adaptative extrême) sort du cadre de ce manuscrit et nous renvoyons les lecteurs intéressés vers les revues de GUYON (2018a) et de ROUSSET & FUSCO (2022) (en Français).

L’optique adaptative présente une fréquence de coupure qui est la fréquence de Nyquist du système d’optique adaptative liée au nombre d’actionneurs du miroir déformable dans la pupille

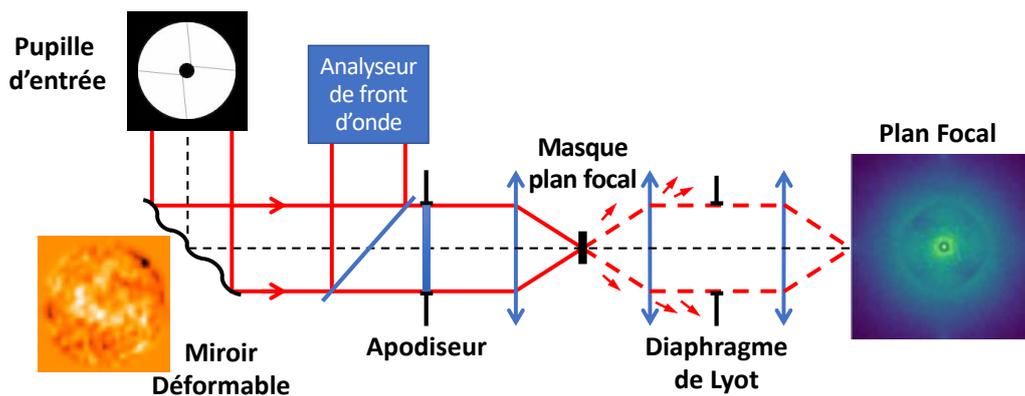


FIGURE 1.7 – Schéma de principe d'un instrument coronographique au sol. L'analyse est faite dans une voie spécifique, qui permet de contrôler le miroir déformable.

d'entrée. Au delà, pour les hautes fréquences spatiales, la turbulence n'est donc pas corrigée. Cet effet apparaît particulièrement dans le cas de la coronographie et se manifeste par une zone de correction visible dans le plan focal, comme montré Figure 1.7. Même dans la zone de correction, une partie des aberrations dues à l'atmosphère ne sont pas corrigées, soit car elles sont plus rapides que l'optique adaptative, ou car elles résultent de conditions météorologiques particulières. On parle alors d'aberrations résiduelles, qui laisse à un halo diffus au centre des images coronographiques des instruments au sol.

Enfin, les optiques adaptatives utilisent une voie d'optique spécifique, séparée de la voie de science (Figure 1.7). Une aberration introduite par une optique située après la séparatrice ne sera pas mesurée si elle est située dans la voie de science, ou au contraire sera corrigée par erreur si elle est dans la voie de l'analyseur, mais pas dans la voie de science. La correction de ces aberrations différentielles (*non-common path aberrations* en anglais) avec un miroir déformable ne peut se faire qu'au moyen d'un analyseur de surface d'onde se trouvant directement dans le plan focal du coronographe (un *Focal Plane WFS* en anglais). Le développement d'un analyseur de la surface d'onde en plan focal, la *Self-Coherent Camera* (SCC, BAUDOZ et al., 2006) était au cœur de mon travail de thèse (voir MAZOYER et al., 2013, 2014a). Parmi les autres techniques d'analyse de la surface d'onde en plan focal pour la correction des *non-common path aberrations* en coronographie, on peut aussi citer le *Pair wise probing* (BORDÉ & TRAUB, 2006 ; GIVE'ON et al., 2007, PWP,), sur lequel nous reviendrons dans la section 1.2.1.5. Cependant, l'estimation du champ électrique n'est que l'un des aspects de cette problématique, il faut ensuite contrôler le miroir déformable pour réussir à minimiser le champ électrique mesuré. Comme pour l'optique adaptative, on a là aussi un effet de fréquence de coupure du miroir déformable qui fait que cette correction n'est possible que dans une zone donnée du plan focal que l'on nomme *Dark-Hole*. Une grande partie de ma recherche porte sur les *Dark-Holes* et dans ce document, on retrouvera plusieurs exemples, obtenus en simulation (Figure 1.10), expérimentalement sur banc de test (Figure 1.11), et même sur un télescope (Figure 1.12).

1.1.4.3 Instruments coronographiques dans l'espace

Bien que les coronographes spatiaux soient libérés des aberrations introduites par l'atmosphère, les aberrations introduites directement par les optiques limitent fortement les performances espérées, les algorithmes d'analyse de la surface d'onde en plan focal et de contrôle

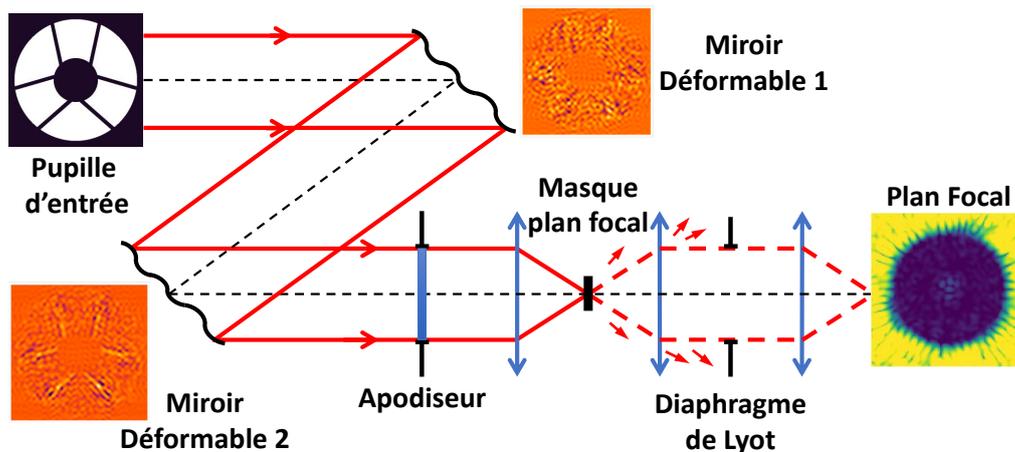


FIGURE 1.8 – Schéma d'un instrument coronographique spatial, comme celui embarqué à bord de Roman. L'analyse de la surface d'onde pour contrôler les miroirs déformables est directement effectuée dans le plan focal de science.

sont au cœur de la construction de coronographes spatiaux, comme celui actuellement intégré sur Roman. Ces algorithmes de contrôle dans le cadre spatial sont l'une de mes expertises, que je développerais dans les sections 1.2.1.1 et 1.2.1.2. En particulier, ces algorithmes de contrôle se complexifient lorsque l'on cherche à corriger à la fois les erreurs de phase et d'amplitude. En effet, par construction, un miroir déformable dans le plan pupille ne peut apporter que des corrections de phase. Cependant, il est possible d'introduire une aberration de phase qui permet de corriger simultanément les speckles créés par les erreurs de phase et d'amplitude, mais seulement dans la moitié du plan focal (BORDÉ & TRAUB, 2006), comme nous le verrons dans la partie 1.2.1.5. Cependant, si l'on dispose d'un second miroir déformable que l'on place en dehors du plan pupille, il est possible, par propagation optique, d'introduire des corrections d'amplitude dans la pupille l'instrument. Pour cette raison, les instruments coronographiques spatiaux incluant une correction active seront tous équipés de deux miroirs déformables, comme représenté sur la Figure 1.8.

1.1.5 Les algorithmes de traitement d'images coronographiques

Même avec les meilleurs instruments actuels, une large partie de l'image coronographique est dominée par des résidus de lumière stellaire (voir vignette de gauche dans la Figure 1.9), que ce soit des résidus de l'optique adaptative sous la forme d'un halo lisse décroissant (résultant du moyennage de milliers de *speckles* variant beaucoup plus rapidement que le temps de pose de la caméra scientifique), ou de *speckles* quasi-statiques, plus ponctuels, qui imitent les images d'exoplanètes. Par commodité, le terme "*speckles*" désigne dans cette section tout type de résidu de lumière stellaire qui atteint le détecteur, le halo résiduel de l'optique adaptative ou les *speckles* quasi-statiques.

Plusieurs techniques d'imagerie et stratégies d'observation ont été utilisées pour améliorer les capacités de détection des instruments coronographiques. Si nous utilisons une seule image coronographique brute (par exemple celle montrée en haut à gauche de la Figure 1.9), il n'est pas possible de différencier un *speckle* d'une exoplanète ou le halo de résidu de l'optique adaptative d'un disque vu de face. Cependant, le comportement du bruit de speckles et des objets

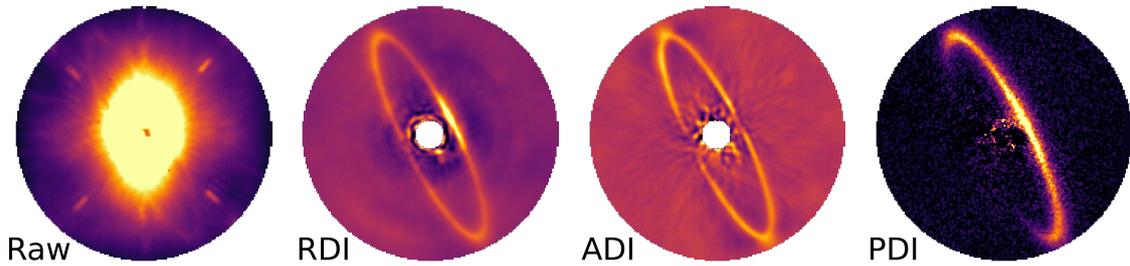


FIGURE 1.9 – Données GPI de HR 4796A dans la bande H pour plusieurs techniques d’imagerie différentielle. Le nord est en haut et l’est à droite. **De gauche à droite** : Image brute en intensité totale, le disque est à peine visible ; RDI qui laisse le disque presque sans distorsion ; ADI qui donne généralement un SNR plus élevé, mais l’auto-soustraction a souvent un impact important sur la forme du disque (surtout visible au niveau de l’anse et des régions proches de l’étoile) ; PDI qui n’est pas affectée par l’auto-soustraction, mais ne peut détecter que les régions où la lumière est la plus polarisée (partie avant du disque), alors que les régions avec un flux moins polarisé (partie arrière du disque) ne sont pas détectées. Les images brutes/RDI/ADI sont adaptées de CHEN et al. (2020), l’image PDI de ARRIAGA et al. (2020).

astrophysique diffèrent de façon spécifique. Les techniques d’imagerie différentielle exploitent ces différences pour calibrer les *speckles* et extraire le signal astrophysique :

- **imagerie différentielle de référence** (*Reference Differential Imaging* ou RDI en anglais) : on observe des étoiles similaires dans des conditions instrumentales similaires, en supposant que les *speckles* soient suffisamment stables dans le temps. Utilisée dès les années 90, cette méthode se révèle particulièrement efficace avec les coronographes d’Hubble, où la stabilité de l’image coronographique est très importante (SCHNEIDER et al., 1998). Depuis le sol, cette technique est malheureusement beaucoup plus difficile, car l’image coronographique est beaucoup moins stable que pour Hubble. Pour réussir à obtenir une image plus proche de celle de l’étoile cible, il est souvent nécessaire d’observer une séquence directement après, sur une étoile proche. On peut citer les premiers essais prometteurs à Palomar (WAHL et al., 2014) ou au Keck (RUANE et al., 2019). Enfin, récemment, cette technique a été définie comme un mode de l’instrument VLT/SPHERE (star-hopping, WAHHAJ et al., 2021) qui effectue aller-retours rapides entre l’étoile et la référence. Enfin, en combinant des bibliothèques entières de certains instruments contenant plusieurs centaines de séquences différentes (donc plusieurs milliers d’images coronographiques) dans une même bande, il est possible, même depuis le sol, de re-construire la meilleure image coronographique de référence (XIE et al., 2022). Cette technique sera discutée en particulier en section 1.3.1.
- **imagerie différentielle angulaire** (*Angular Differential Imaging* ou ADI en anglais, MAROIS et al., 2006) : on suppose que la plupart des aberrations optiques restent statiques pendant les observations. En gardant l’orientation de la pupille fixe, les *speckles* restent stables dans les images alors que le champ de vision tourne autour de l’étoile centrale lors de la rotation de la Terre.
- **imagerie différentielle en polarisation** (*Polarization Differential Imaging* ou PDI en anglais, KUHN et al., 2001 ; BABA & MURAKAMI, 2003) on considère que contrairement à la lumière de l’étoile, la lumière de l’exoplanète est partiellement polarisée. La fraction

de lumière qui est polarisée pour une planète est si faible qu'il est actuellement impossible d'utiliser cette méthode pour les exoplanètes, mais elle est actuellement la méthode la plus utilisée pour la détection des disques circumstellaires.

- **imagerie différentielle spectrale** (*Spectral Differential Imaging* ou SDI en anglais, RACINE et al., 1999) : le SDI suppose que les *speckles* sont induits par des différences de chemin optique achromatique, de sorte que le mouvement des *speckles* a différentes longueurs d'ondes est ainsi parfaitement connu (alors que les objets astrophysiques restent immobiles). Elle est utilisée pour tous les coronographes équipés d'un spectrographe à intégrale de champs (IFS) pour chercher des points sources, elle l'est beaucoup moins pour les objets étendus, car cette méthode ne fait pas bouger "suffisamment" les *speckles* par rapport aux disques.
- on peut aussi faire une hypothèse non seulement sur l'évolution différente spatiale des *speckles* avec la longueur d'onde, mais aussi sur leur évolution en photométrie en faisant des hypothèses sur la différence entre le spectre des *speckles* (qui suivent le spectre de l'étoile) et celui de l'objet à détecter. Cet aspect est au cœur des méthodes dites de ***molecular mapping*** (SPARKS & FORD, 2002 ; SNELLEN et al., 2015).
- imagerie différentielle de cohérence (*Coherence Differential Imaging* ou CDI en anglais). Comme la PDI, cette méthode repose sur une différence fondamentale entre la lumière stellaire et la lumière planétaire, la cohérence. La lumière stellaire est ainsi cohérente avec elle-même et il est donc possible de créer une différence avec la lumière planétaire qui ne l'est pas (NISHIKAWA, 2022 ; JOVANOVIĆ et al., 2018). Cette technique sera discutée en particulier en section 1.3.1.

La figure 1.9) montre les données GPI du disque de débris HD 4796. À gauche, l'image coronographique brute est dominée par le halo de l'optique adaptative et les *speckles* quasi-statiques. Ensuite, de gauche à droite, les images post-traitées en utilisant RDI, ADI et PDI où le disque de poussière est clairement détecté. Nous remarquons que les images montrent différentes formes et structures du disque. Chaque technique sonde une partie du signal (par exemple, PDI sonde uniquement la lumière polarisée) mais introduit aussi des biais. Nous discuterons en détail de ces biais et de la manière de les corriger dans la section 1.2.2.2.

1.2 Une recherche à l'intersection de l'instrumentation et de l'observation haut-contraste

Ma thèse se situait déjà à l'intersection d'un travail expérimental, sur le banc Très haute dynamique (THD) du LESIA avec 2 publications expérimentales (MAZOYER et al., 2013, 2014a) et d'une analyse des données astrophysique d'archive Gemini/NICI sur le disque HD 15115 (MAZOYER et al., 2014b). Ce travail, décrit dans ma thèse (MAZOYER, 2014), ne sera pas discuté dans ce manuscrit.

Durant la décennie suivante, j'ai tenté de conserver cet équilibre entre recherche instrumentale et observationnelle. Ces aspects de mon travail sont complémentaires. À mesure que la complexité des techniques coronographiques augmente, il devient nécessaire pour un observateur de comprendre précisément les limitations de son instrument. À l'inverse, une expérience astrophysique est selon moi indispensable pour déterminer les priorités des projets futurs et orienter la recherche instrumentale.

1.2.1 Instrumentation pour le haut-contraste pour le sol et le spatial

Les coronographes actuels sont des systèmes fixes, optimisés en simulation pour obtenir les meilleures performances pour un système donné. Ils ne prennent donc pas en compte la réalité des instruments : vibrations, imperfections, désalignements et déformations des optiques, évolution de la pupille du télescope. Ma recherche instrumentale se focalise sur la correction **active** pour le haut-contraste, élément clé de la prochaine génération d'instruments, pour optimiser en temps réel un coronographe donné à la réalité de l'instrument pour lequel il est développé. J'ai abordé plusieurs aspects complémentaires de ce problème. En simulation, j'ai développé une méthode de correction avec deux miroirs déformables, obtenu des résultats sur plusieurs bancs haut-contraste et récemment participé à la première validation d'un *Dark-Hole* sur ciel sur l'instrument SPHERE.

1.2.1.1 Correction active de pupilles complexes avec 2 miroirs déformables

Mon travail de thèse s'est effectué avec une pupille pleine, sans obstruction centrale ni segments. Cependant, les ouvertures des futurs grands télescopes seront de plus en plus complexes (grands miroirs secondaires, segmentation du miroir primaire). Les effets de diffraction de ces pupilles limiteront les capacités des futurs projets coronographiques au sol (ELTs) ou dans l'espace (Roman, *Habitable Worlds Observatory*).

La correction de ces effets est possible en utilisant 2 miroirs déformables dans différents plans optiques (PUEYO & NORMAN, 2013), dans un montage similaire à celui montré en Figure 1.8. Durant mon premier post-doc, j'ai proposé une nouvelle méthode (*active correction for aperture discontinuities - optimized stroke minimization / ACAD-OSM*) pour optimiser les formes des miroirs déformables pour tout coronographe et toute ouverture de télescope (pleine, obstruée ou segmentée). Cette méthode (MAZOYER et al., 2018a) a amélioré le niveau de contraste d'un facteur de 10^5 dans des cas complexes (par exemple sur de larges bandes spectrales) par rapport à la technique existant précédemment (PUEYO & NORMAN, 2013). ACAD-OSM peut maintenant obtenir, en simulation, le seuil de contraste de détection des Exo-Terres en lumière réfléchiée pour toute ouverture complexe. Pour limiter l'impact sur l'image de l'objet hors axe (planète ou disque), il faut effectuer cette correction tout en minimisant la déformation de la surface d'onde introduite. En réduisant la course des actionneurs des miroirs déformables, cette technique minimise ces déformations et augmente ainsi le rapport signal à bruit de la détection. J'ai aussi montré que ce type de technique active pouvait aussi être adaptée aux instruments au sol, même pour des pupilles changeant régulièrement comme les ELTs où plusieurs segments différents seront démontés pour être entretenus chaque jour. La figure 1.10 montre ainsi la technique ACAD-OSM pour la pupille de l'ELT, à gauche dans le cas où tous les segments fonctionnent et à droite avec 3 segments manquants. Les objectifs en contraste depuis le sol sont différents et les résultats en contraste seront sans doute limités par les performances ultimes de l'optique adaptative depuis le sol (quelques 10^{-8} au mieux sur des télescopes de tailles raisonnables GUYON, 2005). J'ai montré que ce genre de techniques actives réduiraient les erreurs des pupilles, mêmes changeantes, à des niveaux bien inférieurs aux limites attendues de l'optique adaptative.

Il faut noter qu'ACAD-OSM est particulièrement lente à converger et après presque une décennie de travail, les ingénieurs du JPL ont sans aucun doute développé des méthodes plus efficaces pour trouver les meilleures formes de surface de miroirs déformables pour obtenir un haut contraste avec l'ouverture de Roman. Cependant, cet article est particulièrement impor-

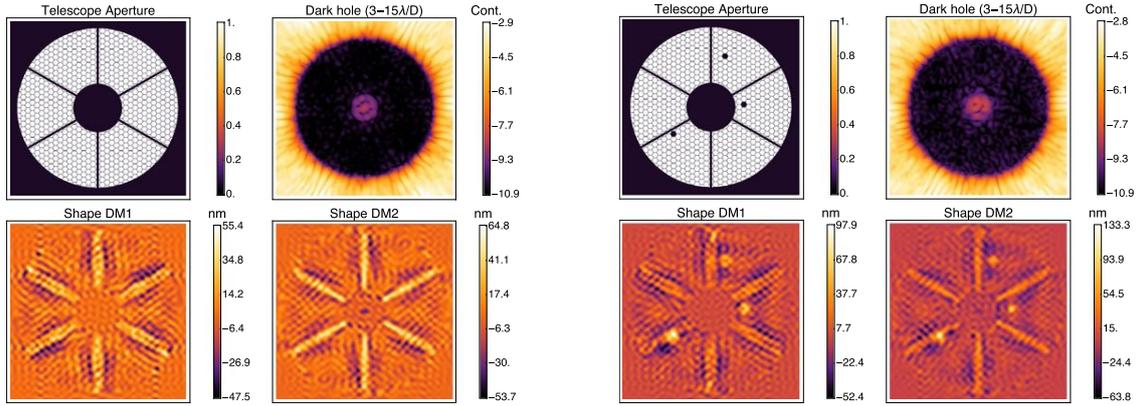


FIGURE 1.10 – Correction avec ACAD-OSM de la pupille de l’ELT. Chaque figure montre en haut à gauche la pupille complexe que l’on cherche à corriger, en bas les surfaces de miroirs déformables obtenues avec ACAD-OSM, et en haut à droite le Dark-Hole obtenu. **À gauche**, la pupille sans segments manquants / inopérables. **À droite**, la pupille avec trois segments manquants / inopérables. Figure adaptée de MAZOYER et al. (2018a).

tant, car il prouve que pour toute ouverture, il est sans doute possible de trouver une solution active (avec des optiques actives) ce qui est souvent préférable à une solution fixe (un apodiseur) qui ne peut être modifié après la construction de l’instrument en cas de modification de la pupille.

1.2.1.2 Instruments coronographiques : de la pratique à la théorie

En parallèle du développement d’ACAD-OSM, j’ai été amené à développer des outils spécifiques théoriques pour comprendre les limitations que j’observais dans mes simulations. Dans MAZOYER et al. (2016b), j’ai étudié les différentes approximations possibles pour simuler la propagation d’une aberration. Ainsi, la simulation de systèmes à 2 miroirs déformables demande de pouvoir simuler rapidement le champ électrique créé par une phase introduite par un miroir déformable en dehors du plan pupille. Plusieurs approximations de l’intégrale de Kirchoff — Fresnel (appelée ainsi dans BORN et al. (1999)) ont été proposées pour ce problème, dont *Stretched-Remapped-Fresnel* (SR-Fresnel, PUEYO et al., 2011 ; PUEYO & NORMAN, 2013) et l’approximation de Fresnel. Ces approximations utilisent le fait que les miroirs déformables sont petits devant la distance les séparant et certaines ont été introduites pour simuler les coronographes de type PIAA (phase-induced amplitude apodization coronagraph GUYON et al., 2005), où d’importants retards de phase sont introduits par deux miroirs fixes pour créer une apodisation sans perte de flux. J’ai montré que la propagation de Fresnel était la meilleure approximation pour le niveau de phases introduites sur les miroirs déformables dans les instruments coronographiques, mais que ce n’était pas le cas pour les coronographes PIAA.

Enfin, dans MAZOYER & PUEYO (2017) & MAZOYER et al. (2018b), nous avons analysé théoriquement et en simulation numérique les limitations attendues d’un système à deux miroirs déformables, tel que présenté dans la figure 1.8, avec l’un des deux miroirs déformables, situé en dehors du plan pupille pour corriger les aberrations d’amplitude. En particulier, j’ai pu émettre des limites théoriques sur le contraste maximum obtenu par un système à deux miroirs déformables, en fonction de la largeur de la bande spectrale et surtout du nombre de Fresnel

du système :

$$F = \frac{a^2}{\lambda L}$$

où a correspond à la taille de la pupille (et des miroirs déformables), L la distance de propagation entre le miroir déformable hors plan pupille et le plan pupille et λ la longueur d'onde. Ces articles de théorie de l'instrumentation optique m'ont permis d'émettre des recommandations générales pour tous les systèmes utilisant deux miroirs déformables, qui seront utilisées sur la plupart des futurs instruments de haut-contraste. De la même façon, nous avons aussi pu calculer les contrastes limites accessibles en fonction du niveau d'aberrations présents sur les paraboles hors axes de l'instrument situées en amont de l'instrument. On peut ainsi prédire que des aberrations, même faibles, introduites par certaines optiques (celles qui sont situées hors du plan pupille, mais à des distances différentes de celle du miroir hors pupille) peuvent limiter les performances d'un tel système inexorablement. Ces études permettent de mettre des contraintes sur la qualité de surface, mais aussi la position dans le faisceau des optiques de l'instrument. En particulier, j'ai pu émettre plusieurs recommandations spécifiquement sur l'instrument coronographique de Roman, CGI (appelé WFIRST à l'époque). J'étais aussi contributeur scientifique pour les deux avant-projets LUVOIR (PUEYO et al., 2017; LUVOIR TEAM, 2019) et HabEx (GAUDI et al., 2020).

1.2.1.3 Codes de simulation coronographique : Asterix et COMPASS

Asterix est une bibliothèque python pour simuler des instruments et des bancs d'essai haut contraste, avec un accent particulier sur les algorithmes de détection et de correction du front d'onde dans le plan focal. *Asterix* est publiquement disponible sur GitHub¹. Je dirige et maintiens le développement avec des contributions majeures d'Axel Potier, Iva Laginja, et Raphaël Galicher du LESIA.

La simulation numérique de coronographes est un domaine critique pour développer de nouveaux coronographes ou méthodes de correction. En effet, les performances que l'on recherche sont tellement élevées (obtenir des performances de quelques 10^{-10} suppose de contrôler la différence de marche à un niveau équivalent au picomètre), qu'il est nécessaire de faire un effort spécifique pour ne pas être limité par des erreurs numériques des codes. Pour réaliser des simulations réalistes dans des temps corrects, de nombreuses "astuces de simulation" ont été développés depuis 2 décennies, souvent spécifiques à un type de coronographes, et qui sont malheureusement souvent redéveloppés par des générations de jeunes chercheurs durant leur thèse. Pour ma part, j'ai développé un code de simulation de coronographe en thèse en IDL, suivi d'un nouveau en Mathematica durant mon post-doctorat au STScI, pour finir par utiliser l'outil du JPL, en Matlab, durant mon dernier post-doctorat. L'objectif d'*Asterix* est de créer un code intégrant cette expérience, accessible et ouvert, permettant de simuler la majorité des instruments coronographiques grâce à un code permettant de "concaténer" des éléments optiques différents. Une fois l'instrument simulé, il est immédiatement possible de lui appliquer tous les algorithmes de correction et d'estimation précédemment codés. L'utilisation d'un code orienté objet autorise une modularité permettant, dès que l'on a développé une nouvelle méthode de correction par exemple, de l'appliquer rapidement à différents coronographes ou type de miroirs. Une grande attention a été portée pour accélérer la simulation de la propagation optique

1. <https://asterix-hci.readthedocs.io/en/latest/>

pour les matrices de contrôle du banc THD ainsi que pour notre validation de *Dark-Hole* sur SPHERE (voir section 1.2.1.5).

Il est à noter que le développement du code **Asterix** a été effectué en parallèle du code **HCIpy** (High Contrast Imaging for Python POR et al., 2018) à Leiden puis au StsCI avec à peu près les mêmes objectifs (permettre à des non-spécialistes de simuler des instruments coronographiques rapidement, grâce à un code orienté objet en python). Si j'ai pu tester que les performances en vitesses sont un peu moins bonnes que celle d'**Asterix** (en tout cas pour les applications sur lesquelles je travaillais), la très large adoption d'**HCIpy** par la communauté est en passe d'en faire un standard, permettant de simuler rapidement de nouveaux instruments à partir d'une large bibliothèque de composants disponibles. De ce fait, de très nombreux composants sont développés dans **HCIpy** par différentes équipes et il est possible que dans un futur proche, la partie "simulation d'instruments coronographiques" d'**Asterix** soit remplacée par simulateur utilisant **HCIpy** pour ne garder qu'une partie "algorithmes d'estimation et de correction".

Mon expertise dans la simulation de code m'a finalement permis d'encadrer le doctorant Charles Goulas dans la simulation du mode coronographique de **COMPASS** (FERREIRA et al., 2018), un outil de simulation d'optique adaptative sur GPU développé au LESIA. En effet, à cause de la rapidité de variations des aberrations dans les instruments coronographiques au sol (les boucles d'optique adaptative évoluent à des fréquences de quelques kHz), il est difficile de simuler à travers l'instrument coronographique chacune des 10^4 images individuelles nécessaires pour simuler une image coronographique longue pose (typiquement de quelques dizaines de secondes), sur une relativement large bande spectrale (typiquement de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres).

Alors qu'aucun outil existant de simulation coronographique n'était développé en CUDA², la plupart des outils existants de simulation de coronographes au sol utilisent des modèles analytiques (voir par exemple JOLISSAINT et al., 2006) pour simuler rapidement des phases reproduisant des résidus d'optique adaptative qui sont ensuite sommés de manière incohérente pour réaliser de "pseudo longues poses" (voir par exemple CANTALLOUBE et al., 2019, reproduisant les aberrations connues de SPHERE). Cependant, cette approche qui sépare la simulation de l'optique adaptative de la simulation coronographique ne permet pas de simuler de manière correcte les effets d'une boucle de correction des *non-common path aberrations* en plan focal sur la stabilité de la boucle d'optique adaptative, au cœur de notre travail sur les *Dark-Holes* de SPHERE (voir section 1.2.1.5) et de la thèse de Charles Goulas sur SPHERE+. En collaboration avec l'ingénieur au cœur de **COMPASS**, Florian Ferreira, et à partir de l'un de mes codes python particulièrement optimisé pour la vitesse, nous avons développé un mode coronographique à **COMPASS**³ qui, pour la première fois, permet de simuler des images d'instruments coronographiques au sol par GPU. Ce mode est actuellement au cœur du développement de l'instrument SPHERE+ et permet de mesurer l'effet des paramètres de la boucle d'optique adaptative (vitesse, nombre de modes, etc) directement sur le contraste final (GOULAS et al., 2023).

2. CUDA (*Compute Unified Device Architecture*) est une technologie développée par NVIDIA qui permet l'utilisation d'un ou plusieurs processeurs graphiques (GPU) pour exécuter des calculs généraux habituellement exécutés par le processeur central (CPU). Ce n'est pas un langage de programmation, mais une architecture qui supporte plusieurs langages : le C, le C++ et le Fortran.

3. <https://compass.pages.obspm.fr/website/tutorials/2023-07-19-coronagraph/>

1.2.1.4 Du THD au THD2, en passant par HiCAT (STScI) et le DST (JPL), un tour du monde des bancs haut-contraste

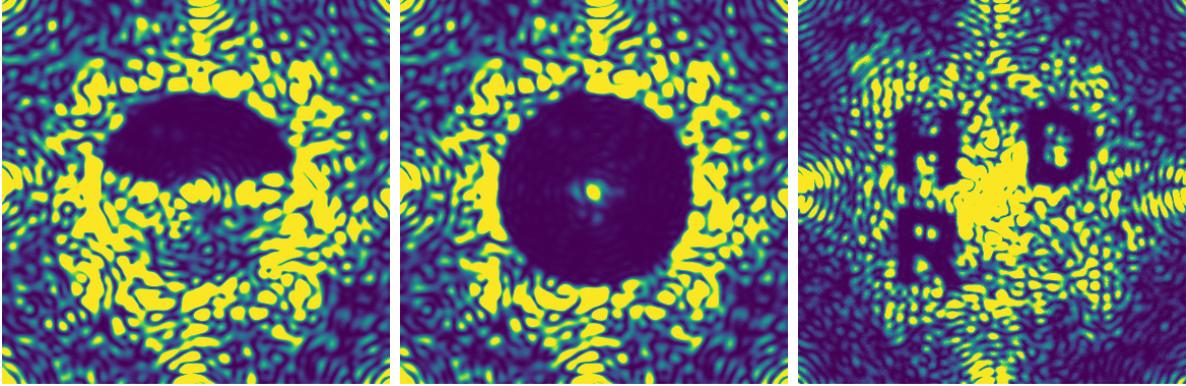


FIGURE 1.11 – Trois Dark-Holes obtenus expérimentalement sur le banc THD2, avec un coronographe de type 4 quadrant. **Gauche** : demi Dark-Hole obtenu en utilisant un seul miroir déformable ; **Centre** : un Dark-Hole symétrique obtenu avec 2 miroirs déformables ; **Droite** : un Dark-Hole un peu spécial, pour montrer notre capacité à contrôler le champ électrique dans le plan focal.

Durant ma thèse, après un développement théorique et en simulation numérique, j’ai testé sur le banc optique THD (Très Haute Dynamique) du LESIA un analyseur de front d’onde en plan focal. J’ai obtenu des performances expérimentales inédites en contraste, meilleures que 3.10^{-7} en bande spectrale étroite (MAZOYER et al., 2012). Pour repousser les limites du banc, j’ai mené une caractérisation approfondie de deux composants essentiels, le DM de 1000 actionneurs, en collaboration avec le LAM (MAZOYER et al., 2014c) et le détecteur sCMOS (analyse publiée uniquement dans ma thèse, MAZOYER, 2014), ce qui a exigé une étude optique, électronique et informatique. Cette analyse des composants critiques et mon amélioration de l’algorithme de mesure de front d’onde m’ont permis d’obtenir un gain sur les performances expérimentales d’un facteur 12 en contraste, en bande spectrale étroite, et d’identifier précisément les nouvelles limitations du banc grâce à des simulations numériques. Mais, pour utiliser cette méthode pour l’analyse spectrale, il faut aussi obtenir des niveaux de contraste comparables sur des bandes spectrales élargies, ce que j’ai commencé durant ma thèse (MAZOYER et al., 2014a) et qui a continué après mon départ (DELORME et al., 2014, 2016a).

J’ai participé au développement du banc optique du STScI, HiCAT (*High-Contrast Imager for Complex Aperture Telescopes*), durant mon premier post-doc, notamment avec la caractérisation des miroirs déformables, de même marque que ceux utilisés à Meudon. (N’DIAYE et al., 2015 ; LEBoulLEUX et al., 2016 ; SOUMMER et al., 2018)

Finalement, j’ai brièvement travaillé sur le banc DST (decadal survey testbed) du JPL. Ce banc utilise l’expérience obtenue sur les autres bancs du JPL (qui obtiennent régulièrement des contrastes records de $\sim 10^{-10}$ TRAUGER & TRAUB, 2007) et sur Roman/CGI (KRIST et al., 2018), avec les mêmes ingénieurs. Je n’ai passé que quelques mois au JPL avant mon recrutement au CNRS et n’ai pas eu temps d’obtenir des résultats importants, mais j’ai pu tirer une expérience utile en travaillant auprès de cette équipe travaillant avec des moyens incomparables (trois ingénieurs spécialisés à plein temps, banc dans une cuve à vide) et qui obtient de ce fait les meilleurs résultats dans notre domaine.

Durant la dernière décennie, j’ai donc travaillé sur trois bancs haut contraste en France (banc THD de Meudon) et aux États-Unis (au STScI et au JPL). Avec la fermeture du banc de Princeton en 2019, ces trois bancs sont les plus performants au monde et les seuls à utiliser 2 miroirs déformables pour simuler régulièrement des zones de haut contraste avec des meilleures performances que 10^{-8} . Cette expérience dans le développement de ce type d’installations m’a permis de rédiger une revue des bancs haut-contraste (MAZOYER et al., 2019), papier blanc à destination du panel du *Decadal Survey* américain de 2020, présentant les forces et expertises des bancs haut-contraste dans le monde.

Les performances d’un banc haut-contraste et, par extension, d’un instrument haut-contraste ne peuvent être réduites à la conception d’un coronographe performant. Pour ces systèmes complexes, une approche globale doit optimiser simultanément trois composantes principaux :

1. un environnement stable, minimisant les variations thermiques et les vibrations mécaniques (et les mouvements d’air dans le cas d’un instrument ne travaillant pas sous vide) ;
2. un coronographe robuste à haut contraste et avec un impact minimal sur la lumière hors-axe (planète, disque) ;
3. une méthode de correction active rapide et stable avec des miroirs déformables pour corriger les aberrations inconnues et/ou dynamiques.

Le travail effectué sur les bancs haut-contraste est indispensable pour faire progresser ces méthodes, étape cruciale entre leur développement théorique et leur sélection sur des instruments haut-contraste (au sol ou dans l’espace). Depuis mon retour à Meudon, une part importante de mon travail est consacré au développement du banc THD2 de Meudon, dont quelques résultats sont montrés dans la Figure 1.11. Ce travail de Recherche et Développement instrumental important repose actuellement sur trois chercheurs permanents : Pierre Baudoz (PI du banc THD) et Raphaël Galicher et moi-même (co-Is). J’encadre dans ce contexte la post-doctorante Iva Laginja, qui adapte actuellement les algorithmes haut-contraste en large bande spectrale que j’ai développé durant mon propre post-doctorat (MAZOYER et al., 2018a) pour le THD, et Yann Gutierrez, doctorant en première année, qui après une partie théorique et numérique, développera ses algorithmes d’apprentissage par renforcement sur le banc THD2 (voir section 1.3.2).

1.2.1.5 *Dark-hole* sur SPHERE

Le concept de *Dark-Hole* est introduit pour la première fois par MALBET et al. (1995). Il faut attendre une dizaine d’années pour obtenir des *Dark-Holes* expérimentaux, d’abord avec un unique miroir déformable, en demi *Dark-Hole* (TRAUGER & TRAUB, 2007), puis un *Dark-Hole* symétrique avec deux miroirs déformables (KAY et al., 2009). Cependant, la démonstration sur ciel tardait pour plusieurs raisons. Dans l’espace, la première mission embarquant des coronographes et des miroirs déformables sera Roman, pour un départ début 2028. Au sol, il faut noter quelques tentatives prometteuses pour minimiser les *non-common path aberrations* à Subaru (MARTINACHE et al., 2014), Keck (BOTTOM et al., 2016) ou Palomar (GALICHER et al., 2019). Cependant, si le facteur limitant est l’optique adaptative elle-même, l’image dans le plan focal scientifique est dominée par des speckles dynamiques, très rapide devant le temps de pose de science, et qui cachent les speckles créés par les *non-common path aberrations*, qui sont la cible de nos algorithmes. Ainsi, les premiers essais de simulation expérimentale, réalisés sur le banc THD2 par SINGH et al. (2019), montrent qu’il est critique d’utiliser de long temps de pose pour obtenir un *Dark-Hole* sur ciel, car il faut attendre que les *speckles* trop rapides soient moyennées et réussir à identifier précisément les *speckles* quasi-statiques. Après de longs tests

expérimentaux sur le THD2 (POTIER et al., 2020a) et en source interne sur SPHERE (POTIER et al., 2020b), notre groupe a récemment obtenu le premier *Dark-Hole* sur un instrument réel (POTIER et al., 2022b). Ce résultat majeur, auquel j'ai contribué de manière importante à mon retour en France, a été initié par Raphaël Galicher et Pierre Baudoz et mené principalement par Axel Potier, actuellement post-doctorant à Bern. Ce résultat démontre aussi les performances exceptionnelles de l'optique adaptative de SPHERE, SAXO (FUSCO et al., 2014), qui permet, avec de bonnes conditions d'observation, d'atteindre le "plancher" des erreurs de *non-common path aberrations*.

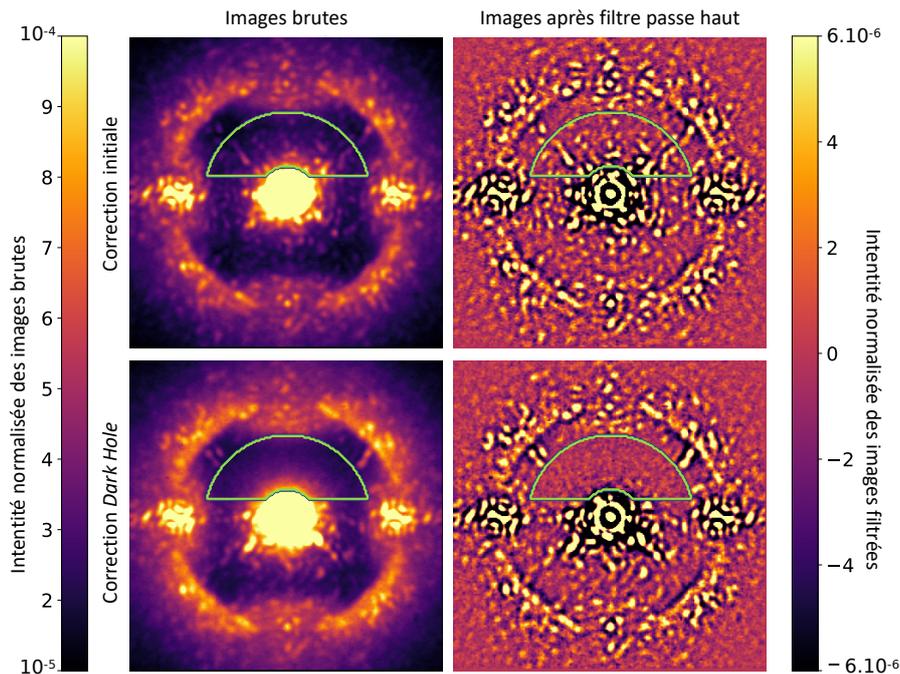


FIGURE 1.12 – Images coronographiques SPHERE/IRDIS après correction de l'optique adaptative et, avant (en haut) et après (en bas) la minimisation des speckles à l'intérieur du Dark-Hole (ligne verte), en utilisant la technique de Pair-Wise Probing pour l'estimation et l'Electric Field conjugation pour la correction (POTIER et al., 2020b). À gauche : images brutes. La partie centrale saturée est un halo lisse produit par les résidus d'optique adaptative. Des "speckles" quasi-statiques sont également visibles. À droite : Après un filtrage passe-haut pour montrer uniquement l'effet de la correction sur les speckles quasi-statiques. La barre de couleur représente l'intensité normalisée. Adaptée de POTIER et al. (2022a).

La Figure 1.12 qui montre ce résultat sur SPHERE montre bien les différentes échelles de temps des aberrations de SPHERE. Dans la colonne de gauche, on voit que l'image est limitée par un halo continu. Ce halo est le résultat de *speckles* dynamiques et éphémères (plus rapides que la boucle d'optique adaptative tournant à 1 kHz pour SPHERE) qui se moyennent donc dans le plan focal durant la pose. La correction de ce halo n'est pas l'objectif de la technique décrite ici et il ne peut être corrigé qu'en améliorant la boucle d'optique adaptative (voir section 1.3.3). En plus de ce halo central, on aperçoit dans la vignette en haut à gauche des points localisés, qui sont les speckles créés par les erreurs de phase introduite après l'analyseur de front d'onde ou par des erreurs d'amplitude. Leur aspect bien localisé prouve qu'ils sont stables durant la prise de l'image (pose de plusieurs dizaines de secondes). En haut à droite, un filtrage passe haut a été appliqué pour corriger le halo continu et montrer uniquement l'effet de

la correction sur les *speckles* quasi-statiques. En bas, nous montrons l'effet de la correction de *Dark-Hole* dans la partie supérieure du plan focal, les *speckles* ont disparu. Nous montrons que nous avons abaissé le niveau de ces *speckles* quasi-statique d'un facteur 4 dans le *Dark-Hole*.

L'objectif de la correction présentée ici est de trouver une phase spécifique qui minimise l'intensité des *speckles* stellaires à l'intérieur d'une zone donnée, le *Dark-Hole*. Il est important de noter que cet objectif est différent de celui des systèmes d'optique adaptative classiques, qui minimisent la phase totale dans le plan de la pupille : la correction pour la création de *Dark-Hole* n'est pas équivalente à la minimisation de la phase. Même dans le cas d'un *Dark-Hole* qui corrige uniquement la phase avec un miroir avec un nombre limité d'actionneurs, les *non-common path aberrations* (erreurs de phase invisibles pour l'analyseur de la boucle d'optique adaptative) ne peuvent être corrigés que sur un nombre limité de fréquences spatiales et la boucle de correction va souvent converger vers une surface du miroir déformable qui augmente en pratique la phase totale (en particulier aux hautes fréquences spatiales) pour obtenir un meilleur résultat dans le *Dark-Hole* (MAZOYER et al., 2013). Dans le cas d'un demi *Dark-Hole*, qui corrige simultanément les erreurs de phase et d'amplitude, la phase introduite augmente là aussi la phase totale dans le système. Cependant, dans le cas de SPHERE, cette boucle de correction s'effectue sur le même miroir déformable que la boucle d'optique adaptative, en parallèle. Comme le montre la Figure 1.7 l'introduction d'une phase pour créer un *Dark-Hole* directement sur le miroir déformable d'une correction sera immédiatement mesurée par le Shack-Hartmann et corrigée (car l'objectif de cet analyseur est de minimiser le déphasage). Pour obtenir une correction de type *Dark-Hole* dans ce cas, il est donc nécessaire de "piéger" l'analyseur en changeant sa mesure de phase référence (on parle de pente de référence) de manière que la minimisation de la phase converge vers la phase qui sera celle permettant de créer le *Dark-Hole*. Pour appliquer cette pente de référence, on applique une matrice pré-calibrée reliant mesure de l'analyseur et phase mesurée. À moins de disposer d'un miroir déformable uniquement dédié à la création de *Dark-Hole*, cette technique est donc intimement liée au type d'analyseur utilisé par les boucles d'optique adaptative.

1.2.2 Imagerie des disques de débris : algorithmes de réduction et propriétés de diffusion

J'ai commencé à m'intéresser aux disques de débris durant ma thèse. Après une première publication sur le disque orbitant l'étoile HD 15115 durant ma dernière année de thèse où j'ai utilisé les données de l'archive de l'instrument NICI, dé-commissionné en 2012, j'ai continué cette analyse durant mon premier post-doctorat avec l'analyse d'un autre disque de débris HD 141569A. Enfin, j'ai effectué mon second post-doctorat dans ce domaine en travaillant au sein d'un large programme sur l'instrument GPI, actif à Gemini Sud de 2014 à 2019.

1.2.2.1 HD 141569A : une analyse multi-instrumentale sol et spatial.

Dans la seconde partie de ma thèse, j'ai appliqué plusieurs traitements d'images, à l'époque récemment développés, à des images d'archives prises par l'instrument coronographique dé-commissionné Gemini/NICI. J'ai ainsi sélectionné et traité les données de 9 étoiles sur des bandes et époques différentes (29 séquences au total de 2008 à 2011). Elles ont révélé des images d'une résolution angulaire inédite de deux disques, HD 15115 (MAZOYER et al., 2014b) et HD 141569, que j'ai analysées en collaboration avec le groupe disques de l'IPAG.

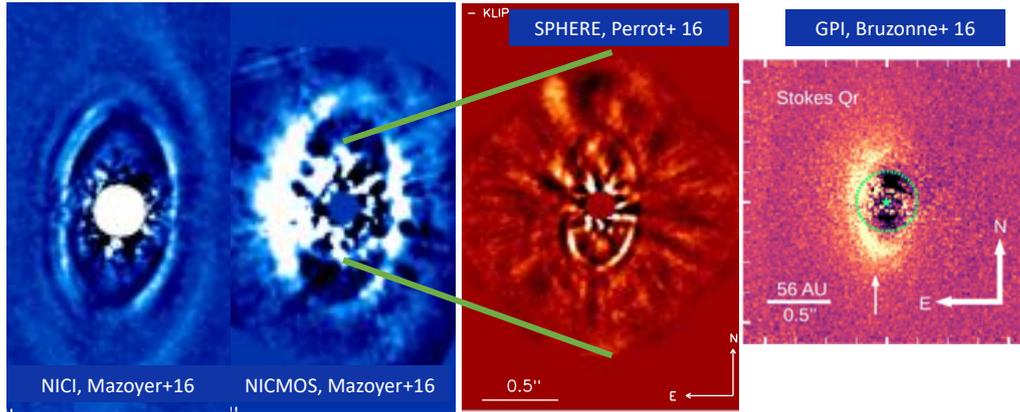


FIGURE 1.13 – De Gauche à droite : le(s) disque(s) de débris orbitant HD 141569, observé par NICI, NICMOS (MAZOYER et al., 2016a), puis la partie interne imagée en intensité totale (PERROT et al., 2016) et en lumière polarisée (BRUZZONE et al., 2020).

HD 141569 est un disque particulier : il inclut à la fois des structures complexes caractéristiques des disques de débris évolués, mais contient aussi du gaz primordial. Il est, selon les mots de HUGHES et al. (2018), "le meilleur candidat pour un véritable intermédiaire entre le protoplanétaire et le disque de débris". Mon analyse (MAZOYER et al., 2016a) a permis de contraindre ses paramètres orbitaux et d'identifier de nouvelles structures. Dans ce papier multi-instrumental, j'ai aussi utilisé les données d'archives HST/NICMOS pour confirmer ces paramètres. Nous avons ré-observé ces deux disques avec SPHERE, confirmant mes résultats et découvrant de nouvelles structures (PERROT et al., 2016 ; SINGH et al., 2021). En tant que membre du consortium GPI, à l'époque, j'ai participé à l'analyse des données de HD 141569 avec cet instrument (BRUZZONE et al., 2020). La complexité de ce disque se vérifie à l'échelle de la milliarcsecond, avec GRAVITY COLLABORATION et al. (2021) détectant de nouvelles structures de poussière et de gaz près de l'étoile (Figure 1.14), confirmant l'appellation de disque "Matryoshka" par CURRIE et al. (2016).

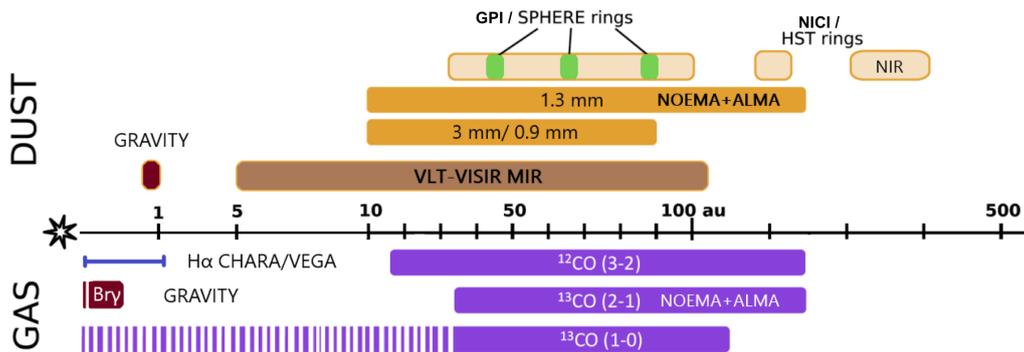


FIGURE 1.14 – La structure du disque HD 141569, adaptée de GRAVITY COLLABORATION et al. (2021). Références des différentes détections dans la publication d'origine.

Enfin, HD 141569 a été le premier disque observé avec JWST/MIRI comme cible de l'*Early Release Science Program* consacré à l'imagerie directe (PI : Sasha Hinkley, HINKLEY et al., 2023), dont je suis collaborateur. Les premiers résultats de ce programme ont été publiés sur les planètes HIP 65426 b (CARTER et al., 2023) et VHS 1256-1257 b (MILES et al., 2023) mais

l'analyse du disque HD 141569 a été compliquée par le fait que la luminosité du disque interne (déjà détectée et analysée par PERROT et al., 2016; SINGH et al., 2021)), très importante en infrarouge moyen, limite les performances du coronographe de phase Quatre-Quadrants. C'est un problème similaire à celui rencontré par les chercheurs essayant de concevoir des coronographes utilisés pour un grand télescope comme HWO où les étoiles ne pourront plus être considérées comme ponctuelles, mais comme des disques de l'ordre de 1 milliarcseconde en diamètre, limitant les performances des coronographes (SHAKLAN et al., 2019), en particulier ceux de phase, optimisés pour les très petites séparations (je me suis brièvement penché sur ce problème en particulier lors de ma collaboration avec K. Fogarty FOGARTY et al., 2017b). Ce problème inattendu n'est pas spécifique à HD 141569A et se retrouve aussi dans une moindre mesure pour d'autres observations MIRI, comme par exemple le système HR 8799 (données non publiées, A. Boccaletti, discussion privée). De manière similaire, il serait intéressant d'étudier l'impact des exo-zodii sur les coronographes de Roman. Durant mes tout derniers mois de post-doctorat au JPL, j'ai commencé à m'intéresser à ce problème en interagissant avec la collaboration HOSTS dont le but était justement de contraindre la présence d'exo-zodii autour des étoiles proches, avec l'instrument LBTI (ERTEL et al., 2020).

1.2.2.2 DiskFM : mesure de paramètres des disques de débris

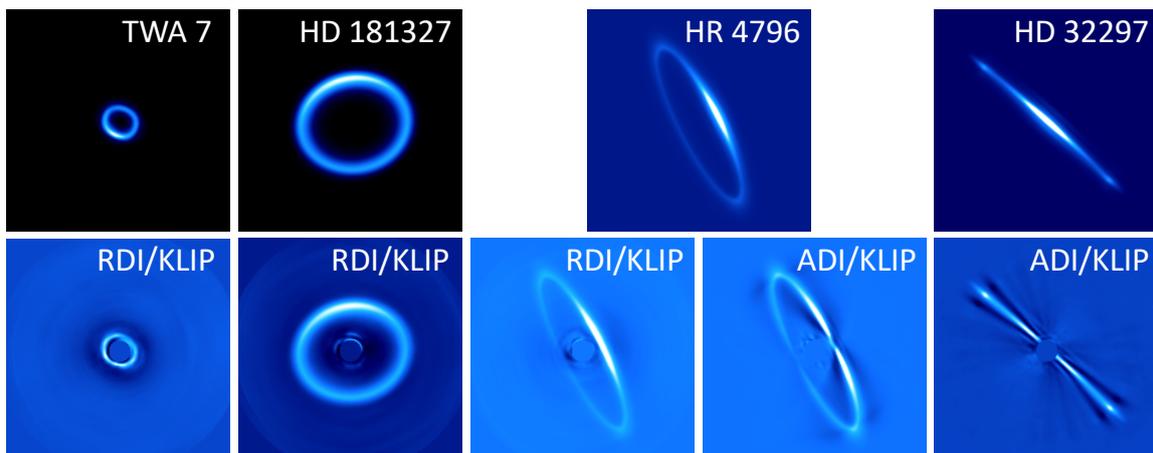


FIGURE 1.15 – Impact des méthodes d'observations PCA/ADI et PCA/RDI sur des disques de débris simulée grâce à *DiskFM*, tiré de (MAZOYER et al., 2020). **En haut** : disque original (après convolution par le télescope). **En bas** : Modèles avancés *DiskFM* en modes RDI et ADI. **Gauche** : PCA/RDI, seul l'effet de la sur-soustraction a un impact sur le disque. Ceci est particulièrement critique pour les disques dont certaines parties se trouvent dans des zones à fort bruit de speckles (TWA 7 et petites régions de séparation de HR 4796 A). **À droite** : PCA/ADI, les effets de sur-soustraction et d'auto-soustraction ont un impact sur le disque. L'effet est présent à toutes les séparations et pour toutes les géométries. Dans le cas des disques face à face (TWA 7 ou HD 181327), l'auto-soustraction due à PCA/ADI (non montrée ici) empêcherait souvent la détection.

Le développement des techniques d'imagerie en post-traitement présentées dans la section 1.1.5 a sans conteste permis la détection d'exoplanètes ou de disques faibles. Malheureusement, elles ont aussi un fort impact sur l'image des objets détectés, et les effets de soustraction abusifs rendent leur caractérisation précise difficile. On peut séparer cette soustraction en 2 parties, la

sur-soustraction où l'objet astrophysique est confondu avec un *speckle* et est en partie soustrait lors du traitement et l'auto-soustraction qui intervient lorsque l'objet astrophysique est à la fois dans l'image cible, mais aussi en partie dans la bibliothèque d'images que l'on utilise pour soustraire, comme c'est le cas pour les méthodes ADI et SDI. Pour les disques, le problème est rendu plus compliqué par le fait que l'objet astrophysique est étendu dans le plan focal et avec des méthodes comme ADI, le disque s'auto-soustrait très efficacement de l'image finale (MILLI et al., 2012). La figure 1.15 montre ces effets pour certains disques emblématiques.

Des techniques, dites de *forward-modelling* (FM), ont été développées pour les planètes (PUEYO, 2016), appliquant à un modèle donné une fonction linéaire reproduisant les effets des traitements d'images appliqués aux données astrophysiques. Pour les planètes, il s'agit de simuler les effets sur la photométrie et l'astrométrie planétaire. Ces techniques ont permis à RUFFIO et al. (2017) de faire la ré-analyse de l'archive GPI pour la recherche de compagnons grâce à des techniques de *Matched filter* : la recherche d'un motif spécifique (ici la fonction d'étalement du point après simulation des effets de soustraction créés par les algorithmes en post-traitement) par corrélation croisée. Ces méthodes de *Matched filter* ont d'ailleurs particulièrement bien fonctionné lors du "Exoplanet Imaging Data Challenge" (CANTALLOUBE et al., 2020) dont l'objectif était de comparer les méthodes de traitement existantes.

Pour les objets étendus, le problème est rendu plus compliqué par le fait que l'objet astrophysique ne peut être réduit à un simple point source convolué par la fonction d'étalement du point. Dans ce cas, la photométrie, mais aussi la morphologie, sont modifiées par les traitements d'images, de manière non linéaires, et des centaines de milliers de modèles doivent être explorés pour parvenir aux bons paramètres. Mon apport principal à ce domaine est l'adaptation de ces méthodes de *Forward-Modelling* pour les disques réduit avec des techniques de réduction en composantes principales de SOUMMER et al. (2012). Pour ces algorithmes, elles sont primordiales pour extraire des informations fiables sur ces objets, au-delà de la simple détection. Déjà utilisé dans mon papier disque sur HD 15115 (MAZOYER et al., 2014b) pour corriger le flux mesuré, ces techniques m'ont aussi permis de comparer les images NICI (instrument au sol, obtenues en mode ADI) et NICMOS (instrument spatial, obtenues en mode RDI) et identifier précisément les paramètres orbitaux du disque HD 141569 (MAZOYER et al., 2016a).

Pour l'équipe de GPI, et en collaboration avec la doctorante Pauline Arriaga, j'ai développé *DiskFM* (MAZOYER et al., 2020), un code intégré à la librairie *pyKLIP* (WANG et al., 2015)⁴. La Figure 1.16 en montre le principe à travers l'exemple du disque HR 4796 (CHEN et al., 2020) dans des données SPHERE en bande H2 de février 2015. L'image du disque après une analyse en composante principale du disque (PCA/RDI) est montrée dans la vignette au milieu en bas. Les effets de variations de la luminosité locales dues aux algorithmes de traitement apparaissent clairement (en particulier pincements aux anses). À partir d'un jeu de paramètres sur le disque (paramètres physiques de la géométrie du disque, angles d'observation et paramètres de diffusion) une simulation de disque (issue d'un code développé par MILLAR-BLANCHAER et al., 2015) est obtenue (en haut gauche). On convolue ensuite le disque par la fonction d'étalement du point (en bas à gauche) puis nous appliquons *DiskFM* qui permet de simuler les effets de traitements d'images. Cette image est ensuite comparée à l'image effectivement obtenue (en bas à droite), ce qui nous permet de mesurer des résidus. J'ai ensuite adopté une stratégie de type Markov Chain Monte Carlo (MCMC) pour générer des modèles de disques avec *DiskFM* pour minimiser ces résidus. À l'issue de ces MCMCs où plusieurs centaines de milliers de modèles sont générés (en utilisant les serveurs des instituts où je me trouvais à ce moment), nous

4. https://pyklip.readthedocs.io/en/latest/diskfm_gpi.html

obtenons les valeurs les plus probables pour paramètres orbitaux, mais aussi la photométrie locale (>10 paramètres) ainsi que des barres d'erreurs sur ces paramètres, nous permettant de faire l'analyse la plus complète de ces disques de débris à ce jour en lumière diffusée. Ce code a été principalement utilisé par l'équipe disque du consortium GPI (voir section suivante), mais il a aussi été utilisé par (BETTI et al., 2022) pour un disque protoplanétaire issu des données du Large Binocular Telescope (LBT / LMIRCam) en proche infrarouge (AB Aur) et je l'ai également utilisé pour des données SPHERE (comme montré dans la Figure 1.16).

Dans MAZOYER et al. (2020), j'ai cherché à savoir si mon algorithme était robuste pour différentes géométries de disques (disques de profil comme HD 32297 ou au contraire de face comme HD 181327, voir la figure 1.4) et différents algorithmes de réduction (ADI ou RDI, voir figure 1.9). J'ai pour cela utilisé une approche en "crime inverse", en injectant un modèle de disque "cible" dans des données réelles pour ensuite tenter de retrouver les paramètres que j'y avais injectés. Cette approche est plus optimiste que la réalité, car le disque "cible" ayant été obtenu grâce au même modèle que celui utilisé dans le MCMC pour le retrouver, il est par définition plus simple que dans un cas réel. D'autre part, il est souvent difficile de reproduire l'intégralité des effets instrumentaux et des simplifications sont donc faites (par exemple, on considère que la fonction d'étalement du point hors-axe reste la même tout au long de l'observation).

Enfin, il faut reconnaître que `DiskFM` n'existe que parce que les techniques les plus utilisées depuis une dizaine d'années pour la réduction de données coronagraphiques depuis le sol avait un impact important sur les objets étudiés, en particulier sur les disques. Depuis quelques années, plusieurs algorithmes ont été développés pour réduire cet impact au minimum, de manière à obtenir une image de l'objet au plus proche de la source originale (après convolution par la fonction d'étalement du point, inévitable lors de l'observation par un télescope de taille finie). En particulier pour les disques, on peut citer les techniques de *Non-negative matrix factorization* (NMF, REN et al., 2018), de *data imputation* (REN et al., 2020; REN, 2023), des méthodes itératives où l'objet astrophysique est progressivement retiré de l'image pour éviter une auto-soustraction (PAIRET et al., 2018; STAPPER & GINSKI, 2022). Enfin, les algorithmes MAYONNAISE (PAIRET et al., 2021) et REXPACO (FLASSEUR et al., 2021) utilisent la construction d'un modèle de la séquence d'observation, grâce à une analyse statistique permettant de séparer les speckles d'un objet astrophysique par leur évolution et leur mouvement durant la séquence. Toutes ces méthodes rendront en pratique `DiskFM` rapidement obsolète. Cependant, il est intéressant de noter que contrairement au cas planétaire, une image du disque de débris ne permet pas simplement de déduire les valeurs des paramètres physiques et l'approche en MCMC est conservée pour l'analyse des objets ainsi détectés.

1.2.2.3 Le programme disque de Gemini/GPI et la curieuse fonction de phase de diffusion du disque HR 4796

Comme nous l'avons vu dans la section 1.1.3, une grande partie de l'analyse des disques de débris est orientée vers la détection de structures qui pourraient être les marqueurs de planètes non détectées. Cependant, l'analyse des grains de poussière circumstellaires eux-mêmes est primordiale pour comprendre l'évolution du système, car les molécules qui les composent sont communes à celles que nous détecterons à la surface des exoplanètes. L'analyse en visible et proche infrarouge offerte par les instruments coronagraphiques au sol et sur HST offre une opportunité unique pour cette analyse en donnant accès aux propriétés de diffusion des grains de poussière de taille micrométrique. L'objectif du grand programme disque de Gemini/GPI

SPHERE H2 band: Best Model and Residuals

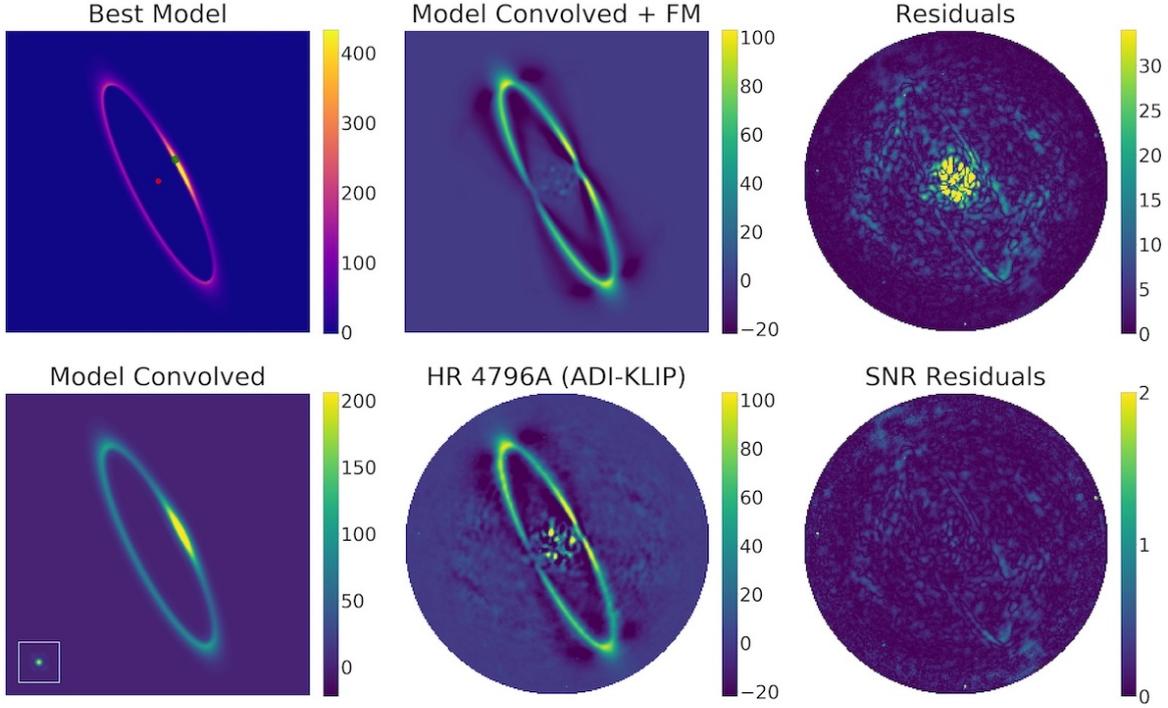


FIGURE 1.16 – Principe de *DiskFM* à travers l'exemple du disque HR 4796 (CHEN et al., 2020) dans des données SPHERE en bande H2 de février 2015. En haut à gauche : image d'un modèle de disque (issu d'un code développé par MILLAR-BLANCHAER et al., 2015). En bas à gauche : image du même modèle après convolution avec la fonction d'étalement du point de SPHERE observée dans la même bande sans coronographe juste après l'observation (montrée dans une petite vignette en bas à gauche). En haut au milieu : image du modèle le mieux ajusté après convolution et modélisation en avant pour reproduire l'effet ADI-KLIP grâce à *DiskFM*. En bas au milieu : Image montrant le disque issu des vraies données astrophysique après la réduction par l'algorithme de post-traitement. À droite : différence entre ces deux dernières images (haut) rapport signal à bruit de ces résidus (bas).

(PI : C. Chen) est justement la caractérisation détaillée de tous les disques de débris détectés par cet instrument. J'ai intégré en 2016 le consortium GPI, en tant que responsable de la réduction et de l'analyse des données du spectrographe intégral de champ (IFS) de ce programme. Il s'est achevé en 2019 (80h de télescope, 17 disques détectés, dont la plupart sont montrés dans la figure 1.4). J'ai participé à toutes les campagnes d'observations (au Chili ou à distance, entre 2017 et 2019), et effectué la première réduction des données pour évaluer leur qualité. L'analyse des disques a cependant nécessité une correction fine des effets des techniques d'imagerie, dont je suis spécialiste. Mon code *DiskFM* a ainsi été utilisé pour l'analyse de 8 des disques du programme Large programme GPI disque avec la meilleure détection par Justin Hom. Nous avons collaboré quotidiennement pendant plus de 2 ans sur cet article et Justin a pu le soumettre juste après sa soutenance de thèse en Juin 2023 à Arizona State University (HOM et al., 2024).

Cependant, avant cette analyse groupée de plusieurs disques, nous avons effectué entre 2017 et 2020 l'étude détaillée du disque HR 4796 avec mon encadrante de post-doc (Christine Chen) et l'aide précieuse de Gaspard Duchêne, spécialiste des effets de diffusion dans les disques de

poussière et du code de transfert radiatif MCFOST (PINTE et al., 2006).

Ce disque emblématique est imagé pour la première fois à la fin des années 90, d’abord sans coronographe depuis le sol dans l’infrarouge moyen, (JAYAWARDHANA et al., 1998 ; KOERNER et al., 1998) puis immédiatement après grâce à HST/NICMOS (SCHNEIDER et al., 1999) en lumière diffusée. Une décennie avant les premières images d’exoplanète orbitant des étoiles de la séquence principale (LAFRENIÈRE et al., 2008 ; MAROIS et al., 2008 ; LAGRANGE et al., 2009), le disque HR 4796 est seulement la seconde image d’un disque obtenue, après l’image de β -Pictoris par SMITH & TERRILE, 1984. Cependant, contrairement au disque de β -Pictoris, visible à une inclinaison presque complètement par la tranche (inclinaison supérieure à 89°), HR 4796 est visible à une inclinaison intermédiaire, ce qui fait de cet anneau très fin une élégante ellipse (Figure 1.9, gauche). L’absence dans l’anneau principal de structures particulières (discutées dans la section 1.1.3) fait de ce disque le laboratoire parfait pour l’étude des phénomènes de diffusion des grains. En effet, la grande majorité des différences locales de photométrie le long du disque peuvent être expliqués uniquement par une ellipse très légèrement excentrée ($e \sim 0.02$) et des propriétés de diffusion.

Lorsque la lumière de l’étoile rencontre un grain de poussière de taille comparable à sa longueur d’onde, elle est diffusée dans toutes les directions (Figure 1.17, gauche). La façon dont cette lumière est diffusée, en fonction de l’angle de diffusion, de la longueur d’onde et la polarisation introduite lors de cette diffusion, sont utilisés depuis des décennies pour estimer les propriétés physiques des grains du système solaire : forme, taille, composition et porosité. Par exemple, on sait ainsi que les grains cométaires des jets et de la coma ont des tailles différentes GREENBERG & LI, 1999 ; KOLOKOLOVA et al., 2004.

La fonction liant la quantité de lumière stellaire diffusée par les grains selon l’angle de diffusion est appelée fonction de phase de diffusion (FPD). La difficulté pour les disques circumstellaires (débris et protoplanétaires) est qu’il est impossible de faire varier notre angle d’observation comme le font les sondes dans le système solaire et donc de mesurer, pour une même partie du disque, cette fonction de diffusion. Pour chaque point du disque, nous observons un unique angle de diffusion qui correspond à l’angle entre l’étoile, le grain de poussière, et l’observateur. La fonction de diffusion varie donc d’un petit angle (diffusion vers l’avant) pour la partie du disque qui est la plus proche de nous, à un grand angle (diffusion vers l’arrière) pour la partie du disque la plus éloignée (Figure 1.17, centre). Pour obtenir un grand intervalle d’angle de diffusion, il est donc préférable de favoriser les disques très inclinés (vu de côté). Cependant, pour les disques les plus inclinés, comme pour HD 32297, la partie la plus en avant est souvent caché par le masque coronographique. HR 4796 est donc le meilleur exemple à ce jour pour observer la fonction de phase, car il est relativement incliné (76°) mais suffisamment proche de nous pour qu’il soit possible d’imager le disque sur toute son orbite.

Grâce à au code décrit dans la section précédente, j’ai obtenu le modèle le plus complet à ce jour de ce disque, combinant à la fois propriété géométrique et de diffusion. Ce modèle nous a permis de confirmer que ce disque avait effectivement une FPD particulière. La figure 1.17 (droite) montre la FPD de HR 4796, comparée à d’autres observées dans le système solaire et montre que l’augmentation abrupte de l’intensité de diffusion de HR 4796 à faible angle de diffusion est relativement unique.

En comparant la FDP extraite dans la bande H avec celle mesurée par le télescope spatial Hubble STIS aux longueurs d’onde visibles, nous avons montré que le disque montrait une couleur bleue aux petits angles de diffusion et une couleur rouge aux grands angles de diffusion, ce qui est cohérent avec les prédictions et les mesures en laboratoire pour des grains de poussières

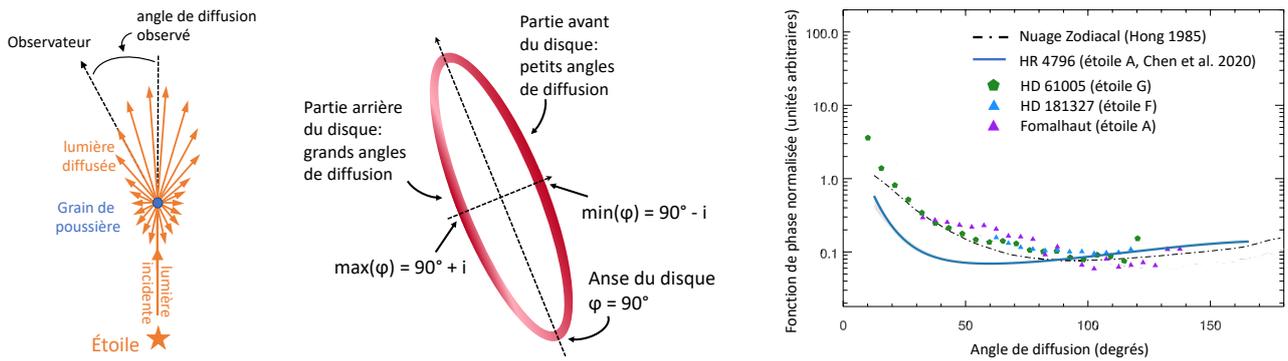


FIGURE 1.17 – De gauche à droite : Schéma définissant l’angle de diffusion ; schéma montrant l’angle de diffusion des grains de poussière en fonction de la position sur l’orbite ; comparaison de la FPD extraite dans notre étude (CHEN et al., 2020) en trait plein en bleu, et de plusieurs FPD mesurées dans le système solaire et d’autres disques de débris (adaptée de HUGHES et al., 2018).

relativement gros. Enfin, en utilisant le code MCFOST (PINTE et al., 2006) de transfert radiatif, nous avons pu modéliser la FDP extraite en H en utilisant un modèle de sphères creuses (distribution of hollow spheres ou DHS model MIN et al., 2005, 2016) composées de silicates, de carbone et de fer métallique.

1.3 Et maintenant ?

Cette partie présente mes projets de recherche pour les années à venir.

1.3.1 Nouvelles méthodes d’observations

Dans la section 1.2.2.2, j’ai décrit les limites des algorithmes de traitement basé sur l’ADI, en particulier sur les disques de débris, particulièrement sensibles à l’auto-soustraction. Je notais que `DiskFM` ne sert qu’à caractériser des disques en simulant les effets de soustraction pour en limiter l’impact lors d’une caractérisation des paramètres orbitaux et de diffusion. Enfin, j’évoquais d’autres algorithmes moins sensibles à l’auto-soustraction dans la fin de la section. Cependant, pour tous les algorithmes différentiels, la détection d’un objet n’est possible que dans le cas où l’on arrive à tirer profit d’une diversité entre les *speckles* et le disque que l’on cherche à détecter. Pour les disques totalement de face comme HD 181327 et TWA 7, le disque est essentiellement invariant par rotation et les techniques initiales de type ADI ne permettent plus de créer cette diversité. Pour ceux-ci, une approche de type PDI est souvent utilisée depuis le sol, mais qui ne permet d’accéder qu’à la fraction polarisée de la lumière. Pour l’intensité totale, une approche de type RDI semble préférable. Dans le RDI, l’image coronographique de référence que l’on va soustraire va être obtenue juste avant ou après l’observation de l’étoile cible en supposant que les *speckles* n’aient pas évolué. Cette méthode est particulièrement efficace pour le spatial et est le mode d’observation privilégié pour les coronographes de JWST par exemple (BOCCALETTI et al., 2022), mais est aussi efficace depuis le sol (WAHHAJ et al., 2021). Enfin, en combinant des archives entières de certains instruments contenant plusieurs centaines de séquences différentes (donc plusieurs milliers d’images coronographiques) dans

une même bande, il est possible de re-construire la meilleure image de référence, comme cela a été fait avec succès dans le cas de NICMOS par exemple (SOUMMER et al., 2014; CHOQUET et al., 2016). Le RDI est particulièrement adapté à la détection de disques de face, car si elle est sensible aux effets de sur-soustraction, elle est immunisée contre l'auto-soustraction, car la librairie de référence ne contient pas le disque lui-même. Avec Justin Hom (doctorant à l'Arizona State University pour lequel j'ai participé à l'encadrement), nous avons développé une méthode RDI pour les données de l'instrument GPI, et produit la première image de HR 4796 obtenue avec cette technique (publiée dans CHEN et al., 2020, et montré dans la figure 1.9). Enfin, il est venu à Paris quelques jours seulement avant la fermeture des frontières à cause de la pandémie et nous avons travaillé ensemble à développer un mode RDI pour DiskFM, qui simule uniquement les effets de sur-soustraction (soustraction d'une partie du disque qui est confondu avec une planète) sur un modèle de disque. J'ai continué à travailler sur ces aspects pour l'encadrement de ma première doctorante, Sophia Stasevic, qui est co-encadrée par Julien Milli et Anne-Marie Lagrange, dont l'objectif de thèse est justement de ré-analyser l'intégralité de l'archive de l'instrument SPHERE en utilisant une méthode de type RDI à la recherche de disque de débris. Cette analyse est actuellement en cours.

Par ailleurs, les approches historiquement utilisées pour créer des *Dark-Holes*, en appliquant des "sondes" sur le miroir déformable (comme la technique *Pair-Wise Probing* décrite en section 1.2.1.5) ou en faisant interférer les *speckles* grâce à un trou dans le Lyot comme pour la SCC (BAUDOZ et al., 2006; GALICHER & BAUDOZ, 2007) mesurent le champ électrique des *speckles* et peuvent donc être a fortiori également être utilisée pour mesurer et soustraire l'intensité des *speckles* (en prenant le carré de cette mesure) pour le post-traitement. Ces méthodes sont appelées *imagerie différentielle cohérente* (CDI) : la distribution de la lumière cohérente (résidus de la lumière de l'étoile) est modifiée par les sondes ou par les interférences créant des franges, tandis que la lumière incohérente (planète ou disques) n'est pas impactée.

Lors de notre nuit d'observations en mars 2022, nous avons utilisé des mouvements du miroir déformable (les "probes" de la technique *Pair-Wise Probing*) pour mesurer le champ de *speckles* avec une méthode active. Cependant, nous avons aussi pu produire, a posteriori, une image de référence basée sur la cohérence (c'est-à-dire toute la partie du champ de *speckles* qui bouge pendant le mouvement du miroir), illustrée dans la colonne centrale de la figure 1.18. La différence entre l'image initiale (à gauche) et la référence CDI (au centre) est indiquée dans la colonne de droite de la figure 1.18. Nous avons entouré en bleu la zone dans laquelle seule une soustraction post-traitement CDI (pas de correction active) a été réalisée : les *speckles* sont effectivement supprimées lors du post-traitement et un facteur de 3 a été atteint instantanément pour toutes les séparations. Ce test n'était pas optimisé pour le CDI et nous n'avons pas essayé d'être aussi rapides que possible, car l'objectif principal de la nuit d'observation était d'obtenir une boucle active stable avec le *Pair-Wise Probing + Electrical Field Conjugation*. Ces premiers tests ont eu lieu en distanciel durant le COVID. Grâce à un financement ECOS-Sud que j'ai obtenu, j'ai pu financer les missions pour aller tenter d'améliorer cette technique et la tester avec le coronographe quatre quadrants de SPHERE au printemps 2023 (Galicher et al, accepté dans *Astronomy and Astrophysics*).

On peut aussi citer les premiers tests réalisés grâce à la SCC en CDI (BAUDOZ et al., 2012). La technique CDI, à l'intersection entre la correction active et la soustraction post-traitement, ouvre un nouveau champ de méthodes de post-traitement. Il s'agit d'une méthode très prometteuse et en grande partie inexplorée : à notre connaissance, il s'agissait de la première tentative de CDI sur le ciel. Récemment, (NISHIKAWA, 2022) conclut que le CDI pourrait

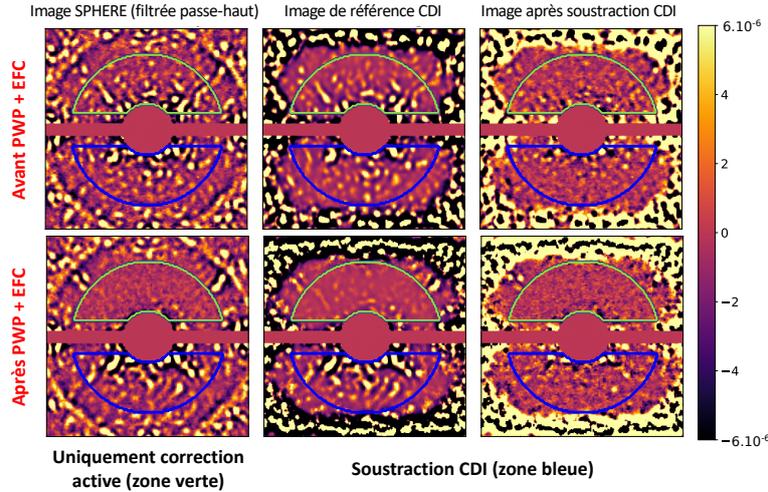


FIGURE 1.18 – . Correction d'image grâce au CDI (adaptée de POTIER et al., 2022b) sur SPHERE. Gauche : images d'intensité avant et après PWP+EFC. La région de correction active (Dark-Hole) est entourée en vert. Au centre : images de référence modulée mesurée avec PWP à chaque itération. À droite : Résultats du CDI calculés comme la soustraction entre l'intensité totale (gauche) et la composante modulée de référence (centre). L'image de référence a été remise à l'échelle pour minimiser l'intensité totale après CDI dans la région encerclée en bleu. Toutes les images ont été filtrées en passe-haut à l'aide d'une fonction gaussienne dont l'écart-type est de $0.57\lambda/D$, afin d'éliminer le halo de turbulence.

permettre d'atteindre presque la limite du bruit des photons pour les instruments spatiaux et terrestres. Contrairement à toutes les autres techniques de post-traitement introduites jusqu'à présent, les techniques CDI nous permet de contrôler directement la diversité des speckles / planètes : en quelques minutes seulement, il est possible de créer une diversité indépendante de la séparation des étoiles. Il permet d'explorer le voisinage proche des étoiles (séparation < 250 mas), à la recherche de planètes ou de disques circumstellaires qui ne peuvent pas être imagés aujourd'hui.

Bien qu'imaginée il y a plus d'une décennie, cette technique ne pouvait pas être utilisée pour les instruments coronagraphiques dans l'espace en l'absence de miroir déformable dédié (il est tout à fait hors de question d'utiliser les segments du JWST pour cet usage, car cela aurait un impact majeur sur la tâche de diffraction de tous les instruments). Roman/CGI sera le premier instrument coronagraphique spatial équipé de miroirs déformables dédiés. Enfin, au sol, il n'était pas évident que les images coronagraphiques était principalement limitée par les speckles issus des aberrations quasi-statiques, qui sont ceux qui peuvent être atteints par le CDI. Sur la meilleure optique adaptative de l'hémisphère sud, SPHERE, et dans de relativement bonnes conditions météorologiques (le *seeing* à 500 nm était en moyenne de $\sim 0.8''$, selon le moniteur DIMM-Seeing de Paranal), POTIER et al., 2022b montre qu'il y a maintenant un vrai potentiel pour cette technique. La comparaison des performances du CDI par rapport aux techniques existantes reste encore à faire.

1.3.2 Utilisation de l'apprentissage automatique pour l'imagerie directe

Dans cette section, je résume rapidement l'utilisation de l'apprentissage automatique (*Machine Learning*) dans le domaine de l'imagerie haut contraste, autant pour l'optique active que dans les algorithmes de détection. Ce sujet, sur lequel je me forme actuellement grâce à la formation Fidle ([Formation Introduction au Deep Learning](#)) proposée par le CNRS, occupera une place de plus en plus importante dans ma recherche.

1.3.2.1 Réseaux convolutifs pour l'estimation d'aberrations dans le plan focal

Dès les années 90, ANGEL et al., 1990 et SANDLER et al., 1991 montre 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 de l'apprentissage profond (*deep learning*, la branche de l'intelligence artificielle utilisant des réseaux neuronaux artificiels) pour approximer des problèmes non-linéaires, comme celui de la mesure de la phase en plan focal. Cependant, les cadences énormes nécessaires pour une utilisation sur un grand télescope et la diversité des images coronographiques possibles expliquent le temps mis pour que la communauté s'empare véritablement de ces outils. Il faut attendre la généralisation des réseaux neuronaux de convolution (CNN) beaucoup plus efficaces (moins de paramètres pour de meilleures performances) car ils permettent d'extraire les caractéristiques les plus utiles de l'image pour remplir sa tâche en question, pour que leur utilisation devienne plus fréquente en astrophysique. Pour comparer à une technique régulièrement utilisée par les astronomes, c'est exactement comme débruiter une image par la convolution par une fonction d'étalement du point qui extrait du signal les fréquences trop élevées pour être d'origine astrophysique, sauf que les noyaux de convolution en question sont issus d'un entraînement pour être les plus efficaces possible et que les convolutions sont appliquées en série, ce qui fait perdre rapidement le sens physique de l'"image" obtenue. Une grande partie du travail des astronomes étant de détecter des objets peu brillants dans des images bruitées, leur utilisation est maintenant répandue dans quasiment tous les domaines de l'astrophysique.

Sans chercher à être aussi exhaustif dans ce manuscrit, je tenterais simplement de décrire leur utilisation dans le cadre de l'optique active, ma spécialité. On peut déjà noter que plusieurs auteurs ont tenté de l'utiliser pour améliorer les performances d'analyseurs de surface d'onde existants. En palliant les non-linéarités des analyseurs de surface d'onde, ces algorithmes permettent d'en améliorer la précision et la gamme d'application. On peut citer des améliorations des analyseurs les plus utilisés, comme le Shack-Hartmann ou la pyramide (ALVAREZ DIEZ et al., 2008; WEINBERGER et al., 2022) mais aussi d'autres algorithmes comme le *generalised Optical Differentiation Wavefront Sensor* (g-ODWFS original HAFFERT, 2016; version avec CNN LANDMAN & HAFFERT, 2020), le *Lyot-based low order wavefront sensor* (LLOWFS original SINGH et al., 2014; version avec CNN ALLAN et al., 2020a) ou le *Zernike Wavefront Sensors* (ZWFS original ZERNIKE, 1934; version avec CNN ALLAN et al., 2020b).

1.3.2.2 Le problème de la correction

Enfin, de nombreux auteurs ont tenté de réaliser cette analyse par CNN directement depuis le plan focal, ce qui se rapproche de mon champ d'étude. Cependant, l'indétermination sur

le signe des modes paires de la phase menant à une dégénérescence est un problème toujours présent. PAINE & FIENUP (2018) étudient ces algorithmes dans le cas de JWST en association d'algorithme de minimisation du gradient plus classique pour les améliorer. Pour lever cette dégénérescence, de nombreux auteurs (ANDERSEN et al., 2020; NAIK et al., 2020; ORBAN DE XIVRY et al., 2021) entraînent des CNNs sur un duo d'images focalisées / défocalisées. Enfin, QUESNEL et al. (2022) utilise la diversité de phase azimutale introduite par le vortex coronographe (MAWET et al., 2005, 2009), soit en séparant les polarisations après le masque pour le vecteur vortex, soit en une seule image pour le vortex "scalaire". Toutes ces approches basées sur des CNN ont pour objectif de mesurer la phase, qui n'est pas la bonne métrique pour la création de *Dark-Holes*, mais leur utilisation directement en plan focal montre qu'il est aussi sans doute possible de les utiliser pour mesurer le champ électrique complexe des *speckles*.

Cependant, toutes ces méthodes répondent uniquement au problème de la mesure en plan focal et non au problème du contrôle du miroir, qui reste l'un des principaux problèmes pour créer des *Dark-Holes* de manière efficace. En effet, la quasi-totalité des méthodes de correction du *Dark-Hole* (voir les revues de POTIER, 2020 en français et GROFF et al., 2016 en anglais) utilise une linéarisation de l'action du miroir déformable sur le champ électrique calculé. On peut noter l'exception notable de la méthode du *Dark-Hole* non-linéaire (DHNL, PAUL, 2014), qui cherche les tensions pour minimiser l'énergie dans le *Dark-Hole* sans linéariser son expression. PAUL (2014) montre ainsi en simulation que si le niveau de correction final est sensiblement identique (sans doute limité par les caractéristiques du miroir déformable et la quantité de *non-common path aberrations* présente), le DHNL peut, en simulation, obtenir un *Dark-Hole* en une seule itération, là où les méthodes classiques améliorent lentement leurs performances en quelques / quelques dizaines d'itérations (même pour une estimation "parfaite" du champ électrique). Pour les très fortes aberrations introduites par des pupilles complexes (section 1.2.1.1), extrêmement non-linéaires, mes algorithmes (linéaires) pouvaient mettre plusieurs dizaines, voire centaines d'itérations pour converger (MAZOYER et al., 2018a; LLOP-SAYSON et al., 2022). C'est aussi un problème majeur pour le télescope Roman (SEO et al., 2018). Il est à noter que comme l'ont montré SINGH et al., 2019; POTIER et al., 2022b, la correction des *non-common path aberrations* en *Dark-Hole* pour les télescopes au sol nécessite de très longues pauses pour chaque image de "probes", nécessaires pour créer la diversité de phase, le temps que les *speckles* issus de la turbulence atmosphériques se moyennent. Les itérations de Roman à très haut contraste (moins de 10^{-8}) seront, elles aussi, fortement limitées par le bruit de photon dans le *Dark-Hole*. On voit donc tout le potentiel de ce genre d'algorithme.

Cependant, son application sur le banc haut contraste THD2 (HERSCOVICI-SCHILLER et al., 2017) montre que les performances en nombres d'itérations sont sensiblement comparables aux méthodes classiques, ce que les auteurs expliquent par la difficulté d'obtenir un modèle assez précis de l'instrument pour obtenir une correction efficace "du premier coup". Cette inadéquation entre le modèle et la réalité de l'instrument est aussi l'un des freins majeurs à la convergence des algorithmes de Roman (SEO et al., 2017; LLOP-SAYSON et al., 2022).

Ces erreurs sont toutes les "inconnues connues" de notre instrument : alignement exact de la pupille et du Lyot par rapport aux miroirs déformables, gain individuel de chaque actionneur (si tant est que leur comportement soit totalement linéaire, hypothèse que j'ai démontrée fautive pour les miroirs Bostons Micromachines durant ma thèse MAZOYER et al., 2014c), linéarité des pixels de la caméra, etc.

Dans ce contexte, un champ particulièrement intéressant du *machine learning* est l'apprentissage par renforcement (*reinforcement learning*, RL, voir le livre de référence de SUTTON &

BARTO (2018)). Dans ce paradigme, l'agent apprend ce qu'il faut faire afin de maximiser un signal de récompense numérique (par exemple le contraste ou le rapport de Strehl). On ne dit pas à l'agent quelles actions il doit entreprendre (par exemple comment il doit pousser le miroir déformable), mais il doit découvrir les actions les plus gratifiantes (ici en termes de contraste ou de rapport de Strehl) en les essayant. Cette approche commence tout juste à être utilisée en optique adaptative, avec deux approches, basé sur un modèle initial (NOUSIAINEN et al., 2021, 2022) ou non (LANDMAN et al., 2021 ; POU et al., 2022). Les méthodes sans modèle ont l'avantage d'être rapides à évaluer (quelle est la meilleure action pour un état donné), car les politiques apprises sont souvent des réseaux neuronaux qui permettent d'évaluer une action en quelques millisecondes (par opposition à une simulation optique complexe à travers une pyramide par exemple). Cependant, elles souffrent du grand espace d'actions possibles résultant du nombre d'actionneurs qui doivent être contrôlés dans les systèmes d'optique adaptative. Il est difficile d'apprendre à contrôler chaque actionneur simultanément et individuellement avec une méthode sans modèle. Ces questions n'ont pas encore été explorées dans le cadre du contrôle du champ électrique pour obtenir des *Dark-Holes*. Les algorithmes de *reinforcement learning* pour la création de *Dark-Hole* sont au cœur de la thèse de Yann Gutierrez, que j'encadre depuis 2022 en co-direction avec des chercheurs de l'ONERA.

1.3.2.3 Détection d'objet dans les images coronographiques

Finalement, revenons à l'utilisation de *deep learning* pour la détection d'objets astrophysiques dans les images haut-contraste. Plusieurs auteurs ont récemment tenté d'explorer ce problème. Pour les données sol, il est clair que l'utilisation de séquences de données prises en mode "pupille fixe" donne un énorme avantage, on sait que dans ces séquences, les planètes bougent alors que les *speckles* restent fixes. Pour réduire la complexité du problème, certains chercheurs ont donc entraîné des données sur des séquences déjà réduites avec un algorithme "non *Deep learning*" soit PACO (deep PACO, FLASSEUR et al., 2023), soit une version de PCA (SODINN et NA SODINN, GONZALEZ et al., 2018 ; CANTERO et al., 2023)

Pour le spatial, on ne peut pas utiliser cet avantage et l'on a souvent une unique image, contenant à la fois *speckles* et planète. Il devient alors difficile d'entraîner un algorithme alors que l'intégralité des *speckles* sont encore présents dans l'image et indiscernable des planètes. (YIP et al., 2020) proposent une approche basée sur les *Generative Adversarial Network* (GAN, GOODFELLOW et al., 2014). Il s'agit d'entraîner deux réseaux en parallèle. Le premier, le GAN en lui-même, va simuler des images NICMOS à partir des données existantes puis de créer des jeux de données artificiels avec ou sans planètes (simulée avec Tiny Tim, KRIST et al., 2011, puis injectée dans les images). Ces jeux de données sont ensuite être utilisés pour entraîner un autre CNN. Ce problème me paraît cependant trop mal contraint pour donner des résultats fiables. En effet, un *speckle* qui n'apparaît qu'une seule fois est littéralement indiscernable d'une planète et ce type d'algorithme me paraît donc une faible amélioration du projet ALICE (SOMMER et al., 2014 ; CHOQUET et al., 2016) qui appliquait une analyse en composantes principales aux données NICMOS : la différence entre une planète et un *speckle*, c'est qu'un *speckle* apparaît suffisamment souvent dans l'archive NICMOS, mais la robustesse de la détection tient justement à l'évaluation de ce "suffisamment". Enfin, ce type d'approche par GAN est rendu beaucoup plus difficile pour les images sol par l'immense diversité des images coronographiques possibles. Certains réseaux récents (Latent Diffusion Models, ROMBACH et al., 2022) pourraient être adaptés pour décrire cette diversité.

Enfin, le problème de la détection des disques demeure à ce jour inexploré. Pour les mêmes raisons que pour les algorithmes classiques, une image de disques est beaucoup plus complexe qu'une image de planète (qui est fondamentalement identique à une fonction d'étalement du point, donc très bien connue) ce qui rend le problème de classification ("oui ou non y a-t-il un disque dans cette image?") plus difficile. Enfin, il est aussi plus difficile d'utiliser l'avantage de rotation des images pour les raisons déjà évoquées dans les sections 1.2.2.2. Ce problème reste ouvert et constitue une piste intéressante de recherche, tout à fait alignée sur mes intérêts pour les algorithmes de détections et de traitement pour les disques de débris.

1.3.3 De SPHERE à SPHERE+ : trois boucles valent mieux qu'une

Les instruments SPHERE et GPI ont observé plusieurs centaines d'étoiles dans leurs grands relevés SPHINE (SpHere INfrared survey of Exoplanets, VIGAN et al., 2021) et GPIES (GPI Exoplanet survey, NIELSEN et al., 2019). Les résultats de l'analyse fréquentielle des populations d'objets sub-stellaire (super-Jupiters et naines brunes) montrent que ces objets deviennent vraiment rares au-delà de 10 unités astronomiques (ua). Ainsi, selon VIGAN et al. (2021), la proportion d'étoiles de type F, K et G qui seraient l'hôte d'au moins un objet de $M_p = 5 - 75M_{Jup}$ et orbitant entre 10 et 300 ua est de seulement $5.7^{+3.8}_{-2.8}\%$. Cependant, les relevés récents en vitesse radiale (FULTON et al., 2021) suggèrent justement que les planètes géantes sont plus fréquentes à des distances orbitales de 1-10 ua par rapport aux orbites situées à l'intérieur ou à l'extérieur de cette fourchette ($14.1^{+1.8}_{-2.0}\%$ pour une orbite entre 2 et 8 ua et $8.9^{+2.4}_{-3.0}\%$ entre 8 et 32 au). Cette distance est justement à l'extrême limite des instruments actuels : à 48 pc (la distance médiane des étoiles dans les premières 150 étoiles observées par SHINE DESIDERA et al., 2021), 10 ua correspond à 208 mas, soit $5 \lambda/D$ en bande H avec un miroir primaire de 8 mètres. Il est donc clair que de nombreuses exoplanètes se situent juste sous les speckles dans les images de nos instruments. À partir de ce constat, deux approches, complémentaires, peuvent être utilisées pour les détecter. Utiliser des méthodes complémentaires (principalement astrométrie et vitesses radiales) et des algorithmes de détection extrêmement performants pour les extraire du bruit stellaire à ces faibles séparations, et améliorer les instruments actuels pour réussir à combler le fossé encore existant entre les détections en vitesses radiales à grandes séparations et l'imagerie directe à faible séparation. La première approche est celle entreprise par le projet COBREX porté par Anne-Marie Lagrange avec qui je collabore pour la ré-analyse des archives des instruments haut contraste. La seconde approche est celle empruntée par les équipes responsables des jouvences des instruments actuels : SPHERE+ (BOCCALETTI et al., 2020), GPI2.0 (CHILCOTE et al., 2022), SCEXAO (LOZI et al., 2020).

Une autre limitation identifiée par BOCCALETTI et al. (2020) est que les objets astrophysiques les plus intéressants en imagerie directe (disques protoplanétaires et planètes en formation, comme autour de l'étoile PDS 70) orbitaient des étoiles souvent trop faibles pour être accessible pour l'optique adaptative de SPHERE car trop rouges ou trop faibles. En augmentant la sensibilité de l'optique adaptative dans l'infrarouge pour pouvoir fermer la boucle sur ces cibles, de nombreux jeunes systèmes en formation (déjà détectés avec ALMA), pourrait être imagés en lumière diffusée, permettant de contraindre de manière plus efficace la formation planétaire.

Pour améliorer les performances de l'instrument SPHERE, plusieurs améliorations ont été proposées et sont en cours de réalisation. Parmi elles, la plus lourde en développement est le développement d'une seconde boucle d'optique adaptative (voir Figure 1.19). Cette seconde

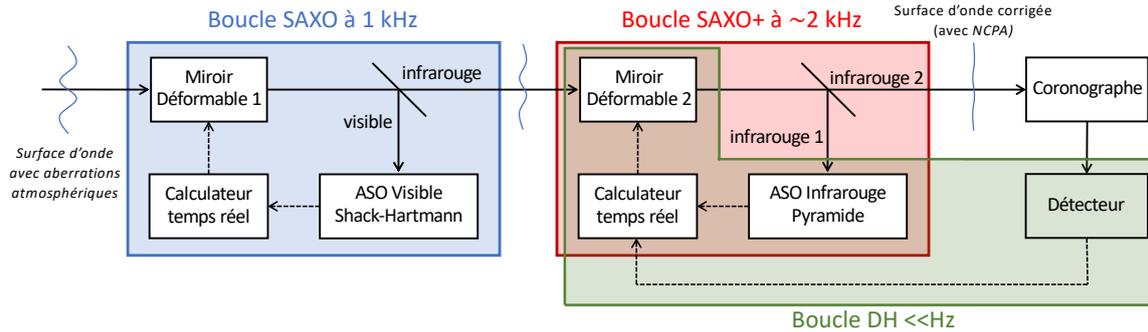


FIGURE 1.19 – Boucles de contrôle pour SPHERE+. Figure traduite et adaptée de GOULAS et al. (2023).

boucle se situera après la boucle SAXO originale (FUSCO et al., 2014) qui utilisait la lumière visible et utilisera une partie de la lumière infrarouge jusqu’à maintenant utilisée pour les images scientifiques. Elle contrôlera un second miroir déformable (de type Boston, comme ceux utilisés sur le banc THD2), grâce à un analyseur de surface d’onde de type pyramide.

Enfin, il est prévu d’inclure une troisième boucle de contrôle utilisant directement le plan focal ou un *Zernike Wavefront Sensor* (en vert sur le schéma). Je suis actuellement responsable du *work package Dark-Hole* et correction des *non-common path aberrations* pour SPHERE+. Ces deux techniques ont déjà été utilisées sur la version actuelle de l’instrument. Un Zernike Wavefront Sensor (N’DIAYE et al., 2016 ; VIGAN et al., 2019) est installé dans la roue à coronographe de l’instrument SPHERE depuis son intégration à Paranal en 2014. Il s’agit d’un masque de phase introduisant au plan focal un déphasage θ sur une pastille circulaire de diamètre d et 0 en dehors (dans le cadre du masque introduit dans SPHERE, ces paramètres valent $d = 1.076\lambda_0/D$ et $\theta(\lambda) = 0.440\pi\lambda_0/\lambda$ pour $\lambda_0 = 1.642\mu m$). Ce masque a permis de mesurer et de calibrer les *non-common path aberrations* présents dans l’instrument SPHERE en 2022 (VIGAN et al., 2022). La technique du *Dark-Hole* appliqué sur SPHERE (POTIER et al., 2022a) a déjà été présentée en détail dans la section 1.2.1.5. Cependant, cette troisième boucle ne disposera pas d’un miroir déformable en propre pour corriger les aberrations mesurées et utilisera celui de la seconde boucle, donc situé avant la pyramide. Comme décrit dans la section 1.2.1.5, pour introduire une phase donnée sur le miroir déformable (par exemple une correction de *non-common path aberrations*), il est nécessaire de modifier les phases de références de la pyramide. Cependant, contrairement à l’analyseur de Shack-Hartmann, la réponse de la pyramide à une phase n’est pas parfaitement linéaire et ne peut pas être complètement calibrée par une matrice pré-calculée. La correction de *non-common path aberrations* avec une pyramide (et a fortiori l’application d’une phase permettant la création d’un *Dark-Hole*, ce qui n’est pas équivalent) reste un problème de recherche ouvert (DEO et al., 2019 ; ESPOSITO et al., 2020a ; CHAMBOULEYRON et al., 2021 ; SKAF et al., 2022), dont je ne suis pas spécialiste, mais qui est au cœur de la thèse de Charles Goulas.

Cette ambitieuse triple boucle de contrôle nous permettra de remplir les objectifs scientifiques décrits au début de cette section, mais servira aussi démonstrateur technologique sur le ciel dans le cadre de la feuille de route pour l’instrument PCS (planetary camera and spectrograph KASPER et al., 2021). Cet instrument de seconde génération sur l’ELT se donne pour objectif de détecter, depuis le sol, des planètes en lumière réfléchie, GUYON (2018b) montre même qu’il est théoriquement possible d’imager les planètes rocheuses dans les zones habitables

d'une cinquantaine de naines rouges proches et de quelques étoiles plus chaudes si l'on peut atteindre des contrastes bruts de 10^{-8} à 1 élément de résolution. À ce jour, la solution pour obtenir ce niveau de contraste avec PCS implique nécessairement une optique adaptative à deux étages fonctionnant à haute fréquence. En développant SPHERE+, nous nous préparons donc au développement de PCS (le SPHERE de l'ELT) qui devrait commencer alors que les premières générations arriveront sur ciel.

1.3.4 Quel futur pour le THD2 ?

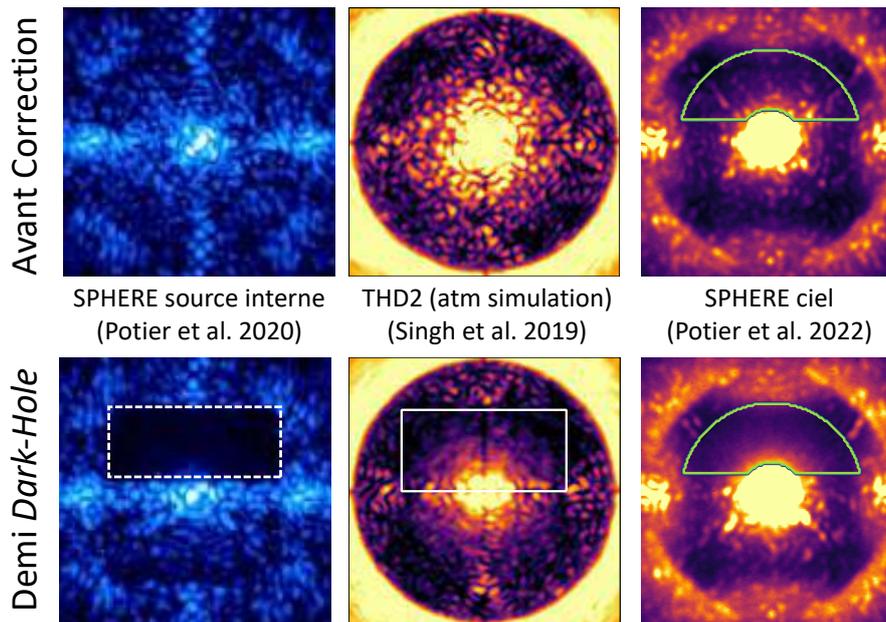


FIGURE 1.20 – Trois Dark-Holes obtenus par l'équipe très haute dynamique du LESIA. **Gauche** : un Dark-Hole obtenu sur source interne sur l'instrument SPHERE POTIER et al. (2020a) . **Centre** : un Dark-Hole obtenu sur le banc THD avec un disque de phase reproduisant les aberrations que verrait un coronographe derrière une optique adaptative extrême SINGH et al. (2019). **Droite** : un Dark-Hole obtenu sur SPHERE sur le ciel POTIER et al. (2022a).

Le banc d'essai Très Haute Dynamique 2 (THD2) de Meudon est une plate-forme unique en Europe : il permet la simulation expérimentale d'instruments coronographiques spatiaux et terrestres et de plusieurs techniques et il a une longue histoire de tests de coronographes et d'algorithmes d'estimation et de correction pour le haut-contraste (environ un papier de rang A par an en moyenne de validation expérimentale depuis 10 ans, MAS et al., 2012 ; MAZOYER et al., 2013, 2014a ; DELORME et al., 2016a,b ; HERSCOVICI-SCHILLER et al., 2017 ; PATRU et al., 2018 ; SINGH et al., 2019 ; GALICHER et al., 2020 ; POTIER et al., 2020a). Cette étape est nécessaire pour tester ces composants avant leur adoption sur télescopes, en particulier sur le VLT, car l'ESO ne permet pas de faire de recherche expérimentale sur ciel. Actuellement, avec la chercheuse post-doctorante Iva Laginja, nous sommes en train de développer de nouveaux algorithmes de contrôle en lumière polychromatique.

La figure 1.20 montre trois *Dark-Holes* obtenus par l'équipe très haute dynamique du LESIA. Il est intéressant de noter que la simulation sur le THD2 des effets atmosphériques (image centrale) nous permet d'approcher de manière plus réaliste l'image ciel (à droite) qu'une image

en source interne cependant prise avec le même instrument, mais sans simulation des effets atmosphériques (à gauche). La reproduction de conditions diverses permet de développer de nouvelles techniques de coronographie. En particulier, le développement de techniques basées sur les réseaux neuronaux (voir section 1.3.2.2) pour le haut contraste va demander l’entraînement de ces algorithmes sur des images coronographiques. L’une des spécificités de notre domaine par rapport à l’optique adaptative est que les boucles de contrôle doivent nécessairement être de l’ordre de grandeur des boucles de science, donc beaucoup plus lente que les boucles d’optique adaptative. En effet, le nombre réduit de photons après le coronographe oblige à faire des poses relativement longues, que ce soit au sol ou dans l’espace. Dans ce contexte, il est difficilement imaginable de disposer de même quelques centaines d’images pour entraîner un algorithme (alors que les algorithmes pour l’optique adaptative disposent de milliers de poses chaque seconde). Ces problèmes de jeu de données réduites nous forcent à ouvrir d’autres voies de recherche qui sont au cœur de la thèse de Yann Gutierrez, que j’encadre depuis 2022. Elles sont selon moi l’un des arguments importants pour le développement des bancs haut-contrastes, qui seront sans doute une étape indispensable pour tester et pré-entraîner les algorithmes, entre les simulations numériques et les instruments sur ciel.

Cependant, le THD2 nécessite une jouvence d’une manière urgente. Alors que la plupart des outils de simulation coronographique sont désormais basés sur python, le THD2 s’appuie depuis une décennie sur un mélange de codes Labview, C, python et IDL pour créer des algorithmes de détection et contrôler les DM. Ce cadre logiciel obsolète ralentit considérablement le portage de nouveaux algorithmes pour la validation expérimentale sur le banc d’essai (ces nouveaux algorithmes sont souvent codés en python, qui est devenu le langage le plus utilisé dans notre communauté). De plus, cela oblige les chercheurs et chercheuses doctorants ou post-doctorants, qui maîtrisent souvent python, mais pas d’autres langages, à dépendre entièrement des chercheurs permanents pour tester leurs algorithmes sur le THD2. Enfin, l’ordinateur de contrôle des miroirs déformables du banc date de ma thèse et il est nécessaire de le changer. Les cartes et *drivers* pour contrôler ces composants complexes ne sont pas compatibles avec tous les systèmes et ce changement n’est pas anodin. Je mène actuellement cette jouvence des systèmes informatiques du banc, avec l’aide précieuse de la chercheuse post-doctorante Iva Laginja. J’ai récemment obtenu un financement du DIM (domaine de recherche et d’innovation majeur) **Origines** (action de la région île de France autour de l’astronomie) pour financer du matériel sur le banc.

1.3.5 De Roman à HWO, quelle place pour le haut-contraste spatial en Europe ?

Le télescope spatial Nancy Grace Roman (anciennement WFIRST) sera lancé au milieu en 2027. Il embarquera un instrument coronographique (*coronagraphic instrument*, CGI, en anglais) qui sera capable de détecter et de caractériser les exoplanètes et les disques circumstellaires en lumière visible à un niveau de contraste sans précédent de $\sim 10^{-8}$ ou moins. Comme le montre la figure 1.21, un tel niveau de contraste, supérieur de plusieurs magnitudes à celui des coronographes de pointe dans le visible ou le proche infrarouge, devrait permettre d’imager les premières Jupiters âgées, dont l’existence est déjà connue grâce aux détections en vitesses radiales. Le flux estimé des planètes connues détectées par des méthodes indirectes est représenté sur la Figure 1.2 (droite) et certains ont été indiqués (cercle gris) sur la figure 1.21. Le coronographe de Roman sera le premier instrument coronographique spatial doté d’un contrôle

actif du front d'onde en temps réel grâce à l'utilisation de miroir déformable et un détecteur EMCCD permettra la détection de signaux faibles. Quatre miroirs super polis ont été fournis par le LAM pour cette mission. Notre équipe au LESIA avait proposé en 2020 le développement d'algorithmes de contrôle rapides pour cet instrument, mais ce *work package* n'a malheureusement pas pu être financé par notre agence spatiale. Arthur Vigan est le représentant français pour la *CGI Core team* et je suis son adjoint. Nous sommes en train de mettre en place les participants français à l'équipe du projet pour préparer les résultats.

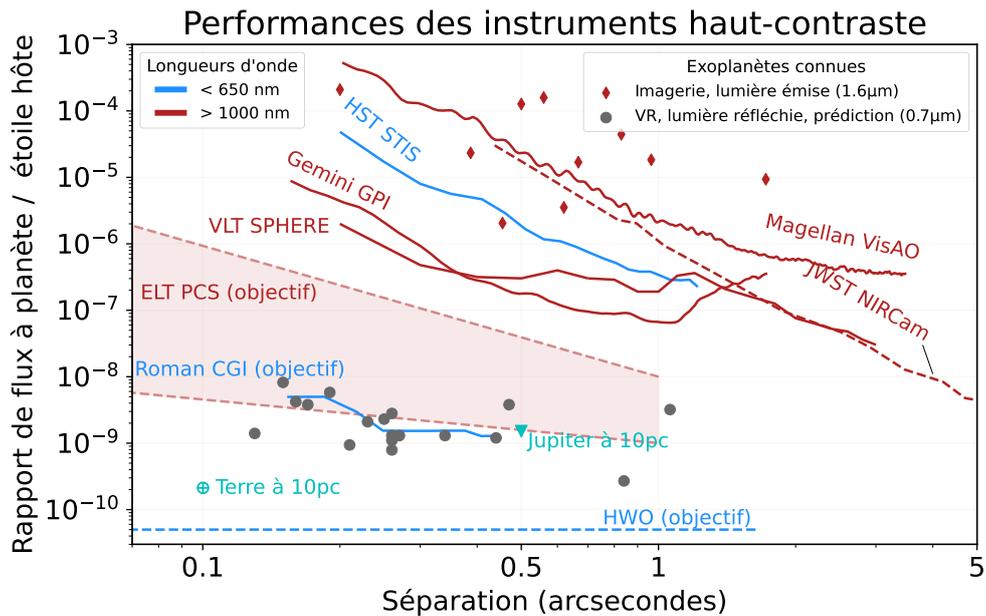


FIGURE 1.21 – Limites de détection (5σ) des instruments terrestres et spatiaux. Les diamants rouges représentent quelques-unes des exoplanètes actuellement imagées, avec leur rapport de flux planète-étoile connu dans la bande H. Les ronds gris représentent les exoplanètes connues détectées par la méthode des vitesses radiales (VR), pour lesquelles le rapport de flux de lumière réfléchie est prédit dans le visible. Adapté et traduit de BAILEY et al., 2018.

Cet ambitieux instrument est un démonstrateur technologique pour la future grande mission d'imagerie prévue pour la fin des années 30 - début des années 40, *Habitable World Observatory*. Cette mission a été désignée comme une priorité par l'étude décennale sur l'astronomie et l'astrophysique de la communauté américaine (NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE, 2021), avec pour objectif la détection de marqueurs d'habitabilité sur des planètes proches. Comme le montre la figure 1.21, la détection de planètes de types terrestres nécessite d'accéder à des contrastes meilleurs que 10^{-10} . Dans une étude récente (VAUGHAN et al., 2023), nous avons même identifié quelques-unes des performances qui devront être atteintes par ce futur instrument coronographique s'il souhaite détecter des signes d'eau liquide dans l'atmosphère (arc-en-ciel, reflets sur les océans), en dessous de la limite de 10^{-10} souvent évoquées.

Jusqu'à maintenant, la communauté européenne a été fortement impliquée dans deux des missions "amirales" ("flagships") de la NASA, issues de recommandations ces études décennales (Hubble pour les années 80, Spitzer pour les années 90, JWST pour les années 2000, et Roman pour les années 2010), avec une participation à la plateforme pour Hubble et au lancement

et à l'instrument coronographique MIRI pour JWST. Dans le même temps, une partie de la communauté européenne commence à étudier une mission interférométrique spatiale, LIFE (Large Interferometer For Exoplanets, QUANZ et al., 2022), complémentaire d'HWO, car elle permettrait de mieux contraindre l'habitabilité des cibles grâce à des mesures dans l'infrarouge. La place que souhaite donc prendre l'europe dans cette future mission coronographique pour la première mesure de marqueurs d'habitabilité est encore largement à définir.

Chapitre 2

Note d'accompagnement

Dans cette note d'accompagnement, je décris mes activités qui ne relèvent pas directement de ma recherche personnelle, incluant mes enseignements (section 2.1) et prises de responsabilités dans mon laboratoire (section 2.2) et ma communauté (section 2.3). Enfin, une attention particulière sera portée à mes activités de diffusion des sciences (section 2.3) ainsi qu'à mes récentes activités d'encadrement de la recherche (section 2.5).

2.1 Enseignements

Je dirige deux formations de master, dans le Master 2 *International Research Track* (IRT) de l'Observatoire de Paris / PSL :

- Formation "Instrumentation optique". J'enseigne une dizaine d'heures dans cette formation qui a pour but d'introduire aux étudiants les bases de l'observation et de la conception d'instruments optiques pour les grands télescopes.
- Formation "Exoplanètes" (en co-direction avec Anne-Marie Lagrange). Ce cours est regroupé en une semaine, ce qui permet de l'intégrer dans les *PSL Weeks*, un programme qui permet à tous les étudiants de master de l'université Paris Science et Lettres (à laquelle appartient l'Observatoire de Paris) de suivre d'autres cours de master, hors de leur spécialité d'inscription. Comme je l'indique dans l'[interview que j'ai donnée sur ce programme](#), "l'interdisciplinarité des *PSL Weeks* permet de toucher des étudiants intéressés par l'astronomie sans y être spécialisés, mais dont les compétences pourraient être utiles pour [notre discipline]". J'enseigne une quinzaine d'heures dans cette formation.

2.2 Prises de responsabilités dans le laboratoire

- Depuis fin 2022, je suis responsable de l'équipe haute dynamique au sein du pôle Haute-résolution angulaire pour l'astrophysique (HRAA) du LESIA. Cette équipe est composée de 6 chercheurs et chercheuses permanents, 1 ingénieur, 4 chercheurs et chercheuses en post-doctorat et 4 en doctorat (voir le [site de l'équipe](#)). En plus de la participation à la rédaction du dossier HCERES du LESIA qui a lieu en 2023, je gère aussi le planning d'occupation des bureaux de mon équipe et organise les réunions d'équipes. Enfin, tâche critique, j'ai conçu et installé la salle de pause et m'occupe de l'achat du café pour l'équipe

(99 kg de café depuis l'installation de l'équipe dans le nouveau bâtiment fin 2021 !). Au-delà de l'aspect trivial de certaines de ces tâches, je suis conscient de leur importance pour entretenir une proximité dans l'équipe qu'il est parfois difficile de recréer depuis la COVID.

- Depuis mon arrivée en 2020, je prends en charge l'organisation du séminaire du pôle HRAA du LESIA.
- J'ai participé au groupe de travail Projet Observatoire de Paris 2025 (POP 2025) pour émettre des recommandations sur la réorganisation de l'observatoire de Paris.
- Participation au groupe de travail GT Partage des Savoirs de l'université PSL pour coordonner les actions de vulgarisation au sein de PSL.

2.3 Prises de responsabilité dans la communauté

- Depuis 2023, je fais partie du **Comité d'experts du thème transverse exoplanètes**, le CET Exoplanètes ([site](#)). Cette année, nous préparons la prospective INSU.
- Depuis 2022, je fais partie du conseil scientifique de l'**Action Spécifique Haute Résolution Angulaire** ([site](#)). L'ASHRA a une ligne budgétaire de l'INSU et une partie de notre rôle est l'accompagnement de certains projets qui en font la demande (appel d'offre une fois par an à la rentrée scolaire). Nous sommes aussi consultés par d'autres sections de l'INSU sur certains projets instrumentaux qui nous concernent. L'ASHRA fédère nos activités et crée un consensus sur les priorités techniques et scientifiques dans la discipline.
- Suite à la COVID où la plupart des séminaires se sont pour la plupart tenus en ligne, j'ai fédéré les séminaires haute résolution angulaire en France (LAM, Lagrange, ONERA, LESIA, CRAL, IPAG) pour que notre communauté puisse accéder à ces séminaires partout en France. Suite à cette initiative, j'ai commencé depuis 2022 l'envoi d'une newsletter mensuelle pour diffuser les annonces de tous les séminaires ou soutenance de thèses rentrant dans le cadre de l'ASHRA en France.

2.4 Diffusion des sciences



Mon intérêt pour le partage avec le grand public a commencé avant même ma thèse, alors que dans le cadre de mon stage de première année de l'École polytechnique (2007-2008), j'ai choisi d'enseigner les sciences en primaire pour l'association la Main à la Pâte. La main à la pâte est une émanation de l'Académie des sciences, co-fondée par Pierre Léna et puis présidée par Daniel Rouan (tous deux au LESIA) : elle est donc historiquement particulièrement liée à l'astronomie française. Basé dans l'académie de Perpignan, j'ai enseigné les sciences pendant 8 mois à plein temps (quatre classes par jour, quatre jours par semaine, le mercredi étant réservé à la formation des professeurs). Dès

mes années d'école, j'ai commencé à participer aux événements comme la fête de la science à l'École polytechnique, et j'ai ensuite continué durant mes années de thèse. C'est aussi à cette époque que j'ai rejoint l'équipe de Podcast Science, avec laquelle je fais maintenant des

émissions presque toutes les semaines depuis presque une décennie (voir la prochaine section). Depuis mon retour en France, j'ai augmenté de manière importante mes activités de diffusion des sciences, que ce soit au sein de l'observatoire (organisation d'évènements) ou en dehors (participation à des associations ou des conférences grand public).

La nécessité de la diffusion des sciences Il devient de plus en plus compliqué de comprendre, même grossièrement, comment sont inventés les médicaments que nous prenons, les véhicules que nous conduisons, ou même les outils que nous utilisons au jour le jour. À cela s'ajoute que la présentation de la recherche scientifique comme une innovation en rupture permanente donne une impression que toute nouvelle découverte est une révolution permanente, ce qui crée un amalgame pour le grand public entre une véritable révolution scientifique qui rendrait caduque des théories existantes (certes possible, mais plutôt rare) et une découverte incrémentale dans une phase de science "normale" (KUHN, 1962).

Ce progrès technique rapide et soi-disant perpétuellement en rupture peut avoir un côté terrifiant si l'on ne comprend pas le processus de la recherche. On imagine alors que les innovations sont inventées hier et aujourd'hui immédiatement testées sur nous. Quand on parle de s'injecter un vaccin expérimental, soi-disant développé en 6 mois, il est rassurant de savoir que la découverte de l'ARN a valu un prix Nobel à ses découvreurs, Jacques Monod, François Jacob et André Lwoff, il y a bientôt 60 ans et que les premières injections in vivo de vaccins ARN date des années du début des années 90 (WOLFF et al., 1990). Quand on observe les progrès rapides et certes impressionnants de l'intelligence artificielle, savoir que le premier réseau neuronal, le perceptron, a été inventé en 1957 par Frank Rosenblatt, donne la mesure du travail effectué dans ce domaine, en énorme partie financée par la recherche publique. Mais pour que le grand public comprenne que ces innovations qu'il voit arriver, changeant parfois de manière rapide nos modes de vie, sont issus de décennies de recherche scientifique par des milliers de chercheurs et de chercheuses, il est nécessaire que cette recherche préparatoire sorte des laboratoires. Il faut donc parler des dernières découvertes, des *press releases* de nos papiers à haut facteur d'impact, mais aussi, et surtout, du contexte qui a amené ces découvertes. Pour cette raison, Podcast Science se refuse de faire de l'actualité scientifique, estimant qu'il est plus important pour notre public de comprendre, par exemple, le contexte de la recherche en exobiologie plutôt que d'annoncer comme une révolution scientifique la détection incertaine d'une molécule dont il n'a jamais entendu parler dans une atmosphère planétaire. Enfin, il est toujours utile de rappeler, que payer des astronomes à faire de l'astrophysique avec les impôts de nos concitoyens alors que beaucoup d'entre eux ne peuvent pas correctement se nourrir ni se loger est loin d'être une évidence. Pour que ceux-ci comprennent l'intérêt de nous financer, leur rendre des comptes, de manière fréquente, sur l'utilisation que nous faisons de leur argent est un devoir moral.

Partager les connaissances est présentée comme la troisième parmi les cinq missions du CNRS listées sur [la page dédiée](#) de leur site internet rendant compte [Décret n°82-993 du 24 novembre 1982](#) portant sur l'organisation et le fonctionnement du CNRS. Le tout récent rapport de l'HCERES sur le CNRS (HCÉRES, 2023) recommande que "le CNRS devrait renforcer sa contribution au développement d'une société bien éclairée par la diffusion des connaissances et apprenante, et augmenter le niveau de sa communication à la fois avec le grand public et avec le gouvernement." On voit donc que cette mission, loin d'être secondaire, devrait occuper une place centrale dans notre métier. Or, la valeur d'un chercheur ou d'une chercheuse

se mesure encore principalement aux nombres de projets scientifiques et de publications, et l'investissement des chercheurs et chercheuses motivés à faire connaître notre domaine au plus grand nombre est souvent vu comme un risque pour sa carrière. Cette activité est donc encore souvent reléguée aux marges de notre travail, durant les soirées et les week-ends. On peut noter certaines améliorations sur ce point, avec la création depuis 3 ans de la **médaille de la médiation scientifique** qui récompense certains chercheurs et chercheuses et associations liées au CNRS pour leur implication dans la diffusion des sciences. Enfin, on peut noter que l'ANR finance maintenant certains projets ambitieux de médiation scientifique. J'ai ainsi récemment obtenu un financement (12 k€) pour créer un nouveau podcast scientifique, plus grand public que Podcast Science.

La diffusion des sciences en "aller vers" Dans le travail social, on parle du "aller vers" pour désigner l'ensemble des pratiques dont l'objectif est de faire sortir physiquement les travailleurs sociaux de leur structure pour aller à la rencontre des populations dans leurs milieux de vie (PARISSE & PORTE, 2022). L'objectif est ainsi de toucher une population qui ne connaît pas les programmes d'aide ou qui ne sait pas qu'elle y a droit par exemple. À l'opposé, beaucoup d'activité de vulgarisation comme les conférences grand public d'astrophysique, les livres de vulgarisation (ou les podcasts comme Podcast Science par exemple) cible un public déjà acquis, qui est suffisamment intéressé par et éduqué aux sciences pour aller de lui-même chercher cette information, voire parfois à payer pour y accéder. Une démarche de diffusion en "aller vers" serait au contraire d'aller toucher des publics qui ne pensent pas forcément être concernés initialement. Il est intéressant de remarquer que ces activités de "aller vers" en diffusion des sciences cible presque uniquement les enfants (intervention dans les classes par exemple). Ainsi, l'association "Les p'tits cueilleurs d'étoiles" dont je fais partie dont l'objectif est d'aller visiter les enfants hospitalisés pour leur parler des étoiles (et leur faire penser à autre chose l'espace de quelques minutes) me permet de faire de la diffusion des sciences dans des milieux sociaux beaucoup plus variés que mes autres activités de vulgarisation. Cependant, je remarque souvent que les parents présents dans les chambres (et qui ont tout autant besoin de se divertir) sont parfois aussi curieux, mais aussi souvent étonnés que je m'adresse à eux et que je réponde à leurs questions, comme s'il était sorti du champ de la vulgarisation il y a longtemps. Même si je n'ai pas de solutions faciles, je voudrais conclure ce paragraphe de réflexion sur la diffusion des sciences pour rappeler au lecteur que les formes de diffusion des sciences sont très larges et que beaucoup de travail reste encore pour toucher plus largement nos concitoyens.

2.4.1 Podcast Science

J'anime chaque semaine **PodcastScience.fm**, **émission scientifique hebdomadaire de radio** (podcast) d'une heure et demie à trois heures. Le podcast produit des émissions sur tous les domaines scientifiques et je réalise tous les contenus relatifs à la physique et à l'astrophysique, soit des dossiers préparés en amont, soit des interviews de chercheurs et de chercheuses. Sur les presque 500 numéros du podcast, j'ai dirigé environ 60 dossiers ou interviews sur ces thèmes. Nous sommes écoutés par entre 8 et 10'000 auditeurs chaque semaine et nos épisodes atteignent entre 10k et 30k écoutes au total.



Enfin, j'ai récemment obtenu 12 k€ euros dans le cadre de l'appel à propositions pour les actions de formation et de communication vers le grand public du *PEPR Origins*. Il s'agit de développer un podcast de public différent de celui de Podcast Science, touchant un public plus large et moins formé en sciences.

Liste (à peu près exhaustive) de mes dossiers :

- "Exoplanètes : de la pluralité des mondes" (**janvier 2014**).
- "Une histoire des télescopes en astronomie" (**avril 2014**).
- "Les sondes Voyager" (**octobre 2014**).
- "Émission spéciale pour la sortie d'Interstellar : la formation des trous noirs" (**novembre 2014**).
- "Richard Feynman" (**mars 2015**).
- "Hubble a 25 ans !" (**avril 2015**).
- Double épisode "Cosmographie : Où sommes-nous ?" (**novembre 2015**).
- "Sciences et Lois : La pizza est elle un légume ?" (**novembre 2015**).
- "Einstein et la physique quantique" (**avril 2016**).
- "Les sciences participatives" (**octobre 2016**).
- "Science et Lois : pourquoi Pluton est une planète dans le ciel du Nouveau-Mexique" (**mai 2017**).
- "Science et Lois : comment l'Indiana a failli légiférer sur la valeur du nombre Pi" (**août 2017**).
- "Planck, l'homme et la machine" (**octobre 2017**).
- "Publier, citer, recommencer." (**février 2019**).
- "La chercheuse et le trou noir" (**avril 2019**).
- "La naissance des planètes" (**septembre 2019**).
- "Images d'autres mondes" (**avril 2020**).
- "La polarisation" (**septembre 2020**).
- "Les Nobels 2020" (**octobre 2020**).
- "Le télescope Arécibo" (**décembre 2020**).
- "Noël en astronomie, la prédiction des événements céleste" (**décembre 2020**).
- "Les plus belles images de l'univers" (**avril 2021**).
- "Le bleu du ciel, ici-bas et sous d'autres cieux" (**mai 2021**).
- "L'astronomie créationiste" (**avril 2021**).
- "Alerte rouge, la raie H alpha" (**juin 2021**).
- "Pourquoi les étoiles ne sont pas vertes ?" (**octobre 2021**).
- "L'Univers Transparent : comment on obtient des infos sur l'espace ?" (**mars 2022**).
- "Les univers îles" (**septembre 2022**).
- "Le James Webb Space Telescope" (**septembre 2022**).
- "Marée sur le côté" (**janvier 2023**).

- “Fait-il froid dans l’espace ?” (**février 2023**).
- “Notre Ampère qui êtes aux cieux” (**septembre 2023**).
- “Le métro” (**Novembre 2023**).

J’ai également interviewé des dizaines de chercheurs, chercheuses ou vulgarisateurs scientifiques pour mes émissions :

- **Jean-Pierre Luminet** (CNRS/LAM) sur les trous noirs (**2015**)
- **Franck Ramus** (CNRS / Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique de l’ENS) sur le genre en neurobiologie (**2015**)
- **Nicolas Grandjean** (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) sur les lasers (**2015**)
- **Anaïs Rassat** (EPFL) sur la mission Euclide (**2016**)
- **Caroline Corbasson** artiste et réalisatrice, sur l’art et la science (**2016**)
- **Michele Maggiore** (Université de Genève) sur les ondes gravitationnelles (**2016**)
- **David Louapre** (chaîne Youtube *Science Étonnante*) La gravitation quantique à boucles (**2017**)
- **Jean-Philippe Uzan** (CNRS/IAP) sur plusieurs thèmes de cosmologie (**chaque année depuis 2016**)
- **Julien Girard** (STScI) sur le VLT (**2017**)
- **Nicolas Martin** (France Culture/La méthode scientifique) sur la vulgarisation scientifique (**2017**)
- **Miho Janvier** (CNAP/IAS) sur le soleil (**2018**)
- **Jean-Baptiste Siraudin** (chaîne Youtube *Scinema*) sur les relations entre la science et le cinéma (**2018**)
- **Agnès Ferté** (JPL) sur l’expansion de l’univers (**2019**)
- **Baptiste Journaux** (University of Washington, Seattle) sur la recherche de vie sur les satellites de glace (**2019**)
- **Thibault Paumard** (CNRS / LESIA) sur GRAVITY et l’interférométrie (**2020**)
- **Julien Bobroff** (Université Paris-Saclay / Laboratoire de physique des solides) sur son livre "La quantique autrement" (**2020**)
- **William Rappin** (CNRS/IRAP) sur Mars, pour l’atterrissage de Perseverance (**2021**)
- **Stéphanie Beauceron** (Institut de physique nucléaire de Lyon/université Claude Bernard) sur le CERN et la recherche en physique des particules (**2021**)
- **Sébastien Charnoz** (Université Paris Cité / IPGP) sur l’origine de la Lune (**2021**)
- **Sébastien Carassou** (chaîne Youtube Sense of Wonder) sur son livre "Le cosmos et nous" (**2021**)
- **Anastasia Rocque** (Institut Français de la Vigne et du Vin) sur le thème "vin et changement climatique" (**2022**)
- **Armelle Rancillac** (Collège de France / PSL) le sommeil (**2023**)

Enfin, nous organisons régulièrement des émissions en public pour rencontrer nos auditeurs

- “Extremely Large Telescopes : des cathédrales pour l’astronomie” en direct depuis le CERN, Genève, **Août 2014**.
- “Des œufs dans l’espace” en direct depuis le Palais de la découverte, Paris **Mai 2016**.
- “Quand votre étron s’envole : 50 ans d’ingénierie spatiale à l’épreuve de la défécation”, en direct depuis le Palais de la découverte, Paris **Mai 2017**.
- “Double Terre”, dans le cadre du festival Double Science, Paris **Mai 2021**.



FIGURE 2.1 – *Gauche* : une intervention à l’hôpital Necker avec l’association le *Les p’tits cueilleurs d’étoiles*, avec Miho Janvier (astronome, IAS/ESA) et moi-même; *Centre et Droite* : La fête de la Science 2023 à Meudon.

2.4.2 Autres investissements dans la diffusion des sciences

Les p’tits cueilleurs d’étoiles

Les p’tits cueilleurs d’étoiles sont une association créée pour faire découvrir le monde de l’espace et des étoiles aux enfants hospitalisés (hôpital Necker et Trousseau, voir Figure 2.1, gauche). J’y intervins trois ou quatre après-midis par an depuis 2020.

Revue l’Éléphant

Participation au *hors-série "Univers"* de la revue l’Éléphant : "De la lunette de Galilée au télescope Webb : 400 ans d’instruments astronomiques" (2022, 8 pages)

Exercice exoplanètes de la FEMIS

Depuis 2016, les étudiants et étudiantes des départements « Décor » et « Image » de la FEMIS (école nationale supérieure des métiers de l’image et du son) collaborent avec des chercheurs ou chercheuses de l’Observatoire de Paris dans le cadre de « l’exercice Exoplanètes », durant leur troisième année. Dans un premier temps, les astronomes de l’Observatoire de Paris aident les étudiants et étudiantes à comprendre les données scientifiques auxquelles ils sont confrontés, tout en mettant l’accent sur les spécificités esthétiques des images scientifiques. Dans un second temps, les élèves réalisent le storyboard d’une séquence et réalisent un décor d’une exoplanète en maquette et à l’échelle 1, qui est ensuite filmé par les élèves, et fait l’objet d’un travail de post-production d’effets visuels. Il s’agit de dépasser les traditionnels « regards d’artistes » pour proposer une représentation visuelle respectueuse des observations scientifiques, ce qui n’exclut

pas la part créative propre au travail cinématographique. J'ai fait partie des chercheurs et chercheuses intervenants lors des deux dernières productions pour discuter et guider les élèves de la FEMIS.

Fête de la Science

Après plusieurs participations en tant que volontaire, j'ai pris la direction de l'organisation de la **Fête de la Science en octobre 2023** à l'observatoire de Paris, à Meudon. Cet évènement a accueilli plus de 720 élèves les jeudi 12 et vendredi 13 octobre 2023 et plus de 500 personnes du grand public le samedi 14 octobre. En 2023, et pour la première fois depuis plus de 20 ans, la grande lunette du château de Meudon a ouvert ses portes au public (Figure 2.1, centre). L'organisation de cet évènement a pris plusieurs semaines de travail dans mon emploi du temps.

Autres interventions :

- Intervention sur la chaîne Youtube CNRS (zeste de Science) en 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=J9X8xYoa72Q>
- Interview sur RFI (2021) Comment partager les étoiles <https://www.rfi.fr/fr/podcasts/autour-de-la-question/20210414-comment-partager-les-%C3%A9toiles?ref=tw>
- Intervention au workshop Comscicom en 2021, atelier de communication scientifique à destination des doctorants et doctorantes <https://france.comscicon.com/edition-2020/>
- Interventions dans des classes régulièrement
- Expert associé pour **Amazonies Spatiales**, une résidence d'écriture mettant en relation des auteurs et des autrices avec des experts et expertes de l'univers et de l'exploration spatiale pour publier un recueil de récits prospectifs autour de notre rapport à l'univers.
- Membre du jury du concours **Astro à l'école**

2.5 Management de la recherche

De trop nombreux chercheurs et chercheuses déclarent encore être témoins ou victimes de comportements de travail toxiques dans le milieu académique. Selon MOSS & MAHMOUDI (2021), 84 % des chercheurs et chercheuses interviewés reportent avoir été victimes de comportements inappropriés de la part de leur encadrement (*abusive supervision*) et 49 % en ont été témoin (travail réalisé sur plus de 2000 jeunes chercheurs et chercheuses venant pour la plupart d'université américaines). Il est intéressant de noter que ces comportements sont apparemment plus fréquents dans les institutions les plus prestigieuses aux États-Unis et qu'en proportion les auteurs sont autant des femmes que des hommes (bien que les femmes en soient plus fréquemment victimes). Ces chiffres sont aussi confirmés en Europe (voir le sondage récent IPSOS / l'Oréal réalisé en majorité en Europe et plus précisément sur le harcèlement sexiste, non publié dans un journal à comité de lecture¹) et dans ma propre communauté : LEBoulleux et al. (2020) montre que 48 +/- 9 % des chercheuses et 25 +/- 5 % des chercheurs rapportent avoir subi des comportements inappropriés (sondage réalisé durant la plus grosse conférence de mon domaine, le *Spirit of Lyot*, en 2019). Comme le notent KEASHLY & NEUMAN (2010), ces

1. <https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2023-03/Ipsos-Fondation-Loreal-Harcelement-Sexisme-monde-scientifique.pdf>

comportements de harcèlement (*bullying* dans l'étude) sont significativement plus présents dans le milieu académique que dans la population générale et ne concernent pas que les étudiants, l'étude pointant des situations fréquentes de harcèlement entre collègues permanents et envers les administratifs. Les causes identifiées par ces mêmes auteurs sont multiples :

- le climat de compétition pour de faibles ressources (financements, accès au télescope dans notre domaine, ou postes permanents pour les jeunes chercheurs) favorise les situations de harcèlement envers les personnels aux statuts les plus fragiles,
- même si les comportements inappropriés de certains chercheurs sont souvent identifiés dans les laboratoires, les valeurs cardinales que sont l'autonomie et indépendance du chercheur, valorisées et –intensément– sélectionnées, empêchent souvent leurs collègues de formuler ces critiques et aux chercheurs de les accepter. Donner un avis critique sur la performance d'un collègue apparaît ainsi comme un signe de manque de respect, que ce soit sur la recherche, mais aussi sur sa façon d'interagir avec ses collègues,
- le manque de formation des chercheurs aux "méthodes de résolution des problèmes, de recherche de consensus, de négociation et de médiation" (traduction personnelle). Ces notions sont des cours de base des formations au management, mais les chercheurs n'y ont souvent pas eu accès dans leur cursus.

Ces trois points apparaissent de manière répétée dans le livre de témoignages terrifiants, récemment publié : "Comment l'université broie les jeunes chercheurs" (COMBES, 2022). Ce livre présente les résultats d'une étude (non référée) issue d'un questionnaire sur plusieurs milliers de doctorants et doctorantes ou jeunes docteurs et docteuses en France, mais est centré sur les témoignages particulièrement éprouvants de trois anciens doctorants et doctorantes. Il propose peu de solutions faciles à mettre en œuvre, mais est instructif pour toute personne encadrant une thèse sur ce qu'il ne faut surtout pas faire. L'article "Ten simple rules towards healthier research labs" (MAESTRE, 2019) propose quant à lui une liste de solutions pour améliorer les pratiques dans les laboratoires de recherche.

Selon la méta-analyse de SATINSKY et al. (2021), la proportion d'étudiants et d'étudiantes en thèse montrant des signes de dépression serait aussi élevé que 24 % (chiffre issu de la méta-analyse portant sur 16 études faisant état de la prévalence de symptômes de dépression cliniquement significatifs et portant sur 23 469 doctorants et doctorantes au total sur des pays d'amérique du nord, d'europe et d'Asie et d'Océanie), bien au-delà des proportions observées dans la population générale. Même si les problèmes d'encadrement ne sont certainement pas les seules causes (le doctorat est un travail exigeant qui demande une grande résilience de la part des personnes candidates), ce chiffre est alarmant. S'il est difficile à mon niveau personnel de lutter contre des pratiques manifestement trop fréquentes dans la recherche, j'ai souhaité commencer à me familiariser aux notions évoquées dans ce paragraphe en suivant une formation de quelques jours à l'encadrement dans la recherche en 2022 donnée par l'association [Bernard Gregory](#).

Il ne faut enfin pas interpréter ce paragraphe non exhaustif sur la question de la santé mentale et du harcèlement dans la recherche comme une critique spécifique de mon laboratoire actuel (dans lequel j'ai eu d'ailleurs la chance d'effectuer moi-même ma thèse dans de très bonnes conditions) mais comme une mise en garde personnelle alors que je commence à mon tour à encadrer des jeunes chercheurs et chercheuses et à diriger des projets.

À propos du manque de compétences des chercheurs et chercheuses en management de projets et d'équipes, COMBES (2022) écrit : "De nombreux docteurs finissent par acquérir les

compétences nécessaires à la gestion de projet, mais dans un milieu où le temps et l'argent sont des denrées rares, et où tant de chercheurs sont dépassés par la charge de travail, généraliser les formations à la gestion de projets semble indispensable." Elle note enfin que le diplôme de l'habilitation à diriger des recherches (HDR) pourrait justement avoir cette ambition : "En outre, l'obtention de l'HDR devrait être conditionnée à la validation d'examens portant sur les compétences en gestion de projets, pédagogie, éthique scientifique et management de personnes".

2.6 Jeunes chercheurs et chercheuses encadrés

2.6.1 Post-doctorants et post-doctorantes

Iva Laginja  (Depuis 2022)

Polychromatic dark-hole correction on the THD2 testbed

Iva Laginja est une post-doctorante CNES que j'encadre depuis Mars 2022 au LESIA. Le projet d'Iva est de réaliser des *Dark-Holes* sur le banc THD du LESIA en lumière polychromatique. Il s'agit de comprendre les limites chromatiques du banc et de tenter de les dépasser avec des algorithmes plus performants, dont ceux issus de MAZOYER et al., 2018a. En particulier, elle m'aide fortement dans le développement du code *Asterix* (voir section 1.2.1.3) et la mise à jour du système informatique contrôlant le banc THD2 (voir section 1.3.4). Dans ce cadre, vient de remporter un appel d'offre (interne au LESIA) pour un nouvel ordinateur fixe contrôlant le banc.

2.6.2 Doctorants ou doctorantes pour lesquels je suis l'un des encadrants officiels

Yann Gutierrez (Depuis 2022)

Apprentissage profond pour la mesure et la correction de surface d'ondes en vue de l'imagerie d'exoplanètes Yann Gutierrez a commencé sa thèse avec moi en 2022 (co-encadrement Laurent Mugnier, Olivier Herscovici-Schiller et Baptiste Abeloos de l'ONERA), avec une bourse *Data Intensive Artificial Intelligence* (DIAI) que j'ai obtenu auprès de l'université Paris Cité. Yann a la particularité d'être un doctorant de l'école doctorale "Astronomie et Astrophysique Île-de-France" en instrumentation optique qui n'a jamais étudié ni l'astronomie, ni l'optique. Il a suivi une formation "Traitement d'Image et du Son et Intelligence Artificielle" et cet encadrement a immédiatement pris la tournure d'une collaboration mutuellement bénéfique où Yann nous forme au *Machine Learning* alors que nous le formons à l'instrumentation optique pour les télescopes. Il explore durant sa thèse des algorithmes de contrôle et d'estimation du champ électrique pour créer des *Dark-Hole* plus efficacement (voir section 1.3.2).

Sophia Stasevic (Depuis 2021)

Recherche de disques circumstellaires en imagerie directe

Sophia est actuellement en début de troisième année de thèse et je la co-encadre avec Anne-Marie Lagrange et Julien Milli. Le cœur de son sujet est la sélection de références et les algorithmes de traitement pour traiter l'archive SPHERE avec la méthode RDI (voir section 1.3.1). En 2022, elle a publié son premier papier (STASEVIC et al., 2023) sur l'analyse du disque de

débris HD 110058, qui présente un *warp* qui peut être un signe de la présence d'une géante gazeuse.

2.6.3 Doctorants ou doctorantes pour lesquels j'ai participé à l'encadrement de manière non-officielle

Justin Hom  (2019 - 2023)

GPI debris disk survey analysis in total intensity

Le sujet de la thèse de Justin à *Arizona State University* était les disques de débris en imagerie directe avec GPI. Étant moi-même un expert de cet instrument pour l'analyse des disques de débris et les effets des algorithmes de post-traitement, j'ai commencé à l'encadrer sur ces aspects en 2019. Durant ma dernière année de post-doctorat, j'ai écrit une demande de financement au JPL pour le financer pendant trois ans (sa thèse américaine étant seulement en partie financée à l'époque). Cette demande a échoué mais sa directrice (J. Patience, ASU) a pu le financer par d'autres sources, alors que je rentrais en France. Notre collaboration a cependant continué, avec une visite en France en février 2020 au début de ma prise de poste au CNRS pour développer les aspects *Reference Differential Imaging* dans le code Disk-FM (MAZOYER et al., 2020), puis de manière hebdomadaire pour la ré-analyse complète du programme disque LLP grâce en partie à DiskFM (HOM et al., 2024). Cette analyse est quasiment finie et devrait mener à une publication sous peu (Hom et al. soumis). Justin a soutenu en Juin 2023 et continue sa recherche en post-doctorat au Steward Observatory à Tucson, AZ.

Kevin Fogarty  (2016 - 2017)

High-Throughput Coronagraphs for obscured coronagraphs

Étudiant à *Johns Hopkins University* initialement sur les noyaux de galaxies, K. Fogarty m'a demandé de l'encadrer durant sa dernière année de thèse sur un développement théorique de nouveaux coronagraphes de type Vortex pour les pupilles avec larges obstructions centrales. Cet aspect était particulièrement intéressant pour moi et complémentaire de mon travail à l'époque, étant plus particulièrement intéressé par les techniques actives de correction des pupilles complexes. Cet encadrement a mené à une collaboration qui a ensuite continué après sa soutenance en 2017, durant son premier post-doctorat, au STScI, puis la *Caltech Prize Postdoctoral Fellowship* à Caltech (FOGARTY et al., 2017a,b, 2018, 2020). Kevin est maintenant chercheur en coronographie à NASA Ames, poste pour lequel je lui ai écrit une lettre de recommandation.

2.6.4 Stagiaires de Master 2

Clara Puerto Sanchez (2022)

What can we learn from direct imaging observations of exoplanetary debris disks ?

L'extraction des paramètres des disques à partir d'images d'observation haut-contraste est un problème compliqué, non seulement par les biais introduits lors du post-traitement des images (MAZOYER et al., 2020), mais aussi directement par la perte d'informations due à l'orientation du disque et à la résolution de l'instrument. Afin d'étudier ce phénomène, ce projet a exploré le scénario idéal dans lequel le bruit et les paramètres originaux du disque sont parfaitement connus, et il vise à identifier les scénarios problématiques potentiels pour une résolution angulaire donnée.

Dans ce stage, nous avons exploré un espace de phase contenant les paramètres géométriques des disques afin de comprendre quels étaient les paramètres qu'il était possible de récupérer pour une géométrie donnée. Nous avons pour cela utilisé un formalisme de *Markov Chain Monte Carlo*. Ensuite, un modèle avec des résultats non problématiques (pas trop incliné ni trop de face) a été choisi pour analyser les incertitudes "minimales" sur l'extraction de ces paramètres. Enfin, un accent particulier est mis sur le lien entre les différents paramètres étudiés pour les variables de diffusion (*fonction de diffusion*).

Valentine Auphan (2022)

Projet artistique "Les lumaissances"

En 2021, une étudiante de l'École nationale supérieure des Arts Décoratifs - PSL s'est inscrite à la semaine de cours exoplanètes pour des étudiants de niveau Master de PSL que j'organise. Cette étudiante, Valentine Auphan, n'espérait certes pas tout comprendre, mais était très motivée pour suivre ce cours et en tirer l'inspiration pour son projet de stage de Master qu'elle souhaitait effectuer sur le thème de l'astronomie durant la majorité de son année.

À la suite de ce cours, nous avons initié une collaboration sur son projet de Master, à laquelle j'ai apporté une expertise dans le domaine de l'astrophysique, de ses lieux et de ses outils. Le projet de Valentine m'a particulièrement intéressé, car elle a immédiatement dépassé les représentations artistiques traditionnelles de l'espace (les « vues d'artiste »). Valentine, quant à elle, s'est rapidement intéressée non aux seuls objets d'études de l'astrophysique, mais aux processus mêmes de la création de la connaissance en astrophysique. En interrogeant notre rapport aux outils d'observations (les coupoles, les télescopes), les différents accès à l'univers (visuels, sonores) voire à notre langage scientifique, elle a souhaité étudier non seulement l'univers, mais notre accès à celui-ci. Son travail, nourri de ses expériences personnelles d'observations et de ses contacts avec le domaine des sciences formelles, questionne selon moi la façon dont notre espèce terrestre se donne les moyens d'accéder à cet univers, qui forme le cœur de l'astronomie en général et de mon travail de recherche en instrumentation en particulier. Elle vient d'être acceptée en **Doctorat en études pratiques des arts** à l'Université du Québec à Montréal (UQAM), pour lequel je l'avais recommandé.

Le projet sur le site des arts-décos : <https://www.ensad.fr/en/projets/luminaissances>

Benjamin Roman (2021)

Développement de masques coronographiques Roman pour le banc THD2

Les travaux effectués lors de ce stage s'inscrivent dans le développement d'un simulateur du *Roman Space Telescope* sur le banc THD2. L'instrument coronographique Roman CGI inclut plusieurs coronographes, parmi lesquels un *Hybrid Lyot coronagraph* (HLC) et *Shaped Pupil coronagraph* (SPC). Ces deux coronographes reposent sur des composants optiques précisément conçus pour limiter l'impact de la pupille de Roman sur les performances en contraste. Ce stage a été orienté autour de la caractérisation précise de masques binaires (achetés à l'entreprise Mécachimique) ou de phase (fabriqués par le GEPI) avant leur intégration sur le banc.

Bibliographie

- ALLAN, G., KANG, I., DOUGLAS, E. S., BARBASTATHIS, G. & CAHOY, K. (2020a). « Deep Residual Learning for Low-Order Wavefront Sensing in High-Contrast Imaging Systems ». *Optics Express* 28.18, p. 26267-26283. DOI : [10.1364/OE.397790](https://doi.org/10.1364/OE.397790).
- ALLAN, G., KANG, I., DOUGLAS, E. S. et al. (2020b). « Deep Neural Networks to Improve the Dynamic Range of Zernike Phase-Contrast Wavefront Sensing in High-Contrast Imaging Systems ». *Proceedings of the SPIE*. T. 11443. SPIE, p. 743-753. DOI : [10.1117/12.2562927](https://doi.org/10.1117/12.2562927).
- ALVAREZ DIEZ, C., SHAO, F. & BILLE, J. (2008). « Pyramid and Hartmann–Shack Wavefront Sensor with Artificial Neural Network for Adaptive Optics ». *Journal of Modern Optics* 55.4-5, p. 683-689. DOI : [10.1080/09500340701608073](https://doi.org/10.1080/09500340701608073).
- ANDERSEN, T. E., OWNER-PETERSEN, M. & ENMARK, A. (2020). « Image-Based Wavefront Sensing for Astronomy Using Neural Networks ». *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 6.3, p. 034002. DOI : [10.1117/1.JATIS.6.3.034002](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.6.3.034002).
- ANGEL, J. R. P., WIZINOWICH, P., LLOYD-HART, M. & SANDLER, D. (1990). « Adaptive Optics for Array Telescopes Using Neural-Network Techniques ». *Nature* 348.6298, p. 221-224. DOI : [10.1038/348221a0](https://doi.org/10.1038/348221a0).
- ARRIAGA, P., FITZGERALD, M. P., DUCHÊNE, G. et al. (2020). « Multiband Polarimetric Imaging of HR 4796A with the Gemini Planet Imager ». *The Astronomical Journal* 160, p. 79. DOI : [10.3847/1538-3881/ab91b1](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab91b1).
- BABA, N. & MURAKAMI, N. (2003). « A Method to Image Extrasolar Planets with Polarized Light ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 115.814, p. 1363-1366. DOI : [10.1086/380422](https://doi.org/10.1086/380422).
- BAILEY, V. P., HILDEBRANDT RAFELS, S., NEMATI, B. & KERN, B. (2018). *CGI-flux-ratio-plot*. URL : <https://github.com/nasavbailey/DI-flux-ratio-plot>.
- BAUDOZ, P., BOCCALETTI, A., BAUDRAND, J. & ROUAN, D. (2006). « The Self-Coherent Camera : A New Tool for Planet Detection ». *Proceedings of the IAU Colloquium*, p. 553-558. DOI : [10.1017/S174392130600994X](https://doi.org/10.1017/S174392130600994X).
- BAUDOZ, P., MAZOYER, J., MAS, M., GALICHER, R. & ROUSSET, G. (2012). « Dark Hole and Planet Detection : Laboratory Results Using the Self-Coherent Camera ». *Proceedings of the SPIE*. T. 8446, p. 84468C. DOI : [10.1117/12.926575](https://doi.org/10.1117/12.926575).
- BEICHMAN, C. A., RIEKE, M., EISENSTEIN, D. et al. (2012). « Science Opportunities with the Near-IR Camera (NIRCam) on the James Webb Space Telescope (JWST) ». *Proceedings of the SPIE*. T. 8442. SPIE, p. 973-983. DOI : [10.1117/12.925447](https://doi.org/10.1117/12.925447).
- BETTI, S. K., FOLLETTE, K., JORQUERA, S. et al. (2022). « Detection of Near-infrared Water Ice at the Surface of the (Pre)Transitional Disk of AB Aur : Informing Icy Grain Abundance, Composition, and Size ». *The Astronomical Journal* 163.4, p. 145. DOI : [10.3847/1538-3881/ac4d9b](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac4d9b).
- BEUZIT, J.-L., VIGAN, A., MOUILLET, D. et al. (2019). « SPHERE : The Exoplanet Imager for the Very Large Telescope ». *Astronomy and Astrophysics* 631, A155. DOI : [10.1051/0004-6361/201935251](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935251).
- BOCCALETTI, A., CHAUVIN, G., MOUILLET, D. et al. (2020). « SPHERE+ : Imaging Young Jupiters down to the Snowline ». *arXiv e-prints* 2003, arXiv :2003.05714. DOI : [10.48550/arXiv.2003.05714](https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.05714).
- BOCCALETTI, A., COSSOU, C., BAUDOZ, P. et al. (2022). « JWST/MIRI Coronagraphic Performances as Measured on-Sky ». *Astronomy and Astrophysics* 667, A165. DOI : [10.1051/0004-6361/202244578](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244578).

- BOCCALETTI, A., LAGAGE, P.-O., BAUDOZ, P. et al. (2015). « The Mid-Infrared Instrument for the James Webb Space Telescope, V : Predicted Performance of the MIRI Coronagraphs ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 127, p. 633. DOI : [10.1086/682256](https://doi.org/10.1086/682256).
- BORDÉ, P. J. & TRAUB, W. A. (2006). « High-Contrast Imaging from Space : Speckle Nulling in a Low-Aberration Regime ». *The Astrophysical Journal* 638.1, p. 488. DOI : [10.1086/498669](https://doi.org/10.1086/498669).
- BORN, M., WOLF, E. & BHATIA, A. B. (1999). *Principles of Optics : Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press.
- BOTTOM, M., FEMENIA, B., HUBY, E. et al. (2016). « Speckle Nulling Wavefront Control for Palomar and Keck ». *Proceedings of the SPIE*. T. 9909. SPIE, p. 1507-1522. DOI : [10.1117/12.2233025](https://doi.org/10.1117/12.2233025).
- BRUZZONE, J. S., METCHEV, S., DUCHÊNE, G. et al. (2020). « Imaging the 44 Au Kuiper Belt Analog Debris Ring around HD 141569A with GPI Polarimetry ». *The Astronomical Journal* 159, p. 53. DOI : [10.3847/1538-3881/ab5d2e](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab5d2e).
- CANTALLOUBE, F., DOHLEN, K., MILLI, J., BRANDNER, W. & VIGAN, A. (2019). « Peering through SPHERE Images : A Glance at Contrast Limitations ». *The Messenger* 176, p. 25-31. DOI : [10.18727/0722-6691/5138](https://doi.org/10.18727/0722-6691/5138).
- CANTALLOUBE, F., GOMEZ-GONZALEZ, C., ABSIL, O. et al. (2020). « Exoplanet Imaging Data Challenge : Benchmarking the Various Image Processing Methods for Exoplanet Detection ». *Proceedings of the SPIE*, p. 321. DOI : [10.1117/12.2574803](https://doi.org/10.1117/12.2574803). eprint : [2101.05080](https://arxiv.org/abs/2101.05080).
- CANTERO, C., ABSIL, O., DAHLQVIST, C.-H. & VAN DROOGENBROECK, M. (2023). *NA-SODINN : A Deep Learning Algorithm for Exoplanet Image Detection Based on Residual Noise Regimes*. DOI : [10.48550/arXiv.2302.02854](https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.02854).
- CARSON, J., THALMANN, C., JANSON, M. et al. (2013). « Direct Imaging Discovery of a "Super-Jupiter" around the Late B-type Star κ And ». *The Astrophysical Journal Letters* 763, p. L32. DOI : [10.1088/2041-8205/763/2/L32](https://doi.org/10.1088/2041-8205/763/2/L32).
- CARTER, A. L., HINKLEY, S., KAMMERER, J. et al. (2023). « The JWST Early Release Science Program for Direct Observations of Exoplanetary Systems I : High-contrast Imaging of the Exoplanet HIP 65426 b from 2 to 16 μm ». *The Astrophysical Journal Letters* 951.1, L20, p. L20. DOI : [10.3847/2041-8213/acc93e](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acc93e).
- CHAMBOULEYRON, V., FAUVARQUE, O., SAUVAGE, J.-F., NEICHEL, B. & FUSCO, T. (2021). « Focal-Plane-Assisted Pyramid Wavefront Sensor : Enabling Frame-by-Frame Optical Gain Tracking ». *Astronomy and Astrophysics* 649, A70. DOI : [10.1051/0004-6361/202140354](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140354).
- CHAUVIN, G., DESIDERA, S., LAGRANGE, A.-M. et al. (2017). « Discovery of a Warm, Dusty Giant Planet around HIP 65426 ». *Astronomy and Astrophysics* 605, p. L9. DOI : [10.1051/0004-6361/201731152](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731152).
- CHAUVIN, G., LAGRANGE, A.-M., DUMAS, C. et al. (2004). « A Giant Planet Candidate near a Young Brown Dwarf. Direct VLT/NACO Observations Using IR Wavefront Sensing ». *Astronomy and Astrophysics* 425, p. L29-L32. DOI : [10.1051/0004-6361:200400056](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200400056).
- CHEN, C., MAZOYER, J., POTEET, C. A. et al. (2020). « Multiband GPI Imaging of the HR 4796A Debris Disk ». *The Astrophysical Journal* 898.1, p. 55. DOI : [10.3847/1538-4357/ab9aba](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9aba).
- CHEN, J. & KIPPING, D. (2017). « Probabilistic Forecasting of the Masses and Radii of Other Worlds ». *The Astrophysical Journal* 834, p. 17. DOI : [10.3847/1538-4357/834/1/17](https://doi.org/10.3847/1538-4357/834/1/17).
- CHILCOTE, J., KONOPACKY, Q., FITZSIMMONS, J. et al. (2022). « GPI 2.0 : Upgrade Status of the Gemini Planet Imager ». *Proceedings of the SPIE*. T. 12184. SPIE, p. 635-649. DOI : [10.1117/12.2630159](https://doi.org/10.1117/12.2630159).
- CHOQUET, É., PERRIN, M. D., CHEN, C. H. et al. (2016). « First Images of Debris Disks around TWA 7, TWA 25, HD 35650, and HD 377 ». *The Astrophysical Journal Letters* 817, p. L2. DOI : [10.3847/2041-8205/817/1/L2](https://doi.org/10.3847/2041-8205/817/1/L2).
- CLOSE, L. M., GASHO, V., KOPON, D. et al. (2010). « The Magellan Telescope Adaptive Secondary AO System : A Visible and Mid-IR AO Facility ». *Proceedings of the SPIE*. T. 7736. SPIE, p. 58-69. DOI : [10.1117/12.857924](https://doi.org/10.1117/12.857924).
- COMBES, A. B. (2022). *Comment l'université broie les jeunes chercheurs*. Autrement, ISBN : 9782080270474. URL : www.autrement.com/comment-luniversite-broie-les-jeunes-chercheurs/9782080270474.

- CROTTS, K. A., DRAPER, Z. H., MATTHEWS, B. C. et al. (2022). « A Multiwavelength Study of the Highly Asymmetrical Debris Disk around HD 111520 ». *The Astrophysical Journal* 932.1, 23, p. 23. DOI : [10.3847/1538-4357/ac6c86](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac6c86).
- CURRIE, T., GRADY, C. A., CLOUTIER, R. et al. (2016). « The Matryoshka Disk : Keck/NIRC2 Discovery of a Solar-system-scale, Radially Segregated Residual Protoplanetary Disk around HD 141569A ». *The Astrophysical Journal Letters* 819, p. L26. DOI : [10.3847/2041-8205/819/2/L26](https://doi.org/10.3847/2041-8205/819/2/L26).
- DELORME, J. R., GALICHER, R., BAUDOZ, P. et al. (2014). « High-Contrast Imaging in Wide Spectral Band with a Self-Coherent Camera and Achromatic Coronagraphs ». *Proceedings of the SPIE*. T. 9151, 91515Q. DOI : [10.1117/12.2056846](https://doi.org/10.1117/12.2056846).
- DELORME, J. R., GALICHER, R., BAUDOZ, P. et al. (2016a). « Focal Plane Wavefront Sensor Achromatization : The Multireference Self-Coherent Camera ». *Astronomy and Astrophysics* 588, A136. DOI : [10.1051/0004-6361/201527657](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527657).
- DELORME, J. R., N'DIAYE, M., GALICHER, R. et al. (2016b). « Laboratory Validation of the Dual-Zone Phase Mask Coronagraph in Broadband Light at the High-Contrast Imaging THD Testbed ». *Astronomy and Astrophysics* 592, A119. DOI : [10.1051/0004-6361/201628587](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628587).
- DEO, V., GENDRON, É., ROUSSET, G. et al. (2019). « A Telescope-Ready Approach for Modal Compensation of Pyramid Wavefront Sensor Optical Gain ». *Astronomy and Astrophysics* 629, A107. DOI : [10.1051/0004-6361/201935847](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935847).
- DESIDERA, S., CHAUVIN, G., BONAVITA, M. et al. (2021). « The SPHERE Infrared Survey for Exoplanets (SHINE). I. Sample Definition and Target Characterization ». *Astronomy and Astrophysics* 651, A70. DOI : [10.1051/0004-6361/202038806](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038806).
- ERTEL, S., DEFRÈRE, D., HINZ, P. et al. (2020). « The HOSTS Survey for Exozodiacal Dust : Observational Results from the Complete Survey ». *The Astronomical Journal* 159, p. 177. DOI : [10.3847/1538-3881/ab7817](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab7817).
- ESPOSITO, S., PUGLISI, A., PINNA, E. et al. (2020a). « On-Sky Correction of Non-Common Path Aberration with the Pyramid Wavefront Sensor ». *Astronomy & Astrophysics* 636, A88. DOI : [10.1051/0004-6361/201937033](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937033).
- ESPOSITO, T. M., KALAS, P., FITZGERALD, M. P. et al. (2020b). « Debris Disk Results from the Gemini Planet Imager Exoplanet Survey Polarimetric Imaging Campaign ». *The Astronomical Journal* 160.1, p. 24. DOI : [10.3847/1538-3881/ab9199](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9199).
- FERREIRA, F., GENDRON, E., ROUSSET, G. & GRATADOUR, D. (2018). « Numerical Estimation of Wavefront Error Breakdown in Adaptive Optics ». *Astronomy and Astrophysics* 616, A102. DOI : [10.1051/0004-6361/201832579](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832579).
- FLASSEUR, O., BODRITO, T., MAIRAL, J. et al. (2023). *deep PACO : Combining statistical models with deep learning for exoplanet detection and characterization in direct imaging at high contrast*. DOI : [10.48550/arXiv.2303.02461](https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.02461).
- FLASSEUR, O., THÉ, S., DENIS, L., THIÉBAUT, É. & LANGLOIS, M. (2021). « REXPACO : An Algorithm for High Contrast Reconstruction of the Circumstellar Environment by Angular Differential Imaging ». *Astronomy and Astrophysics* 651, A62. DOI : [10.1051/0004-6361/202038957](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038957).
- FOGARTY, K., MAWET, D., MAZOYER, J. et al. (2020). « Towards High Throughput and Low-Order Aberration Robustness for Vortex Coronagraphs with Central Obstructions ». *Proceedings of the SPIE*. T. 11443, 114433Y. DOI : [10.1117/12.2563180](https://doi.org/10.1117/12.2563180).
- FOGARTY, K., MAZOYER, J., LAURENT, K. S. et al. (2018). « Optimal Deformable Mirror and Pupil Apodization Combinations for Apodized Pupil Lyot Coronagraphs with Obstructed Pupils ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10698, 106981J. DOI : [10.1117/12.2314394](https://doi.org/10.1117/12.2314394).
- FOGARTY, K., PUEYO, L., MAZOYER, J. & N'DIAYE, M. (2017a). « Polynomial Apodizers for Centrally Obscured Vortex Coronagraphs ». *The Astronomical Journal* 154, p. 240. DOI : [10.3847/1538-3881/aa9063](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa9063).
- FOGARTY, K., PUEYO, L., MAZOYER, J. & N'DIAYE, M. (2017b). « Tip/Tilt Optimizations for Polynomial Apodized Vortex Coronagraphs on Obscured Telescope Pupils ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10400, p. 224-240. DOI : [10.1117/12.2274603](https://doi.org/10.1117/12.2274603).

- FRANSON, K., BOWLER, B. P., ZHOU, Y. et al. (2023). « Astrometric Accelerations as Dynamical Beacons : A Giant Planet Imaged inside the Debris Disk of the Young Star AF Lep ». *The Astrophysical Journal Letters* 950.2, p. L19. DOI : [10.3847/2041-8213/acd6f6](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acd6f6).
- FULTON, B. J., ROSENTHAL, L. J., HIRSCH, L. A. et al. (2021). « California Legacy Survey. II. Occurrence of Giant Planets beyond the Ice Line ». *The Astrophysical Journal Supplement Series* 255.1, p. 14. DOI : [10.3847/1538-4365/abfcc1](https://doi.org/10.3847/1538-4365/abfcc1).
- FUSCO, T., SAUVAGE, J.-F., PETIT, C. et al. (2014). « Final Performance and Lesson-Learned of SAXO, the VLT-SPHERE Extreme AO : From Early Design to on-Sky Results ». *Proceedings of the SPIE*. T. 9148. International Society for Optics and Photonics, 91481U. DOI : [10.1117/12.2055423](https://doi.org/10.1117/12.2055423).
- GALICHER, R., BAUDOZ, P., DELORME, J.-R. et al. (2019). « Minimization of Non-Common Path Aberrations at the Palomar Telescope Using a Self-Coherent Camera ». *Astronomy and Astrophysics* 631, A143. DOI : [10.1051/0004-6361/201936282](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936282).
- GALICHER, R., HUBY, E., BAUDOZ, P. & DUPUIS, O. (2020). « A Family of Phase Masks for Broadband Coronagraphy Example of the Wrapped Vortex Phase Mask Theory and Laboratory Demonstration ». *Astronomy and Astrophysics* 635, A11. DOI : [10.1051/0004-6361/201936971](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936971).
- GALICHER, R. & BAUDOZ, P. (2007). « Expected Performance of a Self-Coherent Camera ». *Comptes Rendus Physique* 8, p. 333-339. DOI : [10.1016/j.crhy.2007.03.004](https://doi.org/10.1016/j.crhy.2007.03.004).
- GALICHER, R. & MAZOYER, J. (2023). « Imaging Exoplanets with Coronagraphic Instruments ». *Comptes Rendus. Physique* 24.S2, p. 1-45. DOI : [10.5802/crphys.133](https://doi.org/10.5802/crphys.133).
- GAUDI, B. S., SEAGER, S., MENNESSON, B. et al. (2020). « The Habitable Exoplanet Observatory (HabEx) Mission Concept Study Final Report ». *arXiv e-prints* arXiv :2001.06683. DOI : [10.48550/arXiv.2001.06683](https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.06683).
- GIVE'ON, A., BELIKOV, R., SHAKLAN, S. & KASDIN, J. (2007). « Closed Loop, DM Diversity-Based, Wavefront Correction Algorithm for High Contrast Imaging Systems ». *Optics Express* 15.19, p. 12338-12343. DOI : [10.1364/OE.15.012338](https://doi.org/10.1364/OE.15.012338).
- GONZALEZ, C. A. G., ABSIL, O. & DROOGENBROECK, M. V. (2018). « Supervised Detection of Exoplanets in High-Contrast Imaging Sequences ». *Astronomy & Astrophysics* 613, A71. DOI : [10.1051/0004-6361/201731961](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731961).
- GOODFELLOW, I. J., POUGET-ABADIE, J., MIRZA, M. et al. (2014). *Generative Adversarial Networks*. DOI : [10.48550/arXiv.1406.2661](https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661).
- GOULAS, C., VIDAL, F., GALICHER, R. et al. (2023). « SAXO+ upgrade : second stage AO system end-to-end numerical simulations ». *Proceedings of the 7th AO4ELT Conference*. arXiv : [2310.15765](https://arxiv.org/abs/2310.15765) [astro-ph.IM].
- GRADY, C. A., PROFFITT, C. R., MALUMUTH, E. et al. (2003). « Coronagraphic Imaging with the Hubble Space Telescope and the Space Telescope Imaging Spectrograph ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 115, p. 1036-1049. DOI : [10.1086/377083](https://doi.org/10.1086/377083).
- GRAVITY COLLABORATION, GANCI, V., LABADIE, L. et al. (2021). « The GRAVITY young stellar object survey. VIII. Gas and dust faint inner rings in the hybrid disk of HD141569 ». *Astronomy and Astrophysics* 655, A112, A112. DOI : [10.1051/0004-6361/202141103](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141103).
- GREENBERG, J. M. & LI, A. (1999). « Morphological Structure and Chemical Composition of Cometary Nuclei and Dust ». *Space Science Reviews* 90, p. 149. DOI : [10.1023/A:1005298014670](https://doi.org/10.1023/A:1005298014670).
- GROFF, T. D., ELDORADO RIGGS, A. J., KERN, B. & JEREMY KASDIN, N. (2016). « Methods and Limitations of Focal Plane Sensing, Estimation, and Control in High-Contrast Imaging ». *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 2, p. 011009. DOI : [10.1117/1.JATIS.2.1.011009](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.2.1.011009).
- GUYON, O. (2005). « Limits of Adaptive Optics for High-Contrast Imaging ». *The Astrophysical Journal* 629, p. 592-614. DOI : [10.1086/431209](https://doi.org/10.1086/431209).
- GUYON, O. (2018a). « Extreme Adaptive Optics ». *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 56, p. 315. DOI : [10.1146/annurev-astro-081817-052000](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-052000).

- GUYON, O. (2018b). « Imaging with Adaptive Optics and Coronagraphs for Exoplanet Research ». *Handbook of Exoplanets*. Sous la dir. de H. J. DEEG & J. A. BELMONTE. Cham : Springer International Publishing, p. 1-20. DOI : [10.1007/978-3-319-30648-3_112-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30648-3_112-1).
- GUYON, O., PLUZHNIK, E. A., GALICHER, R. et al. (2005). « Exoplanet Imaging with a Phase-induced Amplitude Apodization Coronagraph. I. Principle ». *The Astrophysical Journal* 622.1, p. 744-758. DOI : [10.1086/427771](https://doi.org/10.1086/427771).
- HAFFERT, S. Y. (2016). « Generalised Optical Differentiation Wavefront Sensor : A Sensitive High Dynamic Range Wavefront Sensor ». *Optics Express* 24.17, p. 18986-19007. DOI : [10.1364/OE.24.018986](https://doi.org/10.1364/OE.24.018986).
- HAFFERT, S. Y., BOHN, A. J., DE BOER, J. et al. (2019). « Two Accreting Protoplanets around the Young Star PDS 70 ». *Nature Astronomy* 3, p. 749-754. DOI : [10.1038/s41550-019-0780-5](https://doi.org/10.1038/s41550-019-0780-5).
- HCÉRES (2023). *Rapport d'évaluation du Centre national de la recherche scientifique - CNRS*. <https://www.hceres.fr/fr>.
- HERSCOVICI-SCHILLER, O., MUGNIER, L. M., BAUDOZ, P. et al. (2017). « Focal Plane Complex Wavefront Sensing with Coronagraphic Phase Diversity on the THD2 Bench ». *Proceedings of the Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes 5*. Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). DOI : [10.26698/A04ELT5.0063](https://doi.org/10.26698/A04ELT5.0063).
- HINKLEY, S., LACOUR, S., MARLEAU, G.-D. et al. (2023). « Direct Discovery of the Inner Exoplanet in the HD 206893 System - Evidence for Deuterium Burning in a Planetary-Mass Companion ». *Astronomy and Astrophysics* 671, p. L5. DOI : [10.1051/0004-6361/202244727](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244727).
- HODAPP, K. W., JENSEN, J. B., IRWIN, E. M. et al. (2003). « The Gemini Near-Infrared Imager (NIRI) ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 115, p. 1388-1406. DOI : [10.1086/379669](https://doi.org/10.1086/379669).
- HOM, J., PATIENCE, J., CHEN, C. H. et al. (2024). « A uniform analysis of debris discs with the Gemini Planet Imager II : constraints on dust density distribution using empirically informed scattering phase functions ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 528.4, p. 6959-6984. DOI : [10.1093/mnras/stae368](https://doi.org/10.1093/mnras/stae368). arXiv : [2402.00214](https://arxiv.org/abs/2402.00214) [astro-ph.EP].
- HUGHES, A. M., DUCHÊNE, G. & MATTHEWS, B. C. (2018). « Debris Disks : Structure, Composition, and Variability ». *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 56.1, p. 541-591. DOI : [10.1146/annurev-astro-081817-052035](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081817-052035).
- JACKSON, A. P., WYATT, M. C., BONSOR, A. & VERAS, D. (2014). « Debris Froms Giant Impacts between Planetary Embryos at Large Orbital Radii ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 440, p. 3757-3777. DOI : [10.1093/mnras/stu476](https://doi.org/10.1093/mnras/stu476).
- JACQUINOT, P. & ROIZEN-DOSSIER, B. (1964). « II Apodisation ». T. 3. Progress in Optics. Elsevier, p. 29-186. DOI : [10.1016/S0079-6638\(08\)70570-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70570-5).
- JANSON, M., GRATTON, R., RODET, L. et al. (2021). « A Wide-Orbit Giant Planet in the High-Mass b Centauri Binary System ». *Nature* 600, p. 231-234. DOI : [10.1038/s41586-021-04124-8](https://doi.org/10.1038/s41586-021-04124-8).
- JAYAWARDHANA, R., FISHER, S., HARTMANN, L. et al. (1998). « A Dust Disk Surrounding the Young A Star HR 4796A ». *The Astrophysical Journal Letters* 503.1, p. L79-L82. DOI : [10.1086/311524](https://doi.org/10.1086/311524).
- JOLISSAINT, L., VÉLAN, J.-P. & CONAN, R. (2006). « Analytical modeling of adaptive optics : foundations of the phase spatial power spectrum approach ». *Journal of the Optical Society of America A* 23.2, p. 382-394. DOI : [10.1364/JOSAA.23.000382](https://doi.org/10.1364/JOSAA.23.000382).
- JONES, J. W., CHIANG, E., DUCHÊNE, G., KALAS, P. & ESPOSITO, T. M. (2023). « Giant Impacts and Debris Disk Morphology ». *The Astrophysical Journal* 948, p. 102. DOI : [10.3847/1538-4357/acc466](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acc466).
- JOVANOVIĆ, N., MARTINACHE, F., GUYON, O. et al. (2015). « The Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics System : Enabling High-Contrast Imaging on Solar-System Scales ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 127.955, p. 890. DOI : [10.1086/682989](https://doi.org/10.1086/682989).
- JOVANOVIĆ, N., ABSIL, O., BAUDOZ, P. et al. (2018). « Review of High-Contrast Imaging Systems for Current and Future Ground-Based and Space-Based Telescopes : Part II. Common Path Wavefront Sensing/Control and Coherent Differential Imaging ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10703, 107031U. DOI : [10.1117/12.2314260](https://doi.org/10.1117/12.2314260).
- KALAS, P. G., RAJAN, A., WANG, J. J. et al. (2015). « Direct Imaging of an Asymmetric Debris Disk in the HD 106906 Planetary System ». *The Astrophysical Journal* 814, p. 32. DOI : [10.1088/0004-637X/814/1/32](https://doi.org/10.1088/0004-637X/814/1/32).

- KASPER, M., CERPA URRÁ, N., PATHAK, P. et al. (2021). « PCS — A Roadmap for Exoearth Imaging with the ELT ». *The Messenger* 182, p. 38-43. DOI : [10.18727/0722-6691/5221](https://doi.org/10.18727/0722-6691/5221).
- KAY, J. D., PUEYO, L. A. & KASDIN, N. J. (2009). « Demonstration of a Symmetric Dark Hole with a Stroke-Minimizing Correction Algorithm ». *Proceedings of the SPIE*. T. 7209. International Society for Optics and Photonics, 72090G. DOI : [10.1117/12.809815](https://doi.org/10.1117/12.809815).
- KEASHLY, L. & NEUMAN, J. H. (2010). « Faculty Experiences with Bullying in Higher Education ». *Administrative Theory & Praxis* 32.1, p. 48-70. DOI : [10.2753/ATP1084-1806320103](https://doi.org/10.2753/ATP1084-1806320103).
- KEPLER, M., BENISTY, M., MÜLLER, A. et al. (2018). « Discovery of a Planetary-Mass Companion within the Gap of the Transition Disk around PDS 70 ». *Astronomy and Astrophysics* 617, A44. DOI : [10.1051/0004-6361/201832957](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832957).
- KOERNER, D. W., RESSLER, M. E., WERNER, M. W. & BACKMAN, D. E. (1998). « Mid-Infrared Imaging of a Circumstellar Disk around HR 4796 : Mapping the Debris of Planetary Formation ». *The Astrophysical Journal Letters* 503.1, p. L83-L87. DOI : [10.1086/311525](https://doi.org/10.1086/311525).
- KOLOKOLOVA, L., HANNER, M. S., LEVASSEUR-REGOURD, A.-C. & GUSTAFSON, B. Å. S. (2004). « Physical Properties of Cometary Dust from Light Scattering and Thermal Emission ». *Comets II*, p. 577-604.
- KRAL, Q., THÉBAULT, P., AUGEREAU, J.-C., BOCCALETTI, A. & CHARNOZ, S. (2015). « Signatures of Massive Collisions in Debris Discs. A Self-Consistent Numerical Model ». *Astronomy and Astrophysics* 573, A39. DOI : [10.1051/0004-6361/201424309](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424309).
- KRIST, J., EFFINGER, R., KERN, B. et al. (2018). « WFIRST Coronagraph Flight Performance Modeling ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10698. International Society for Optics and Photonics, 106982K. DOI : [10.1117/12.2310043](https://doi.org/10.1117/12.2310043).
- KRIST, J. E., HARTIG, G. F., CLAMPIN, M. et al. (2003). « Advanced Camera for Surveys Coronagraph on the Hubble Space Telescope ». *Proceedings of the SPIE*. T. 4860. SPIE, p. 20-31. DOI : [10.1117/12.457835](https://doi.org/10.1117/12.457835).
- KRIST, J. E., HOOK, R. N. & STOEHR, F. (2011). « 20 Years of Hubble Space Telescope Optical Modeling Using Tiny Tim ». *Proceedings of the SPIE*. T. 8127. SPIE, p. 166-181. DOI : [10.1117/12.892762](https://doi.org/10.1117/12.892762).
- KUHN, J. R., POTTER, D. & PARISE, B. (2001). « Imaging Polarimetric Observations of a New Circumstellar Disk System ». *The Astrophysical Journal Letters* 553, p. L189-L191. DOI : [10.1086/320686](https://doi.org/10.1086/320686).
- KUHN, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago : University of Chicago Press.
- KUZUHARA, M., TAMURA, M., KUDO, T. et al. (2013). « Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504 ». *The Astrophysical Journal* 774, p. 11. DOI : [10.1088/0004-637X/774/1/11](https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/11).
- LAFRENIÈRE, D., JAYAWARDHANA, R. & KERKWIJK, M. H. van (2008). « Direct Imaging and Spectroscopy of a Planetary-Mass Candidate Companion to a Young Solar Analog ». *The Astrophysical Journal* 689.2, p. L153. DOI : [10.1086/595870](https://doi.org/10.1086/595870).
- LAGRANGE, A.-M., GRATADOUR, D., CHAUVIN, G. et al. (2009). « A Probable Giant Planet Imaged in the β Pictoris Disk. VLT/NaCo Deep L'-Band Imaging ». *Astronomy and Astrophysics* 493, p. L21-L25. DOI : [10.1051/0004-6361:200811325](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200811325).
- LAGRANGE, A.-M., LANGLOIS, M., GRATTON, R. et al. (2016). « A narrow, edge-on disk resolved around HD 106906 with SPHERE ». *Astronomy and Astrophysics* 586, L8, p. L8. DOI : [10.1051/0004-6361/201527264](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527264).
- LANDMAN, R. & HAFFERT, S. Y. (2020). « Nonlinear Wavefront Reconstruction with Convolutional Neural Networks for Fourier-based Wavefront Sensors ». *Optics Express* 28.11, p. 16644-16657. DOI : [10.1364/OE.389465](https://doi.org/10.1364/OE.389465).
- LANDMAN, R., HAFFERT, S. Y., RADHAKRISHNAN, V. M. & KELLER, C. U. (2021). « Self-Optimizing Adaptive Optics Control with Reinforcement Learning for High-Contrast Imaging ». *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 7, p. 039002. DOI : [10.1117/1.JATIS.7.3.039002](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.7.3.039002).
- LEBOULLEUX, L., CHOQUET, É., HUBY, E., SINGH, G. & CANTALLOUBE, F. (2020). « A Socio-Demographic Study of the Exoplanet Direct Imaging Community ». *Bulletin of the AAS* 52.2, p. 0209. DOI : [10.3847/25c2cfcb.d73b7960](https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.d73b7960).

- LEBOULLEUX, L., N'DIAYE, M., RIGGS, A. J. E. et al. (2016). « High-Contrast Imager for Complex Aperture Telescopes (HiCAT). 4. Status and Wavefront Control Development ». *Proceedings of the SPIE*. T. 9904, p. 99043C-99043C-13. DOI : [10.1117/12.2233640](https://doi.org/10.1117/12.2233640).
- LENZEN, R., HARTUNG, M., BRANDNER, W. et al. (2003). « NAOS-CONICA First on-Sky Results in a Variety of Observing Modes ». *Proceedings of the SPIE*. T. 4841. SPIE, p. 944-952. DOI : [10.1117/12.460044](https://doi.org/10.1117/12.460044).
- LLOP-SAYSON, J., RIGGS, A. J. E., MAWET, D. et al. (2022). « Coronagraph Design with the Electric Field Conjugation Algorithm ». *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 8, p. 015003. DOI : [10.1117/1.JATIS.8.1.015003](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.1.015003).
- LOZI, J., GUYON, O., VIEVARD, S. et al. (2020). « Status of the SCExAO Instrument : Recent Technology Upgrades and Path to a System-Level Demonstrator for PSI ». *Proceedings of the SPIE*. T. 11448. SPIE, p. 110-121. DOI : [10.1117/12.2562832](https://doi.org/10.1117/12.2562832).
- LUVOIR TEAM (2019). *The LUVOIR Mission Concept Study Final Report*. Rapp. tech. arXiv :1912.06219. arXiv. DOI : [10.48550/arXiv.1912.06219](https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.06219).
- MACINTOSH, B., GRAHAM, J. R., BARMAN, T. et al. (2015). « Discovery and Spectroscopy of the Young Jovian Planet 51 Eri b with the Gemini Planet Imager ». *Science* 350, p. 64-67. DOI : [10.1126/science.aac5891](https://doi.org/10.1126/science.aac5891).
- MACINTOSH, B. A., GRAHAM, J. R., PALMER, D. W. et al. (2008). « The Gemini Planet Imager : From Science to Design to Construction ». *Proceedings of the SPIE*. T. 7015, p. 701518. DOI : [10.1117/12.788083](https://doi.org/10.1117/12.788083).
- MAESTRE, F. T. (2019). « Ten simple rules towards healthier research labs ». *PLOS Computational Biology* 15.4, p. 1-8. DOI : [10.1371/journal.pcbi.1006914](https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006914). URL : <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006914>.
- MALBET, F., YU, J. W. & SHAO, M. (1995). « High-Dynamic-Range Imaging Using a Deformable Mirror for Space Coronagraphy ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 107, p. 386. DOI : [10.1086/133563](https://doi.org/10.1086/133563).
- MAROIS, C., LAFRENIÈRE, D., DOYON, R., MACINTOSH, B. & NADEAU, D. (2006). « Angular Differential Imaging : A Powerful High-Contrast Imaging Technique ». *The Astrophysical Journal* 641.1, p. 556. DOI : [10.1086/500401](https://doi.org/10.1086/500401).
- MAROIS, C., MACINTOSH, B., BARMAN, T. et al. (2008). « Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799 ». *Science* 322.5906, p. 1348-1352. DOI : [10.1126/science.1166585](https://doi.org/10.1126/science.1166585).
- MAROIS, C., ZUCKERMAN, B., KONOPACKY, Q. M., MACINTOSH, B. & BARMAN, T. (2010). « Images of a Fourth Planet Orbiting HR 8799 ». *Nature* 468.7327, p. 1080-1083. DOI : [10.1038/nature09684](https://doi.org/10.1038/nature09684).
- MARTINACHE, F., GUYON, O., JOVANOVIĆ, N. et al. (2014). « On-Sky Speckle Nulling Demonstration at Small Angular Separation with SCExAO ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 126, p. 565. DOI : [10.1086/677141](https://doi.org/10.1086/677141).
- MAS, M., BAUDOZ, P., ROUSSET, G. & GALICHER, R. (2012). « Tip-Tilt Estimation and Correction Using FQPM Coronagraphic Images ». *Astronomy and Astrophysics* 539, p. 126. DOI : [10.1051/0004-6361/201117898](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117898).
- MAWET, D., RIAUD, P., ABSIL, O. & SURDEJ, J. (2005). « Annular Groove Phase Mask Coronagraph ». *The Astrophysical Journal* 633.2, p. 1191. DOI : [10.1086/462409](https://doi.org/10.1086/462409).
- MAWET, D., SERABYN, E., LIEWER, K. et al. (2009). « Optical Vectorial Vortex Coronagraphs Using Liquid Crystal Polymers : Theory, Manufacturing and Laboratory Demonstration ». *Optics Express* 17.3, p. 1902-1918. DOI : [10.1364/OE.17.001902](https://doi.org/10.1364/OE.17.001902).
- MAYOR, M. & QUELOZ, D. (1995). « A Jupiter-mass Companion to a Solar-Type Star ». *Nature* 378.6555, p. 355-359. DOI : [10.1038/378355a0](https://doi.org/10.1038/378355a0).
- MAZOYER, J., BAUDOZ, P., GALICHER, R., MAS, M. & ROUSSET, G. (2013). « Estimation and Correction of Wavefront Aberrations Using the Self-Coherent Camera : Laboratory Results ». *Astronomy and Astrophysics* 557, p. 9. DOI : [10.1051/0004-6361/201321706](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321706).
- MAZOYER, J., BAUDOZ, P., GALICHER, R. & ROUSSET, G. (2014a). « High-Contrast Imaging in Polychromatic Light with the Self-Coherent Camera ». *Astronomy and Astrophysics* 564, p. L1. DOI : [10.1051/0004-6361/201423375](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423375).

- MAZOYER, J., BOCCALETTI, A., AUGEREAU, J.-C. et al. (2014b). « Is the HD 15115 Inner Disk Really Asymmetrical? » *Astronomy and Astrophysics* 569, A29. DOI : [10.1051/0004-6361/201424479](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424479).
- MAZOYER, J., BOCCALETTI, A., CHOQUET, É. et al. (2016a). « A Symmetric Inner Cavity in the HD 141569A Circumstellar Disk ». *The Astrophysical Journal* 818.2, p. 150. DOI : [10.3847/0004-637X/818/2/150](https://doi.org/10.3847/0004-637X/818/2/150).
- MAZOYER, J., PUEYO, L., N'DIAYE, M. et al. (2018a). « Active Correction of Aperture Discontinuities-Optimized Stroke Minimization. I. A New Adaptive Interaction Matrix Algorithm ». *The Astronomical Journal* 155, p. 7. DOI : [10.3847/1538-3881/aa91cf](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa91cf).
- MAZOYER, J., PUEYO, L., N'DIAYE, M. et al. (2018b). « Active Correction of Aperture Discontinuities-Optimized Stroke Minimization. II. Optimization for Future Missions ». *The Astronomical Journal* 155, p. 8. DOI : [10.3847/1538-3881/aa91d7](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa91d7).
- MAZOYER, J. (2014). « Haut contraste pour l'imagerie directe d'exoplanètes et de disques : de la self-coherent camera à l'analyse de données NICI ». Thèse de Doctorat. Université Paris Diderot - Paris 7. DOI : [10.5281/zenodo.58003](https://doi.org/10.5281/zenodo.58003).
- MAZOYER, J., ARRIAGA, P., HOM, J. et al. (2020). « DiskFM : A Forward Modeling Tool for Disk Analysis with Coronagraphic Instruments ». *Proceedings of the SPIE*. T. 11447, p. 1144759. DOI : [10.1117/12.2560091](https://doi.org/10.1117/12.2560091).
- MAZOYER, J., BAUDOZ, P., BELIKOV, R. et al. (2019). « High-Contrast Testbeds for Future Space-Based Direct Imaging Exoplanet Missions ». *Bulletin of the AAS* 51.7. URL : <https://baas.aas.org/pub/2020n7i101/release/1>.
- MAZOYER, J., BAUDOZ, P., MAS, M., ROUSSET, G. & GALICHER, R. (2012). « Experimental Parametric Study of the Self-Coherent Camera ». *Proceedings of the SPIE*. T. 8442, p. 844250. DOI : [10.1117/12.926080](https://doi.org/10.1117/12.926080).
- MAZOYER, J., GALICHER, R., BAUDOZ, P. et al. (2014c). « Deformable Mirror Interferometric Analysis for the Direct Imagery of Exoplanets ». *Proceedings of the SPIE*. T. 9148, p. 914846. DOI : [10.1117/12.2057833](https://doi.org/10.1117/12.2057833).
- MAZOYER, J. & PUEYO, L. (2017). « Fundamental Limits to High-Contrast Wavefront Control ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10400, p. 1040014. DOI : [10.1117/12.2274657](https://doi.org/10.1117/12.2274657).
- MAZOYER, J., PUEYO, L., NORMAN, C. et al. (2016b). « Active Compensation of Aperture Discontinuities for WFIRST-AFTA : Analytical and Numerical Comparison of Propagation Methods and Preliminary Results with a WFIRST-AFTA-like Pupil ». *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* 2, p. 011008. DOI : [10.1117/1.JATIS.2.1.011008](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.2.1.011008).
- MCLEAN, I. S. & SPRAYBERRY, D. (2003). « Instrumentation at the Keck Observatory ». *Proceedings of the SPIE*. T. 4841. SPIE, p. 1-6. DOI : [10.1117/12.461785](https://doi.org/10.1117/12.461785).
- MENNESSON, B., JUANOLA-PARRAMON, R., NEMATI, B. et al. (2020). *Paving the Way to Future Missions : The Roman Space Telescope Coronagraph Technology Demonstration*. DOI : [10.48550/arXiv.2008.05624](https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.05624).
- MESA, D., GRATTON, R., KERVELLA, P. et al. (2023). « AF Lep b : The Lowest-Mass Planet Detected by Coupling Astrometric and Direct Imaging Data, » *Astronomy & Astrophysics* 672, A93. DOI : [10.1051/0004-6361/202345865](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202345865).
- MILES, B. E., BILLER, B. A., PATAPIS, P. et al. (2023). « The JWST Early-release Science Program for Direct Observations of Exoplanetary Systems II : A 1 to 20 Mm Spectrum of the Planetary-mass Companion VHS 1256-1257 b ». *The Astrophysical Journal* 946, p. L6. DOI : [10.3847/2041-8213/acb04a](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acb04a).
- MILLAR-BLANCHAER, M. A., GRAHAM, J. R., PUEYO, L. et al. (2015). « β PICTORIS' INNER DISK IN POLARIZED LIGHT AND NEW ORBITAL PARAMETERS FOR β PICTORIS b ». *The Astrophysical Journal* 811.1, p. 18. DOI : [10.1088/0004-637X/811/1/18](https://doi.org/10.1088/0004-637X/811/1/18).
- MILLI, J., MOUILLET, D., LAGRANGE, A.-M. et al. (2012). « Impact of Angular Differential Imaging on Circumstellar Disk Images ». *Astronomy and Astrophysics* 545, A111. DOI : [10.1051/0004-6361/201219687](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219687).
- MIN, M., HOVENIER, J. W. & DE KOTER, A. (2005). « Modeling Optical Properties of Cosmic Dust Grains Using a Distribution of Hollow Spheres ». *Astronomy and Astrophysics* 432.3, p. 909. DOI : [10.1051/0004-6361:20041920](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041920).
- MIN, M., RAB, C., WOITKE, P., DOMINIK, C. & MÉNARD, F. (2016). « Multiwavelength Optical Properties of Compact Dust Aggregates in Protoplanetary Disks ». *Astronomy and Astrophysics* 585, A13. DOI : [10.1051/0004-6361/201526048](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526048).

- MOSS, S. E. & MAHMOUDI, M. (2021). « STEM the Bullying : An Empirical Investigation of Abusive Supervision in Academic Science ». *eClinicalMedicine* 40. DOI : [10.1016/j.eclinm.2021.101121](https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.101121).
- MOUILLET, D., LARWOOD, J. D., PAPALOIZOU, J. C. B. & LAGRANGE, A. M. (1997). « A Planet on an Inclined Orbit as an Explanation of the Warp in the Beta Pictoris Disc ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 292, p. 896-904. DOI : [10.1093/mnras/292.4.896](https://doi.org/10.1093/mnras/292.4.896).
- N'DIAYE, M., VIGAN, A., DOHLEN, K. et al. (2016). « Calibration of Quasi-Static Aberrations in Exoplanet Direct-Imaging Instruments with a Zernike Phase-Mask Sensor. II. Concept Validation with ZELDA on VLT/SPHERE ». *Astronomy and Astrophysics* 592, A79. DOI : [10.1051/0004-6361/201628624](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628624).
- N'DIAYE, M., MAZOYER, J., CHOQUET, É. et al. (2015). « High-Contrast Imager for Complex Aperture Telescopes (HiCAT) : 3. First Lab Results with Wavefront Control ». *Proceedings of the SPIE*. T. 9605, p. 96050I. DOI : [10.1117/12.2188497](https://doi.org/10.1117/12.2188497).
- NAIK, K. R., WRIGHT, R. H., CLAVEAU, D. D., ACTON, D. S. & KNIGHT, J. S. (2020). « Convolutional Neural Networks for Object-Agnostic Wavefront Sensing in the Presence of Noise ». *Proceedings of the SPIE*. T. 11448. SPIE, p. 312-331. DOI : [10.1117/12.2576147](https://doi.org/10.1117/12.2576147).
- NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE (2021). *Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s*. Washington, DC : The National Academies Press. DOI : [10.17226/26141](https://doi.org/10.17226/26141).
- NIELSEN, E. L., DE ROSA, R. J., MACINTOSH, B. et al. (2019). « The Gemini Planet Imager Exoplanet Survey : Giant Planet and Brown Dwarf Demographics from 10 to 100 Au ». *The Astronomical Journal* 158, p. 13. DOI : [10.3847/1538-3881/ab16e9](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab16e9).
- NISHIKAWA, J. (2022). « The Coherent Differential Imaging on Speckle Area Nulling (CDI-SAN) Method for High-Contrast Imaging under Speckle Variation ». *The Astrophysical Journal* 930.2, p. 163. DOI : [10.3847/1538-4357/ac5f44](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5f44). arXiv : [2204.10002](https://arxiv.org/abs/2204.10002) [astro-ph].
- NOUSIAINEN, J., ENGLER, B., KASPER, M. et al. (2022). « Advances in Model-Based Reinforcement Learning for Adaptive Optics Control ». *Proceedings of the SPIE*. T. 12185. SPIE, p. 882-891. DOI : [10.1117/12.2630317](https://doi.org/10.1117/12.2630317).
- NOUSIAINEN, J., RAJANI, C., KASPER, M. & HELIN, T. (2021). « Adaptive Optics Control Using Model-Based Reinforcement Learning ». *Optics Express* 29, p. 15327. DOI : [10.1364/OE.420270](https://doi.org/10.1364/OE.420270).
- ORBAN DE XIVRY, G., QUESNEL, M., VANBERG, P.-O., ABSIL, O. & LOUPPE, G. (2021). « Focal Plane Wavefront Sensing Using Machine Learning : Performance of Convolutional Neural Networks Compared to Fundamental Limits ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 505, p. 5702-5713. DOI : [10.1093/mnras/stab1634](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1634).
- PAINE, S. W. & FIENUP, J. R. (2018). « Machine Learning for Improved Image-Based Wavefront Sensing ». *Optics Letters* 43.6, p. 1235-1238. DOI : [10.1364/OL.43.001235](https://doi.org/10.1364/OL.43.001235).
- PAIRET, B., CANTALLOUBE, F. & JACQUES, L. (2021). « MAYONNAISE : A Morphological Components Analysis Pipeline for Circumstellar Discs and Exoplanets Imaging in the near-Infrared ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 503.3, p. 3724-3742. DOI : [10.1093/mnras/stab607](https://doi.org/10.1093/mnras/stab607).
- PAIRET, B., CANTALLOUBE, F. & JACQUES, L. (2018). « Reference-less algorithm for circumstellar disks imaging ». *arXiv e-prints*, arXiv :1812.01333. DOI : [10.48550/arXiv.1812.01333](https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.01333).
- PARISSE, J. & PORTE, E. (2022). « Les démarches d'« aller vers » dans le travail social : une mise en perspective ». *Cahiers de l'action* 59.2, p. 9-16. DOI : [10.3917/cact.059.0009](https://doi.org/10.3917/cact.059.0009).
- PATRU, F., BAUDOZ, P., GALICHER, R. et al. (2018). « Laboratory Demonstration of a Broadband Six-Level Phase Mask Coronagraph ». *Optics Express* 26.8, p. 10007. DOI : [10.1364/OE.26.010007](https://doi.org/10.1364/OE.26.010007).
- PAUL, B. (2014). « Mesure de Front d'onde Post-Coronographique à Haute Précision Pour l'imagerie à Haut Contraste : Application Sol et Espace ». Thèse de Doctorat. Université Aix-Marseille. URL : <https://www.theses.fr/2014AIXM4731>.
- PERROT, C., BOCCALETTI, A., PANTIN, E. et al. (2016). « Discovery of Concentric Broken Rings at Sub-Arcsec Separations in the HD 141569A Gas-Rich, Debris Disk with VLT/SPHERE ». *Astronomy and Astrophysics* 590, p. L7. DOI : [10.1051/0004-6361/201628396](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628396).

- PINTE, C., MÉNARD, F., DUCHÊNE, G. & BASTIEN, P. (2006). « Monte Carlo Radiative Transfer in Protoplanetary Disks ». *Astronomy and Astrophysics* 459.3, p. 797. DOI : [10.1051/0004-6361:20053275](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053275).
- POR, E. H., HAFFERT, S. Y., RADHAKRISHNAN, V. M. et al. (2018). « High Contrast Imaging for Python (HCIPy) : An Open-Source Adaptive Optics and Coronagraph Simulator ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10703. SPIE, p. 1112-1125. DOI : [10.1117/12.2314407](https://doi.org/10.1117/12.2314407).
- POTIER, A., BAUDOZ, P., GALICHER, R., SINGH, G. & BOCCALETTI, A. (2020a). « Comparing Focal Plane Wavefront Control Techniques : Numerical Simulations and Laboratory Experiments ». *Astronomy and Astrophysics* 635, A192. DOI : [10.1051/0004-6361/201937015](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937015).
- POTIER, A., GALICHER, R., BAUDOZ, P. et al. (2020b). « Increasing the Raw Contrast of VLT/SPHERE with the Dark Hole Technique. I. Simulations and Validation on the Internal Source ». *Astronomy and Astrophysics* 638, A117. DOI : [10.1051/0004-6361/202038010](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038010).
- POTIER, A., MAZOYER, J., WAHHAJ, Z. et al. (2022a). « Increasing the Raw Contrast of VLT/SPHERE with the Dark Hole Technique. II. On-sky Wavefront Correction and Coherent Differential Imaging ». *Astronomy and Astrophysics* 665, A136. DOI : [10.1051/0004-6361/202244185](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244185).
- POTIER, A. (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 ». Thèse de Doctorat. Observatoire de Paris / Paris Sciences et Lettres – LESIA. URL : <https://theses.hal.science/tel-03065844v2>.
- POTIER, A., WAHHAJ, Z., GALICHER, R. et al. (2022b). « Improving VLT/SPHERE without Additional Hardware : Comparing Quasi-Static Correction Strategies ». *Proceedings of the SPIE*. T. 12185, p. 1943-1952. DOI : [10.1117/12.2629926](https://doi.org/10.1117/12.2629926).
- POU, B., FERREIRA, F., QUINONES, E., GRATADOUR, D. & MARTIN, M. (2022). « Adaptive Optics Control with Multi-Agent Model-Free Reinforcement Learning ». *Optics Express* 30, p. 2991. DOI : [10.1364/OE.444099](https://doi.org/10.1364/OE.444099).
- PUEYO, L., ZIMMERMAN, N., BOLCAR, M. et al. (2017). « The LUVOIR Architecture "A" Coronagraph Instrument ». *Proceedings of the SPIE*. T. 0398, 103980F. DOI : [10.1117/12.2274654](https://doi.org/10.1117/12.2274654).
- PUEYO, L. (2016). « Detection and Characterization of Exoplanets Using Projections on Karhunen Loeve Eigenimages : Forward Modeling ». *The Astrophysical Journal* 824, p. 117. DOI : [10.3847/0004-637X/824/2/117](https://doi.org/10.3847/0004-637X/824/2/117).
- PUEYO, L., KASDIN, N. J., CARLOTTI, A. & VANDERBEI, R. (2011). « Design of Phase Induced Amplitude Apodization Coronagraphs Over Square Apertures ». *The Astrophysical Journal Supplement Series* 195, p. 25. DOI : [10.1088/0067-0049/195/2/25](https://doi.org/10.1088/0067-0049/195/2/25).
- PUEYO, L. & NORMAN, C. (2013). « High-Contrast Imaging with an Arbitrary Aperture : Active Compensation of Aperture Discontinuities ». *The Astrophysical Journal* 769, p. 102. DOI : [10.1088/0004-637X/769/2/102](https://doi.org/10.1088/0004-637X/769/2/102).
- QUANZ, S. P., OTTIGER, M., FONTANET, E. et al. (2022). « Large Interferometer For Exoplanets (LIFE). I. Improved exoplanet detection yield estimates for a large mid-infrared space-interferometer mission ». *Astronomy and Astrophysics* 664, A21, A21. DOI : [10.1051/0004-6361/202140366](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140366).
- QUESNEL, M., ORBAN DE XIVRY, G., LOUPPE, G. & ABSIL, O. (2022). « A Deep Learning Approach for Focal-Plane Wavefront Sensing Using Vortex Phase Diversity ». *Astronomy and Astrophysics* 668, A36. DOI : [10.1051/0004-6361/202143001](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202143001).
- RACINE, R., WALKER, G. A. H., NADEAU, D., DOYON, R. & MAROIS, C. (1999). « Speckle Noise and the Detection of Faint Companions ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 111.759, p. 587-594. DOI : [10.1086/316367](https://doi.org/10.1086/316367).
- RAMEAU, J., CHAUVIN, G., LAGRANGE, A.-M. et al. (2013). « Discovery of a Probable 4-5 Jupiter-mass Exoplanet to HD 95086 by Direct Imaging ». *The Astrophysical Journal Letters* 772, p. L15. DOI : [10.1088/2041-8205/772/2/L15](https://doi.org/10.1088/2041-8205/772/2/L15).
- REN, B., PUEYO, L., BEN ZHU, G., DEBES, J. & DUCHÊNE, G. (2018). « Non-Negative Matrix Factorization : Robust Extraction of Extended Structures ». *The Astrophysical Journal* 852, p. 104. DOI : [10.3847/1538-4357/aaaf2](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaaf2).
- REN, B., PUEYO, L., CHEN, C. et al. (2020). « Using Data Imputation for Signal Separation in High-contrast Imaging ». *The Astrophysical Journal* 892, p. 74. DOI : [10.3847/1538-4357/ab7024](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab7024).

- REN, B. B. (2023). « Karhunen-Loève Data Imputation in High Contrast Imaging ». *arXiv e-prints*, arXiv :2308.16912. DOI : [10.48550/arXiv.2308.16912](https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.16912).
- ROMBACH, R., BLATTMANN, A., LORENZ, D., ESSER, P. & OMMER, B. (2022). « High-Resolution Image Synthesis With Latent Diffusion Models ». *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, p. 10684-10695. DOI : [10.48550/arXiv.2112.10752](https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.10752).
- ROSA, R. J. D., NIELSEN, E. L., WAHHAJ, Z. et al. (2023). « Direct Imaging Discovery of a Super-Jovian around the Young Sun-like Star AF Leporis ». *Astronomy & Astrophysics* 672, A94. DOI : [10.1051/0004-6361/202345877](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202345877).
- ROUAN, D., RIAUD, P., BOCCALETTI, A., CLÉNET, Y. & LABEYRIE, A. (2000). « The Four-Quadrant Phase-Mask Coronagraph. I. Principle ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 112, p. 1479-1486. DOI : [10.1086/317707](https://doi.org/10.1086/317707).
- ROUSSET, G., LACOMBE, F., PUGET, P. et al. (2003). « NAOS, the First AO System of the VLT : On-Sky Performance ». *Proceedings of the SPIE*. T. 4839, p. 140-149. DOI : [10.1117/12.459332](https://doi.org/10.1117/12.459332).
- ROUSSET, G. & FUSCO, T. (2022). « Optique Adaptative : Correction Des Effets de La Turbulence Atmosphérique Sur Les Images Astronomiques ». *Comptes Rendus. Physique* 23.S1, p. 1-52. DOI : [10.5802/crphys.111](https://doi.org/10.5802/crphys.111).
- RUANE, G., NGO, H., MAWET, D. et al. (2019). « Reference Star Differential Imaging of Close-in Companions and Circumstellar Disks with the NIRC2 Vortex Coronagraph at the W. M. Keck Observatory ». *The Astronomical Journal* 157.3, 118, p. 118. DOI : [10.3847/1538-3881/aafee2](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aafee2).
- RUFFIO, J.-B., MACINTOSH, B., WANG, J. J. et al. (2017). « Improving and Assessing Planet Sensitivity of the GPI Exoplanet Survey with a Forward Model Matched Filter ». *The Astrophysical Journal* 842, p. 14. DOI : [10.3847/1538-4357/aa72dd](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa72dd).
- SANDLER, D. G., BARRETT, T. K., PALMER, D. A., FUGATE, R. Q. & WILD, W. J. (1991). « Use of a Neural Network to Control an Adaptive Optics System for an Astronomical Telescope ». *Nature* 351.6324, p. 300-302. DOI : [10.1038/351300a0](https://doi.org/10.1038/351300a0).
- SATINSKY, E. N., KIMURA, T., KIANG, M. V. et al. (2021). « Systematic Review and Meta-Analysis of Depression, Anxiety, and Suicidal Ideation among Ph.D. Students ». *Scientific Reports* 11.1, p. 14370. DOI : [10.1038/s41598-021-93687-7](https://doi.org/10.1038/s41598-021-93687-7).
- SCHNEIDER, G., GRADY, C. A., HINES, D. C. et al. (2014). « Probing for Exoplanets Hiding in Dusty Debris Disks : Disk Imaging, Characterization, and Exploration with HST/STIS Multi-roll Coronagraphy ». *The Astronomical Journal* 148, p. 59. DOI : [10.1088/0004-6256/148/4/59](https://doi.org/10.1088/0004-6256/148/4/59).
- SCHNEIDER, G., SMITH, B. A., BECKLIN, E. E. et al. (1999). « NICMOS Imaging of the HR 4796A Circumstellar Disk ». *The Astrophysical Journal Letters* 513.2, p. L127-L130. DOI : [10.1086/311921](https://doi.org/10.1086/311921).
- SCHNEIDER, G., THOMPSON, R. I., SMITH, B. A. & TERRILE, R. J. (1998). « Exploration of the Environments of Nearby Stars with the NICMOS Coronagraph : Instrumental Performance Considerations ». *Proceedings of the SPIE*. T. 3356. SPIE, p. 222-233. DOI : [10.1117/12.324461](https://doi.org/10.1117/12.324461).
- SEO, B.-J., CADY, E., GORDON, B. et al. (2017). « Hybrid Lyot Coronagraph for WFIRST : High-Contrast Broadband Testbed Demonstration ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10400. International Society for Optics and Photonics, 104000F. DOI : [10.1117/12.2274687](https://doi.org/10.1117/12.2274687).
- SEO, B.-J., SHI, F., BALASUBRAMANIAN, B. et al. (2018). « Hybrid Lyot Coronagraph for WFIRST : High Contrast Testbed Demonstration in Flight-like Low Flux Environment ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10698. International Society for Optics and Photonics, 106982P. DOI : [10.1117/12.2314358](https://doi.org/10.1117/12.2314358).
- SHAKLAN, S., CRILL, B., BELIKOV, R. et al. (2019). « Status of Space-based Segmented-Aperture Coronagraphs for Characterizing Exo-Earths Around Sun-Like Stars ». *Bulletin of the AAS* 51.7, p. 211. URL : <https://baas.aas.org/pub/2020n7i211/release/1>.
- SINGH, G., BHOWMIK, T., BOCCALETTI, A. et al. (2021). « Revealing Asymmetrical Dust Distribution in the Inner Regions of HD 141569 ». *Astronomy and Astrophysics* 653, A79. DOI : [10.1051/0004-6361/202140319](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140319).

- SINGH, G., GALICHER, R., BAUDOZ, P. et al. (2019). « Active Minimization of Non-Common Path Aberrations in Long-Exposure Imaging of Exoplanetary Systems ». *Astronomy and Astrophysics* 631, A106. DOI : [10.1051/0004-6361/201936206](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936206).
- SINGH, G., MARTINACHE, F., BAUDOZ, P. et al. (2014). « Lyot-Based Low Order Wavefront Sensor for Phase-mask Coronagraphs : Principle, Simulations and Laboratory Experiments ». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 126, p. 586-594. DOI : [10.1086/677048](https://doi.org/10.1086/677048).
- SIVANANDAM, S., HINZ, P. M., HEINZE, A. N., FREED, M. & BREUNINGER, A. H. (2006). « Clio : A 3-5 Micron AO Planet-Finding Camera ». *Proceedings of the SPIE*. T. 6269. SPIE, p. 288-297. DOI : [10.1117/12.672344](https://doi.org/10.1117/12.672344).
- SKAF, N., GUYON, O., GENDRON, É. et al. (2022). « On-Sky Validation of Image-Based Adaptive Optics Wavefront Sensor Referencing ». *Astronomy and Astrophysics* 659, A170. DOI : [10.1051/0004-6361/202141514](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141514).
- SMITH, B. A. & TERRILE, R. J. (1984). « A Circumstellar Disk around Beta Pictoris ». *Science* 226, p. 1421-1424. DOI : [10.1126/science.226.4681.1421](https://doi.org/10.1126/science.226.4681.1421).
- SNELLEN, I., DE KOK, R., BIRKBY, J. L. et al. (2015). « Combining High-Dispersion Spectroscopy with High Contrast Imaging : Probing Rocky Planets around Our Nearest Neighbors ». *Astronomy and Astrophysics* 576, A59. DOI : [10.1051/0004-6361/201425018](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425018).
- SOMMER, R., BRADY, G. R., BROOKS, K. et al. (2018). « High-Contrast Imager for Complex Aperture Telescopes (HiCAT) : 5. First Results with Segmented-Aperture Coronagraph and Wavefront Control ». *Proceedings of the SPIE*. T. 10698, 106981O. DOI : [10.1117/12.2314110](https://doi.org/10.1117/12.2314110).
- SOMMER, R., PERRIN, M. D., PUEYO, L. et al. (2014). « Five Debris Disks Newly Revealed in Scattered Light from the Hubble Space Telescope NICMOS Archive ». *The Astrophysical Journal Letters* 786, p. L23. DOI : [10.1088/2041-8205/786/2/L23](https://doi.org/10.1088/2041-8205/786/2/L23).
- SOMMER, R., PUEYO, L. & LARKIN, J. (2012). « Detection and Characterization of Exoplanets and Disks Using Projections on Karhunen-Loève Eigenimages ». *The Astrophysical Journal Letters* 755.2, p. L28. DOI : [10.1088/2041-8205/755/2/L28](https://doi.org/10.1088/2041-8205/755/2/L28).
- SPARKS, W. B. & FORD, H. C. (2002). « Imaging Spectroscopy for Extrasolar Planet Detection ». *The Astrophysical Journal* 578, p. 543-564. DOI : [10.1086/342401](https://doi.org/10.1086/342401).
- STAPPER, L. M. & GINSKI, C. (2022). « Iterative Angular Differential Imaging (IADI) : An Exploration of Recovering Disk Structures in Scattered Light with an Iterative ADI Approach ». *Astronomy & Astrophysics* 668, A50. DOI : [10.1051/0004-6361/202142820](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142820).
- STASEVIC, S., MILLI, J., MAZOYER, J. et al. (2023). « An inner warp discovered in the disk around HD 110058 using VLT/SPHERE and HST/STIS ». *Astronomy and Astrophysics* 678, A8, A8. DOI : [10.1051/0004-6361/202346720](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346720).
- SUTTON, R. S. & BARTO, A. G. (2018). *Reinforcement Learning, Second Edition : An Introduction*. MIT Press, ISBN : 978-0-262-03924-6.
- TAMURA, M., HODAPP, K., TAKAMI, H. et al. (2006). « Concept and Science of HiCIAO : High Contrast Instrument for the Subaru next Generation Adaptive Optics ». *Proceedings of the SPIE*. T. 6269, p. 28. DOI : [10.1117/12.670742](https://doi.org/10.1117/12.670742).
- TOOMEY, D. W. & FTACLAS, C. (2003). « Near Infrared Coronagraphic Imager for Gemini South ». *Proceedings of the SPIE*. T. 4841, p. 889-900. DOI : [10.1117/12.461099](https://doi.org/10.1117/12.461099).
- TRAUGER, J. T. & TRAUB, W. A. (2007). « A Laboratory Demonstration of the Capability to Image an Earth-like Extrasolar Planet ». *Nature* j.7137, p. 771-773. DOI : [10.1038/nature05729](https://doi.org/10.1038/nature05729).
- VAUGHAN, S. R., GEBHARD, T. D., BOTT, K. et al. (2023). « Chasing rainbows and ocean glints : Inner working angle constraints for the Habitable Worlds Observatory ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 524.4, p. 5477-5485. DOI : [10.1093/mnras/stad2127](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2127). arXiv : [2307.15137](https://arxiv.org/abs/2307.15137) [astro-ph.EP].
- VIGAN, A., DOHLEN, K., N'DIAYE, M. et al. (2022). « 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 ». *Astronomy and Astrophysics* 660, A140. DOI : [10.1051/0004-6361/202142635](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142635).
- VIGAN, A., FONTANIVE, C., MEYER, M. et al. (2021). « The SPHERE Infrared Survey for Exoplanets (SHINE). III. The Demographics of Young Giant Exoplanets below 300 Au with SPHERE ». *Astronomy and Astrophysics* 651, A72. DOI : [10.1051/0004-6361/202038107](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038107).
- VIGAN, A., N'DIAYE, M., DOHLEN, K. et al. (2019). « Calibration of Quasi-Static Aberrations in Exoplanet Direct-Imaging Instruments with a Zernike Phase-Mask Sensor. III. On-sky Validation in VLT/SPHERE ». *Astronomy and Astrophysics* 629, A11. DOI : [10.1051/0004-6361/201935889](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935889).
- VILAS, F. & SMITH, B. A. (1987). « Coronagraph for Astronomical Imaging and Spectrophotometry. » *Applied Optics* 26, p. 664-668. DOI : [10.1364/AO.26.000664](https://doi.org/10.1364/AO.26.000664).
- WAHHAJ, Z., MILLI, J., ROMERO, C. et al. (2021). « A Search for a Fifth Planet around HR 8799 Using the Star-Hopping RDI Technique at VLT/SPHERE ». *Astronomy & Astrophysics* 648, A26. DOI : [10.1051/0004-6361/202038794](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038794).
- WAHL, M., METCHEV, S., PATEL, R. et al. (2014). « Debris Disk Science with the Palomar ExAO System : First Results ». *Proceedings of the International Astronomical Union*. T. 299, p. 72-73. DOI : [10.1017/S174392131300793X](https://doi.org/10.1017/S174392131300793X).
- WANG, J. J., RUFFIO, J.-B., DE ROSA, R. J. et al. (2015). « pyKLIP : PSF Subtraction for Exoplanets and Disks ». *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1506.001. URL : <http://ascl.net/1506.001>.
- WEINBERGER, C., GUZMÁN, F., TAPIA, J., NEICHEL, B. & VERA, E. (2022). « Exploration of Convolutional Neural Networks to Handle Non-Linearity Estimation Issues in Pyramid Wavefront Sensors. » *Proceedings of the SPIE*. T. 12185. SPIE, p. 2576-2581. DOI : [10.1117/12.2630099](https://doi.org/10.1117/12.2630099).
- WIZINOWICH, P. L. (2006). « Optical Engineering at Keck Observatory : Design and Performance of the Telescopes, Adaptive Optics and Interferometer ». *ICO20 : Optical Design and Fabrication*. T. 6034. SPIE, p. 603401. DOI : [10.1117/12.668084](https://doi.org/10.1117/12.668084).
- WOLFF, J. A., MALONE, R. W., WILLIAMS, P. et al. (1990). « Direct Gene Transfer into Mouse Muscle in Vivo ». *Science* 247.4949, p. 1465-1468. DOI : [10.1126/science.1690918](https://doi.org/10.1126/science.1690918).
- XIE, C., CHOQUET, E., VIGAN, A. et al. (2022). « Reference-Star Differential Imaging on SPHERE/IRDIS ». *Astronomy and Astrophysics* 666, A32. DOI : [10.1051/0004-6361/202243379](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243379).
- YIP, K. H., NIKOLAOU, N., CORONICA, P. et al. (2020). « Pushing the Limits of Exoplanet Discovery via Direct Imaging with Deep Learning ». *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. Sous la dir. d'U. BREFELD, E. FROMONT, A. HOTHO et al. Lecture Notes in Computer Science. Cham : Springer International Publishing, p. 322-338. DOI : [10.1007/978-3-030-46133-1_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46133-1_20).
- ZERNIKE, F. (1934). « Diffraction Theory of the Knife-Edge Test and Its Improved Form, the Phase-Contrast Method ». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 94, p. 377-384. DOI : [10.1093/mnras/94.5.377](https://doi.org/10.1093/mnras/94.5.377).

Annexe A

Curriculum vitae

Johan MAZOYER

Intérêts de recherche : Instrumentation Optique, Observation et Caractérisation de Systèmes Extrasolaires, Imagerie Directe et Coronagraphie, Disques protoplanétaires et de Débris

EXPÉRIENCES PROFESSIONNELLES

Chargé de recherche CNRS – LESIA/Observatoire de Paris (France)	Depuis 2020
Sagan Fellow – Jet Propulsion Laboratory (Pasadena, CA)	2018 - 2019
Post-doctorant – Johns Hopkins University (Baltimore, MD)	2016 - 2018
Post-doctorant – Space Telescope Science Institute (Baltimore, MD)	2014 - 2016
Doctorant – LESIA/Observatoire de Paris (France)	2011 - 2014

FORMATION

Doctorat – Université Paris Diderot <i>Astronomie et Astrophysique</i> Sujet : <i>Haut-contraste pour l'imagerie directe d'exoplanètes et de disques (P. Baudoz & G. Rousset)</i>	Paris, France Septembre 2014
Master 2 – Université Paul Sabatier <i>Astrophysique, Science de l'Espace, Planétologie</i> Stage : <i>Influence de l'atmosphère martienne sur les limites de détection de MSL/Chemcam (O. Gasnault)</i>	Toulouse, France Septembre 2011
Diplôme d'ingénieur – ISAE Supaero <i>Systèmes Spatiaux et Techniques d'Imageries Spatiales</i>	Toulouse, France Septembre 2011
Diplôme d'ingénieur – Ecole polytechnique <i>Systèmes Embarqués (électronique et informatique)</i>	Palaiseau, France Septembre 2011

PRIX & BOURSES

Programme Équipements du DIM Origines (PI) – 15k€ <i>Matériel pour le banc THD2</i>	2023
Actions de diffusion du PEPR Origins (PI) – 12k€ <i>Création d'un podcast</i>	2023
Programme Data Intensive Artificial Intelligence de l'UPC (PI) – 100k€ / 3 ans <i>Financement de la thèse de Yann Gutierrez</i>	2022
CNES (co-PI) – 100k€ / 2 ans <i>Financement du post-doctorat d'Iva Laginja</i>	2021
Programme Collaboration Franco-Chilienne Ecosud (co-PI) – 3 ans <i>Collaboration avec Laura Perez de l'Universidad de Chile</i>	2020
NASA Group Award : LBTI Hosts Survey Science Team	2020
Carl Sagan Fellowship / NASA Hubble Fellowship Program (PI) – 3 ans	2018
Couverture du journal Astronomy & Astrophysics (Volume 564)	2014
Bourse doctorale du CNES – 3 ans	2011
Bourse d'étude de l'Ecole polytechnique – 4 ans	2007

PRISES DE RESPONSABILITÉS POUR LA COMMUNAUTÉ

Organisation de conférences, ateliers et séminaires

- Séminaire “**Haute Résolution Angulaire pour l’Astrophysique**” (**HRAA**) au LESIA (2020-)
- Organisateur et SOC : **National Capital Area Disks** (Baltimore, MD, Oct. 2018). [Site internet](#)
- Organisateur et SOC : **Optimal Optical Coronagraphs** (Leiden, NL, Sep. 2017). [Site internet](#)
- Séminaire “**Exoplanet Star and Planet Formation**” (**ESPF**) au STScI (2016-2018)
- SOC : **High Contrast Imaging from Space** (Baltimore, MD, US, Nov 2016). [Site internet](#)
- Organisateur : **La très haute dynamique** (Paris, Fr, Oct. 2012)

Autres investissements

- Responsable de l’équipe haut-contraste du LESIA 2023 -
- Comité d’experts du thème transverse exoplanètes de l’INSU (**CET exoplanètes**) 2023 -
- **Roman** : Représentant adjoint du CNES au Community Participation Program 2023 -
- **SPHERE+** : Responsable du groupe de travail Focal Plane Wavefront Sensor 2022 -
- Comité Scientifique de l’action Spécifique Haute résolution Angulaire de l’INSU (**ASHRA**) 2021 -
- **Habitable Exoplanet Observatory (HabEx)** : Contributeur scientifique 2019
- **Large UV Optical Infrared Surveyor (LUVOIR)** : Contributeur scientifique 2019
- Participation au **Telescope Allocation Committee** d’Hubble 2016
- Membre de l’IAU 2019 -
- **Peer-review** pour le *AJ*, *A&A*, *MNRAS*, *PASP* et *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*.

Annexe B

Liste de mes publications

PRINCIPAUX ARTICLES

- Galicher, R. ; Potier, A. ; **Mazoyer, J.** et al. *Increasing the raw contrast of VLT/SPHERE with the dark hole technique. III. Broadband reference differential imaging of HR 4796 using a four quadrant phase mask (accepted in A & A)*
- 1. Stasevic, S. ; Milli, J. ; **Mazoyer, J.** et al. (2023), *An inner warp discovered in the disk around HD 110058 using VLT/SPHERE and HST/STIS*, *Astronomy and Astrophysics*, 678, A8, [DOI link](#), [arXiv link](#), 3 citations
- 2. Galicher, R. & **Mazoyer, J.** (2023), *Imaging exoplanets with coronagraphic instruments*, *Comptes Rendus. Physique*, Online first, pp. 1-45. [DOI link](#), [arXiv link](#)
- 3. Potier, A. ; **Mazoyer, J.** ; Wahhaj, Z. et al. (2022), *Increasing the raw contrast of VLT/SPHERE with the dark hole technique. II. On-sky wavefront correction and coherent differential imaging*, *Astronomy and Astrophysics*, 665, A136, [DOI link](#), [arXiv link](#), 7 citations
- 4. Chen, C. ; **Mazoyer, J.** ; Poteet, C. A. et al. (2020), *Multiband GPI Imaging of the HR 4796A Debris Disk*, *The Astrophysical Journal*, 898, 55, [DOI link](#), [arXiv link](#), 35 citations
- 5. **Mazoyer, J.** ; Pueyo, L. ; N'Diaye, M. et al. (2018), *Active Correction of Aperture Discontinuities-Optimized Stroke Minimization. II. Optimization for Future Missions*, *The Astronomical Journal*, 155, 8, [DOI link](#), [arXiv link](#), 22 citations
- 6. **Mazoyer, J.** ; Pueyo, L. ; N'Diaye, M. et al. (2018), *Active Correction of Aperture Discontinuities-Optimized Stroke Minimization. I. A New Adaptive Interaction Matrix Algorithm*, *The Astronomical Journal*, 155, 7, [DOI link](#), [arXiv link](#), 18 citations
- 7. Fogarty, K. ; Pueyo, L. ; **Mazoyer, J.** et al. (2017), *Polynomial Apodizers for Centrally Obscured Vortex Coronagraphs*, *The Astronomical Journal*, 154, 240, [DOI link](#), [arXiv link](#), 10 citations
- 8. **Mazoyer, J.** ; Pueyo, L. ; Norman, C. et al. (2016), *Active compensation of aperture discontinuities for WFIRST-AFTA : analytical and numerical comparison of propagation methods and preliminary results with a WFIRST-AFTA-like pupil*, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2, 011008, [DOI link](#), [arXiv link](#), 9 citations
- 9. **Mazoyer, J.** ; Boccaletti, A. ; Choquet, É. et al. (2016), *A Symmetric Inner Cavity in the HD 141569A Circumstellar Disk*, *The Astrophysical Journal*, 818, 150, [DOI link](#), [arXiv link](#), 13 citations
- 10. **Mazoyer, J.** ; Boccaletti, A. ; Augereau, J. -C. et al. (2014), *Is the HD 15115 inner disk really asymmetrical ?*, *Astronomy and Astrophysics*, 569, A29, [DOI link](#), [arXiv link](#), 33 citations
- 11. **Mazoyer, J.** ; Baudoz, P. ; Galicher, R. et al. (2014), *High-contrast imaging in polychromatic light with the self-coherent camera*, *Astronomy and Astrophysics*, 564, L1, [DOI link](#), [arXiv link](#), 32 citations
- 12. **Mazoyer, J.** ; Baudoz, P. ; Galicher, R. et al. (2013), *Estimation and correction of wavefront aberrations using the self-coherent camera : laboratory results*, *Astronomy and Astrophysics*, 557, A9, [DOI link](#), [arXiv link](#), 33 citations

AUTRES ARTICLES

1. Hom, J. ; Patience, J. ; Chen, C. H. et al. (2024), *A uniform analysis of debris discs with the Gemini Planet Imager II : constraints on dust density distribution using empirically informed scattering phase functions*, *MNRAS*, 528, 6959, [DOI link](#), [arXiv link](#)
2. Sallum, S. ; Ray, S. ; Kammerer, J. et al. (2024), *The JWST Early Release Science Program for Direct Observations of Exoplanetary Systems. IV. NIRISS Aperture Masking Interferometry Performance and Lessons Learned*, *The Astrophysical Journal*, 963, L2, [DOI link](#), [arXiv link](#), 1 citation
3. Worthen, K. ; Chen, C. H. ; Brittain, S. D. et al. (2024), *Vertical Structure of Gas and Dust in Four Debris Disks*, *The Astrophysical Journal*, 962, 166, [DOI link](#), [arXiv link](#)
4. Crotts, K. A. ; Matthews, B. C. ; Duchêne, G. et al. (2024), *A Uniform Analysis of Debris Disks with the Gemini Planet Imager. I. An Empirical Search for Perturbations from Planetary Companions in Polarized Light Images*, *The Astrophysical Journal*, 961, 245, [DOI link](#), [arXiv link](#), 2 citations
5. Vaughan, S. R. ; Gebhard, T. D. ; Bott, K. et al. (2023), *Chasing rainbows and ocean glints : Inner working angle constraints for the Habitable Worlds Observatory*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 524, 5477, [DOI link](#), [arXiv link](#), 2 citations
6. Carter, A. L. ; Hinkley, S. ; Kammerer, J. et al. (2023), *The JWST Early Release Science Program for Direct Observations of Exoplanetary Systems I : High-contrast Imaging of the Exoplanet HIP 65426 b from 2 to 16 μm* , *The Astrophysical Journal*, 951, L20, [DOI link](#), [arXiv link](#), 35 citations

7. Miles, B. E. ; Biller, B. A. ; Patapis, P. et al. (2023), *The JWST Early-release Science Program for Direct Observations of Exoplanetary Systems II : A 1 to 20 μm Spectrum of the Planetary-mass Companion VHS 1256-1257 b*, The Astrophysical Journal, 946, L6, [DOI link](#), [arXiv link](#), 59 citations
8. Hinkley, S. ; Carter, A. L. ; Ray, S. et al. (2022), *The JWST Early Release Science Program for the Direct Imaging and Spectroscopy of Exoplanetary Systems*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 134, 095003, [DOI link](#), [arXiv link](#), 35 citations
9. Crotts, K. A. ; Draper, Z. H. ; Matthews, B. C. et al. (2022), *A Multiwavelength Study of the Highly Asymmetrical Debris Disk around HD 111520*, The Astrophysical Journal, 932, 23, [DOI link](#), [arXiv link](#), 4 citations
10. Betti, S. K. ; Follette, K. ; Jorquera, S. et al. (2022), *Detection of Near-infrared Water Ice at the Surface of the (Pre)Transitional Disk of AB Aur : Informing Icy Grain Abundance, Composition, and Size*, The Astronomical Journal, 163, 145, [DOI link](#), [arXiv link](#), 12 citations
11. Singh, G. ; Bhowmik, T. ; Boccaletti, A. et al. (2021), *Revealing asymmetrical dust distribution in the inner regions of HD 141569*, Astronomy and Astrophysics, 653, A79, [DOI link](#), [arXiv link](#), 11 citations
12. Crotts, K. A. ; Matthews, B. C. ; Esposito, T. M. et al. (2021), *A Deep Polarimetric Study of the Asymmetrical Debris Disk HD 106906*, The Astrophysical Journal, 915, 58, [DOI link](#), [arXiv link](#), 15 citations
13. Arriaga, P. ; Fitzgerald, M. P. ; Duchêne, G. et al. (2020), *Multiband Polarimetric Imaging of HR 4796A with the Gemini Planet Imager*, The Astronomical Journal, 160, 79, [DOI link](#), [arXiv link](#), 28 citations
14. Esposito, T. M. ; Kalas, P. ; Fitzgerald, M. P. et al. (2020), *Debris Disk Results from the Gemini Planet Imager Exoplanet Survey's Polarimetric Imaging Campaign*, The Astronomical Journal, 160, 24, [DOI link](#), [arXiv link](#), 76 citations
15. Duchêne, G. ; Rice, M. ; Hom, J. et al. (2020), *The Gemini Planet Imager View of the HD 32297 Debris Disk*, The Astronomical Journal, 159, 251, [DOI link](#), [arXiv link](#), 19 citations
16. Ertel, S. ; Defrère, D. ; Hinz, P. et al. (2020), *The HOSTS Survey for Exozodiacal Dust : Observational Results from the Complete Survey*, The Astronomical Journal, 159, 177, [DOI link](#), [arXiv link](#), 77 citations
17. Bruzzone, J. S. ; Metchev, S. ; Duchêne, G. et al. (2020), *Imaging the 44 au Kuiper Belt Analog Debris Ring around HD 141569A with GPI Polarimetry*, The Astronomical Journal, 159, 53, [DOI link](#), [arXiv link](#), 10 citations
18. Hom, J. ; Patience, J. ; Esposito, T. M. et al. (2020), *First Resolved Scattered-light Images of Four Debris Disks in Scorpius-Centaurus with the Gemini Planet Imager*, The Astronomical Journal, 159, 31, [DOI link](#), [arXiv link](#), 11 citations
19. Bhowmik, T. ; Boccaletti, A. ; Thébaud, P. et al. (2019), *Spatially resolved spectroscopy of the debris disk HD 32297. Further evidence of small dust grains*, Astronomy and Astrophysics, 630, A85, [DOI link](#), [arXiv link](#), 25 citations
20. Ren, B. ; Choquet, É. ; Perrin, M. D. et al. (2019), *An Exo-Kuiper Belt with an Extended Halo around HD 191089 in Scattered Light*, The Astrophysical Journal, 882, 64, [DOI link](#), [arXiv link](#), 37 citations
21. Stark, C. C. ; Belikov, R. ; Bolcar, M. R. et al. (2019), *ExoEarth yield landscape for future direct imaging space telescopes*, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 5, 024009, [DOI link](#), [arXiv link](#), 47 citations
22. Engler, N. ; Boccaletti, A. ; Schmid, H. M. et al. (2019), *Investigating the presence of two belts in the HD 15115 system*, Astronomy and Astrophysics, 622, A192, [DOI link](#), [arXiv link](#), 27 citations
23. Esposito, T. M. ; Duchêne, G. ; Kalas, P. et al. (2018), *Direct Imaging of the HD 35841 Debris Disk : A Polarized Dust Ring from Gemini Planet Imager and an Outer Halo from HST/STIS*, The Astronomical Journal, 156, 47, [DOI link](#), [arXiv link](#), 30 citations
24. Lebouilleux, L. ; Sauvage, J. -F. ; Pueyo, L. A. et al. (2018), *Pair-based Analytical model for Segmented Telescopes Imaging from Space for sensitivity analysis*, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4, 035002, [DOI link](#), [arXiv link](#), 19 citations
25. Poteet, C. A. ; Chen, C. H. ; Hines, D. C. et al. (2018), *Space-based Coronagraphic Imaging Polarimetry of the TW Hydrae Disk : Shedding New Light on Self-shadowing Effects*, The Astrophysical Journal, 860, 115, [DOI link](#), [arXiv link](#), 12 citations
26. Jensen-Clem, R. ; Mawet, D. ; Gomez Gonzalez, C. A. et al. (2018), *A New Standard for Assessing the Performance of High Contrast Imaging Systems*, The Astronomical Journal, 155, 19, [DOI link](#), [arXiv link](#), 30 citations

27. Perrot, C. ; Boccaletti, A. ; Pantin, E. et al. (2016), *Discovery of concentric broken rings at sub-arcsec separations in the HD 141569A gas-rich, debris disk with VLT/SPHERE*, Astronomy and Astrophysics, 590, L7, [DOI link](#), [arXiv link](#), 41 citations
28. Delorme, J. R. ; Galicher, R. ; Baudoz, P. et al. (2016), *Focal plane wavefront sensor achromatization : The multireference self-coherent camera*, Astronomy and Astrophysics, 588, A136, [DOI link](#), [arXiv link](#), 16 citations
29. Choquet, É. ; Perrin, M. D. ; Chen, C. H. et al. (2016), *First Images of Debris Disks around TWA 7, TWA 25, HD 35650, and HD 377*, The Astrophysical Journal, 817, L2, [DOI link](#), [arXiv link](#), 71 citations
30. Debes, J. H. ; Ygouf, M. ; Choquet, E. et al. (2016), *Wide-Field Infrared Survey Telescope-Astrophysics Focused Telescope Assets coronagraphic operations : lessons learned from the Hubble Space Telescope and the James Webb Space Telescope*, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2, 011010, [DOI link](#), [arXiv link](#), 11 citations
31. Wiens, R. C. ; Maurice, S. ; Lasue, J. et al. (2013), *Pre-flight calibration and initial data processing for the ChemCam laser-induced breakdown spectroscopy instrument on the Mars Science Laboratory rover*, Spectrochimica Acta, 82, 1, [DOI link](#), 230 citations
32. Cousin, A. ; Forni, O. ; Maurice, S. et al. (2011), *Laser induced breakdown spectroscopy library for the Martian environment*, Spectrochimica Acta, 66, 805, [DOI link](#), 75 citations

PRINCIPAUX ACTES DE CONFERENCES

1. Fogarty, K. ; Mawet, D. ; **Mazoyer, J.** et al. (2020), *Towards high throughput and low-order aberration robustness for vortex coronagraphs with central obstructions*, Space Telescopes and Instrumentation 2020 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 11443, 114433Y, [DOI link](#), 1 citation
2. **Mazoyer, J.** ; Arriaga, P. ; Hom, J. et al. (2020), *DiskFM : A forward modeling tool for disk analysis with coronagraphic instruments*, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VIII, 11447, 1144759, [DOI link](#), [arXiv link](#), 6 citations
3. Fogarty, K. ; **Mazoyer, J.** ; St. Laurent, K. et al. (2018), *Optimal deformable mirror and pupil apodization combinations for apodized pupil Lyot coronagraphs with obstructed pupils*, Space Telescopes and Instrumentation 2018 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 10698, 106981J, [DOI link](#), 2 citations
4. Ruane, G. ; Riggs, A. ; **Mazoyer, J.** et al. (2018), *Review of high-contrast imaging systems for current and future ground- and space-based telescopes I : coronagraph design methods and optical performance metrics*, Space Telescopes and Instrumentation 2018 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 10698, 106982S, [DOI link](#), [arXiv link](#), 12 citations
5. **Mazoyer, J.** ; Pueyo, L. ; N'Diaye, M. et al. (2017), *Capabilities of ACAD-OSM, an active method for the correction of aperture discontinuities*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 10400, 104000G, [DOI link](#), [arXiv link](#), 2 citations
6. **Mazoyer, J.** & Pueyo, L. (2017), *Fundamental limits to high-contrast wavefront control*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 10400, 1040014, [DOI link](#), [arXiv link](#), 2 citations
7. Leboulleux, L. ; N'Diaye, M. ; **Mazoyer, J.** et al. (2017), *Comparison of wavefront control algorithms and first results on the high-contrast imager for complex aperture telescopes (hicat) testbed*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 10562, 105622Z, [DOI link](#)
8. Fogarty, K. ; Pueyo, L. ; **Mazoyer, J.** et al. (2017), *Tip/tilt optimizations for polynomial apodized vortex coronagraphs on obscured telescope pupils*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 10400, 104000T, [DOI link](#), 2 citations
9. **Mazoyer, J.** ; Pueyo, L. ; N'Diaye, M. et al. (2016), *Correcting for the effects of pupil discontinuities with the ACAD method*, Space Telescopes and Instrumentation 2016 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 9904, 99044T, [DOI link](#), [arXiv link](#), 1 citation
10. **Mazoyer, J.** ; Pueyo, L. ; Norman, C. et al. (2015), *Active correction of aperture discontinuities (ACAD) for space telescope pupils : a parametric analysis*, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VII, 9605, 96050M, [DOI link](#), [arXiv link](#), 10 citations
11. N'Diaye, M. ; **Mazoyer, J.** ; Choquet, É. et al. (2015), *High-contrast imager for complex aperture telescopes (HiCAT) : 3. first lab results with wavefront control*, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VII, 9605, 96050I, [DOI link](#), [arXiv link](#), 18 citations

12. **Mazoyer, J.** ; Galicher, R. ; Baudoz, P. et al. (2014), *Deformable mirror interferometric analysis for the direct imagery of exoplanets*, Adaptive Optics Systems IV, 9148, 914846, [DOI link](#), [arXiv link](#), 1 citation
13. **Mazoyer, J.** ; Baudoz, P. ; Galicher, R. et al. (2013), *Direct detection of exoplanets in polychromatic light with a Self-coherent camera*, Proceedings of the Third AO4ELT Conference, 97, [DOI link](#)
14. Baudoz, P. ; **Mazoyer, J.** ; Galicher, R. (2013), *Laboratory tests of planet signal extraction in high contrast images*, Proceedings of the Third AO4ELT Conference, 109, [DOI link](#), 2 citations
15. **Mazoyer, J.** ; Galicher, R. ; Baudoz, P. et al. (2013), *Speckle correction in polychromatic light with the self-coherent camera for the direct detection of exoplanets*, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VI, 8864, 88640N, [DOI link](#), [arXiv link](#), 1 citation
16. Galicher, R. ; **Mazoyer, J.** ; Baudoz, P. et al. (2013), *High-contrast imaging with a self-coherent camera*, Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VI, 8864, 88640M, [DOI link](#)
17. Baudoz, P. ; **Mazoyer, J.** ; Mas, M. et al. (2012), *Dark hole and planet detection : laboratory results using the self-coherent camera*, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 8446, 84468C, [DOI link](#), 11 citations
18. Mas, M. ; Baudoz, P. ; **Mazoyer, J.** et al. (2012), *Experimental results on wavefront correction using the self-coherent camera*, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, 8446, 844689, [DOI link](#), 4 citations
19. **Mazoyer, J.** ; Baudoz, P. ; Mas, M. et al. (2012), *Experimental parametric study of the self-coherent camera*, Space Telescopes and Instrumentation 2012 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 8442, 844250, [DOI link](#), [arXiv link](#), 2 citations
20. Gasnault, O. ; **Mazoyer, J.** ; Cousin, A. et al. (2012), *Deciphering Sample and Atmospheric Oxygen Contents with ChemCam on Mars*, 43rd Annual Lunar and Planetary Science Conference, 2888, 1 citation

AUTRES ACTES DE CONFERENCE

1. Goulas, C. ; Vidal, F. ; Galicher, R. et al. (2023), *SAXO+ upgrade : second stage AO system end-to-end numerical simulations* (AO4ELT7 conference proceedings), arXiv e-prints, [arXiv:2310.15765](#)
2. Fowler, J. ; Haffert, S. Y. ; van Kooten, M. A. M. et al. (2023), *Visible extreme adaptive optics on extremely large telescopes : towards detecting oxygen in Proxima Centauri b and analogs*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 12680, 126801U, [DOI link](#)
3. Desai, N. ; König, L. ; Por, E. et al. (2023), *Integrated photonic-based coronagraphic systems for future space telescopes*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 12680, 126801S, [DOI link](#), [arXiv link](#)
4. Cantalloube, F. ; Christiaens, V. ; Cantero, C. et al. (2022), *Exoplanet imaging data challenge, phase II : characterization of exoplanet signals in high-contrast images*, Adaptive Optics Systems VIII, 12185, 1218505, [DOI link](#), [arXiv link](#), 2 citations
5. Boccaletti, A. ; Chauvin, G. ; Wildi, F. et al. (2022), *Upgrading the high contrast imaging facility SPHERE : science drivers and instrument choices*, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX, 12184, 121841S, [DOI link](#), [arXiv link](#), 1 citation
6. Potier, A. ; Wahhaj, Z. ; Galicher, R. et al. (2022), *Improving VLT/SPHERE without additional hardware : comparing quasi-static correction strategies*, Adaptive Optics Systems VIII, 12185, 1218568, [DOI link](#), [arXiv link](#)
7. Lopez, R. ; Fitzgerald, M. ; Duchene, G. et al. (2022), *The Peculiar Warp of HD 110058's Debris Disk*, American Astronomical Society Meeting #240, 54, 421.01
8. N'Diaye, M. ; Fogarty, K. ; Soummer, R. et al. (2018), *Apodized Pupil Lyot coronagraphs with arbitrary aperture telescopes : novel designs using hybrid focal plane masks*, Space Telescopes and Instrumentation 2018 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 10698, 106986A, [DOI link](#), [arXiv link](#), 2 citations
9. Soummer, R. ; Brady, G. R. ; Brooks, K. et al. (2018), *High-contrast imager for complex aperture telescopes (HiCAT) : 5. first results with segmented-aperture coronagraph and wavefront control*, Space Telescopes and Instrumentation 2018 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 10698, 106981O, [DOI link](#), [arXiv link](#), 6 citations
10. Snik, F. ; Absil, O. ; Baudoz, P. et al. (2018), *Review of high-contrast imaging systems for current and future ground-based and space-based telescopes III : technology opportunities and pathways*, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III, 10706, 107062L, [DOI link](#), [arXiv link](#), 3 citations

11. St. Laurent, K. ; Fogarty, K. ; Zimmerman, N. T. et al. (2018), *Apodized pupil Lyot coronagraphs designs for future segmented space telescopes*, Space Telescopes and Instrumentation 2018 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 10698, 106982W, [DOI link](#), [arXiv link](#), 2 citations
12. Jovanovic, N. ; Absil, O. ; Baudoz, P. et al. (2018), *Review of high-contrast imaging systems for current and future ground-based and space-based telescopes : Part II. Common path wavefront sensing/control and coherent differential imaging*, Adaptive Optics Systems VI, 10703, 107031U, [DOI link](#), [arXiv link](#), 15 citations
13. Leboulleux, L. ; Pueyo, L. ; Sauvage, J. -F. et al. (2018), *Sensitivity analysis for high-contrast imaging with segmented space telescopes*, Space Telescopes and Instrumentation 2018 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 10698, 106986H, [DOI link](#), 3 citations
14. Egron, S. ; Soummer, R. ; Lajoie, C. -P. et al. (2017), *James Webb Space Telescope optical simulation testbed IV : linear control alignment of the primary segmented mirror*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 10398, 1039811, [DOI link](#)
15. Pueyo, L. ; Zimmerman, N. ; Bolcar, M. et al. (2017), *The LUVOIR architecture "A" coronagraph instrument*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 10398, 103980F, [DOI link](#), 10 citations
16. Leboulleux, L. ; N'Diaye, M. ; Riggs, A. J. E. et al. (2016), *High-contrast imager for Complex Aperture Telescopes (HiCAT). 4. Status and wavefront control development*, Space Telescopes and Instrumentation 2016 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 9904, 99043C, [DOI link](#), 6 citations
17. Galicher, R. ; Baudoz, P. ; Delorme, J. R. et al. (2014), *High contrast imaging on the THD bench : progress and upgrades*, Space Telescopes and Instrumentation 2014 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 9143, 91435A, [DOI link](#), 3 citations
18. Delorme, J. R. ; Galicher, R. ; Baudoz, P. et al. (2014), *High-contrast imaging in wide spectral band with a self-coherent camera and achromatic coronagraphs*, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation, 9151, 91515Q, [DOI link](#), 1 citation
19. Galicher, R. ; Delorme, J. R. ; Baudoz, P. et al. (2013), *Focal Plane Wavefront Sensing with a self-coherent camera*, Proceedings of the Third AO4ELT Conference, 123, [DOI link](#)

PAPIERS BLANCS (SELECTION)

- Boccaletti, A. et al. (2020), *SPHERE+ : Imaging young Jupiters down to the snowline*, arXiv e-prints, [arXiv:2003.05714](#)
- Gaudi, B. S. et al. (2020), *The Habitable Exoplanet Observatory (HabEx) Mission Concept Study Final Report*, arXiv e-prints, [arXiv:2001.06683](#)
- The LUVOIR Team (2019), *The LUVOIR Mission Concept Study Final Report*, arXiv e-prints, [arXiv:1912.06219](#)
- Mazoyer, J. et al. (2019), *High-Contrast Testbeds for Future Space-Based Direct Imaging Exoplanet Missions*, Bulletin of the American Astronomical Society, 51, 101, [arXiv:1907.09508](#)

MANUSCRIT DE THESE

- Mazoyer, J. (2014), *Haut contraste pour l'imagerie directe d'exoplanètes et de disques : de la self-coherent camera à l'analyse de données NICI*, Ph.D. Thesis, [DOI link](#), 2 citations

CODES PYTHON PUBLICS

- **Asterix** est une bibliothèque python pour simuler des instruments et des bancs d'essai haut contraste, avec un accent particulier sur les algorithmes de détection et de correction du front d'onde dans le plan focal (voir section 1.2.1.3). Asterix est publiquement disponible sur GitHub <https://asterix-hci.readthedocs.io/en/latest/>.
- **DiskFM** est un code intégré à la librairie pyKLIP (WANG et al., 2015). Il permet de simuler les effets de traitements d'images sur les disques de débris (voir section 1.2.2.2) https://pyklip.readthedocs.io/en/latest/diskfm_gpi.html
- Cette liste de publication a été générée automatiquement à partir d'ADS. Si vous souhaitez l'utiliser pour produire la votre, le code est en open-access sur mon github : https://github.com/johanmazoyer/create_publication_list.