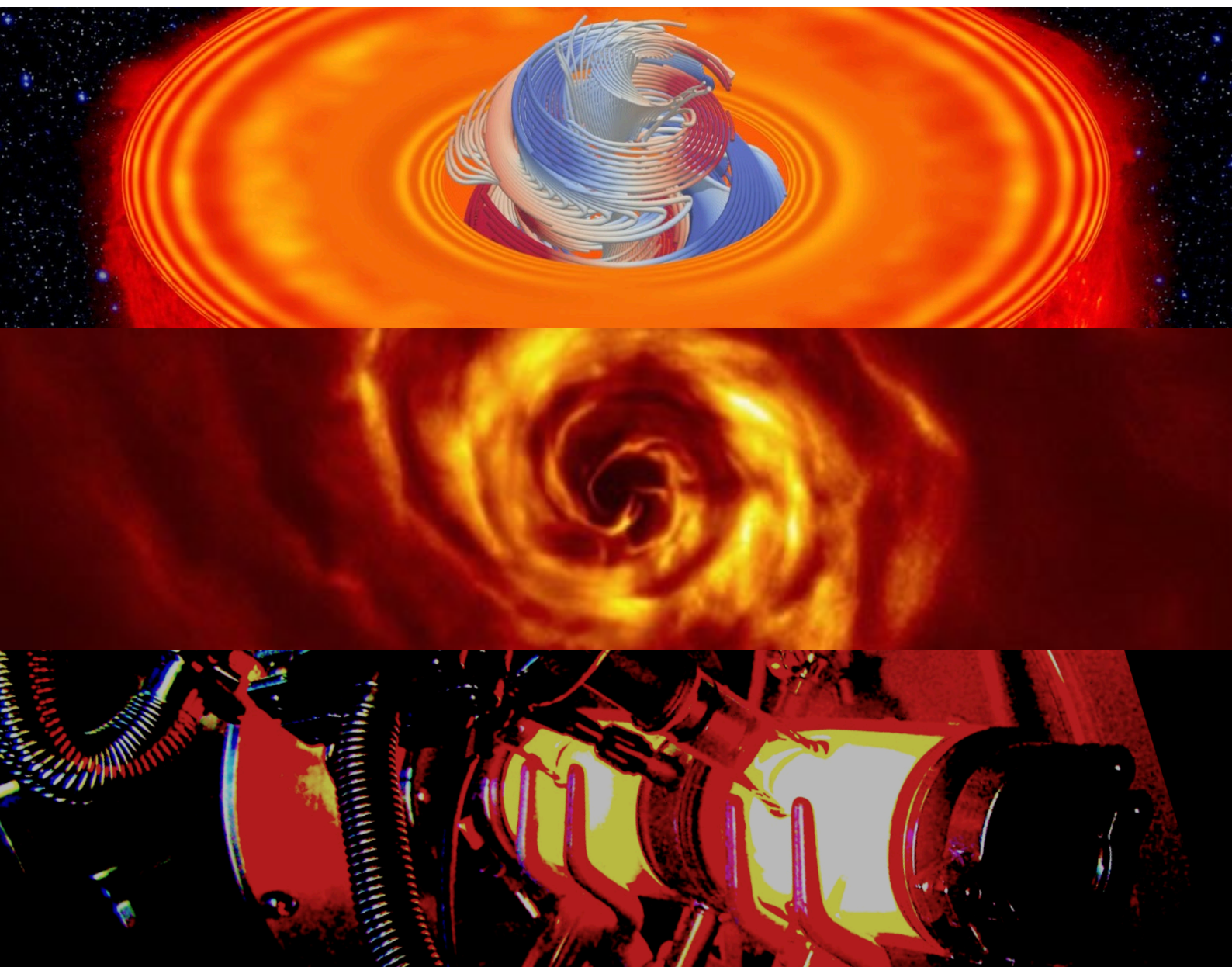


# Programme National de Physique Stellaire



**Bilan 2019-2023**  
**Prospective 2024-2028**



**PNPS**  
Programme National de  
Physique Stellaire



*Version préliminaire*

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Le conseil scientifique du PNPS : fonctionnement et bilan</b>	<b>5</b>
Les missions et la composition du CS . . . . .	5
Financement de projets . . . . .	5
Animation et formation . . . . .	9
Représentants du CS dans les comités . . . . .	10
<b>Panorama de la communauté PNPS</b>	<b>12</b>
Cartographie de la communauté PNPS . . . . .	12
Personnels permanents . . . . .	12
Thèses et Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) . . . . .	15
Recrutements sur la période 2019-2023 . . . . .	16
Distinctions . . . . .	16
Périmètre scientifique . . . . .	17
Thématiques . . . . .	17
Méthodologies . . . . .	18
Interfaces . . . . .	19
<b>Les moyens au coeur des activités du PNPS</b>	<b>23</b>
Instruments, équipements et infrastructures . . . . .	23
Les télescopes de 2M nationaux . . . . .	25
Les services nationaux d'observation . . . . .	27
Les codes de simulations numériques . . . . .	28
<b>Origines : formation stellaire et disques protoplanétaires</b>	<b>30</b>
Introduction . . . . .	30
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . . .	31
Processus transformant le gaz du milieu interstellaire en étoiles : une vision dynamique . . . . .	31
Moment cinétique : formation des disques protoplanétaires, jets et vents de disques . . . . .	32
Evolution chimique et des solides durant les phases enfouies . . . . .	32
Étoiles de pré-séquence principale : accréation/éjection, structure, environnement . . . . .	33
Caractérisation des disques protoplanétaires . . . . .	34
Dynamique et évolution des disques protoplanétaires . . . . .	35
La fonction de masse . . . . .	36
Conclusion . . . . .	36
<b>Champ magnétique et activité stellaire</b>	<b>37</b>
Introduction . . . . .	37
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . . .	37

Champ magnétique dans les zones radiatives . . . . .	37
Champ magnétique dans les zones convectives . . . . .	40
Impact de la variabilité stellaire sur la détectabilité et la caractérisation des exoplanètes . . . . .	43
Conclusion . . . . .	44
<b>Evolution, structure interne et atmosphère</b>	<b>45</b>
Introduction . . . . .	45
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . . .	45
Structure interne et processus dynamiques . . . . .	45
Atmosphères Stellaires . . . . .	48
Paramètres fondamentaux . . . . .	50
Conclusion . . . . .	53
<b>Interactions : étoile-planète.s, étoile-disque, étoile-étoile.s, populations stellaires</b>	<b>54</b>
Introduction . . . . .	54
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . . .	54
Interactions étoile-planète . . . . .	54
Interactions étoile-étoile . . . . .	55
Interactions étoile-disque . . . . .	57
Conclusion . . . . .	57
<b>Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes</b>	<b>58</b>
Introduction . . . . .	58
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . . .	58
Perte de masse : origines et propriétés . . . . .	59
Comment les étoiles ont-elles évolué pour donner les objets compacts et phénomènes transitoires qu'on observe? . . . . .	60
Conclusion . . . . .	62
<b>Astrophysique de laboratoire</b>	<b>63</b>
Introduction . . . . .	63
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . . .	63
Physique atomique et moléculaire . . . . .	63
Propriétés des poussières . . . . .	65
Phénomène d'accrétion et éjection . . . . .	66
Conclusion . . . . .	67
<b>A Annexes</b>	<b>68</b>

# LE CONSEIL SCIENTIFIQUE DU PNPS : FONCTIONNEMENT ET BILAN

## LES MISSIONS ET LA COMPOSITION DU CS

Le Programme National de Physique Stellaire de l'INSU est l'un des sept Programmes Nationaux qui pavent la discipline de l'astrophysique. Ce programme est animé par un Conseil Scientifique (CS) d'une quinzaine de personnes, lui-même dirigé par un binôme de direction constitué d'un(e) président(e) du CS et d'un(e) directeur(ice). Le PNPS a trois missions principales, à savoir :

- la structuration de la communauté par l'accompagnement de projets scientifiques dans le domaine de la Physique Stellaire.
- une mission d'animation, de formation, d'information et de représentation de la communauté de Physique Stellaire et de ses interfaces.
- une mission d'expertise pour l'INSU par le biais de la Commission Spécialisée Astronomie Astrophysique (CSAA) mais également pour les partenaires tels que le CNES.

Pour mener à bien ses missions, le CS du PNPS s'appuie sur un appel d'offre annuel (AO) qui permet de financer des projets scientifiques et des ateliers ou conférences. Les réponses à cet AO sont évaluées lors d'une réunion du CS qui se déroule à l'automne et qui est également l'occasion de faire le bilan des actions de l'année et d'interagir avec les partenaires du PNPS que sont l'INSU, le CNES, et le CEA. Au fil de l'eau, le CS est également sollicité pour effectuer des expertises.

Les membres du conseil scientifique sont nommés par l'INSU et choisis de telle sorte à assurer qu'ils soient représentatifs de la diversité thématique de la communauté nationale de physique stellaire ainsi que de l'implantation géographique. Ainsi, les membres du CS qui sont actuellement en fonction sont :

- Nadège Meunier (directrice) - IPAG, Grenoble
- Kevin Belkacem (président) - LESIA, Paris
- Christian Balança - LERMA, Paris
- Clément Baruteau - IRAP, Toulouse
- Xavier Bonfils - IPAG, Grenoble
- Hervé Bouy - LAB, Bordeaux
- Jean-Claude Bouret - LAM, Marseille

- Benoit Commerçon - CRAL, Lyon
- Orlagh Creevey - Lagrange, Nice
- Sébastien Deheuvels - IRAP Toulouse
- Astrid Lamberts - Lagrange, Nice
- Maud Langlois - CRAL, Lyon
- Joao Pedro Marques - IAS, Orsay
- Anaëlle Maury - CEA, Saclay
- Alessandra Ravasio - LULI, Palaiseau
- Sophia Sulis - LAM, Marseille

Lors du mandat 2019-2023, à la suite d'un renouvellement partiel, un certain nombre de membres ont quitté le CS. Ces anciens membres sont :

- Agnès Lèbre (directrice, 2018-2022) - LUPM, Montpellier
- Céline Reylé (présidente, 2018-2022) - UTINAM, Besançon
- Franck Delahaye (2018-2022) - LERMA, Meudon-Jussieu
- Nicolas Grosso (2016-2019) - LAM, Marseille
- Eric Lagadec (2016-2019) - Lagrange, Nice
- Julien Morin (2016-2019) - LUPM, Montpellier
- Nicolas Nardetto (2016-2019) - Lagrange, Nice
- Christophe Winisdoerffer (2016-2019) - CRAL, Lyon

Ainsi, les membres du CS ont été choisis pour leurs expertises qui couvrent l'ensemble des thématiques abordées par la communauté PNPS et en accord avec les thèmes prioritaires tels qu'explicités dans le chapitre suivant (Panorama de la communauté PNPS).

## FINANCEMENT DE PROJETS

Comme déjà évoqué ci-dessus, l'accompagnement de projets scientifiques dans le domaine de la Physique Stellaire est la principale mission du PNPS. Pour cela, une action récurrente consiste à organiser un appel d'offre annuel qui finance un certain nombre de projets dont nous établissons un rapide bilan ci-dessous pour la période 2019-2023. Avant cela, il convient néanmoins de rappeler que cette période a été traversée par la pandémie de la COVID19 qui a bouleversé nos activités de recherche. Le bilan que nous dressons est donc fortement marqué par cette période et, faute d'un recul suffisant, il ne nous



semble pas encore possible de dire si nous nous dirigeons vers un retour à la période pré-COVID ou si nos pratiques de recherche (tant du point de vue qualitatif que quantitatif) ont été durablement affectées par cette crise.

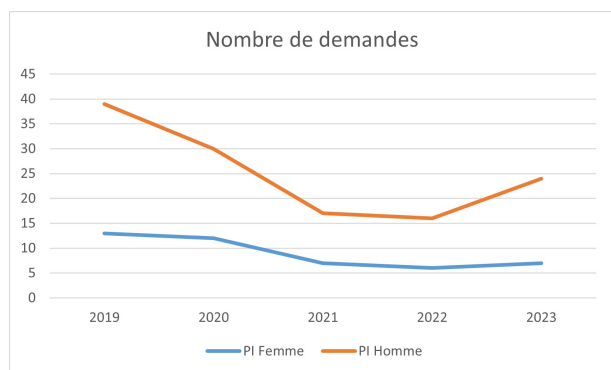


FIGURE 1 – Nombre de demandes sur l'ensemble des AO (hors budget de fonctionnement du CS). L'évolution est similaire pour les porteurs femmes et hommes, avec une proportion de 26% de demandes portées par des femmes, ce qui est représentatif de la communauté.

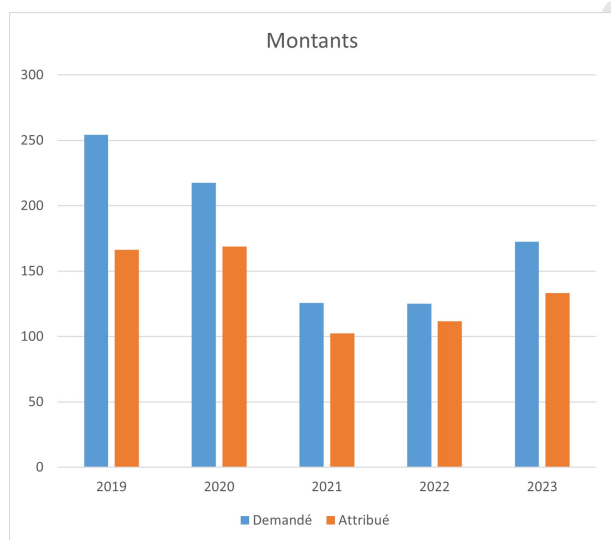


FIGURE 2 – Montants demandés et attribués (en k€) par AO. Notons que le pourcentage d'attribution est en moyenne de 84% pour les femmes et de 74% pour les hommes.

Ainsi, à la fois le nombre et le montant total des demandes faites au CS du PNPS a connu une baisse qui est essentiellement due à la situation pandémique (Figs. 1 et 2), qui a en particulier limité les déplacements qui représentent une partie importante

des demandes de budget. La pression moyenne est de l'ordre de 1.1, avec une baisse lors de la pandémie. La tendance semble s'inverser depuis 2022 avec une augmentation du nombre de demandes et de la pression lors des exercices 2023 et 2024 (les montants demandés ont retrouvé le niveau pré-pandémie en 2024). Il est néanmoins à noter que la décroissance du nombre résulte en partie d'une double volonté de la part du conseil scientifique du PNPS; structurer la communauté (regroupement de certaines demandes afin de favoriser la mise en réseau et les collaborations) mais aussi favoriser l'émergence de projets d'ampleur dans la communauté (type ANR et ERC). Cette politique s'avère être fructueuse tant nous constatons une augmentation du nombre de financements type ANR, ERC dans la communauté par rapport à la période précédente. En effet, nous comptabilisons 22 ANR et 17 ERC obtenues ou en cours en physique stellaire pour la période 2019-2023 (voir Tabs. 1 et 2 pour les listes exhaustives) contre 10 projets ANR et 5 projets ERC pour la période 2015-2018. Cette constatation est consolidée par les réponses au sondage effectué en 2022 auprès de la communauté (voir Sect. pour plus de détails sur ce sondage) comme le montre la Fig. 3 qui présente donc le nombre de personnes bénéficiant des différents types de projets. La répartition est dominée par les ANRs, suivi de manière assez équivalente (en nombre) par les Universités, ERC, agence spatiale et PIA. Les montants sont bien sûr être assez différents. La catégorie "Autres" regroupe des sources assez diverses : Observatoires (Observatoire de Paris, OCA), INSU (hors PN/AS, par exemple CSAA), CPER, IN2P3, le CEFIPRA, des financements européens (hors ERC : Marie Curie, H2020) et des financements étrangers. Enfin, nous notons avec satisfaction que les réponses à l'enquête effectuée insistent sur le rôle fondamental du PNPS et de son AO pour permettre de consolider ce type de demande, dont le taux de réussite est globalement faible.

De plus, outre le rôle de structuration de la communauté et d'amorçage de projets de plus grande ampleur (le montant des demandes est en moyenne de 5.2 k€, avec une moyenne de 4 k€ attribué), le CS du PNPS permet de financer des projets de longue haleine qui ne bénéficient pas actuellement d'une forte visibilité mais qui s'avèrent fondamentaux tant ils irriguent toute la communauté. En terme de publications sur la période 2019-2023, une limite infé-

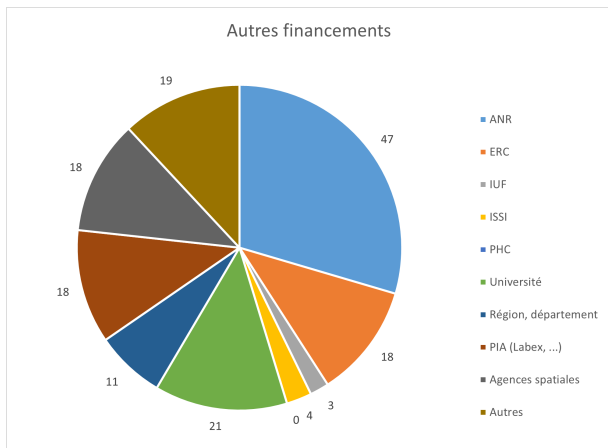


FIGURE 3 – Nombre de personnes, ayant répondu au sondage 2022, ayant bénéficié de financements autres que ceux des PN et AS.

rieur donne 297 [à consolider en 2024] publications avec une baisse notable en 2021-2022 durant la période pandémique<sup>1</sup>.

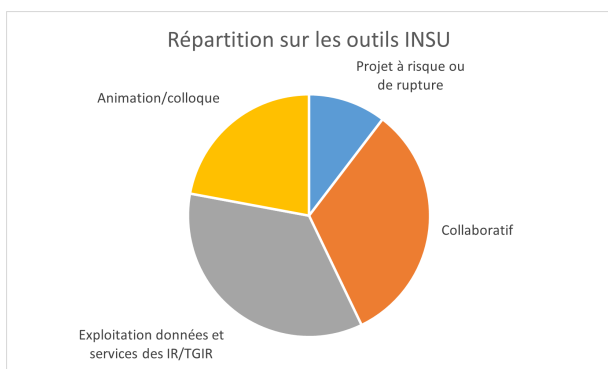


FIGURE 4 – Répartition des demandes sur les outils INSU (depuis l'AO 2021 inclus).

Les Figs. 4 et 5 présentent la répartition des demandes sur les outils INSU mis en place à partir de l'AO 2021 ainsi que sur les thèmes prioritaires définis par le PNPS lors du dernier exercice de prospective. Tous les outils INSU sont représentés, avec une prédominance des projets collaboratifs et de l'exploitation des données et services des IT/TGIR. Cependant, il est à noter que de nombreux projets pourraient émerger à plusieurs outils (il est en particulier possible d'être à la fois sur Collaboratif, Exploita-

1. Les porteurs de projets reçoivent la consigne de remercier le PNPS dans leurs publications correspondant à des travaux soutenus par le CS du PNPS. Nous avons donc comptabilisé le nombre de publications ayant bénéficié d'un financement du PNPS sur cette base à l'aide d'ADS.

tion des données et services des IT/TGIR, et Risque ou rupture) étant donné qu'ils ne sont pas mutuellement exclusifs.

En ce qui concerne les axes prioritaires du PNPS (4 axes prioritaires sur la période, 2 axes transverses, et un dernier axe qui portant sur les stades évolués qui n'est pas représenté sur la Fig. 5 car ajouté en juin 2022 seulement), ils sont définis comme suit :

- ORI : Origines : formation stellaire et disques protoplanétaires
- MAG : Champ magnétique et activité stellaire : origine, nature et effet dans tout le diagramme HR, importance pour la recherche et la caractérisation des exoplanètes
- EIA : Evolution/Intérieurs/Atmosphères : transport, oscillations, paramètres fondamentaux, perte de masse, multiplicité
- INT : Interactions : étoile-planète.s, étoile-disque, étoile-étoile.s, populations stellaires
- LAB : Astrophysique de laboratoire : expériences de laboratoire à vocation astrophysique stellaire (jets/chocs, lasers de puissance...), expériences numériques (multi-D, Big Data...)
- SYN : Synergies de méthodes : focus sur objets prototypiques, benchmarks,...
- ULT : Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes

A la fois en terme du nombre de demandes et des montants demandés et alloués, la répartition est plutôt homogène à l'exception des thèmes *Synergie de méthodes* (SYN) et *Champ magnétique et activité stellaire* (MAG) en raison de leur caractère transverse et donc du recouvrement avec les autres thèmes. En effet, l'étude du champ magnétique est une thématique que l'on retrouve dans la majorité des autres thèmes prioritaires.

Enfin, de nombreuses demandes émergent à d'autres PN. La plus grosse catégorique concerne la thématique exoplanètes, avec des demandes examinées par le Comité Exoplanète Transverse (CET) en amont des réunions du CS du PNPS, depuis l'automne 2020 (AO 2021). Au cours des 3 derniers AO, cela a concerné un total de 27 demandes (dont la moitié lors de l'AO 2022), soit un tiers des demandes vues par le CS du PNPS. En dehors de cette thématique exoplanètes, nous avons reçu de manière régulière des demandes PN à l'interface avec le PCMI, le PNCG et le PNHE.

TABLE 1 – ANR achevées ou obtenues depuis 2019 (le laboratoire indiqué est celui du porteur de projet).  
 [TBC 2023]

Laboratoire	Nom du porteur	Titre	Années
CRAL	Maud Langlois	DDISK	2021-2026
LAB	Sylvain Bontemps	GENESIS	2017-2021
Lagrange	Anthony Meilland	MASSIF	2022-2026
	Andrea Chiavassa	PEPPER	2021-2024
	Astrid Lamberts	COSMERGE	2021-2024
	Alexandra Recio Blanco	ArchéoGal	2015-2020
	Sylvestre Lacour	exoVLTi	2021-2025
LESIA	Pierre Kervella	UnlockCepheids	2015-2020
	Dahbia Talbi	ODUST	2022-2026
LUPM	Frédérique Motte	COSMHIC	2021-2025
IPAG	Mickaël Bonnefoy	FRAME	2021-2025
	Xavier Delfosse	SPLASH	2018-2023
	François Ménard	Planet-forming Disks	2016-2021
	Evelyne Alecian	PROMETHEE	2023-2026
	Sébastien Charnoz	DISKBUILD	2021-2025
IRAP	Sébastien Deheuvels	BEAMING	2019-2023
	Michel Rieutord	ESRR	2017-2021
	Stéphane Charpinet	INSIDE	2018-2023
ObAS	Ariane Lançon	POPSYCLE	2020-2024
LPSC	Frédéric Mayet	NIKA2Sky	2016-2019
Inst. des Sciences Moléculaire	Thierry Stoecklin	Waterstars	2021-2025
IPGP	Sebastien Charnoz	DISKBUILD	2020-2025



TABLE 2 – ERC achevées ou obtenues depuis 2019 (le laboratoire indiqué est celui du porteur de projet).  
[TBC 2023]

Laboratoire	Nom du porteur	Titre	Années
CEA	Anaëlle Maury	MagneticYSOs	2016-2022
	Anaëlle Maury	PEBBLES	2023-XXXX
	Patrick Hennebelle	ECOGAL	2021-2026
	Allan Sacha Brun	Whole Sun	2019-2026
	Stéphane Mathis	SPIRE	2015-2021
CRAL	Guillaume Laibe	Podcast	2020-2025
	Isabelle Baraffe	COBOM	2018-2024
IPAG	Jérôme Bouvier	SPIDI	2018-2023
	Geoffroy Lesur	MHDiscs	2019-2024
	Francois Menard	DUST2PLANETS	2022-2027
	Nicolas Cuello	Stellar-MADE	2022-2027
IRAP	Myriam Benisty	PROTOPLANETS	2021-2026
	Jean-François Donati	NewWorlds	2017-2023
Lagrange	Denis Mourard	ISSP	2020-2025
IRAP	Audrey Coutens	Chemtrip	2021-2026
LESIA	Anne-Marie Lagrange	COBREX	2021-2026
	G Pietrzyński	CepBin	2016-2021
	Pierre Kervella et al.	UniverScale	2021-2027

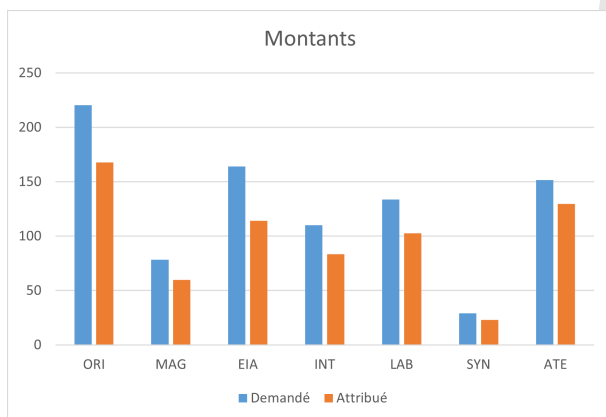


FIGURE 5 – Montant demandés et attribués (en k€) par thème prioritaire et intégré sur la période 2019-2023.

## ANIMATION ET FORMATION

Une autre des missions fondamentales du PNPS est de financer, organiser, et impulser des actions d’animation et de formation pour la communauté de physique stellaire. Cela se traduit par des actions récurrentes (par ex. l’organisation d’écoles Evry Schatzman), des actions plus ponctuelles (par ex. le finan-

cement d’ateliers et conférences), mais également par des actions de communications à destination de la communauté et au-delà.

### Actions récurrentes

Le PNPS participe tous les ans aux journées SF2A par différents moyens. Le PNPS propose un orateur en session plénière, dont la liste est indiquée dans la Table 1. Nous organisons également un atelier d’une demi-journée chaque année, portant en général sur l’ensemble des thématiques du PNPS. Enfin, le PNPS est régulièrement associé à d’autres ateliers de ces journées (Table 2).

De plus, le PNPS organise pratiquement tous les ans l’Ecole Evry Schatzman. Cette école organisée une semaine en général à l’automne, porte sur des thématiques du PNPS, parfois en collaboration avec d’autres programmes nationaux. La liste est indiquée dans la Table 3 et a couvert une bonne partie des axes thématiques du PNPS. Nous avons également fait des choix permettant de mettre l’accent sur des projets instrumentaux dans laquelle la France s’est impliquée fortement comme SPIROU, Gaia, le JWST, et les instruments de l’ELT.

## Soutien à des ateliers et conférences

La Table 4 fournit la liste des ateliers et conférences auxquels le CS du PNPS a apporté son soutien. Cette liste n'inclut pas les Ecoles Evry Schatzman, qui sont décrites plus haut. Plusieurs conférences ont été annulées en raison des conditions pandémiques en 2020 et 2021 : Colloque OHP2020 : Planets of red stars (Isabelle Boisse), Ecole des Houches "Chocs Interstellaires" (Antoine Gusdorf), Doctoral Training : Plasmas in Extreme Environments : from Astrophysics to the Laboratory (Mickael Greck). Certaines financées durant ces 2 années ont également eu lieu plus tard (2022-2023). Le nombre de conférences et ateliers est cependant remonté au niveau pré-covid en 2023. Les montants consacrés à ces actions sont présentés plus haut dans la section Budget.

## Actions de communication

Le site du PNPS a été refait en 2021, sous la responsabilité de Clément Baruteau. Le site est hébergé par le CNRS (<https://pnps.cnrs.fr/>). Il présente les thèmes prioritaires, les appels d'offre en cours, des informations sur l'animation par le CS (Ecole Evry Schatzman, journées PNPS), des documents (bilan et prospective). Le logo a également été refait à cette occasion : il a été réalisé par Alexis Lavail et utilise une image adaptée d'une simulation numérique de supergéante rouge fournie par Bernd Freytag.

Enfin, la liste de diffusion du PNPS (dite *forum-etoiles*) est principalement utilisé par la direction du programme pour diffuser une lettre en général hebdomadaire. A la date de juin 2023, elle comprend 334 membres (368 abonnés incluant des doublons), correspondant à différents statuts : chercheurs et ingénieurs (permanents, doctorants, post-doctorants) et retraités (émérites ou non). Davantage de détails sont présentés dans le chapitre Panorama de la communauté.

## REPRÉSENTANTS DU CS DANS LES COMITÉS

Plusieurs membres du CS du PNPS sont présents dans des comités et conseils au titre du CS, au sein desquels ils apportent leur expertise en physique stellaire. Cette représentation permet également de tenir le CS régulièrement informé de l'état d'avancement (pour les comités de suivi) des actions en cours et des problèmes éventuels.

## Comités associés aux télescopes nationaux

Le comité d'attribution de temps (TAC) sur les télescopes nationaux de 2 mètres (T2m) a été mis en place par une lettre de mission de l'INSU en Juillet 2018. Sa mission est d'évaluer les demandes de temps sur le Télescope Bernard Lyot (TBL) de l'OMP et le télescope de 193 cm (T193) de l'OHP, suite à un appel d'offres (AO) ouvert chaque semestre par l'INSU. Côté TBL, les observations s'effectuent en mode service et concernent le spectropolarimètre Neo-Narval. Ce dernier a remplacé Narval courant 2020 et vise à une stabilité vélocimétrique de l'ordre de 3 m/s. Côté T193, les observations sont principalement en mode visiteur, avec au plus une dizaine de nuits offertes par semestre en mode service. Les instruments qui y sont disponibles sont : (i) SOPHIE, spectrographe échelle atteignant une précision de 1 à 2 m/s, (ii) MISTRAL, spectrographe imageur basse résolution mis en service en 2021, et (iii) des instruments visiteurs comme GHASP, Fabry-Pérot dédié à la cinématique galactique.

	2019		2020		2021		2022		2023	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
PNPS	Julien Morin (président)		Xavier Bonfils		Astrid Lamberts		Clément Baruteau (président ≥ 2021A)			
PNP	Jean-Charles Augereau				Tristan Guillot		Sandrine Guerlet			
PNCG	Rodrigo Ibata				Nadège Lagarde	Anne-Laure Melchior		Joakim Rosdahl		
PNHE					Sylvain Chaty		Alexis Coleiro			
PCMI					Cécile Gry					

FIGURE 6 – Composition du comité d'attribution de temps sur les télescopes nationaux de 2 mètres entre les appels d'offres 2019A et 2023B.

Ainsi, pour sélectionner les réponses aux appels d'offre, le TAC T2m est constitué de membres des CS des programmes nationaux (PN). Sa composition depuis l'AO 2019A est indiquée à la Fig. 6. Le TAC compte également comme invités permanents des représentants des T2m et de l'INSU, sans voix délibérative dans l'allocation des demandes. A noter que le CS du PNPS est également représenté dans les CS

du T193 et du TBL.

### Comité Exoplanète Transverse (CET)

A la suite de la prospective 2019, l'INSU a créé en 2021 le Comité Exoplanètes Transverse (CET) afin de répondre à la demande de la communauté de créer un PN dédié à cette thématique. Le CET est composé de membres de CS de PNs (PNP, PNPS, PCMI, PNST) et de l'ASHRA. La mise en place et la responsabilité a été assurée par N. Meunier, membre du CS du PNPS (jusqu'à fin 2022). Cette responsabilité est depuis début 2023 assurée par M. Langlois (membre du CS PNPS), en coordination avec I. Boisse (membre du CS PNP). Le CET évalue sur demandes des directions de PN les dossiers à l'interface entre les PN (c'est-à-dire concernant au moins 2 PNs) sur cette thématique, en particulier sur l'AO INSU, évaluation de services d'observations. Le CET ne bénéficiant d'aucun budget propre, ses évaluations sont donc scientifiques, assorties d'une proposition de financement transmise aux CS des PNs. Enfin, le CET assure l'animation de la communauté et la prise en charge du bilan et de la prospective sur la thématique exoplanètes (voir document PNP, thème systèmes exoplanétaires).

### Autres comités avec des représentants PNPS

Hormis les comités associés aux télescopes nationaux et au CET, les membres du CS du PNPS sont impliqués dans de nombreux autres conseils et comités, à savoir ;

- *CS Actions Spécifiques (AS)* : le PNPS est impliqué dans 2 Actions Spécifiques de l'INSU, à savoir l'AS numérique (créée en 2022, le représentant PNPS est B. Commerçon) et l'AS Observatoire Virtuel (le représentant PNPS est K. Belkacem).
- *CS Pôles Thématiques Nationaux (PTN)* : ces CS ont pour rôle de structurer l'organisation des services d'observations concernés par ces pôles, en émettant des recommandations sur les services fournis, sur leur évolution, leur coordination et activités d'animation de la communauté. Le CS du PNPS est représenté dans les CS de trois de ces pôles thématiques nationaux, au sein desquels ils apportent une expertise en physique stellaire (JMMC : O. Creevey, Modèle de référence pour la matière interstellaire : B. Commerçon, Diffusion des données atomiques et moléculaires : F. Delahaye - jusqu'à 2022).

- *Comités VLT et E-ELT* : le CS du PNPS est représenté dans les comités de suivi de GRAVITY+ et des instruments E-ELT (un seul comité à partir de 2021). Cette participation à ces comités permet d'y apporter l'expertise, et d'informer régulièrement le CS du PNPS des avancées techniques, choix instrumentaux, et de leur impact sur les objectifs scientifiques de ces instruments (GRAVITY+/VLTI : A. Maury, MOSAIC/E-ELT [2020-2021] : A. Lèbre, HARMONI/E-ELT [2020-2021] : M. Langlois, MICADO/MAORI/E-ELT [2020-2021] : C. Reylé, METIS/E-ELT [2020-2021] : M. Langlois, Instrumentation E-ELT [2021-] : M. Langlois).

## PANORAMA DE LA COMMUNAUTÉ PNPS

Le Programme National de Physique Stellaire est une instance qui s'adresse aux personnels ayant une activité de recherche en physique stellaire ou à ses interfaces. Leurs statuts sont multiples (poste permanent ou non-permanent) et ils peuvent relever de laboratoires de l'INSU, du CEA, ou encore de l'INP et de l'IN2P3. Ainsi, établir une cartographie exhaustive de la communauté n'est pas toujours une chose facile mais nous pouvons néanmoins dire qu'au sens large la communauté PNPS est de l'ordre de 330 personnes<sup>1</sup>. Pour aller plus loin et affiner notre analyse, nous nous sommes appuyé sur deux sources d'information que nous décrivons plus en détails ci-dessous, à savoir; une enquête effectuée auprès de la communauté PNPS (et des directeurs d'unité en février-mai 2022) et des échanges directs avec les équipes de physique stellaire dans les laboratoires (entre Juin et Septembre 2023).

L'enquête auprès de la communauté PNPS a été lancée durant la période février-mai 2022 et diffusée via la liste de diffusion forum-etoile. Une relance des personnels non-permanents a été effectuée afin de récolter le maximum de réponses. Ceci a permis d'aboutir à 184 réponses (dont 147 personnels permanents, voir Table 1), dont 163 complètes et permet une analyse statistiquement représentative des activités de la communauté en physique stellaire en France, mais elle sous-estime le nombre de personnes impliquées. Ce sondage a en parallèle été complété par une enquête auprès des directeurs d'unité (15 laboratoires), effectuées aux mêmes dates. La seconde source d'information évoquée ci-dessus correspond aux entretiens effectués lors de la période Juin-Septembre 2023 entre la di-

TABLE 1 – Sondage effectué par le PNPS en direction de la communauté en Février-Mars 2022 : quelques chiffres clés

Source	Nombre
Enquête 2022-2023	181 réponses <i>147 permanents</i> <i>31 non-permanents</i> <i>6 émérites</i>
Dir. Unités	15 laboratoires
forum-etoile	334 abonnés

rection du PNPS et les équipes identifiées comme ayant une part significative de leurs activités autour des thèmes de physique stellaire (voir Table 2). Ces entretiens, d'une à deux heures par équipe ont permis d'affiner le bilan scientifique et la prospective mais aussi d'obtenir quelques éléments quantitatifs qui sont inclus dans ce chapitre.

### CARTOGRAPHIE DE LA COMMUNAUTÉ PNPS

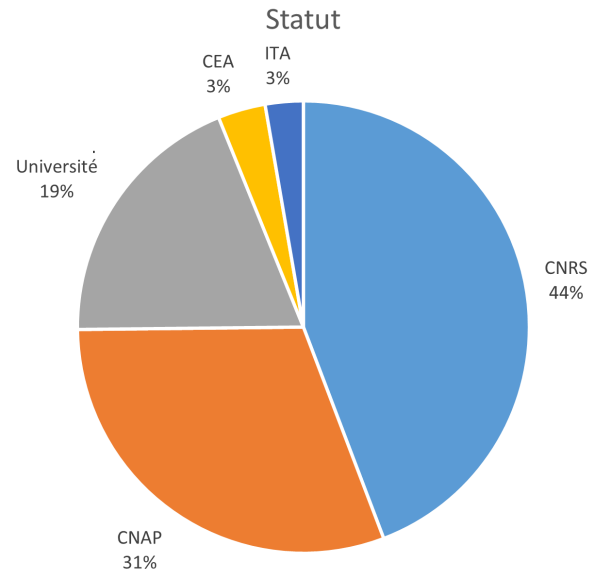
#### Personnels permanents

Le nombre de permanents dans le domaine de la physique stellaire (principalement chercheurs mais aussi les ingénieurs fortement intégrés dans les équipes) ayant répondu à l'enquête est de 147, auxquels s'ajoutent 6 émérites. Nous estimons également qu'il y a de l'ordre de 70 permanents en plus impliqués en physique stellaire d'après les abonnés sur la liste forum-etoile. Soit un total de l'ordre de 210 personnels permanents qui relèvent pour tout ou partie de leurs activités du PNPS. Les statuts de ces personnels sont variés avec une répartition proche de l'ensemble de la communauté AA, hormis une prédominance notable de personnel CNRS et une sous-représentation de personnel des universités au PNPS (Fig. 1, panel du haut).

1. Il y a en effet un total de 368 abonnés sur la liste de diffusion du PNPS forum-etoile, correspondant à 334 personnes uniques (à la date de juin 2023). Ce chiffre correspond bien évidemment à l'ensemble des personnels intéressés par la physique stellaire, quelque soit leurs statuts.

TABLE 2 – Liste des équipes incluant des activités en physique stellaire ayant eu des échanges avec le CS du PNPS dans la période Juin-Septembre 2023. Pour certaines équipes des entretiens n’ont pu être effectués et un questionnaire a été transmis (en italique). De même quand la notion d’équipe de physique stellaire n’avait pas de sens, des contacts individuels ont été pris par courriel.

Laboratoire	Equipe
UTINAM	Équipe PhAs
LUPM	Astrophysique Stellaire
LESIA	Pôle ETOILE
LESIA	Pôle HPA
LESIA	Pôle Planéto
LESIA	Pôle HRAA
LERMA	Pôle 2
LAM	GECO
LAM	Systèmes Planétaires
Lagrange	Physique Solaire et Stellaire
Lagrange	Galaxies et Cosmologie
LAB	FEMIS
LAB	M2A
LAB	AMOR
IRAP	PS2E
IPAG	Sherpas
IPAG	Odyssey
IPAG	Exoplanètes
<i>IAS</i>	<i>Physique Solaire et Stellaire</i>
GEPI	Physique stellaire et galactique
LPENS	Astrophysique
<i>CRAL</i>	<i>AstroENS</i>
CRAL	AIRI
AIM	étoiles/soleil LDE3
AIM	MIS / formation stellaire LFEMI
<i>ObAS</i>	<i>N.A.</i>
<i>LUTH</i>	<i>N.A.</i>



Répartition hommes-femmes

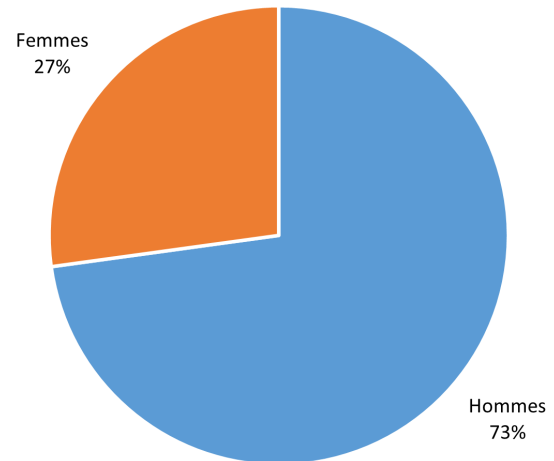


FIGURE 1 – (Figure du haut) Statut sur l’ensemble des permanents (portant sur 147 réponses). Note : "Université" correspond ici aux maîtres de conférence et professeurs uniquement, afin d’identifier les personnels CNAP. (Figure du bas) Répartition hommes/femmes sur l’ensemble des permanents.

La répartition hommes-femmes pour les permanents (elle est similaire sur l’ensemble des personnels ayant répondu au sondage) est présentée en Fig. 1 (panel du bas), avec une communauté composée de 27% de femmes et de 73% d’hommes, ce qui est légèrement supérieur à la communauté en

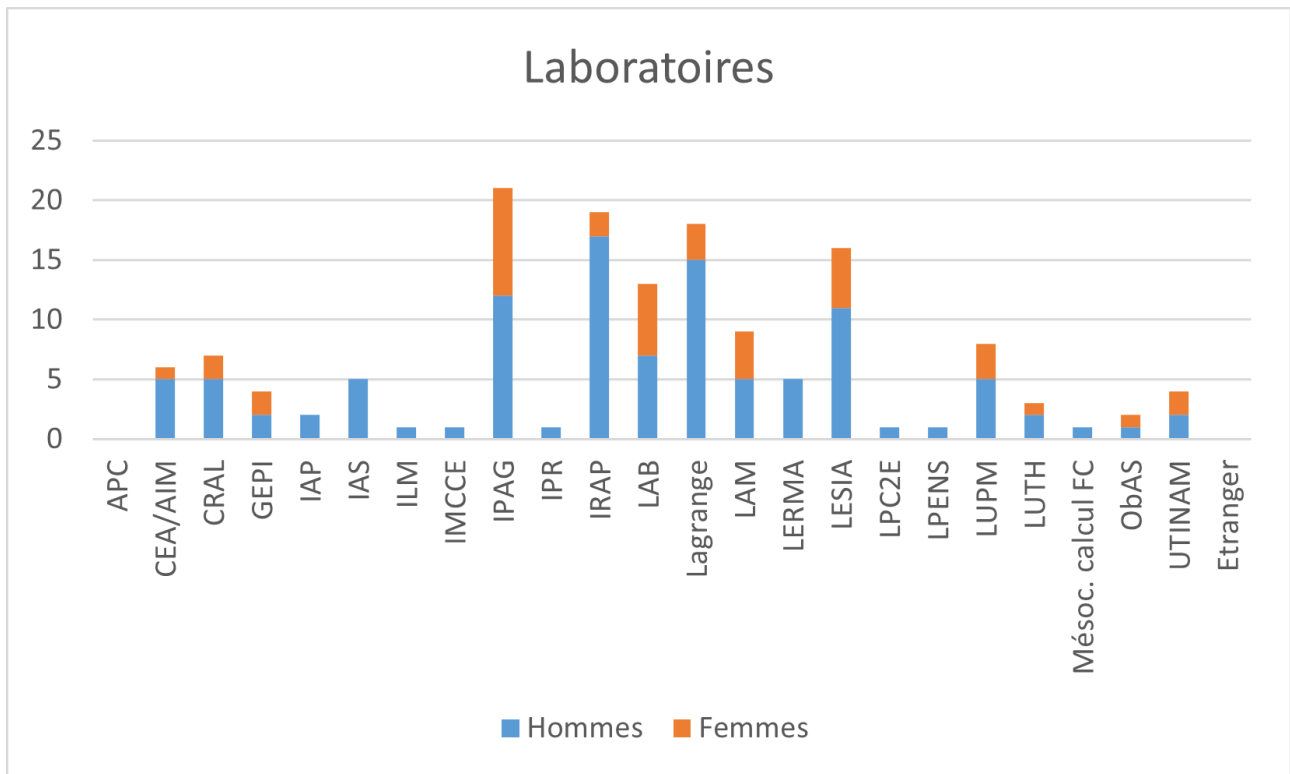


FIGURE 2 – Répartition des permanents hommes (bleu) et femmes (orange) par laboratoire (sur 184 réponses).

astronomie-astrophysique en France (23% de femmes, basé sur les 707 personnes dans les corps du CNRS, CNU et CNAP en 2020<sup>2</sup>; 25% basé sur des chiffres fournis par les sections en 2023). Il y a cependant une grande disparité entre laboratoires, y compris ceux avec une forte représentation de la physique stellaire (Fig. 2). La répartition par type de poste présente de petites disparités, mais pas toujours significatives étant donné les petits nombres. Le pourcentage de femmes le plus élevé est observé pour les personnels CNAP (33%, légèrement au-dessus de l'ensemble des personnels CNAP en Astronomie-Astrophysique qui est de 29% en 2023) et plus faible pour les personnels CNRS (26%, légèrement au-dessus de l'ensemble des personnels CNRS en section 17 qui est de 24.5%) et les personnels des universités (25%, également supérieur à la population total en Section 34 du CNU qui est en dessous de 20%).

Enfin, la proportion de personnels de rang A diffère selon le genre. Dans le périmètre PNPS, 32 % des personnels de rang A sont des femmes, tandis que seulement 24% des rang B le sont. Cette tendance est

similaire aux chercheurs en section 17 du CNRS (27% des DR sont des femmes contre 21% des CR), mais elle est inverse pour le CNAP et le CNU. Une analyse de la distribution de la proportion de femmes dans la communauté PNPS en fonction de l'année de recrutement ne montre pas un biais dû à une différence recrutement au cours du temps pouvant expliquer cette différence. L'analyse montre en effet que de manière régulière, sur les recrutements 1985-2009, le pourcentage de femmes rang A est systématiquement plus élevé. Cette différence ne semble pas être due à une différence en terme de HDR, car le taux est similaire, ainsi qu'indiqué plus bas.

Pour ce qui concerne la répartition géographique, la physique stellaire est une thématique qui est bien répartie sur le territoire national (Fig. 3). Il y a bien sûr quelques pôles importants (avec 6 laboratoires incluant plus de dix permanents) mais aucun pôle dominant ne se dégage de la cartographie (voir aussi Fig. 2). Une comparaison avec la situation telle que présentée dans le bilan 2015-2018 semble montrer que cette répartition est relativement stable.

2. [http://sf2a.eu/Bot\\_Buat.pdf](http://sf2a.eu/Bot_Buat.pdf)



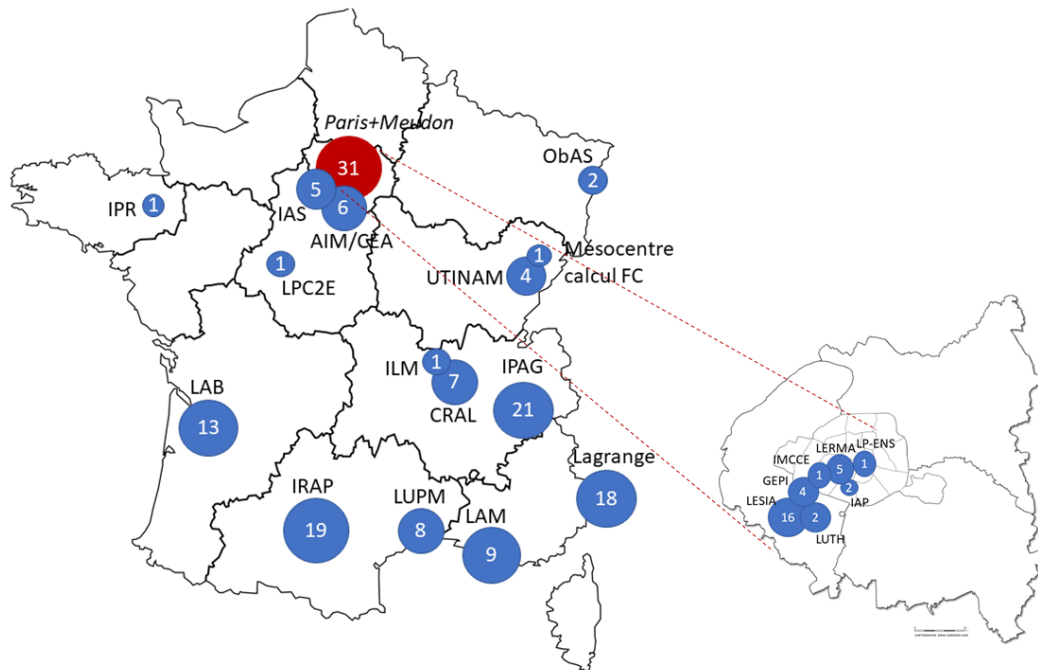


FIGURE 3 – Répartition géographique des personnels permanents ayant répondu à l'enquête par laboratoire, correspondant à un total de 22 laboratoires en France.

### Thèses et Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)

Un indicateur très important de la dynamique de la thématique relevant du périmètre PNPS est le nombre de thèses soutenues et en cours dans la période 2019-2023. Suite au sondage 2022, complété par les entretiens avec les équipes, la Table 5 donne un recensement exhaustif des thèses soutenues et en cours. Il apparaît que le nombre total des thèses est de 170 (100 soutenues et 70 en cours) ce qui est bien supérieur à la période 2015-2018 pour laquelle le nombre total était de 90 (56 soutenues et 34 en cours). Une telle évolution est remarquable et pointe un fort dynamisme de la communauté, que l'on peut également corrélérer avec une augmentation d'un facteur deux des ANR et ERC mais également avec l'arrivée d'instruments structurants pour la communauté de physique stellaire.

La distribution de ces doctorants et docteurs en terme de genre est conforme à la distribution pour les personnels permanents (28% de femmes). En terme thématique, comme le montre la Fig. 4, il y a deux thèmes qui dominent en terme du nombre de thèses, à savoir; le thème Origines (formation stellaire et disques proto-planétaires) et le thème Evo-

lution / Intérieurs / Atmosphères (transport, oscillations, paramètres fondamentaux, perte de masse, multiplicité). Une telle distribution, qui est en adéquation avec la structuration actuelle de la communauté (voir la Figure 5 du chapitre 1 sur le CS du PNPS), n'est pas surprenante mais son interprétation reste cependant à relativiser tant les recouvrements entre certains thèmes sont importants.

Enfin, il est intéressant d'essayer d'estimer pour chaque thèse quelle est la part du travail qui relève du périmètre du PNPS. Cela est résumé par la Fig. 5, qui permet d'estimer la proportion de thèses qui se situent aux interfaces du PNPS. Il apparaît que 55 % des thèses sont centrées quasi-exclusivement sur des questions relevant uniquement du PNPS et pour 83 % des thèses elles constituent la part essentiel du travail. Une telle distribution est fidèle aux grandes questions qui traversent actuellement la discipline (car celles-ci sont centrées sur l'objet "étoile") tout en étant révélateur du poids important des interfaces.

Enfin, pour ce qui concerne les HDR, 18 ont été obtenues pour la période 2019-2023 contre 16 pour la période 2015-2018. Le pourcentage de chercheurs permanents l'ayant obtenue est similaire pour les

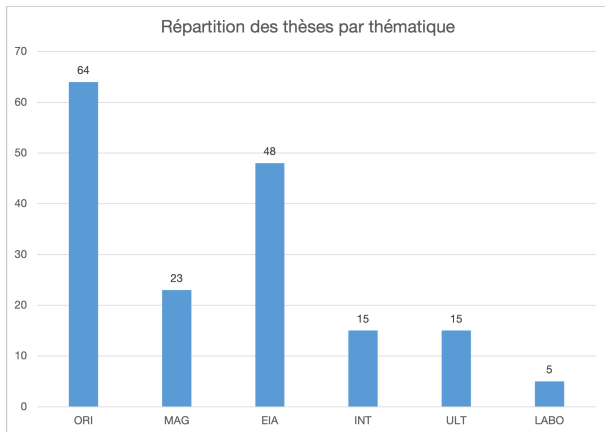


FIGURE 4 – Répartition des thèses par thématique.

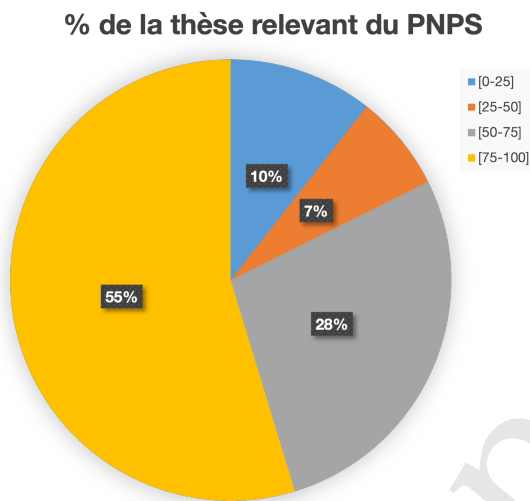


FIGURE 5 – Proportion des travaux de thèse relevant du périmètre du PNPS.

hommes et les femmes, respectivement de 67 % et 68 %. La distribution du nombre d'années après la thèse au moment du passage de la HDR présente un pic avec une médiane de 12 ans, et une dispersion très large. La moitié l'ont passée entre 10 et 14 ans après la thèse. La Table 6 présente la liste des HDR soutenues sur la période et portant pour tout ou partie sur une thématique du PNPS, soit 16 personnes dont 3 femmes.

## Recrutements sur la période 2019-2023

Sur la période, le nombre de recrutés ayant des activités pour tout ou partie lié aux questions scientifiques relevant du PNPs est de 20. Cela est sensiblement identique à la période précédente (19 entre 2015 et 2018). Pour aller plus loin, il est difficile

de s'appuyer sur de si petits nombres et sur une si courte période. C'est pourquoi, afin de dégager les principales tendances sur un temps long, nous nous sommes donc appuyé sur deux indicateurs. Le premier est le sondage qui permet d'avoir une vision représentative des années de recrutement des personnels permanents et le second est la liste complète des recrutements CNAP, CNRS, CEA et Universitaires depuis 2012.

Le premier indicateur permet tout d'abord d'établir le nombre de recrutement par période de 5 ans depuis 1980 (Fig. 6). S'il faut considérer avec prudence les chiffres absolus (car d'une part ils reposent sur le sondage qui n'est pas exhaustif mais statistiquement pertinent et d'autre part il repose sur la communauté effectuant actuellement des recherches en physique stellaire mais pouvant avoir été recruté initialement sur une autre thématique) la tendance fait sens et mérite de s'y pencher. Nous observons tout d'abord une croissance, liée à une augmentation globale du nombre de recrutement entre les années 1980 et les années 1990. En revanche, nous observons ensuite une décroissance très importante depuis 2010 qui semble se confirmer quant on regarde plus précisément la période 2012-2023, voir la Fig. 7. Les causes de cette chute ne sont pas clairement identifiées mais on remarque que près la moitié seulement des recrutés ont une part dominante de leurs activités sur les thématiques PNPS. Cette distribution marque le fait que les comités de sélections recrutent, pour près de la moitié, des candidats ayant une part minoritaire de leurs activités sur les thématiques PNPS. Si l'on compare à la distributions des thèses (voir Fig. 5), il y a donc là un possible biais de sélection qui pose question et qui rejoint une partie des préoccupations remontées par les équipes lors des entretiens. Il conviendrait donc d'aller plus avant dans cette analyse car il est important de s'assurer d'avoir des indicateurs fiables et non-biaisés avec de tirer des conclusions définitives. En effet, le sondage et la liste des thèses identifiées dans le périmètre PNPS peut être biaisé vers les plus fort pourcentage d'activité PNPS.

## Distinctions

Sur la période de référence 2019-2023, les chercheurs suivants ont été distingués, pour des activités concernant pour tout ou partie le PNPS :

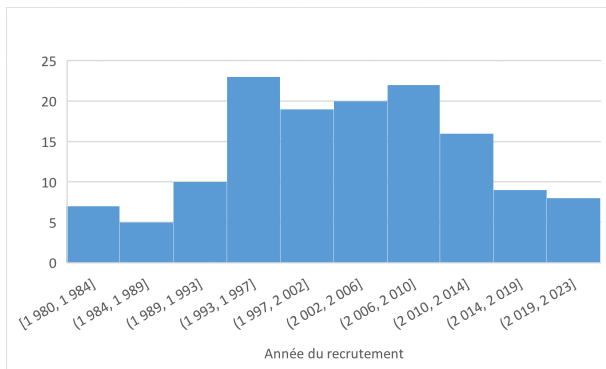


FIGURE 6 – Distribution du nombre de recrutement en fonction de l’année de recrutement (chercheurs permanents, 139 réponses).

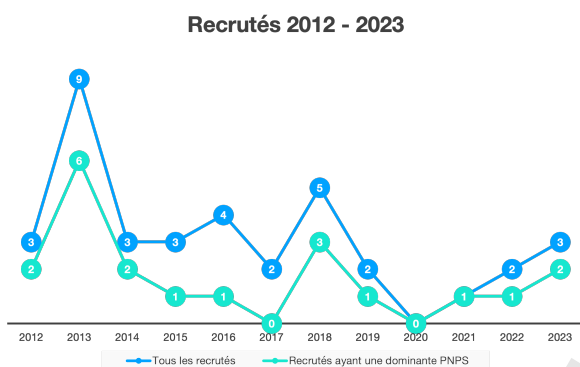


FIGURE 7 – Nombre de recrutements ayant au moins une part de leurs activités relevant du PNPS. La courbe bleue représente le nombre total de recrutements avec une composante PNPS (même faible) et la courbe verte est celle des recrutés pour lesquels les activités PNPS représentent la part dominante.

- Ugo Lebreuilly (CEA/AIM) Sant Cugat Forum Award for Young Scientists en 2019
- Sébastien Deheuvels (IRAP) Prix Jeune Chercheur de la SF2A en 2019
- Collaboration Gaia, ESA Team Award en 2019
- Isabelle Baraffe (CRAL) Viktor Ambartsumian International Science Prize en 2020
- Stéphane Guilloteau (LAB) Prix Deslandres de l’Académie des Sciences en 2020
- Anaëlle Maury (CEA/AIM) Prix Jeune chercheur SF2A en 2020
- Alexandre Santerne (LAM) Prix Gemini SF2A et SAF en 2020
- Jean-Luc Beuzit (LAM), Anthony Boccaletti (LESIA), Gaël Chauvin (Lagrange), Thierry Fusco (ONERA), Maud Langlois (CRAL) et David Mouillet (IPAG), Grand

Prix scientifique de la Fondation Charles Defforey, en 2020

- Jean-Philippe Berger (IPAG) Prix Michelson Lifetime en 2020
- Luc Dessart (IAP), Prix Gay-Lussar Humboldt en 2021
- Denis Mourard (Lagrange) Chevalier Ordre National du Mérite en 2021
- Antoine Strugarek (CEA/AIM) Prix MERAC pour le meilleur début de carrière en astrophysique en 2021
- Eric Lagadec et Mamadou N’Diaye (Lagrange) Prix tremplin de l’Académie des Sciences pour les collaborations avec l’Afrique Subsaharienne en 2021
- Guy Perrin (LESIA) Prix La Recherche en 2019, Prix Fizeau en 2020, élection à l’Académie des sciences en 2022
- Sylvestre Lacour (LESIA) Michelson Investigator Prize en 2022
- Collaboration Gaia, prix Berkeley en 2023
- Astrid Lamberts (Lagrange), médaille de bronze du CNRS en 2023
- [Compléter si besoin]

## PÉRIMÈTRE SCIENTIFIQUE

### Thématiques

Comme évoqué précédemment, à l’issue de la période 2015-2018, le CS du PNPS a défini 4 thèmes prioritaires ainsi que 4 thèmes transverses qui ont constitué notre grille de lecture pour la période 2019-2023. Les grandes questions scientifiques associées sont détaillées dans les chapitres dédiés à chacun. La liste des 4 thèmes prioritaires est rappelée ici :

- Origines : formation stellaire et disques protoplanétaires (ORI)
- Champ magnétique et activité stellaire : origine, nature et effet dans tout le diagramme HR, importance pour la recherche et la caractérisation des exoplanètes (MAG)
- Evolution, structure Interne et Atmosphère (EIA)
- Interactions : étoile-planète.s, étoile-disque, étoile-étoile.s, populations stellaires (INT)

Pour ce qui concerne les 4 axes méthodologiques transverses, ils sont :

- Astrophysique de laboratoire [Expériences de laboratoire à vocation astrophysique stellaire]
- Astrophysique de laboratoire [Expériences numériques]
- Synergie de méthodes [Focus sur objet prototypique]

- Synergie de méthodes [Benchmarks]

Notons par ailleurs que suite à l'analyse du sondage 2022 et aux journées PNPS à Paris en Juin 2022, il a été décidé la création d'un nouveau thème prioritaire jusqu'à la fin de notre mandat. Il s'agit du thème "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes" (ULT) qui porte sur les stades évolués et inclut une interface forte avec le PNHE.

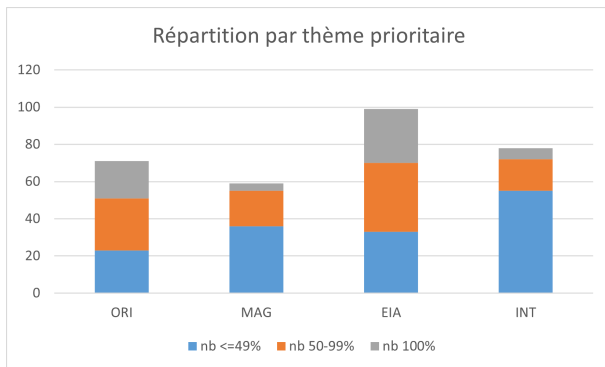


FIGURE 8 – Répartition des réponses par thème prioritaire. Le code couleur indique le pourcentage d'émargement à chaque thème. 173 personnes ont répondu à cette rubrique, avec des réponses possibles sur nos 4 thèmes prioritaires identifiés entre 2019 et 2022.

Il est donc intéressant d'analyser comment la communauté se positionne au regard de cette structuration. Le sondage effectué en 2022 permet de le faire et tout d'abord globalement avec la répartition entre les 4 thèmes ORI, MAG, EIA et INT. La répartition est montrée sur la Fig. 8 (réponses multiples possibles). Le nombre de réponses varie ainsi entre 60 et 100 par thème. Le thème EIA regroupe le plus de personnes mais nous constatons globalement qu'il n'y a pas de forte hétérogénéités. Il est néanmoins important de noter que ces thèmes ne sont pas indépendants les uns des autres : il existe en effet de nombreuses interfaces entre ces thèmes au sein du PNPS. La Fig. 9 indique la nature de ces interfaces. Les thèmes ORI, EIA et ULT sont centrés sur différents stades d'évolution de l'étoile et ont donc un lien naturel. Les thèmes MAG et INT, portant davantage sur les processus, sont de fait transverses à ces 3 thèmes. Enfin, l'astrophysique de laboratoire est transverse à pratiquement tous les thèmes, et porte sur des processus variés.

La répartition des pourcentages représentant le niveau d'implication des personnes sur chaque thème

diffère cependant d'un thème à l'autre. Pour les thèmes ORI et EIA, un pourcentage important de personnes sont à temps complet sur ces thèmes (proche de 30%). Ce pourcentage est par contre très faible pour les thèmes MAG et INT (proche de 8%). Le pourcentage moyen d'implication est ainsi plus élevé pour les 2 premiers (autour de 60%), et plus faible pour les deux autres (35-40%). Cette dichotomie peut s'expliquer par l'hétérogénéité de ces quatre thèmes, deux d'entre eux (ORI et EIA) portant principalement sur un type d'objet, alors que les deux autres thèmes (MAG et INT) portent plutôt sur des processus physiques qui sont transverses à toute la discipline : les personnes impliquées sur ces thèmes auront davantage tendance à s'impliquer également sur un autre thème. Ce constat devra être pris en compte afin de redéfinir les thèmes pour notre prochain bilan (voir chapitre "Prospective"). Sur les axes transverses (voir Fig. 10 panel du haut), le constat est similaire avec un mélange entre approche méthodologie et thématique scientifique (voir la Section suivante pour plus de détails).

## Méthodologies

Les recherches en physique stellaire couvrent un spectre complet en termes de méthodologies. L'analyse de l'enquête nous permet de quantifier la répartition, présentée en Figure 10. Nous notons une implication très répartie entre observations, analyse de données d'une part et théorie/modélisation, simulations numériques d'autre part. L'implication sur des développements instrumentaux est également significative. Les grands relevés constituent une part importante de notre discipline, ce qui est cohérent avec une forte contribution à des missions telles que Gaia ou PLATO, mais aussi dans des relevés sols à différentes échelles. Comme vu précédemment, les expériences de laboratoire concernent une communauté plus modeste (une dizaine de personnes d'après les réponses), ce qui peut traduire par un biais dans les réponses au sondage. Les questionnements Big Data et intelligence artificielle représentent peu de personnes (12%), mais pourraient augmenter dans les années à venir.

Nous notons qu'un nombre important de réponses concerne l'axe méthodologique Synergie, avec une prédominance de l'activité sur objet prototypique. Ce constat peut paraître paradoxal étant donné le faible nombre de projets présentés dans ces caté-

# Interfaces entre thèmes

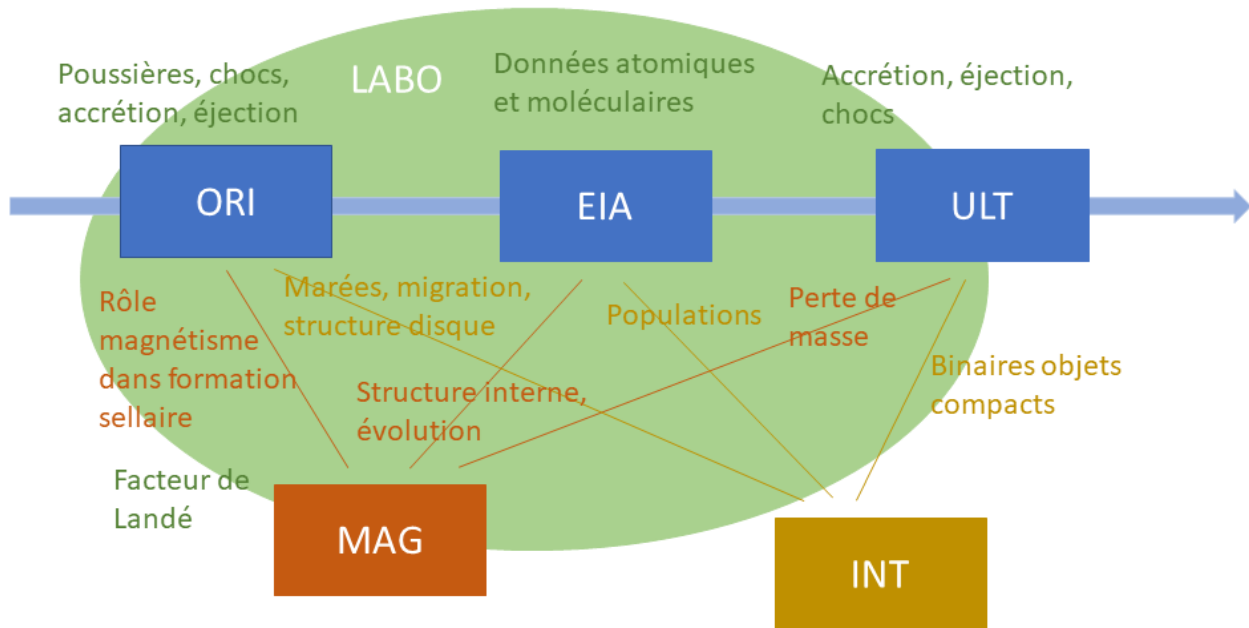


FIGURE 9 – Interfaces principales entre les thèmes du PNPS.

gories lors de l'analyse du bilan financier (voir chapitre "Le conseil scientifique du PNPS : fonctionnement et bilan"), mais le faible nombre identifié lors des évaluations des projets vient du fait que les projets ont majoritairement été affecté de manière unique à l'un des thème prioritaires et non sur ce thème transverse. Ces approches sont mentionnées dans les chapitres thématiques, et portent par exemple sur des objets prototypiques tels que Bételgeuse observées à l'aide du large palette de techniques, ou des approches de type benchmark dans le cadre de la détermination des paramètres fondamentaux à l'aide des données de la mission Gaia.

Ainsi, la communauté PNPS déploie une palette méthodologique complète qui permet une grande complémentarité afin d'aborder la thématique de la physique stellaire. Cette continuité méthodologique est en effet une force de la communauté française depuis des décennies. Notons également que les aspects simulations numériques (HPC) prennent de l'ampleur depuis quelques années. Par contre, pour ce qui concerne les aspects "Big data/IA" et "Expérience de laboratoire", le nombre de personnes ayant répondu reste assez faible. Dans le premier cas, ceci est peut-être dû au fait que les gros pro-

jets structurant Gaia et PLATO n'exigent pas vraiment ce type d'approche, même si les approches IA se développent sur certaines thématiques ciblées. Dans le deuxième cas, la communauté PNPS est en grande partie utilisatrice de données de laboratoire, et le nombre de personnes impliquées dans des expériences pouvant intéresser la communauté PNPS a pu être sous-estimée, avec des interfaces qui pourraient probablement être renforcées.

## Interfaces

Les activités du PNPS présentent de nombreuses interfaces avec presque tous les autres PN. Un panorama des principales interfaces est présenté sur la Fig. 11. Ces interfaces sont de plusieurs natures. Tout d'abord, les étoiles sont naturellement présentes de manière directe dans de nombreux autres PN (PNCG, PNHE). Le Soleil étant une étoile particulière, la comparaison avec des analogues solaire induit une interface avec le PNST. La connaissance de certaines propriétés stellaires est également nécessaire pour l'étude de certains objets présents dans le même système (par exemple exoplanètes ou disque avec le PNP) ou afin de contraindre des grandeurs cosmologiques (par exemple échelle des distances avec le



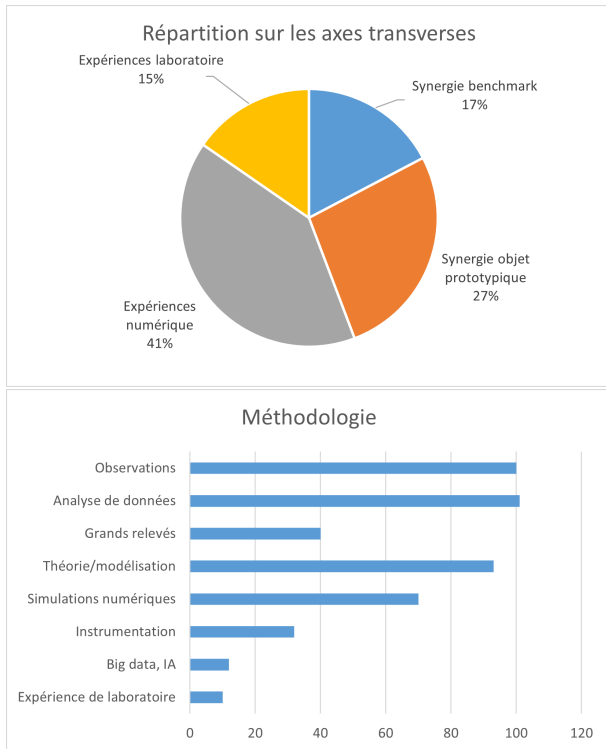


FIGURE 10 – **Panel du haut** : Répartition sur les axes transverses. 71 personnes ont répondu pour un total de 104 indications d'axes transverses (les réponses multiples étaient possibles). **Panel du bas** : Répartition sur les approches méthodologiques, en nombre de réponses sur chaque approche (les réponses multiples étaient possibles). 171 personnes ont répondu à cette rubrique. Le détail du contenu des catégories méthodologique est détaillé dans la Table 7.

PNCG). De plus, certaines thématiques présentent naturellement une continuité entre PN, par exemple avec le PCMI et le PNP dans le cadre de la formation stellaire et planétaire. Enfin, certaines thématiques sont positionnées sur une interface du fait d'une conjonction entre l'objet (étoile / PNPS) et des processus physiques (par exemple haute énergie / PNHE). Le PNPS présente des interfaces avec des AS méthodologiques (ASHRA, AS Num, ASOV), mais aussi liée à un instrument et donc davantage thématiques (AS SKA-LOFAR). Enfin, le PNPS présente également des interfaces naturelles avec d'autres instituts du CNRS, par exemple l'INP (thème transverse "Astrophysique de laboratoire") ou avec l'IN2P3 (thème "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes").

Suite à ce constat, nous précisons ci-dessous l'ampleur de ces interfaces de manière quantita-

tive. Nous rappelons cependant que l'enquête n'incluait pas le thème "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes (ULT)" car ce thème a été introduit en juin 2022. Tout d'abord, lors des AO de nombreuses demandes de financements sont faites à plusieurs PN simultanément. Sur la période, c'est le cas de la moitié (52 %) des demandes sur des projets scientifiques et de 90 % des demandes de soutien à des ateliers et conférences. De plus, lors de l'enquête, plusieurs questions étaient posées sur les interfaces, en plusieurs temps (171 réponses exploitables) : une réponse oui/non pour identifier si les activités de recherche sont à temps complet sur le périmètre PNPS. Dans le cas négatif, les pourcentages d'activité PNPS, autres PN et autres instituts étaient demandés, le total devant faire 100%. Enfin, d'un point de vue transverse, l'appartenance aux périmètres de 4 Actions Spécifiques étaient demandées. Les pourcentages demandés n'incluaient pas les AS, ce qui a pu gêner plusieurs personnes impliqués dans des actions de R&D instrumentales émergeant à l'ASHRA.

63 personnes (37% des réponses) affichent une activité de recherche entièrement dans le périmètre PNPS. La majorité des personnes ayant répondu à l'enquête affichent donc 1, 2, ou 3 interfaces, dont la répartition est donnée en Fig. 12 (en haut). 75% de l'ensemble des personnes ayant répondu ont cependant une prédominance de leurs activités dans le périmètre du PNPS (supérieure à 50%). La répartition par PN des interfaces indiquées, portant sur 100 réponses (8 étant uniquement sur une interface avec un autre institut), est représentée en bas de la Fig. 12. Le total est supérieur à 100 du fait des interfaces multiples. De fortes interfaces existent avec le PNP, le PCMI, le PNCG, et de manière plus modeste avec le PNHE et le PNST. Ces interfaces se traduisent également en termes de financement : sur les 90 personnes ayant bénéficié de financements d'un ou plusieurs PN (60% des réponses à l'enquête), le financement PNPS domine (89% des personnes en ont reçu), mais de nombreux co-financements proviennent du PCMI et du PNP, suivi par le PNCG, le PNST, l'ASHRA et l'AS SKA-LOFAR (voir ci-dessous pour les interfaces avec les AS).

L'interface avec le Comité Exoplanètes Transverse n'était pas dans la liste de l'enquête car ce comité inclut des thématiques PNPS par construction. Par contre, les résultats de l'enquête effectuée



# Interfaces avec les autres PN

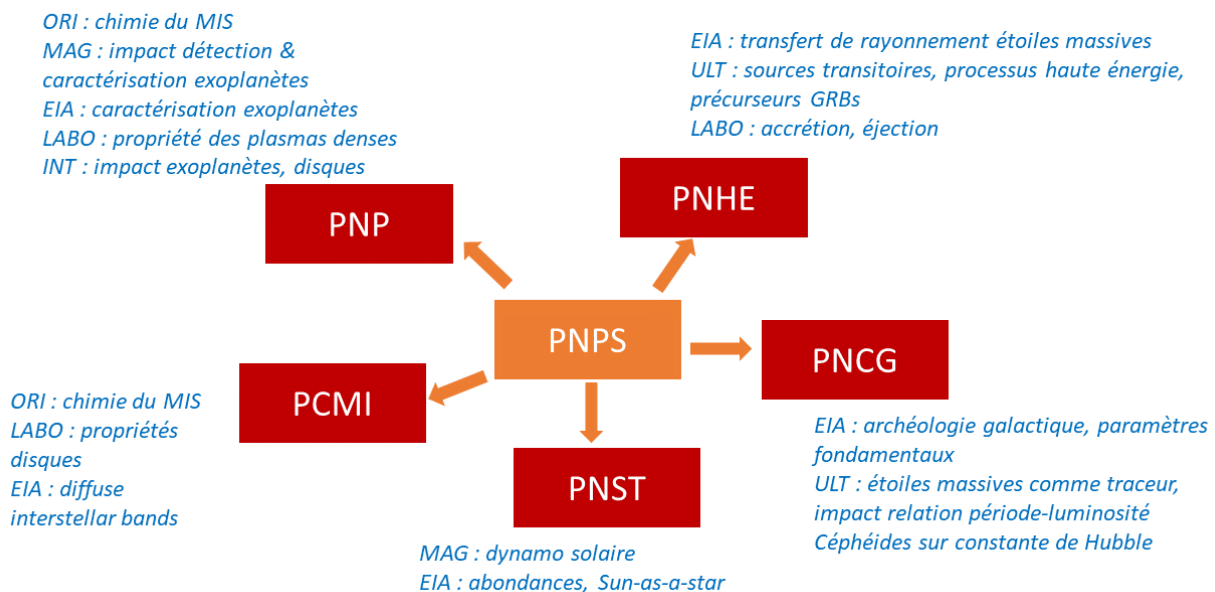


FIGURE 11 – Interfaces principales avec les autres PN.

en 2021-2022 par ce comité<sup>3</sup> indique une proportion importante des personnes impliquées dans la recherche sur les exoplanètes avec le PNPS (51 personnes), ce qui se traduit ici par une forte interface avec le PNP (40 personnes). Cette interface portait sur tous les thèmes prioritaires du PNPS. C'est également le cas dans notre enquête, portant sur 40 réponses indiquant une interface avec le PNP : elles se répartissent entre les 4 thèmes (voir section suivante), avec une légère prédominance pour les thèmes Origines (qui inclue la formation planétaire et les disque protoplanétaire) et Champ magnétique et activité stellaire (pour l'impact de l'activité stellaire sur la détection des exoplanètes).

Les corrélations entre thèmes et interfaces avec les autres PN dépendent fortement du PN. Pour le PNP, comme vu plus haut, l'interface concerne nos 4 thèmes (ORI, EIA, MAG, INT) de manière assez équilibrée. Dans le cas du PCMI par contre, l'interface est majoritairement avec le thème Origines comme attendu (plus de 80% des 36 réponses sur cette interface concerne ce thème), mais elle concerne aussi les autres thèmes (entre 22% et 42% selon le thème, le total étant supérieur à 100% du fait des réponses multiples). L'interface avec le PNCG porte majori-

tairement sur les thèmes EIA et INT, mais les autres thèmes sont présents. L'interface avec le PNHE est principalement sur le thème INT, les autres thèmes étant aussi présent (nous notons que si le thème ULT avait été présent dans l'enquête, il serait clairement apparu ici). Enfin, le PNST quand à lui concerne surtout les thèmes MAG et EIA.

Concernant les AS, 44 personnes (25% de la communauté) ont au moins une interface avec l'une des 4 AS listées (et 129 n'en ont aucune). La Fig. 13 montre la répartition des réponses sur les 4 AS, avec environ la moitié concernant l'ASHRA, et un quart concernant l'AS Num.

Enfin, la Fig. 14 présente les interfaces avec les autres instituts du CNRS pour les 18 personnes concernées (soit proche de 10% de la communauté). Elles ont principalement lieu avec l'INP, suivi par l'IN2P3. L'IN2P3 correspond principalement à l'interface avec le PNHE, et dans une moindre mesure le PNHE et le PCMI pour 2 réponses chacune. L'interface avec l'INP est en partie reliée aux interfaces PCMI, PNST et PNHE pour quelques réponses mais plusieurs ont cette interface INP sans interface avec un autre PN. Les autres interfaces sont avec l'INSIS, l'INS2I, et l'INSMI.

3. [https://www.cet.cnrs.fr/docs/rendu\\_enquete\\_exoplanetes.pdf](https://www.cet.cnrs.fr/docs/rendu_enquete_exoplanetes.pdf)

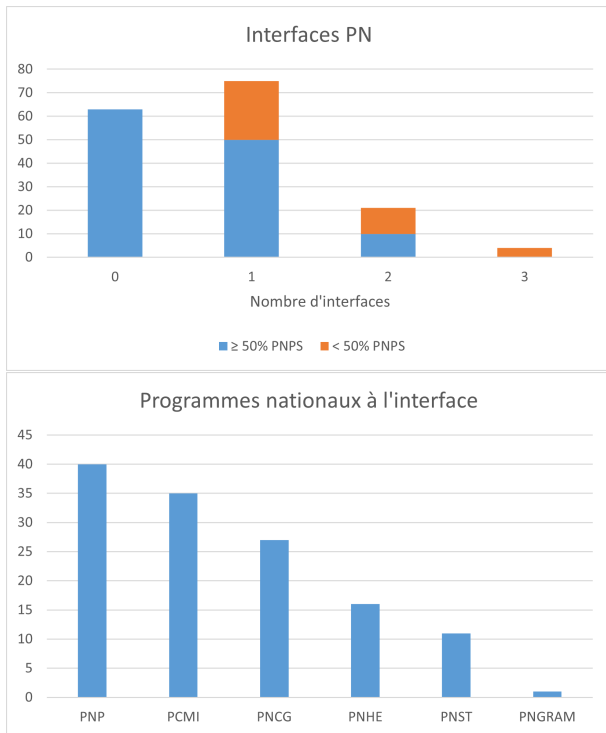


FIGURE 12 – Nombre de PN à l'interface (en haut) et PNPs concernés par ces interfaces (en bas). 173 personnes ont répondu à cette rubrique

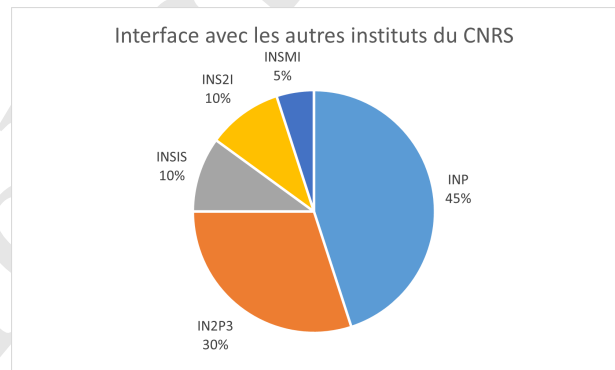


FIGURE 14 – Répartition des interfaces avec d'autres instituts du CNRS, portant sur 18 personnes ayant ce type d'interface. 173 personnes ont répondu à cette rubrique.

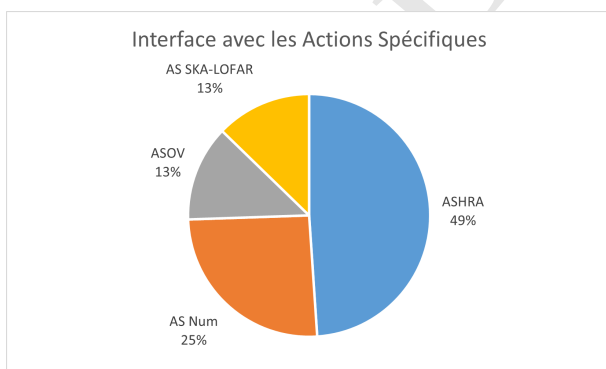


FIGURE 13 – Répartition des réponses entre les 4 AS listées portant sur 44 personnes et 47 indications (3 réponses multiples). 173 personnes ont répondu à cette rubrique.

## LES MOYENS AU COEUR DES ACTIVITÉS DU PNPS

Au-delà des grandes questions scientifiques abordées au PNPS, de son organisation et de sa structuration, la question des moyens mis en oeuvre par la communauté est fondamentale tant elle est dimensionnante. En effet, la communauté PNPS s'appuie fortement sur les moyens mis à sa disposition, mais participe aussi très activement au développement des instruments depuis des phases très amonts. Ainsi, il est fondamental d'être en mesure de déterminer comment la communauté PNPS s'est positionnée dans la période 2019-2023 quant aux moyens à sa disposition, quels instruments, infrastructures, et équipements se sont avérés essentiels et structurants.

### INSTRUMENTS, ÉQUIPEMENTS ET INFRASTRUCTURES

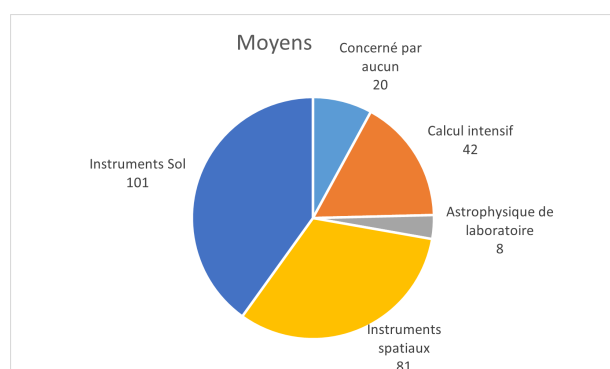


FIGURE 1 – Répartition des moyens sur 4 grands types d'infrastructures obtenu par le sondage 2022 auprès de la communauté PNPS.

De façon générale, la communauté PNPS a toujours été fortement impliquée dans le développement et l'exploitation des instruments sol & espace. Ces équipements sont donc au coeur des moyens mis en oeuvre pour aborder les grandes questions scientifiques. Viennent ensuite les infrastructures de calcul intensif qui ont pris une place importante ces dernières. Il s'agit là du révélateur d'une dynamique autour du calcul massif via les simulations MHD multi-D. En effet, bien que le numérique soit une approche méthodologique forte au sein du PNPS depuis des décennies, l'utilisation des simulations MHD multi-D s'est largement répandu plus récem-

ment et nécessite donc l'utilisation d'infrastructures plus conséquentes que ce soit au niveau régional, national ou européen.

Ces constatations sont largement validées par le sondage effectué en 2022 lors duquel la communauté a été sollicitée pour préciser quels étaient les instruments, équipements et infrastructures dont elle dépendait pour mener à bien ses projets. Ainsi, la Fig. 1 indique la répartition des réponses (plusieurs réponses possibles) sur les 4 grands types d'infrastructures essentielles à leur recherche sur la période 2018-2021. L'exploitation des instruments sol et espace, avec une communauté à peu près équivalente sur les 2, représentent la majorité des réponses positive (78%). Nous notons que le nombre de réponses sur le calcul intensif est similaire au nombre de réponses sur les simulations numériques (méthodologie, ci-dessus). Les expériences de laboratoires concernent de manière directe une communauté plus petite. A noter qu'environ 80% des sondés ont sélectionné 1 ou 2 réponses et une vingtaine étaient concernés par 3 types de moyens sur les 4.

### Les instruments sol & espace

La Fig. 2, obtenue grâce au sondage 2022, présente une vue synthétique des instruments sol & spatiaux actuellement essentiels à la communauté PNPS. Il s'agit d'instruments qui sont en opération et/ou pour lesquels il y a une utilisation de données d'archives.

Pour les instruments spatiaux, il y a trois lignes de force qui se dessinent. La première est liée à Gaia pour lequel la communauté PNPS a énormément investi depuis de très nombreuses années. Comme nous le verrons également avec les SNO, il y a non seulement un aspect exploitation scientifique, mais également une forte implication sur la préparation des distributions de données, passées et à venir. Le second est lié à la photométrie de précision, avec par exemple les données issues de TESS ou encore Kepler/K2, qui permet de faire de l'astérosismologie ou encore d'étudier l'activité de surface des étoiles. Enfin, notons que la montée en puissance de la communauté PNPS sur l'exploitation de JWST (souvent en synergie avec les instruments sub-millimétriques)

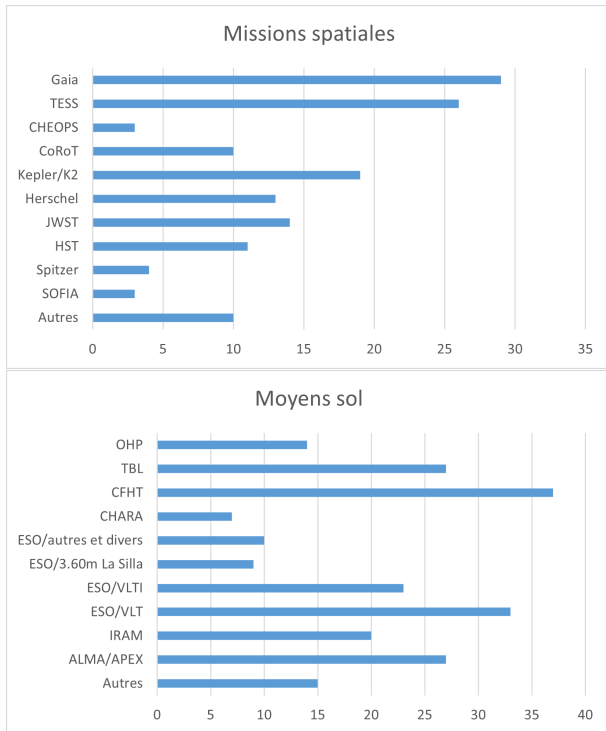


FIGURE 2 – Répartition des instruments spatiaux (panel du haut) et sol (panel du bas) obtenu par le sondage 2022 auprès de la communauté PNPS. Pour ce qui concerne les instruments sol, ils ont été regroupés en différentes catégories (*IRAM* : NOEMA et 30m; *ESO/VLT* : SPHERE, SINFONI, MUSE, ESPRESSO, FLAMES, XSHOOTER, UVES, NACO; *ESO/VLTI* : GRAVITY, MATISSE, PIONIER; *ESO/La Silla* : HARPS et NIRPS (3.60m), SOFI (NTT); *CHARA* : VEGA, SPICA; *CFHT* : ESPaDOnS, SPIRou; *TBL* : Narval, Néonarval; *OHP* : T193. Dans la catégorie *Autres*, les instruments mentionnés ont pour certains une implication française (LOFAR / Nenufar, Radiotélescope de Nancay, VIRGO, SC2PU / PISCO OCA / Calern, WEAVE), d'autres sont américains (SMA, LIGO, GPI, SCEXAO, IOTA, VLA), ou d'autres pays (GIARPS, KAGRA, Mt John), ou concernant la physique solaire (GONG).

pour l'étude des disques et des interactions disques-étoiles.

Pour ce qui concerne les instruments sols, la communauté PNPS en utilise un très grand nombre mais il est possible de dégager quelques grands axes. Tout d'abord autour de la spectro-polarimétrie, une expertise française reconnue internationalement, permet la mesure et l'étude des champs magnétique dans les étoiles. Actuellement, sur cette thématique,

les moyens utilisés sont ceux des instruments du TBL (Narval jusqu'en 2019, puis NeoNarval) ou encore du CFHT (ESPaDOnS, SPIRou). Pour ce qui concerne les instruments ESO, il y a une grande diversité mais c'est surtout autour de la haute résolution angulaire que la communauté PNPS se positionne avec comme objectifs scientifiques l'étude des systèmes exoplanétaires ou encore les étoiles évoluées. Enfin, une part importante des moyens utilisés par le PNPS est centrée sur le sub-millimétrique pour l'étude de la formation stellaire.

### Les infrastructures de calcul

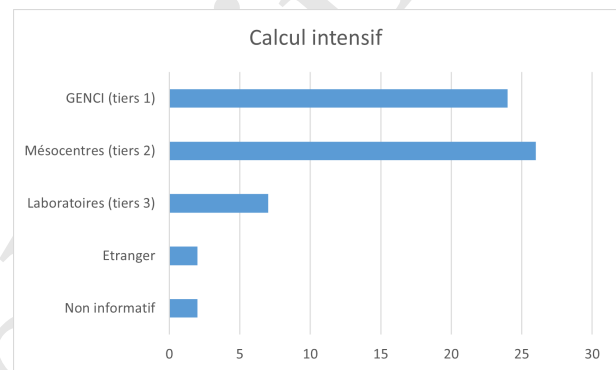


FIGURE 3 – Répartition des moyens calcul intensif.

La Fig. 3 présente une vue synthétique des moyens de calcul intensif actuellement essentiels à la communauté PNPS. Les réponses étaient au format libre, en général sous la forme de nom de serveurs ou de centre de calcul à diverses échelles. Nous les avons regroupés par catégorie, montrant une utilisation importante (autour de 25 réponses chacun) des équipements nationaux (tiers 1, GENCI, avec l'utilisation de divers équipements du CINES et de l'IRDRIS) et des mésocentres régionaux (tiers 2, dont les plus listés sont CALMIP à Toulouse, GRICAD à Grenoble et MesoPSL à Paris). Le tiers 3, correspondant à l'utilisation des moyens des laboratoires, correspond à un petit nombre de réponse, mais la question ayant été posée sous la forme du calcul intensif, ce nombre ne reflète certainement pas l'utilisation réelle de ces serveurs locaux par la communauté, qui est probablement bien plus importante. Enfin, notons que les data-centre associés aux instruments ne sont pas inclus ici (par ex : le data processing center pour Gaia qui est au CNES).

Ainsi, la montée en puissance de la communauté PNPS dans l'utilisation et le développement des si-

mulations numériques lourdes se traduit par l'utilisation d'infrastructures de calcul de grande ampleur. En anticipant sur les aspects prospectifs, le développement actuel de codes visant le passage à l'exascale va très certainement consolider cette dynamique dans les années à venir (voir Sect. ). Il s'agit ici d'une évolution positive au regard de la situation précédente mais il convient de noter que la communauté PNPS note que cela doit s'accompagner d'un double mouvement de structuration, à la fois du côté des codes communautaires mais également infrastructures (autour à la fois des mésocentres dans certaines et du besoins de d'expertise pour soutenir le développements des codes capable de passer à l'exascale sur des structures nationales et au-delà).

### L'astrophysique de laboratoire

L'astrophysique de laboratoire joue un rôle sur plusieurs questions importantes pour le PNPS, par exemple sur les propriétés atomiques et moléculaires (en lien avec les thèmes "Origines" et "Evolution, structure interne et atmosphère"), les opacités (en lien avec le thème "Evolution, structure interne et atmosphère") ou encore sur les propriétés des poussières dans les disques et les régions de chocs (en lien avec le thème "Origines"). Ces approches sont décrites plus en détail dans le chapitre dédié. Les réponses au sondage (8 personnes) représentent un sous-ensemble de ces moyens, essentiellement sur l'utilisation de lasers de puissance, mais aussi le spectrographe de 10m de l'Observatoire de Paris. A noter que le faible nombre de réponses au sondage initié par le PNPS est signifiant dans le sens où il montre un sentiment d'appartenance assez faible d'une partie de la communauté faisant des expériences de laboratoires en lien avec les problématiques de physique stellaire. En effet, comme discuté dans le chapitre "Astrophysique de laboratoire", les thématiques PNPS sont utilisatrices d'un grand nombre de données qui proviennent d'expériences de laboratoires.

### LES TÉLESCOPES DE 2M NATIONAUX

Comme explicité ci-dessous, les télescopes nationaux de 2M (OHP et TBL) sont largement utilisés par la communauté PNPS. Le comité d'attribution du temps de ces télescopes ayant été mis en place en 2015, il est donc important de faire un bilan de l'évolution de l'utilisation de ces moyens.

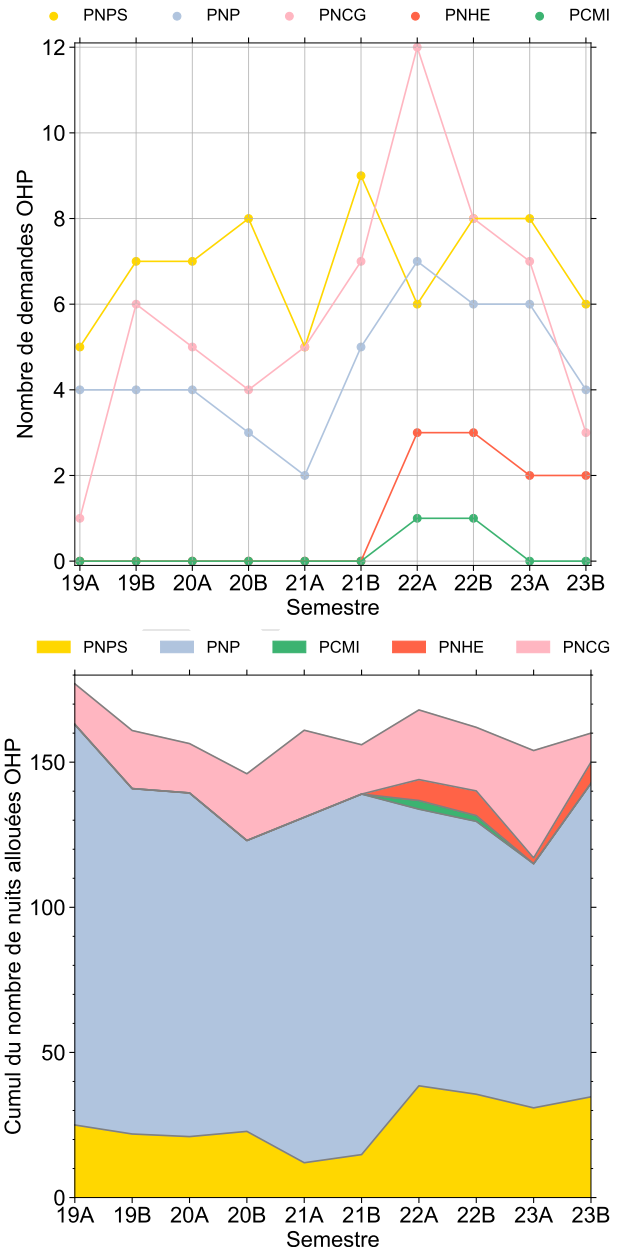


FIGURE 4 – Nombre de demandes de temps (haut) et cumul du nombre de nuits allouées (bas) par programme national sur le T193.

Le nombre de demandes de temps sur chaque T2m et pour chaque PN est représenté en haut des Figs. 4 et 5. On voit que les demandes PNPS dominent très largement les demandes sur le TBL (entre 8 et 9 demandes en moyenne par semestre) mais contribuent plus modérément aux demandes sur le T193 (7 demandes en moyenne par semestre, soit environ 40%). On notera l'augmentation importante du nombre de demandes PNCG et PNHE sur le T193

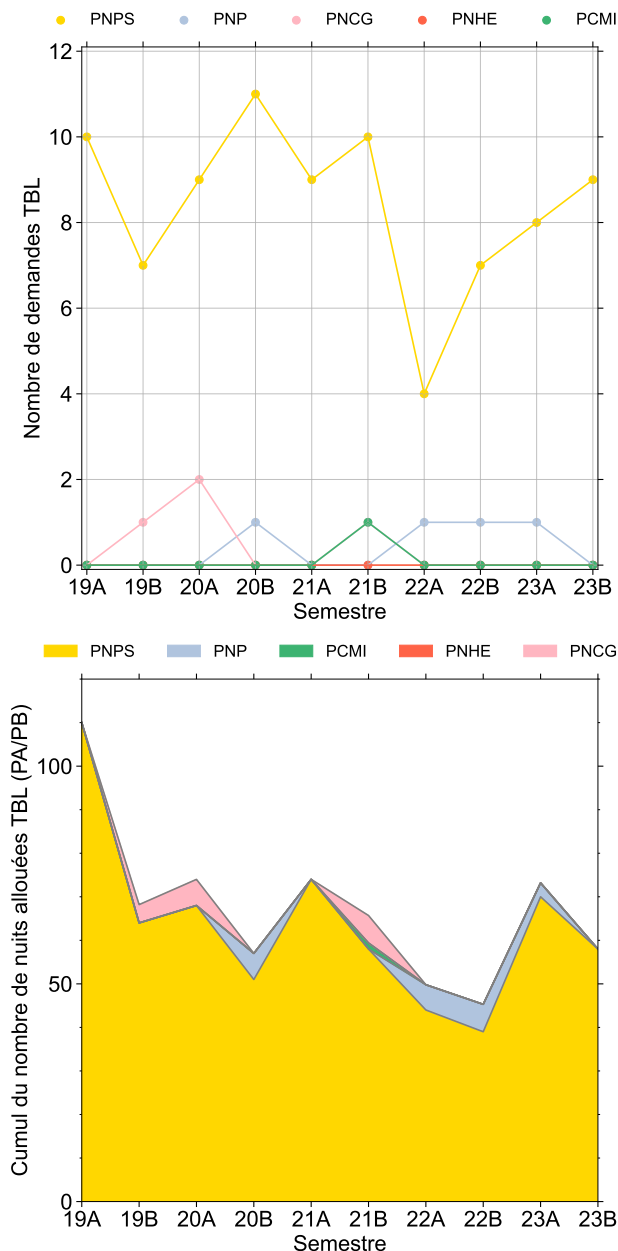


FIGURE 5 – Nombre de demandes de temps (haut) et cumul du nombre de nuits allouées (bas) par programme national sur le TBL.

suite à la mise en service de MISTRAL. Suite aux recommandations du CS du T193, le temps alloué sur MISTRAL ne peut dépasser 15% du temps disponible sur le T193.

Le cumul du nombre de nuits allouées par PN sur chaque T2m est montré en bas des Figs. 4 et 5. Côté TBL, où le temps disponible est alloué en heures, il s'agit du cumul du nombre de nuits attribuées en priorité A et B en comptant 7h/nuits pour les se-

mestres d'hiver et 5.5h/nuits pour les semestres d'été. Les demandes PNPS y représentent en moyenne 93% du temps alloué pour la période 2019-2023, soit exactement la même fraction que sur la période 2015-2018. Côté T193, les nuits allouées incluent celles sur les *Large Programmes* PNP entre 2019A et 2021B. Les demandes PNPS n'y représentent que 15% en moyenne du temps alloué, une fraction là aussi stable par rapport à la période 2015-2018.

Le facteur de pression moyen est en légère augmentation côté T193, passant de 1.3 sur 2015-2018 à 1.5 sur 2019-2023. En revanche, la situation est plus contrastée pour ce qui concerne le TBL avec un facteur de pression qui passe de 1.8 sur 2015-2018 à 1.3 sur 2019-2023. Les entretiens avec les équipes de physique stellaire ainsi que les résultats du sondage 2022, ne semblent pas montrer un manque d'appétence pour le TBL de la part du PNPS. En effet, d'un point de vue programmatique, Narval puis Neo-Narval au TBL ont été et sont des instruments complémentaires à ceux disponibles au CFHT. Ainsi, le TBL est un rouage essentiel pour la communauté française qui est très en pointe sur l'étude des champs magnétiques grâce à la spectropolarimétrie. Par conséquent, cette diminution du facteur de pression reste à être analysée de façon approfondie. Les raisons étant probablement multifactorielles (effets du COVID, problèmes de météo, problèmes techniques, etc...) le CS du PNPS recommande une analyse approfondie de la situation qui permettra le cas échéant de proposer un plan d'action. Cela est d'autant plus important dans la perspective de l'arrivée de VISION et SPIP dans un avenir proche.

D'un point de vue thématique, sur la période 2019-2023, un total de 798 nuits a été alloué sur les demandes PNPS (soit environ 100 nuits par semestre en moyenne), dont 80% au TBL. En associant chaque demande à un des thèmes prioritaires du PNPS, on obtient la répartition indiquée à la Fig. 6. A noter que certaines demandes peuvent couvrir plusieurs thèmes prioritaires, c'est le cas notamment de la plupart des demandes dont le thème prioritaire retenu est "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes" (ULT), demandes qui s'intéressent notamment au champ magnétique de surface des étoiles évoluées. On constate que les thèmes "Champ magnétique et activité stellaire" (MAG) et "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes" (ULT) dominant



largement la répartition des demandes en thèmes prioritaires et reflètent essentiellement les demandes de temps sur le TBL. Les demandes labelisées "Interactions" (INT, 16% des nuits allouées) recouvrent la thématique de la binarité ou encore l'étude des amas ouverts et concernent principalement le T193. La thématique "Origines" (ORI), comprenant des études spectropolarimétriques d'étoiles de pré-séquence principale, est en progression mais reste marginale.

Temps alloué TBL-T193

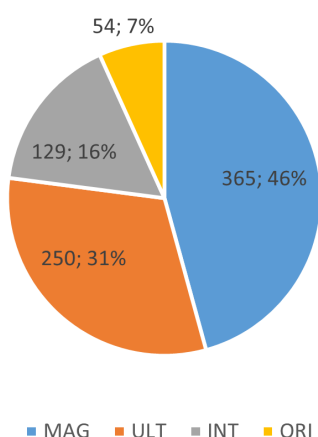


FIGURE 6 – Répartition du temps (en nuits) alloué sur les T2m pour les demandes PNPS par thème prioritaire entre 2019A et 2023B.

## LES SERVICES NATIONAUX D'OBSERVATION

Les SNO sont intimement liés aux moyens et constituent un outil essentiel permettant leur mise en oeuvre. C'est pourquoi, le CS du PNPS, lors du sondage 2022, à sonder la communauté pour quantifier son implication dans ces services. Il en résulte que la communauté PNPS est globalement fortement impliquée dans des SNO avec 79 réponses sur 170 (46%). Etant donné que le personnel CNAP ne représente que 31% de la communauté PNPS contre 44% de CNRS, il s'agit là d'un effort collectif qui est non-négligeable.

Plus précisément, la Fig. 7 montre la répartition en termes de type de poste, logiquement dominée par les personnels CNAP, et en fonction de l'ANO, dominée par les ANO2 et ANO5 (ce qui est également vrai de l'ensemble des thématiques AA), représentant chacun environ un tiers. Les autres implications concernent l'ANO4, l'ANO3 et l'ANO1. Le

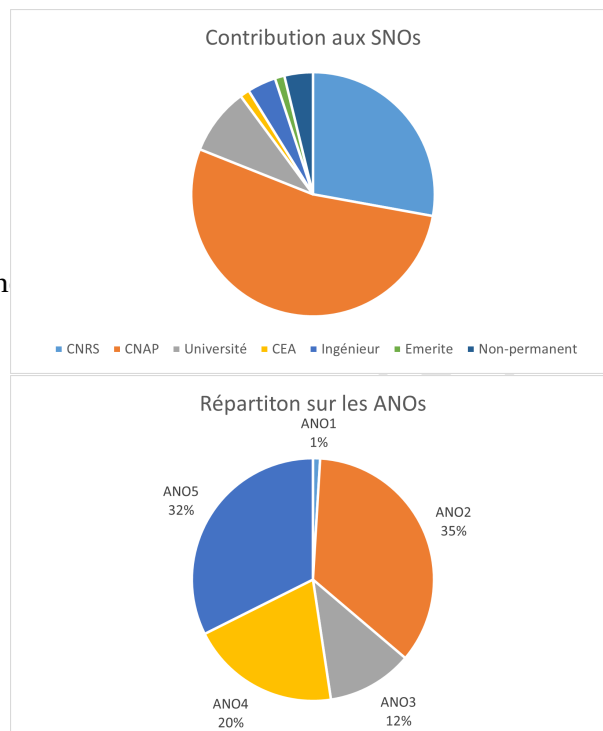


FIGURE 7 – Répartition des réponses des personnes contribuant aux SNO (79 personnes) en fonction du type de poste (en haut) et en fonction de l'ANO (en bas, réponses multiples possibles).

nombre de personnes ayant répondu au sondage varie entre 1 et 20 par SNO avec une forte disparité. Il n'est bien sûr pas représentatif du nombre de personnes impliquées dans tous ces SNO, étant donné que certains sont majoritairement implémentés par des personnes d'autres PN. Réciproquement, certaines personnes ayant répondu à notre enquête peuvent être engagées dans un SNO n'ayant aucun rapport avec le PNPS, ce qui n'apparaît donc pas ici. La liste complète des SNO concernés est présentée sur la Fig. 8 (nous n'y avons pas inclus l'une des réponses, JUICE, car ce SNO ne concerne pas directement le PNPS).

Ainsi, la Fig. 8 permet de dégager quelques points saillants. Tout d'abord, la communauté PNPS participe à un grand nombre de SNO. Il s'agit à la fois point fort car c'est le signe de la vitalité du PNPS mais cela fait également peser un risque de dispersion. Le second point marquant est lié au fait que deux SNO dominent en terme de RH : PLATO et GAIA. Cela n'est pas anormal car il s'agit de deux missions spatiales qui sont et seront structurantes pour la communauté dans les décennies à venir.

Pour PLATO, qui est en phase de préparation avec un lancement prévu fin 2026, il s'agit d'une mission qui mobilise plusieurs communautés au sein du PNPS, à savoir celles s'intéressant aux intérieurs stellaires, à l'activité de surface, aux paramètres fondamentaux des étoiles, mais également aux interactions étoiles-planètes et plus généralement à l'étude des systèmes planétaires. L'implication de la communauté française étant forte dans ce projet, il sera très important dans les années à venir de s'assurer que des moyens seront mis à disposition de la communauté pour préparer l'exploitation des données et ainsi optimiser le retour scientifique de la mission. Pour Gaia, cette problématique est également prégnante car les équipes sont très fortement mobilisées pour la préparation et la distribution des données et cela ne doit pas se faire au détriment de l'exploitation. Pour Gaia, la longévité de la mission et de son exploitation fait peser un risque supplémentaire. En effet, il existe un risque de perte d'expertise et de compétence auquel il convient d'être très attentif si l'on souhaite que la communauté et en particulier la communauté PNPS récolte les fruits de son investissement.

## LES CODES DE SIMULATIONS NUMÉRIQUES

En complément des observations et des travaux théoriques, la communauté PNPS développe et utilise des codes numériques, adaptés aux différents processus physiques et échelles spatio-temporelles propres à chacune de ses thématiques. Cette diversité implique que de nombreux outils sont présents dans le paysage du PNPS, dont certains ont vocation à toucher une communauté plus large que l'environnement proche d'une équipe de recherche. Au cours de cet exercice, le CS du PNPS a recensé les codes à vocation dite communautaire (codes publics). Nous dressons dans la suite une liste non-exhaustive de ces codes, en fonction des thèmes prioritaires. Notons que nous ne listons pas ici les codes utilisés en lien avec les expériences de laboratoire. Ces derniers sont décrits dans le chapitre "Astrophysique de laboratoire".

- Origines : RAMSES, IDEFIX, PLUTO, FARGO-3D, PHANTOM, AMRVAC, code de choc Paris-Durham, Meudon-PDR code;
- Champs magnétiques et activité stellaire : MAGIC, PLUTO;
- Structure interne et atmosphère : CO5BOLD,

CESAM2K, MESA, ESTER, ASTEC, Turbospectrum;

- Interactions : IDEFIX, PLUTO, PHANTOM, RAMSES
- Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes : MAGIC, ALCAR, COSMIC, MESA.

A cette liste s'ajoutent des codes dont les applications sont plus transverses. Citons les codes utilisés pour le transfert de rayonnement : MCFOST, OPTIM3D, POLARIS ou encore RADMC-3D. Aussi, les codes NAUTILUS et DUSTEM sont utilisés pour les études des propriétés des poussières et de la chimie gaz-grain.

Dans cette liste, le CS du PNPS a pu identifier trois codes susceptibles de répondre aux critères de labelisation de la nouvelle ANO Code Communautaire. Après la première campagne de labelisation, le code RAMSES, identifié par le CS, a été labellisé.

Lors de ce recensement, le CS a constaté que la communauté PNPS possédait une expertise unique dans le développement de codes pour étudier l'évolution stellaire et l'astérosismologie. Cependant cette expertise reste peu visible à l'international, au contraire des initiatives communautaires internationales telles que le code MESA. La communauté française développe de nombreux outils en local mais de façon dispersée voire non-coordonnée, ce qui rend difficile l'identification d'un outil communautaire. Le CS propose d'accompagner la communauté PNPS pour aller vers une meilleure structuration autour, par exemple, d'une plateforme publique mettant à disposition les codes français. Pour cela, il a par exemple soutenu l'organisation d'un atelier autour des codes numériques en physique stellaire à l'Observatoire de Paris en Juin 2022. Cette action a porté ses fruits avec la mise à disposition du code Cesam2k20 à la communauté (<https://www.ias.u-psud.fr/cesam2k20>) en décembre 2023. Ce type d'action devra être amplifié à l'avenir.

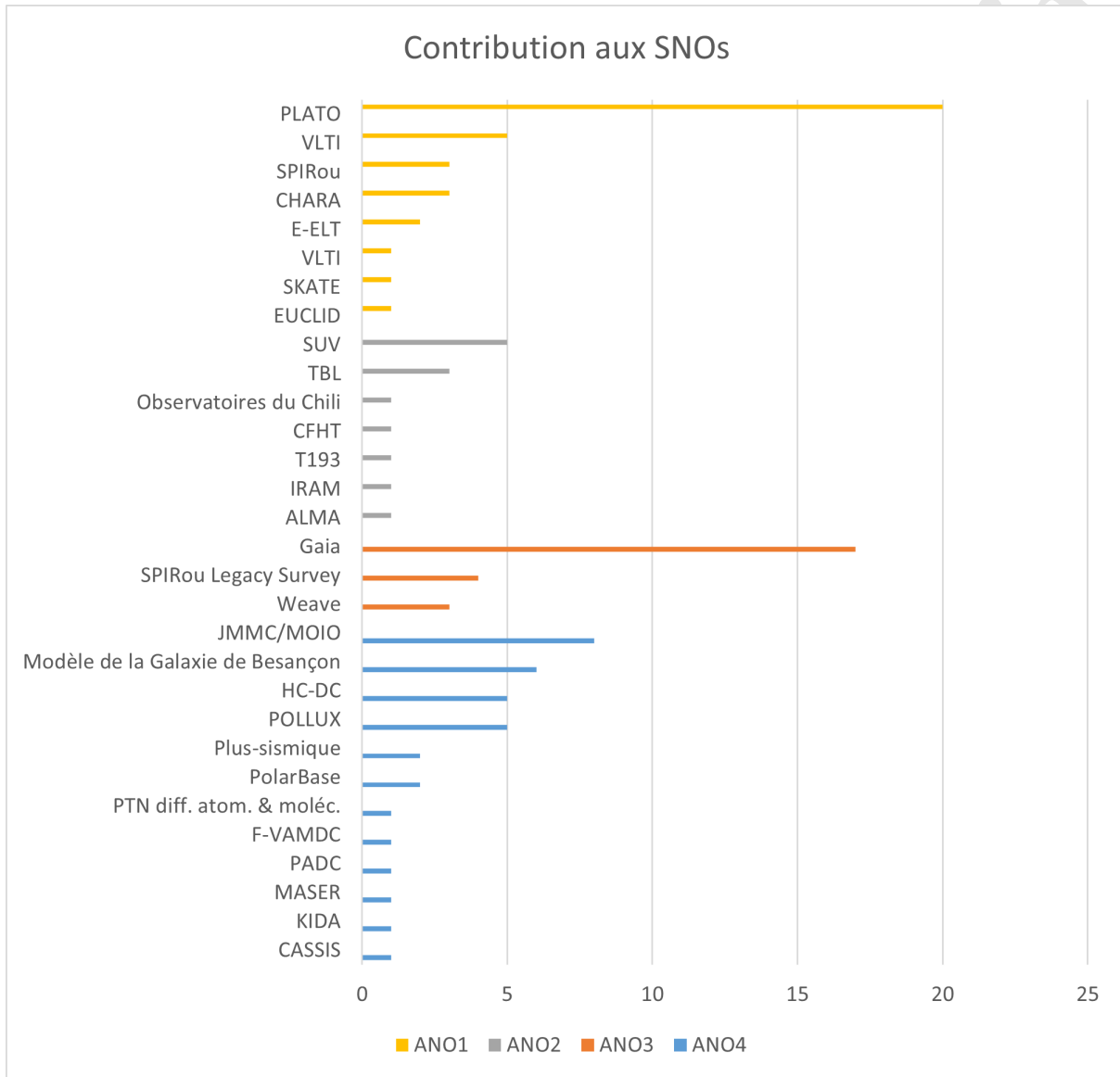


FIGURE 8 – Répartition des contributions aux SNOs (en nombre de réponses). La seule réponse ANO1 concernait Gaia, et a été regroupée ici avec les réponses Gaia en ANO4.

# ORIGINES : FORMATION STELLAIRE ET DISQUES PROTOPLANÉTAIRES

## INTRODUCTION

Comprendre la physique stellaire, c'est aussi comprendre les conditions de formation des étoiles, puisqu'une partie de leurs propriétés sont définies précisément lors de ces phases précoces. En effet, tandis que les étoiles passent la majeure partie de leur vie sur la séquence principale, les processus physiques à l'oeuvre pendant leur formation et leurs premiers millions d'années d'existence déterminent en grande partie leurs propriétés, mais aussi jouent un rôle sur leur évolution et leur stades ultimes. La formation stellaire regorge de mécanismes physiques régulant la multiplicité, la fonction de masse, la rotation et le champ magnétique des étoiles les plus jeunes, ainsi que les propriétés des disques circumstellaires qui les entourent.

Les étoiles se forment dans les phases denses du milieu interstellaire (MIS), grâce à la condensation puis l'effondrement gravitationnel de cœurs protostellaires. Au cours d'un processus qui ne dure que quelques millions d'années, elles héritent de leur masse et de leur rotation, s'entourent de planètes et allument leurs dynamos. Puisque ces phases sont en grande partie froides et enfouies, ce sont principalement les observatoires opérant dans les domaines infrarouge et radio qui ont permis lors des dernières décennies de les étudier et d'obtenir une image détaillée des processus physiques en jeu responsables des propriétés des étoiles jeunes, dans notre Galaxie. De même, les processus magnétohydrodynamiques sont clés pour modéliser l'évolution du gaz et de la poussière du MIS, alors que leur densité et leur température augmentent de plusieurs ordres de grandeur en seulement quelques centaines de milliers d'années. Enfin, les processus magnétohydrodynamiques et radiatifs contribuent à structurer les distributions du gaz et des poussières

au sein des disques circumstellaires, précurseurs de systèmes planétaires.

Quelles conditions physiques, dans les nuages formant les étoiles de notre Galaxie, permettent d'initier les premières phases d'assemblage de la matière interstellaire en objets protostellaires? Peut-on établir un lien de causalité clair entre la masse des cœurs denses progéniteurs d'étoiles et la fonction de masse initiale des étoiles jeunes? Comprend-on comment le moment cinétique du gaz se transmet depuis les échelles interstellaires à l'objet stellaire, et sous quelles modalités il est possible de réguler la fraction de moment cinétique responsable de la rotation des étoiles, de la fragmentation responsable des systèmes stellaires multiples, et de la formation des disques circumstellaires, berceaux de planètes? Est-ce que la chimie primordiale à l'oeuvre dans ce gaz joue un rôle pour établir les paramètres stellaires? Quel est le rôle du champ magnétique lors de la formation des étoiles, son flux se conserve-t-il pendant l'effondrement, est-il transmis aux étoiles jeunes, régule-t-il la formation des jets protostellaires, freine-t-il efficacement les mouvements de rotation du gaz, conditionnant ainsi la taille et la masse des disques formés autour des proto-étoiles? Comment ces disques évoluent-ils lors des premiers millions d'années de la vie des étoiles, quel est leur rôle, notamment via leurs interactions avec leur hôte stellaire, pour modifier les propriétés des étoiles arrivant sur la séquence principale?

Ces grandes questions sont les principaux leviers permettant de transformer notre compréhension de l'origine des étoiles et de leurs systèmes planétaires. Dans la suite, nous reprenons les grandes lignes des activités de recherches concernant ces thèmes, menées au sein de la communauté française sur la période 2019-2023.

## LES GRANDES AVANCÉES SUR LA PÉRIODE 2019-2023

### Processus transformant le gaz du milieu interstellaire en étoiles : une vision dynamique

Comment les structures denses du MIS se fragmentent-elles en cœurs denses, et quelle est l'efficacité de transformation du gaz en étoiles? Les produits de ces processus, tels que la fonction de masse initiale des étoiles, sont-ils bien connus et dépendent-ils des conditions locales?

Alors que la décennie 2010 a vu de nombreuses études des populations de cœurs pré-stellaires et proto-étoiles, permises par l'exploitation des données de l'Observatoire spatial Herschel par exemple, sur la période 2019-2023 les équipes se sont attelées à explorer plus avant le lien entre les statistiques des cœurs formant les étoiles et les propriétés de la matière dense observée dans le milieu interstellaire. Les processus physiques permettant la transformation de la matière de l'ISM en des filaments denses qui deviennent ensuite les pouponnières d'étoiles ont notamment été étudiés avec Herschel et les grands télescopes radio au sol [André et al., 2019; Schuller et al., 2021] et par des modèles analytiques [Jaupart & Chabrier, 2021]. Ces études suggèrent que la formation des structures denses permettant d'initier les processus de fragmentation du milieu en cœurs pré-stellaires est due à la dissipation de l'énergie turbulente MHD dans le milieu interstellaire [André et al., 2022], à la rétroaction d'étoiles massives [Zavagno et al., 2020; Gaudel et al., 2023] ou à de multiples épisodes de compression des nuages atomiques Arzoumanian et al. [2022]. La structure fractale des nuages et la cascade turbulente se propageant jusqu'à l'intérieur des cœurs formant des étoiles ont été observées Gaudel et al. [2020]; Thomasson et al. [2022], ainsi que des compressions du gaz dense dues à l'expansion de bulles du MIS diffus provoquant potentiellement la formation d'une nouvelle génération d'étoiles [De Simone et al., 2022].

Les investigations des distributions en masse des cœurs denses (CMF) et de leur relation avec la distribution en masse initiale des étoiles (IMF) se sont poursuivies, avec notamment l'exploitation de programmes d'observations menés avec les grands observatoires radio [Motte et al., 2022; Bógner et al., 2022]. Ces observations ont parfois révélé des CMF

aux propriétés variables, avec notamment un excès de cœurs massifs dans les régions de formation d'étoiles les plus actives, telle que W43 Pouteau et al. [2022].

Des simulations MHD de nuages formant des étoiles ont été menées pour étudier l'influence de différents processus physiques sur les taux de formation d'étoiles [Brucy & Hennebelle, 2021] ou [Brucy et al., 2023]. L'analyse de modèles MHD a aussi permis de mettre en lumière l'importance de la rétroaction stellaire et du champ magnétique dans la détermination des masses minimum et maximum des cœurs, favorisant une origine gravo-turbulente pour expliquer la pente de la CMF Hennebelle et al. [2022]. Certains de ces résultats, néanmoins, ne semblent pas encore confirmés par les observations de régions irradiées ne montrant pas de différence marquante dans la fragmentation du milieu dense en cœurs [Zhang et al. 2021].

Des observations dans le domaine millimétrique sont venues confirmer l'existence d'une phase pré-stellaire courte lors de la formation des étoiles massives [Nony, 2019; Bonne et al., 2022]. Des observations synthétiques de populations de cœurs ont aussi été analysées, soulignant la complexité d'estimer correctement les propriétés des cœurs formant les étoiles [Men'shchikov, 2023]. Ces analyses, bien qu'encore très controversées, suggèrent aussi une origine biaisée du pic de la CMF, qui pourrait être dû à des effets de résolution dans les observations plutôt qu'à une origine physique d'une masse de cœur plus probable [Louvét et al., 2021]. Enfin, l'utilisation de nouveaux outils numériques a continué à se développer, avec des perspectives de détection plus systématique de structures formant des étoiles par exemple [Zavagno et al., 2023, avec de l'apprentissage profond], des analyses de décomposition des structures permettant de discuter l'origine de la turbulence du gaz à différentes échelles [Robitaille et al., 2020, avec un algorithme multi-échelles pour trouver les structures non-Gaussiennes], ou de mesurer les échelles de fragmentation des cœurs en systèmes stellaires multiples [González et al., 2021, algorithme de clustering combiné au data mining], ouvrant ainsi la voie à une meilleure caractérisation statistique des structures protostellaires dans un futur proche.

Du côté des populations d'objets stellaires jeunes, le recensement de populations s'est poursuivi avec



l'exploration de données Spitzer et Gaia [Russeil et al., 2020], mettant en évidence des interactions dynamiques lors de l'assemblage des clusters stellaires.

## Moment cinétique : formation des disques protoplanétaires, jets et vents de disques

Alors que les grands relevés ont permis d'étudier les populations de cœurs, la communauté a aussi mené des études détaillées d'objets spécifiques. Notamment, l'exploitation d'observations à haute résolution spatiale et la physique raffinée dans les modèles physiques de formation stellaire ont ainsi permis de dessiner une vision très dynamique de la formation stellaire y compris dans les régions les plus internes participant directement à la construction de l'étoile, avec des processus accréation-éjection transportant à la fois d'importantes quantités de matériel et de moment cinétique [Gaudel et al., 2020; Cabedo et al., 2021; Hennebelle, 2021].

Les premières observations de disques protostellaires ont aussi apporté leur lot de surprises, avec la confirmation de la nature très compacte des disques les plus jeunes, observés dans le domaine millimétrique autour de protoétoiles de Classe 0, que ce soit dans l'émission de leurs poussières [Maury et al., 2019a] ou dans leur composante gazeuse [Maret et al., 2020a]. Ces observations, irréconciliables avec des modèles purement hydrodynamiques, ainsi que celles de vents d'origine magnétiques évoquées ci-dessus, sont venues renforcer la nécessité d'explorer des scénarios magnétisés pour la formation des étoiles et de leurs disques circumstellaires [Maury et al., 2022]. De multiples études ont été menées pour cartographier le champ magnétique à l'oeuvre à l'échelle des cœurs protostellaires, grâce à l'émission polarisée de la poussière protostellaire [Le Gouellec et al., 2019; Galametz et al., 2019]. Leur comparaison à des modèles MHD de formation d'étoiles a permis de valider le rôle dynamique du champ magnétique pour réguler la formation des disques et l'accréation de matière sur la protoétoile en formation [Lebreuilly et al., 2021a; Hennebelle et al., 2022]. De récentes observations suggèrent de plus un taux d'ionisation du gaz bien plus élevé que communément admis dans les environnements immédiats des protoétoiles enfouies, suggérant un couplage du champ magnétique à la matière peut-être bien plus important que ce que les modèles actuels ne supposent [Cabedo et al., 2023]. Ces résultats soulignent aussi un rôle

potentiellement clé de certains processus physiques (mécanismes de reconnexion magnétique et/ou accélération de protons dans les chocs d'accréation magnétisés) pour produire des rayons cosmiques de basse énergie capables d'ioniser le gaz y compris à relativement haute densité. Les observations de l'émission moléculaire de certains flots prototypiques ont démontré le rôle des vents MHD pour extraire du moment cinétique [Tabone et al., 2020; de Valon et al., 2022].

L'étude des conditions de formation des étoiles les plus massives a aussi connu de belles avancées, grâce à des observatoires de plus en plus sensibles à l'émission de molécules peu abondantes, et des modèles chimiques couplés à des calculs de transfert radiatif de plus en plus complets. Ainsi un grand nombre de cœurs progéniteurs d'étoiles massives ont pu être observés avec ALMA, révélant une chimie complexe présente dès les premières phases d'assemblage stellaire [Csengeri et al., 2019; Molet et al., 2019; Brouillet et al., 2022], tandis que les modèles, de leur côté, ont permis de décrire la formation de flots protostellaires dans des protoétoiles massives, suggérant des mécanismes très similaires à ceux des étoiles de faible masse [Mignon-Risse et al., 2020, 2021a,b; Commerçon et al., 2022].

## Evolution chimique et des solides durant les phases enfouies

Des observations de milieux denses et protoétoiles permettant de mesurer l'émissivité des poussières dans le domaine millimétrique [Galametz et al., 2019; Le Gouellec et al., 2020; Bouvier et al., 2021] ont pointé du doigt des anomalies de l'émission de ces poussières suggérant la présence de gros grains dans les environnements où se forment les disques circumstellaires. Plus récemment, des observations dans l'infrarouge (Dartois et al. 2023) sont venues confirmer la présence de grains de poussières de plusieurs microns dans les nuages denses de Chameleon. De plus, la comparaison de modèles d'alignement de poussières aux observations de l'émission polarisée des poussières dans les cœurs protostellaires suggère aussi la présence de grains de poussières dont les tailles doivent atteindre plusieurs dizaines de microns [Valdivia et al., 2019] dans les enveloppes protostellaires. Ces observations amorcent un potentiel changement de paradigme pour décrire les premières phases d'évolution des particules so-



lides autour d'étoiles de type solaire, qui viendront ensuite former les planétésimaux et cortèges de planètes. Ainsi, des modèles d'évolution des poussières durant la phase d'accrétion principale ont commencé à être développés [Lombart et al., 2022; Marchand et al., 2023], suggérant que les disques jeunes sont enrichis en poussières [Lebreuilly et al., 2020], mais aussi que l'évolution des tailles de grains durant la phase d'accrétion influence fortement le couplage du champ magnétique à la matière, et donc l'impact dynamique des effets magnétiques [Marchand et al., 2019; Guillet et al., 2020]

La grande quantité de programmes observant les spectres d'émission moléculaire d'objets jeunes, ainsi que la contribution importante de la communauté française au développement de réseaux chimiques permettant d'interpréter ces observations [Bron et al., 2021], ont permis d'établir un inventaire croissant de molécules construisant la complexité chimique du gaz durant les phases de formation de l'étoile et de son disque. Notamment, l'exploitation des grands programmes d'observation avec ALMA et les télescopes millimétriques de l'IRAM ont montré l'incroyable diversité s'établissant lors de l'évolution chimique du gaz dans les régions chauffées par les protoétoiles Bouvier et al. [2022]; Le Gal et al. [2020]; Mercimek et al. [2022]. Cette thématique est pleinement développée à l'interface avec le PCMI.

### **Etoiles de pré-séquence principale : accrétion/éjection, structure, environnement**

L'étude observationnelle du magnétisme des étoiles jeunes permet de guider notre compréhension du processus de génération de champ magnétique par effet dynamo, en particulier à quel moment une dynamo régulière comme pour le Soleil se met en place. Le champ magnétique et la rotation différentielle à la surface d'étoiles de pré-séquence principale continuent à être étudiés avec le spectro-polarimètre Neo-Narval au TBL; ils le sont désormais avec le spectro-polarimètre SPIRou au CFHT [Donati et al., 2020; Finocietty et al., 2023]). Ainsi, les propriétés magnétiques des jeunes étoiles commencent à être bien connues, des proto-étoiles [Galametz et al., 2020; Le Gouellec et al., 2019] aux étoiles T Tauri de faible masse et aux étoiles Herbig Ae-Be [Villebrun et al., 2019a; Pouilly et al., 2020, 2021]. Ces observations suggèrent que dans au moins un système multiple, l'étoile primaire non-magnétique serait en rotation

plus rapide que l'étoile magnétique, confirmant la piste d'un scénario où le freinage magnétique jouerait un rôle prépondérant (Shultz et al. 2021). Par ailleurs, les étoiles jeunes ont une activité magnétique intense qui impacte grandement leur signal de vitesse radiale, mais en modélisant cette activité à partir d'observations spectro-polarimétriques, il est possible de détecter le signal de vitesse radiale d'une ou de plusieurs planètes [Klein et al., 2021b; Donati et al., 2023c]. Tandis qu'une éruption magnétique a été détectée pour la première fois venant d'une protoétoile enfouie, grâce aux observations de photons de haute énergie [photons X Grosso et al., 2020], des observations de jeunes étoiles de type solaire ont montré de fréquentes éjections de masse coronale, confirmant que les événements éruptifs de grande amplitude pourraient avoir de profondes implications sur l'évolution précoce de proto-planètes dans les systèmes de type solaire [Namekata et al., 2023].

Les processus d'accrétion/éjection initiés par la magnétosphère dans les jeunes systèmes stellaires ont été étudiés grâce à des observations et des modèles. Des analyses temporelles de la variabilité spectrale et photométrique (K2, TESS) ont été utilisées pour déduire la structure et la dynamique de la région d'accrétion magnétosphérique s'étendant du bord interne du disque à la surface stellaire [Donati et al., 2019, 2020; Bouvier et al., 2020a,b; Sousa et al., 2021]. Les modèles d'accrétion magnétosphérique ont été améliorés avec le développement de transfert radiatif NLTE dans les raies spectrales, afin de prédire la structure des flux d'accrétion et leurs signatures spectrales comparables aux observations [Pantolmos et al., 2020; Tessore et al., 2021].

En ce qui concerne les éjections de masse des systèmes étoile-disque, des modèles et des observations ont permis d'explorer les mécanismes physiques à l'oeuvre dans les vents de disques. Tandis que les observations suggèrent une efficacité faible du mécanisme dit de disk-locking [de Albuquerque et al., 2020] et des jets variables [Petrov et al., 2019], les modèles ont pu développer la description des chocs hydrodynamiques en conditions de rayonnement non LTE [PLUTO Colombo et al., 2019], et des descriptions des mécanismes de lancement des jets par l'accrétion magnétosphérique [Sauty et al., 2022]. Les modèles de vents de disques MHD montrent aussi que les vents de disque peuvent promouvoir à la fois l'accrétion sur la jeune étoile mais aussi

l'évolution rapide des disques protoplanétaires, avec donc un potentiel impact sur l'architecture finale des systèmes exo-planétaires [Tabone et al., 2022].

## Caractérisation des disques protoplanétaires

Grâce aux instruments du VLT comme SPHERE, MATISSE ou GRAVITY et aux radio-interféromètres ALMA et NOEMA, les observations de disques protoplanétaires atteignent aujourd'hui une sensibilité et une résolution angulaire permettant de sonder les grandes propriétés physiques des disques comme leur taille et leur masse, de caractériser leurs mécanismes d'évolution (accrétion, vents), et aussi de résoudre l'émission de leur contenu en gaz et poussière, qui présente souvent des structures sous forme d'anneaux ou de spirales. Deux revues récentes à ce sujet sont celles de Benisty et al. [2023], sur les observations en optique et en proche-infrarouge des disques, et de Pascucci et al. [2023] sur les observations de vents dans les disques et leur rôle dans leur évolution. Nous reportons ci-dessous plusieurs faits marquants obtenus par la communauté Française sur la période 2019-2023.

Les observations d'objets stellaires jeunes de classe 0 dans le cadre du Large Programme CALYPSO sur NOEMA montrent que ces objets tendent à être entourés d'un disque compact, de taille typique inférieure à 50 ua [Maury et al., 2019b; Maret et al., 2020b], en accord avec les simulations magnétohydrodynamiques d'effondrement de nuages moléculaires [Lebreuilly et al., 2021b]. Cette petite taille de disque n'est pas une caractéristique nécessairement partagée par les objets stellaires plus évolués (classe I/II), qui présentent souvent des disques plus étendus et donc plus facilement résolus. Résoudre l'émission du gaz des disques permet notamment d'en mesurer la vitesse de rotation et d'estimer ainsi la masse de l'étoile hôte [Simon et al., 2019]. Des écarts à la rotation Keplerienne sont observés, que ce soit à grande échelle avec des vents de disque sous forme de cônes d'émission moléculaire [de Valon et al., 2020; Tabone et al., 2020] ou de façon très localisée à l'intérieur d'anneaux sombres dans l'émission continue de la poussière, traçant probablement la présence de compagnons planétaires massifs [Pinte et al., 2020]. Observer l'émission de multiples traceurs moléculaires, comme avec le Large Programme MAPS sur ALMA, permet de contraindre

l'évolution chimique des disques en plus de leur évolution physique [Le Gal et al., 2021]. Les observations du gaz et de la poussière de disques fortement inclinés, quasiment vus par la tranche, permettent de sonder la sédimentation verticale des poussières vers le plan médian des disques et de contraindre le transport turbulent vertical des poussières [Villave et al., 2020].

L'émission des poussières comme du gaz des disques protoplanétaires présente souvent des structures. C'est le cas par exemple du disque autour d'AB Aurigae, dont les observations SPHERE en lumière diffusée polarisée montrent plusieurs spirales, dont une dont la déformation rappelle beaucoup celle prédite par les modèles d'interaction disque-planète [Boccaletti et al., 2020]. Les observations ALMA de l'émission du gaz du disque circumbinaire autour de GG Tau A, un disque massif et étendu, présente plusieurs structures, dont des spirales, possiblement dues à des planètes [Phuong et al., 2020b,a]. Le disque autour de PDS-70, connu pour présenter deux compagnons planétaires découverts dans l'émission infrarouge des poussières et dans l'émission du gaz en  $H\alpha$ , a été l'objet de nouvelles observations ALMA de l'émission des poussières ayant permis la détection de matériel circumplanétaire autour de l'un des deux compagnons planétaires [Benisty et al., 2021].

Les observations au VLTI avec PIONIER, MATISSE ou GRAVITY tracent l'émission des parties internes des disques protoplanétaires (en deçà de 1 ua de l'étoile). Leur comparaison avec des observations ALMA, sondant les parties externes des disques, a notamment permis de révéler une forte inclinaison relative entre les parties interne et externe de plusieurs disques de transition [Bohn et al., 2022]. La modélisation des données interférométriques (visibilités et clôtures de phase) peut contraindre les propriétés physiques de la poussière par la comparaison avec des calculs de transfert radiatif. Par exemple, les observations en bande L avec MATISSE du disque autour d'HD 179218 indiquent que les parties internes sont riches en carbone [Kokoulina et al., 2021]. Parmi un échantillon de 15 à 30 disques observés autour d'étoiles Herbig Ae/Be en bande H avec PIONIER ou en bande K avec GRAVITY, environ un tiers présente une clôture de phase élevée (supérieure à 20 degrés) indiquant une distribution spatiale asymétrique de la poussière juste au-delà du

rayon de sublimation [GRAVITY Collaboration et al., 2019; Kluska et al., 2020]. Cela n'est pas le cas pour les disques autour d'étoiles T Tauri observés avec GRAVITY [GRAVITY Collaboration et al., 2021].

## Dynamique et évolution des disques protoplanétaires

L'évolution du gaz des disques protoplanétaires est régie par plusieurs mécanismes : des instabilités magnéto-hydrodynamiques (MHD) induisant un transport turbulent de masse vers l'étoile, des vents magnétisés extrayant la matière à la surface des disques et induisant un transport laminaire de masse vers l'étoile, ou encore la photoévaporation par le rayonnement X/UV de l'étoile centrale. Quel mécanisme domine dans différentes parties des disques, selon leur âge ou leur masse, est une des questions clés relatives à la théorie des disques protoplanétaires, à laquelle s'ajoute naturellement celle de l'impact de ces mécanismes sur la dynamique et l'évolution des poussières (cf. la revue récente de Lesur et al., 2023). Nous reportons ci-dessous plusieurs faits marquants obtenus par la communauté Française sur la période 2019-2023.

Le taux d'ionisation du gaz est une quantité essentielle pour déterminer où l'instabilité magnéto-rotationnelle peut se développer dans les disques et induire un transport radial turbulent de masse. Dans ce contexte, Brunn et al. [2023] ont montré, via un code modélisant la structure thermique et chimique d'un disque, que les particules énergétiques produites lors de l'interaction entre le champ magnétique du disque et celui de l'étoile conduisent à un taux d'ionisation dans le disque à proximité de l'étoile considérablement plus élevé que celui induit par les sources d'ionisation plus classiques comme les rayons X de l'étoile ou les collisions thermiques entre atomes et molécules de gaz.

La présence d'un champ magnétique poloidal à travers un disque conduit naturellement à l'échappement de vents en surface du disque [Jacquemin-Ide et al., 2019; Lesur, 2021]. Selon l'amplitude de ce champ, la nature et l'amplitude des effets de MHD non-idéale, les vents peuvent déclencher une instabilité conduisant à la formation d'écoulements zonaux prenant la forme d'une alternance d'anneaux sur- et sous-denses de gaz [Riols & Lesur, 2019]. Les disques avec vents magnétisés peuvent également maintenir la présence d'une cavité dans

leurs parties internes, leur permettant d'avoir un taux d'accrétion élevé dans tout le disque, de l'ordre de  $10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ , y compris dans la cavité, ce qui permettrait d'expliquer le taux d'accrétion stellaire élevé pour nombre d'étoiles jeunes entourées d'un disque de transition [Martel & Lesur, 2022]. Comment la présence de vents magnétisés influe sur les interactions disque-planète a été récemment examiné par Wafflard-Fernandez & Lesur [2023].

L'émission des poussières dans les disques montre souvent la présence d'anneaux sombres et brillants, notamment dans le domaine radio. Ces anneaux pourraient résulter de la formation d'écoulements zonaux dans les disques avec vents magnétisés [Riols et al., 2020]. Dans les disques non-magnétisés, ils pourraient aussi résulter de la formation de pièges à poussière induits par la friction mutuelle entre gaz et poussières du disque [Vericel et al., 2021]. Autrement, ces anneaux pourraient être la signature de planètes enfouies dans leur disque et Wafflard-Fernandez & Baruteau [2020] ont proposé qu'une planète massive migrant de manière intermittente dans son disque pourrait générer à elle seule plusieurs anneaux sombres et brillants dans l'émission continue des poussières. Plus généralement, les signatures de la présence et de la migration de planètes dans l'émission du gaz et des poussières des disques ont été l'objet de plusieurs études, dont celles de Baruteau et al. [2019], Pinte et al. [2019] et Baruteau et al. [2021].

Que ce soit pour interpréter l'émission des poussières des disques ou pour les modèles de formation planétaire, il est essentiel de progresser sur notre compréhension de la croissance des poussières dans les disques. Dans ce contexte, Garcia & Gonzalez [2020] et Michoulier & Gonzalez [2022] ont étudié l'impact de la porosité des poussières sur leur croissance et leur dynamique, tandis que Lombart & Laibe [2021] ont développé une nouvelle méthode numérique pour modéliser, dans les simulations hydrodynamiques de disques, la croissance des poussières par coagulation et fragmentation. La croissance des solides du mètre au kilomètre nécessite de mieux comprendre dans quelles circonstances la dynamique couplée du gaz et des poussières des disques peut conduire à l'instabilité filamentaire [Jaupart & Laibe, 2020].

## La fonction de masse

Un des problèmes fondamentaux de l'astrophysique moderne concerne l'origine de la fonction de masse. Les amas d'étoiles jouent évidemment un rôle central dans l'étude de cette question, et en particulier les amas jeunes. Jusqu'à récemment, l'étude de la fonction de masse était limitée essentiellement par l'imcomplétude et la contamination des recensements d'amas d'étoiles d'une part, et par les incertitudes sur l'âge des amas d'autre part. Avec Gaia DR2 il devenait trivial d'identifier avec une très grande confiance et une très bonne complétude les membres d'amas dans l'espace joint des positions, des vitesses, et des luminosités. Gaia DR2 a ainsi permis non seulement de réaliser des recensements systématiques de nombreux amas [Galli et al., 2020a,b, 2021a,b], mais aussi de découvrir de nouveaux amas ou groupes d'étoiles jeunes dans le voisinage solaire et au delà, ou encore de distinguer les populations multiples qui composent ce que l'on considérait comme un seul groupe avant Gaia DR2 [e.g. Olivares et al., 2023; Galli et al., 2019]. Des relevés ciblés combinant Gaia avec des relevés infrarouges profonds sur des amas plus lointains et enfouis et dans des environnements assez diverses n'ont mis en évidence aucune dépendance significative de la fonction de masse initiale en fonction de l'environnement [Damian et al., 2021]. Ces recensements permettaient ensuite de d'améliorer considérablement les estimations d'âge de ces amas et groupes d'étoiles soit en comparant les mesures de Gaia combinées à des mesures photométriques et spectroscopiques avec des modèles d'évolution soit en utilisant la méthode du "traceback" utilisant les vitesses mesurées par Gaia combinées avec des mesures de vitesses radiales pour déterminer des âges dynamiques indépendants des modèles d'évolution [Miret-Roig et al., 2020, 2022b]. La détermination de l'âge d'un groupe est une étape cruciale vers la mesure de la fonction de masse puisque les masses individuelles sont obtenues en convertissant les luminosités avec des modèles d'évolution. Au delà de leur application pour la détermination de la fonction de masse, ces mesures d'âges ont permis de mieux comprendre l'histoire de la formation stellaire dans des régions de formation remarquables comme Orion, le Taureau ou encore Scorpius-Centaurus. Les résultats et recensements exceptionnels (tant en qualité qu'en quantité) obtenus avec Gaia ont été,

dans certains cas, complétés par des observations très profondes obtenues au sol, pour obtenir des recensements complets jusque dans le domaine de masse planétaires. Ces relevés ont ainsi révélé l'existence d'une population d'objets de masse planétaires isolés plus importante que prévue [Miret-Roig et al., 2022a], et qui suggère qu'une fraction importante de ces objets se sont formés dans des systèmes planétaires puis ont été éjectés à la suite d'interactions dynamiques.

## CONCLUSION



# CHAMP MAGNÉTIQUE ET ACTIVITÉ STELLAIRE

## INTRODUCTION

Les champs magnétiques sont présents à travers l'ensemble du diagramme HR. La communauté PNPS s'intéresse à l'ensemble des manifestations du magnétisme stellaire, sur une large gamme de masses et de stades évolutifs. La compréhension de la nature et de l'origine de ces champs magnétiques, observés en surface ou dans diverses zones de l'étoile (zone convective, zone radiative) est au coeur de nos activités. Une grande diversité (amplitude du champ, topologie, variabilité temporelle à diverses échelles de temps) est observée en fonction de la masse de l'étoile. Dans ce document de bilan, la question du magnétisme des proto-étoiles, en lien avec le milieu interstellaire et leur environnement, est traitée dans le chapitre "Origines". Le magnétisme de surface des étoiles dans un stade évolué est traitée dans le chapitre "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes", tandis que le magnétisme en lien avec la structure interne est traité ici.

La communauté cherche à répondre aux grandes questions suivantes. Quelle est l'origine du magnétisme des étoiles dans différentes gammes de masse, des étoiles massives aux naines M? Quel rôle joue le champ magnétique dans le transport de moment cinétique dans les étoiles? En particulier, quel est le lien entre la rotation différentielle et le champ magnétique dans les zones radiatives? Quelle est la topologie de ces champs magnétiques? Des processus de dynamo sont-ils à l'origine de ces champs dans les zones radiatives, et si oui quelle est leur nature? Quelles sont les propriétés (topologie, évolution temporelle, cycles d'activité) des champs magnétiques dans les zones convectives des étoiles de faible masse et quel est leur lien avec l'évolution rotationnelle de ces étoiles? Quel est l'impact de la variabilité stellaire (magnétisme, dynamique photosphérique) sur la détectabilité et la caractérisation des exoplanètes?

Ces grandes questions permettent d'affiner notre compréhension de l'évolution des étoiles au cours de leur vie. Le magnétisme joue en effet un rôle majeur sur cette évolution, par exemple en lien avec la rotation différentielle, détaillés ci-dessous, mais aussi dans les interactions avec leur environnement

(voir chapitre "Interactions"). Ces travaux s'appuient sur une large gamme de méthodologies, en premier lieu les simulations numériques et les observations. La communauté française est particulièrement investie dans le développement d'instrument à la pointe dans ce domaine, en particulier en spectropolarimétrie, dans le visible et l'infrarouge, comme en témoigne le succès de SPIRou, qui a permis d'apporter une moisson de résultats au cours de ce bilan suite à sa mise en service début 2019 (35 publications). Des approches multi-techniques et multi-longueurs d'ondes complémentaires sont implémentées afin de chercher à obtenir une vue d'ensemble de la variabilité des étoiles.

Dans la suite, nous présentons tout d'abord les avancées à la fois observationnelles et théoriques dans le domaine du magnétisme dans les zones radiatives, qu'elles soient en surface ou sous la zone convective en fonction du régime de masse. Nous abordons ensuite le magnétisme dans les zones convectives des étoiles de faible masse et de type solaire, ainsi que leur lien avec la rotation et, au delà de la détection de ces champs, la recherche de cycles d'activités. Ces derniers peuvent également être étudiés avec des observables complémentaires. Enfin, nous présentons les avancées dans le domaine de l'impact de cette variabilité stellaire, en partie due au magnétisme, sur la détection et la caractérisation des exoplanètes.

## LES GRANDES AVANCÉES SUR LA PÉRIODE 2019-2023

### Champ magnétique dans les zones radiatives

Observation du champ magnétique de surface des étoiles massives et de masses intermédiaires

Les observations systématiques des deux dernières décennies - menées notamment dans le cadre du *Large Program MiMeS* - indiquent que moins de 10% des étoiles chaudes et massives (OB) possèdent un champ magnétique de surface [e.g. Wade et al., 2016; Grunhut et al., 2017]. Ces champs sont forts (de l'ordre de la centaine de G jusqu'au kG), princi-



palement dipolaires, stables sur de longues échelles de temps, et l'hypothèse la plus communément admise désormais est que ces champs magnétiques sont d'origine fossile [Donati & Landstreet, 2009].

Les étoiles de masses intermédiaires (type spectral A essentiellement) ont quant à elles des taux de détection de champs fossiles intenses similaires. Cependant, quelques champs faibles (de l'ordre du G) organisés à petite échelle comme Vega (Lignières et al. 2009) et Sirius (Blazère et al. 2016) ont été détectés, révélant la présence d'un "désert magnétique" entre environ 10 et 100 G [Aurière et al., 2007; Sikora, 2019]. L'origine de la dichotomie magnétique (champs intenses vs champs nuls ou faibles) observée dans les étoiles OBA est un sujet d'intenses recherches. Il existe plusieurs hypothèses : une bimodalité des mécanismes de génération des champs magnétiques pendant la formation stellaire [e.g. Emeriau-Viard & Brun, 2017; Villebrun et al., 2019b], une distribution des intensités initiales de champs magnétiques [Petit et al., 2019], et un effet de seuil magnétique en-dessous duquel un champ magnétique dipolaire ne peut pas survivre due à une rotation trop forte [Aurière et al., 2007], ou pourrait être rapidement dissipé par des instabilités magnéto-rotationnelles [e.g. Jouve et al., 2020]. L'origine de la dichotomie magnétique (champs intenses versus champs nuls ou faibles) observée dans les étoiles OBA reste donc un sujet d'intenses recherches.

Au delà de la détection de ces champs, les étoiles de masses intermédiaires ayant des champs magnétiques de surface sont également connues pour présenter des variations photométriques périodiques associées à la modulation de la rotation, ce qui fait d'elles des cibles de choix pour les missions spatiales photométriques comme K2, BRITE, ou TESS. Certaines signatures photométriques sont associées à des phénomènes tels que des pulsations, et elles peuvent être utilisées pour fournir des contraintes sur les paramètres physiques de ces étoiles via une approche de magnéto-astérosismologie [Buysschaert et al., 2019]. C'est dans ce contexte par exemple qu'a été mise en place la collaboration MOBSTER (Magnetic OB[A] Stars with TESS : probing their Evolutionary and Rotational properties), pour exploiter les observations de TESS afin de mieux comprendre l'impact du champ magnétique sur la structure et l'évolution stellaire des étoiles [David-Uraz et al., 2019]. Des approches plus classiques com-

binant spectropolarimétrie et études des modes de pulsations déduits de suivis spectroscopiques sur des cibles de choix telles que les variables pulsantes  $\delta$  Sct et  $\beta$  Cep sont aussi suivies, avec les mêmes objectifs [Fréour et al., 2023; Thomson-Paressant et al., 2021]. Par ailleurs, les champs magnétiques de ces étoiles de masse intermédiaires de la séquence principale sont connus depuis suffisamment longtemps pour avoir permis un suivi temporel significatif des propriétés magnétiques, ce qui a permis de mettre évidence une variabilité à plus grande échelle de temps. C'est le cas de Véga (type A0), dont le suivi spectropolarimétriques depuis plus de 15 ans suggèrent la présence de taches magnétiques à relativement petite échelle qui pourraient ne pas être limitées à la région polaire de l'étoile, bien que l'échantillonnage temporel de la reconstruction magnétique ne soit pas assez complet pour permettre de conclure fermement sur l'évolution temporelle de ces structures [Petit et al., 2022].

### Détection sismique de champs magnétiques dans les zones radiatives des géantes

On dispose actuellement de mesures de champs magnétiques de surface pour des étoiles couvrant le diagramme HR, dans les zones radiatives des étoiles massive ou de masse intermédiaires (voir ci-dessus) ou dans les zones convectives d'étoiles de plus faible masse (voir section suivante). Par contraste, les propriétés du champ magnétique dans les intérieurs stellaires (intensité, topologie) sont restées jusque très récemment inconnues, faute de mesure directe de ces champs, d'où la nécessité d'adopter d'autres techniques. La précision inédite des données astérosismologiques du satellite *Kepler* a ainsi permis de rechercher la signature sismique de champs magnétiques internes. Pour les étoiles de séquence principale présentant des modes de gravité (étoiles de type  $\gamma$  Doradus ou SPB – slowly pulsating B stars), Prat et al. [2019] ont montré qu'un champ magnétique axisymétrique produit des écarts à l'espacement en période attendu, qui devraient être détectables pour des intensités de champ dépassant  $\sim 10^5$  G au cœur. Des intensités plus faibles pourraient être détectées pour des champs non-axisymétriques fortement inclinés (Prat et al. 2020). Dans les étoiles géantes rouges, les multiplets rotationnels (ensemble de modes d'oscillation de même ordre radial  $n$  et de même degré  $l$ ) des modes mixtes sont généralement symé-

triques, du fait de la rotation lente de ces objets. Un champ magnétique au cœur d'une géante produit des asymétries dans ces multiplets, dont l'expression de l'intensité a été dérivée par Mathis et al. [2021] et Bugnet et al. [2021] dans le cas particulier d'un champ axisymétrique à structure dipolaire.

Dans ce contexte, Li et al. [2022] ont détecté de fortes asymétries dans les multiplets rotationnels de trois géantes rouges observées avec *Kepler*. Les propriétés de ces asymétries sont très similaires à celles prédites par Bugnet et al. [2021], mais pour une des trois étoiles, leur signe est différent. Li et al. [2022] ont alors généralisé les études précédentes, en calculant les perturbations magnétiques des fréquences des modes d'oscillation sans faire d'hypothèses sur la topologie du champ. Ils ont montré que l'asymétrie des multiplets est reliée à une moyenne pondérée de la composante horizontale du champ radial. Dans le cas d'un champ dipolaire, le lien entre asymétrie et inclinaison du champ a par la suite été explicité par Mathis & Bugnet 2023. L'expression obtenue par Li et al. [2022] montre un très bon accord avec les observations sismiques pour les trois étoiles. Cela a donné lieu à la première mesure directe de champ magnétique dans les intérieurs stellaires (30 à 100 kG au cœur de ces trois géantes rouges) et également fourni des contraintes sur leur topologie. Une démarche plus systématique de recherche d'asymétries des multiplets rotationnels a ensuite permis de détecter des champs magnétiques au cœur de 10 autres géantes rouges observées avec *Kepler* (Li et al. 2023). Des champs plus forts encore, proches du champ critique au-delà duquel les ondes de gravité ne peuvent plus se propager, ont été détectées par Deheuvels et al. [2023] dans le cœur de 11 géantes rouges grâce à l'impact du champ magnétique sur la régularité des modes de gravité. De nouvelles cibles de ce type pourraient être identifiées par la suite en appliquant la méthode proposée par Bugnet [2022].

Ces premières détections sismiques de champ magnétique dans le cœur des géantes rouges permettront de revisiter la question de l'origine et de l'évolution des champs magnétiques dans les intérieurs stellaires. De premiers calculs en ordre de grandeur suggèrent que les champs détectés pourraient avoir été générés par un processus de dynamo dans le cœur convectif de séquence principale. Ces contraintes observationnelles sont également pré-

cieuses pour la compréhension du transport de moment cinétique dans les étoiles géantes, qui reste mal compris. Par exemple, les intensités de champ radial mesurées par Li et al. [2022] sont plusieurs ordres de grandeur supérieures aux champs prédits comme résultant de la dynamo de Tayler-Spruit suivant le formalisme de Fuller et al. [2019].

## Interactions entre champ magnétique et rotation

Dans le contexte des zones radiatives stellaires, plusieurs travaux ont été menés ces dernières années pour étudier l'interaction entre champ magnétique et rotation différentielle sous l'effet d'une stratification stable. L'objectif est double. D'une part, on cherche à déterminer si un processus dynamo peut avoir lieu dans les zones radiatives et ainsi amplifier un champ fossile hérité des phases de formation stellaire. En effet, s'il est admis que les champs forts dans les zones radiatives des étoiles les plus massives sont d'origine fossile, les étoiles de masse intermédiaires présentent une variabilité temporelle de ces champs magnétiques. D'autre part, les interactions entre champ magnétique et rotation différentielle peuvent transporter du moment cinétique. Une question clé est de savoir quels processus sont à l'oeuvre et quelle est l'efficacité du transport qu'ils produisent. Parmi les mécanismes de transport possibles, on peut citer les ondes d'Alfvén ou des instabilités MHD telles que l'instabilité magnéto-rotationnelle (Balbus & Hawley 1991) ou l'instabilité de Tayler (Tayler 1973), qui produisent un transport turbulent. La communauté s'est intéressée à ces deux objectifs, pour des étoiles dans différents régimes de masse et à différents stades d'évolution.

Il existe différentes stratégies pour forcer la rotation différentielle. Une possibilité est de forcer un taux de rotation différent aux deux bords du domaine. Le développement d'une instabilité de type MRI a ainsi été mis en évidence et étudié dans des simulations numériques 2D incluant l'effet de la stratification (Philidet et al. 2020) et des simulations 3D en l'absence de stratification stable (Meduri et al. 2019). Dans le même type de configuration, Reboul-Salze et al. [2021] et Reboul-Salze et al. [2022] ont également identifié une instabilité MRI, associée à un mécanisme de dynamo permettant d'amplifier fortement le champ magnétique initial. Ces études, dédiées au contexte des magnétars, ont permis de

postuler qu'un tel mécanisme d'amplification permettrait d'atteindre des champs magnétiques d'intensité de l'ordre de  $10^{15}$  G, typiques de ces objets astrophysiques. Plus récemment, les travaux de Petitdemange et al. [2023] et Barrère et al. [2023] ont montré que l'instabilité de Tayler pouvait également se développer à partir d'une certaine amplitude de champ magnétique, elle-même atteinte grâce à une dynamo cinématique liée à la présence d'une instabilité hydrodynamique. Une nouvelle branche dynamo reposant sur l'instabilité de Tayler peut alors exister et produire de nouveau des champs magnétiques intenses associés à un transport de moment cinétique efficace. Ces travaux ont permis de remettre sur le devant de la scène la possibilité qu'une dynamo en zone radiative associée à l'instabilité de Tayler (dynamo de Tayler-Spruit) puisse transporter efficacement du moment cinétique, avec des applications potentiellement majeures pour les étoiles géantes rouges.

Une autre possibilité pour forcer la rotation différentielle est de modéliser les changements structurels de l'étoile, comme par exemple la contraction du cœur pendant la phase de géante rouge (Gouhier et al. 2021, Gouhier et al. 2022). Dans ces simulations 2D incluant l'effet de la stratification, une instabilité de type MRI se développe seulement après que les ondes d'Alfvén ont redistribué efficacement le moment cinétique pour produire une rotation quasi-solide le long des lignes de champ magnétique. Ce même type d'évolution en deux temps a été observé dans les simulations de Jouve et al. [2020], où la rotation différentielle est imposée initialement. Dans le cas où le forçage de la rotation différentielle se fait sur des temps longs par rapport au temps d'Alfvén (réaliste pour les étoiles), le champ magnétique à grande échelle a donc tendance à imposer un type d'écoulement qui peut ensuite devenir instable vis-à-vis de la MRI. Dans les simulations de Gouhier et al. [2022], cette instabilité a pour effet de détruire le champ à grande échelle. Ce type d'évolution pourrait être à l'œuvre dans les étoiles sous-géantes, pour lesquelles l'astérosismologie semble indiquer qu'une phase de rotation quasi-solide précède une phase d'accélération du cœur (Deheuvels et al. 2020).

Enfin, une autre possibilité pour forcer la rotation différentielle est un forçage en volume à travers toute la coquille. Dans ce cas, le profil et l'ampli-

tude du taux de rotation sont contrôlés et l'effet d'un champ magnétique initial peut être étudié. Meduri et al. [2023] ont ainsi identifié différents comportements selon l'amplitude de la rotation et du champ magnétique : des instabilités MRI et de Tayler ainsi que des cas dynamo reposant sur la MRI. Ces travaux ont montré que le transport de moment cinétique est plus efficace que celui des éléments chimiques (avec des applications intéressantes pour le problème du lithium dans les étoiles de type solaire) et une loi d'échelle en fonction de la stratification a été proposée.

## Champ magnétique dans les zones convectives

Il est bien établi que les zones convectives stellaires sont le siège de champs magnétiques produits par un processus de dynamo. La communauté française est fortement impliquée dans l'étude de ces champs pour des étoiles dans diverses gammes de masses, depuis les étoiles naines M (incluant les étoiles entièrement convectives) jusqu'aux étoiles de type solaire. La question centrale de l'origine des cycles magnétiques dans ces étoiles est abordée d'un point de vue observationnel (spectropolarimétrie, marqueurs d'activité chromosphériques, photométrie) et via des simulations numériques.

### Magnétisme des étoiles naines M

Depuis sa mise en service au TCFH au premier semestre 2019, le spectropolarimètre proche infrarouge SPIRou [Donati et al., 2020] a permis d'étendre l'étude du magnétisme des étoiles naines M à des objets plus faibles (du fait de leur distance ou de leur luminosité) et moins actifs que les premières études menées avec son prédécesseur ESPaDOnS. Ces résultats ont principalement été obtenus dans le cadre du grand programme SPIRou Legacy Survey (2019-2022A) dont les objectifs principaux sont d'une part la détection et la confirmation d'exoplanètes de petites masses en orbite autour d'étoiles naines M, et d'autre part l'étude de la formation et de l'évolution précoce des étoiles de petites masses et de leurs systèmes planétaires (cf. thème « Origine »). Les premières études ont notamment permis de vérifier les performances de l'instrument en ciblant des étoiles de type spectral K bien caractérisées dans le domaine visible [Moutou et al., 2020; Petit et al., 2021].

Les séries temporelles denses et réparties sur plusieurs années obtenues dans le cadre des programmes de recherche ou de confirmation d'exoplanètes avec SPIRou constituent une opportunité unique d'étudier le magnétisme des étoiles naines M, ainsi que leur évolution sur plusieurs années (cf. paragraphe « Cycles magnétiques »). Pour les étoiles actives, la cartographie des taches et plages ainsi que du champ magnétique à grande échelle (via l'imagerie Doppler et Zeeman-Doppler, respectivement) est primordiale à la fois pour corriger de l'effet de l'activité stellaire sur les mesures de vitesses radiales (cf. section suivante) et pour modéliser l'environnement dans lequel évoluent les exoplanètes ainsi découvertes (cf. thème « Interactions »). C'est notamment le cas de l'étoile jeune AU Mic [Martioli et al., 2020; Klein et al., 2021b; Donati et al., 2023a], mais aussi d'étoiles moins actives [Martioli et al., 2022]. Les données spectroscopiques et spectropolarimétriques obtenues dans le domaine visible (ESPaDOnS, NARVAL, HARPS, SOPHIE) viennent régulièrement compléter les données SPIRou dans des buts d'intercalibration, d'étude de la chromaticité des signatures de l'activité, et de construction des séries temporelles longues [Klein et al., 2022; Cortés-Zuleta et al., 2023; Carmona et al., 2023; Bellotti et al., 2023]. SPIRou a aussi permis d'étendre les études spectropolarimétriques à des naines M moins actives dont la période de rotation est supérieure à 100 jours, suggérant un régime de dynamo où le champ magnétique est relativement intense indépendamment de la rotation [Fouqué et al., 2023; Donati et al., 2023b]. Les premières cartes magnétiques reconstruites dans ce régime révèlent des champs purement poloïdaux, et les étoiles entièrement convectives semblent générer des champs moins axisymétriques que celles possédant une zone radiative [Lehmann et al., 2024].

Ces nouvelles capacités instrumentales ont impulsé d'une part la réalisation de nouvelles simulations numériques de dynamo dans le but d'étudier les conditions qui déterminent la génération d'un champ à grande échelle dipolaire dans les étoiles naines M, Zaire et al. [2022] proposent ainsi un nouveau critère basé le rapport des forces de Lorentz et d'inertie plutôt que sur le nombre de Rossby. Et d'autre part le développement de nouveaux outils pour analyser plus finement ou efficacement les spectres SPIRou : études PCA de séries de spectres polarisés [Lehmann & Donati, 2022], imagerie ma-

gnétique dépendante du temps [Finocietty & Donati, 2022], mesure combinée du champ magnétique à petite échelle et des paramètres atmosphériques [Cristofari et al., 2023], et comparaison avec des spectres moléculaires expérimentaux (cf. thème « Astrophysique de laboratoire »).

## Évolution rotationnelle des étoiles froides

Le magnétisme joue un rôle critique sur l'évolution de la rotation des étoiles au cours de leur vie (freinage). Par conséquent, la communauté cherche depuis longtemps à explorer le lien entre niveau d'activité, rotation et âge afin de contribuer à la détermination des âges stellaires (principe de la gyrochronologie).

Afin de comprendre l'évolution de la rotation des étoiles froides et tester la validité de la gyrochronologie, il est cependant nécessaire de mieux modéliser la boucle de rétroaction impliquant rotation, génération de champ magnétique par effet dynamo et perte de moment cinétique par les vents magnétisés. L'approche globale consistant à paramétriser un modèle d'évolution du moment cinétique a été étendue en se focalisant sur le lien entre les propriétés coronales et les caractéristiques du vent, les degrés de liberté du modèle étant ajustés sur les mesures spectropolarimétriques de champs magnétiques [Ahuir et al., 2020]. Il est par ailleurs nécessaire de mieux modéliser chacun des processus intervenant dans cette perte de moment cinétique. Alors que l'extraction de moment cinétique est généralement modélisée uniquement par le vent stellaire, plusieurs travaux explorent par exemple la contribution des protubérances pour des étoiles en rotation rapide, en se basant sur des cartes magnétiques ZDI [Cang et al., 2020, 2021; Waugh et al., 2021]. Plusieurs études numériques ont également abordé le problème du freinage magnétique faible des étoiles de type solaire âgées de quelques milliards d'années, ainsi que son lien avec la rotation différentielle « anti-solaire » (équateur lent) à la fois via des simulations numériques directes [Takehiro et al., 2020; Brun et al., 2022] et des modèles dynamos de champ moyen [Noraz et al., 2022a]. Ces études ont notamment montré que des étoiles plus âgées dont le profil de rotation différentielle est anti-solaire aboutissent à des propriétés magnétiques distinctes (cf. paragraphe « Cycles magnétiques ») : il est alors très intéressant d'identifier un échantillon de cibles *Kepler*



candidates pour la détection de ces phénomènes [Noraz et al., 2022b]. Le basculement vers le régime anti-solaire pourrait correspondre à une période de minimum d'activité, avant de retrouver une activité magnétique plus importante : ce type de comportement inattendu devrait fortement impacter les estimations des âges par gyrochronologie.

## Cycles magnétiques des étoiles froides

Le suivi spectropolarimétrique long-terme d'étoiles froides de séquence principale permet de mesurer les propriétés des cycles magnétiques d'étoiles de type solaire et leur lien avec les cycles chromosphériques [Boro Saikia et al., 2022], voire d'identifier leur absence surprenante [Marsden et al., 2023]. L'étude systématique du lien entre activité chromosphérique (voir Section « Caractérisation de la variabilité stellaire à l'aide d'autres observables »), champ magnétique longitudinal et la dispersion de ces quantités sur la base de données PolarBase a également révélé un changement de comportement des étoiles de type solaire d'âge intermédiaire qui pourrait traduire une évolution des cycles magnétiques au cours de la vie de l'étoile [Brown et al., 2022]. Pour les naines M, alors que des cycles d'activité sont rapportés dans la littérature, il n'a pas encore été possible de mettre en évidence de cycle magnétique par des mesures spectropolarimétriques [Klein et al., 2021a; Bellotti et al., 2023], possiblement du fait de la base temporelle encore trop courte des observations de SPIROU. Toutefois les premières inversions de champ magnétique global ont été observées pour des rotateurs lents [Lehmann et al., 2024].

Du point de vue de la modélisation, des études paramétriques menées d'une part sur des modèles de champ moyen et d'autre part sur des simulations numériques directes 3D ont permis de montrer que les modèles présentant un profil de rotation différentielle anti-solaire, correspondant à un nombre de Rossby élevé, entretiennent des dynamos stationnaires, c'est-à-dire sans cycle magnétiques, alors que ces deux types de modèles reproduisent bien des cycles magnétiques de type solaire pour une rotation différentielle solaire (équateur rapide), associée à une valeur intermédiaire du nombre de Rossby [Noraz et al., 2022a; Brun et al., 2022]. Plusieurs études abordent également la problématique de l'extrapolation des résultats des simulations numériques directes de dynamo aux ré-

gimes de paramètres caractéristiques des intérieurs stellaires [Augustson et al., 2019]. Notamment, des simulations en géométrie cartésienne conduisent à la superposition d'un champ magnétique turbulent et d'une composante à grande échelle oscillante, dans le régime de nombre de Reynolds magnétique élevé [Rincon, 2021]. De futures études devront tenter d'étendre ces résultats au domaine des faibles nombres de Prandtl magnétiques typiques des dynamos stellaires, et dans une perspective plus lointaines aux simulations numériques globales.

D'autre part, les modèles de transport de flux et de champ moyen permettent d'analyser l'effet d'une modélisation plus réaliste de certains effets physiques sur les propriétés des cycles magnétiques. Le rôle des différents paramètres du mécanisme de Babcock-Leighton (dans lequel le cycle est produit par la transformation du champ poloïdal en champ toroïdal par la rotation différentielle, puis par la conversion de ce dernier en champ poloïdal par transport de flux par la circulation méridienne) a été étudié à l'aide d'un modèle dynamo 3D de transport de flux modélisant l'émergence de paires de taches de polarités opposées [Kumar et al., 2019]. Ce travail confirme notamment un résultat des modèles 2D, la nécessité de tenir compte des caractéristiques de plusieurs cycles magnétiques antérieurs pour prédire celles du cycle magnétique suivant. Une première étude couplant un modèle dynamo de champ moyen avec un modèle de vent stellaire simple a quant à elle démontré la rétroaction du vent sur la dynamo stellaire, favorisant ainsi les solutions quadripolaires [Perri et al., 2021].

## Caractérisation de la variabilité stellaire à l'aide d'autres observables

Comme décrit dans les sections précédentes, la communauté française est très impliquée dans la caractérisation directe du magnétisme stellaire, de par son investissement dans des instruments phares de la discipline et le développement d'outils d'analyse dédiés. Néanmoins, d'autres méthodes peuvent être utilisées de manière complémentaire afin de caractériser différents processus en lien avec l'activité stellaire, et la variabilité stellaire en général.

Parmi ces méthodes, les indicateurs d'émission chromosphériques ont été utilisés sur de larges échantillons de naines M, beaucoup moins bien caractérisés que les FGK, afin de rechercher des cycles d'ac-



tivité, en complément avec une analyse de la variabilité photométrique [Mignon et al., 2023] : les résultats obtenus montrent une grande diversité de propriétés, avec une absence de corrélation entre longueur de cycle et période de rotation, ainsi que des relations complexes entre différents indicateurs d'activité chromosphérique (Meunier et al. 2023, soumis). Ces indicateurs ont également été exploités afin de rechercher des diagnostics de processus qui ne sont pas encore identifiés sur des étoiles de type solaire comme les filaments [Meunier et al., 2022]. Enfin, l'instrument SPIRou ouvre des perspectives intéressantes devant permettre de caractériser l'activité stellaire dans l'infrarouge, ce qui s'est avéré une tâche complexe [Cortés-Zuleta et al., 2023]. En effet, le lien entre l'activité magnétique et le comportement des raies dans l'IR reste mal compris. De plus, les systématiques instrumentales contribuent encore significativement, ce qui impacte la comparaison entre différentes observables.

Les courbes de lumière photométriques sont traditionnellement utilisées afin de contraindre des structures telles que les taches et les plages, qui sont d'origine magnétique, mais qui par leur contraste permettent d'accéder à d'autres diagnostics. Ces deux types de structures créent cependant un signal dégénéré, ce qui rend difficile d'évaluer leur influence relative, et le signal résultant dépend en outre de la distribution en latitude et l'inclinaison de l'étoile [Meunier & Lagrange, 2019b]. Une approche alternative à l'ajustement direct des courbes de lumière a été implémentée, basée sur la transformée de Fourier du signal (Degott et al., these en cours), et dont les performances sont en cours d'évaluation. Le signal photométrique est également impacté par la présence d'autres sources de variabilité, les oscillations et la granulation (voir aussi le chapitre Structure interne et atmosphère). La granulation en particulier s'est révélée être une source de variabilité limitant la caractérisation précise de petites exoplanètes (type Terre) de longue période orbitale Sulis et al. [2022] et de nouveaux indicateurs ont été développés pour caractériser les variabilités de ce phénomène [Sulis et al., 2023].

Enfin, les vitesses radiales, dont la compréhension de l'impact de la variabilité de l'étoile est critique pour la thématique exoplanètes (voir section suivante), sont également impactées par ces processus, l'inhibition du blueshift convectif dans les

plages (lié à la granulation), mais aussi par de nombreux champs de vitesse à différentes échelles, comme la supergranulation [Meunier & Lagrange, 2019a, 2020b] ou la circulation méridienne [Meunier & Lagrange, 2020a], ce qui représente un potentiel pour étudier des processus encore mal compris pour des étoiles autres que le Soleil. Notons que les simulations MHD en 3D se sont révélées prometteuses pour reproduire les propriétés photométriques de granulation des étoiles du diagramme HR [Rodríguez Díaz et al., 2022a] ainsi que les vitesses radiales solaires de ce phénomène de faible amplitude [Sulis et al., 2020].

Enfin, des sursauts stellaires de naines M observés dans le domaine radio avec une haute résolution temporelle permettent d'étudier les propriétés des éruptions stellaires afin d'identifier les processus en cause, comme le montre les résultats récents obtenus sur AD Leo [Zhang et al., 2023]. *A compléter*

## Impact de la variabilité stellaire sur la détectabilité et la caractérisation des exoplanètes

Malgré une recherche d'exoplanètes très fructueuse au niveau national (voir document de bilan du PNP) et international, il est maintenant communément admis que la variabilité stellaire représente une limitation intrinsèque à la détection d'exoplanètes par vitesse radiale. Elle commence également à limiter la caractérisation de ces exoplanètes par d'autres techniques. La question de la limitation ultime à la détection et à la caractérisation est donc un enjeu majeur, en particulier pour des étoiles de type solaire. C'est un domaine très actif au niveau international, au sein duquel la communauté française s'est illustrée par différentes approches. Une approche a été de comprendre et quantifier les multiples processus en jeu lors de l'analyse des vitesses radiales, afin de simuler des séries synthétiques réalistes en grand nombre [Meunier et al., 2019] et d'effectuer des tests en aveugle [Meunier & Lagrange, 2019a; Meunier et al., 2023] : un résultat majeur a été de montrer la difficulté qu'il y aurait à atteindre une incertitude sur la masse des exoplanètes au niveau de 10% (requis par PLATO) lors de follow-up en vitesses radiales pour des planètes de masse terrestre en zone habitable autour d'étoiles de type solaire. Des simulations sur des systèmes particuliers ont également été effectuées afin de quantifier l'impact sur l'estimation de la masse des exoplanètes

[Klein & Donati, 2020; Klein et al., 2022]. Une autre approche a été d'optimiser en amont le calcul des vitesses radiales en recherchant des jeux de raies optimaux pour réduire les signatures des variabilités stellaires [Bellotti et al., 2022]. Diverses approches ont été testées pour mieux prendre en compte l'activité stellaire, en se basant sur des cartes issues de l'imagerie Zeeman-Doppler pour corriger de l'effet de l'activité magnétique [Nicholson et al., 2021], ou sur des observations coordonnées entre vitesses radiales et photométrie [Lopez, 2021]. De nouveaux outils de détection d'exoplanètes ont été développés basés sur l'utilisation de simulations MHD 3D réalistes des processus de convection [Sulis et al., 2020] et sur les proxys d'activité magnétique [Sulis et al., 2022].

La communauté française utilise également des approches classiques lors de la recherche de planètes à l'aide la méthode des vitesses radiales (en particulier SOPHIE, HARPS, Spirou), en particulier la comparaison avec les périodicités trouvées dans les indicateurs d'activité et les corrélations entre vitesses radiales et indicateurs, l'estimation de la période de rotation, ou l'utilisation de processus gaussiens (basés sur des logiciels existants publics) pour modéliser la modulation rotationnelles (e.g. Dalal et al. [2021], König et al. [2022]; Heidari et al. [2022]).

Enfin, la combinaison des observations dans le visible et l'infrarouge, peut permettre d'invalider des candidates exoplanètes : un exemple emblématique est celui d'AD Leo [Carmona et al., 2023] pour laquelle les observations SPIROU ont permis d'invalider la présence d'une planète qui avait été suggéré par la forte variation en vitesses radiales précédemment observée dans le visible. Il reste cependant encore beaucoup à faire pour comprendre les différences de comportement entre les vitesses radiales estimées dans ces deux domaines de longueur d'onde.

Toujours dans le domaine de la détectabilité des exoplanètes, il a été montré qu'une approche basée sur l'astrométrie à haute précision, permettrait de détecter facilement ce type de planètes [Meunier et al., 2020]; Meunier & Lagrange [2022].

Enfin, l'étude de la composition des atmosphères exoplanétaires par spectroscopie infrarouge est un enjeux majeur aujourd'hui avec le JWST et l'arrivée de la mission ARIEL dans laquelle la communauté française est très investie. La question de la conta-

mination de l'activité stellaire (décalage Doppler, distorsion du profil des raies) sur l'analyse de ces atmosphères est également préoccupante Drossart et al. [2022]. Les étoiles et les Jupiters chauds peuvent avoir des spectres similaires (par exemple avec la molécule de CO). De récents travaux sur les spectres haute résolution ont permis d'utiliser des simulations MHD 3D pour décorrélérer le spectre de l'absorption stellaire avec celui d'exoplanètes dans la même bande moléculaire [Chiavassa & Brogi, 2019; Maimone, 2022].

## CONCLUSION

# EVOLUTION, STRUCTURE INTERNE ET ATMOSPHÈRE

## INTRODUCTION

L'étude de l'objet étoile est bien évidemment au centre des préoccupations du PNPS et cela va de la compréhension de la structure interne et de l'évolution des étoiles à l'étude des atmosphères stellaires, en passant par la détermination des paramètres fondamentaux des étoiles en lien avec la caractérisation des populations stellaires. Toutes ces activités sont regroupées dans le thème prioritaire *Evolution, structure interne et atmosphère* qui a été défini lors du dernier exercice de prospective du PNPS. Les grandes questions associées pour la période 2019-2023 sont pour la plupart dans la continuité de la période précédente mais avec plusieurs lignes de force qui ont émergées et que nous détaillerons par la suite. Insistons néanmoins sur le fait que la période est charnière sur cette thématique avec la convergence de l'arrivée de nombreuses contraintes observationnelles, des développements théoriques importants et des outils numériques qui permettent une modélisation de plus en plus réaliste de la physique des étoiles.

Pour ce qui concerne plus particulièrement la structure interne et l'évolution des étoiles, la quête de modèles stellaires de nouvelle génération est un objectif important de la communauté depuis plusieurs années. Les contraintes, par exemple obtenues grâce à la sismologie stellaire, ont à la fois permis de caractériser très précisément les étoiles et leurs environnements mais elles ont surtout mis en exergue les limites des modèles actuellement à notre disposition. La période 2019-2023 fut ainsi marquée par un effort collectif pour surmonter ces points bloquants en introduisant une physique plus riche. En effet, appréhender les processus physiques complexes, multi-échelles, aux interactions souvent non-linéaires que sont la convection, la turbulence, le champ magnétique, et la rotation fut une motivation importante. Outre les observations déjà évoquées, ce travail s'est appuyé sur un usage et un développement élargi des codes hydro et magnétohydrodynamiques multidimensionnels. Ces constats sont également vrai pour les atmosphères stellaires qui sont restées un sujet d'étude fondamental car impactant fortement la structure et l'évolution des

étoiles mais aussi leurs environnements. Par exemple, les traitements dits NLTE (non-local thermodynamic equilibrium) sont maintenant systématiquement pris en compte pour les études détaillées sur de petits échantillons. Ils sont en effet fondamentaux pour aborder les questions clés des abondances de surfaces ou encore de la perte de masse et de son influence sur l'évolution des étoiles.

Dans la même période, la détermination des paramètres fondamentaux des étoiles est un sujet qui a revêtu une importance considérable avec en particulier la question de la détermination précise et exacte des âges stellaires. La période précédente fut marquée par un gain important sur la précision alors que la période 2019-2023 marque, pour la communauté PNPS travaillant sur cette thématique, un tournant vers une détermination à la fois précise et exacte des paramètres fondamentaux. Outre la synergie entre les techniques observationnelles (astérosismologie, astrométrie, interférométrie, imagerie haute résolution angulaire, spectroscopie), l'important développement de cet axe est lié à des interfaces qui se sont enrichies et étendues avec par exemple l'exoplanétologie (au travers de la question de la datation des systèmes planétaires) ou encore l'étude des populations stellaires et de l'archéologie galactique.

Dans ce qui suit, nous détaillons les efforts de la communauté au cours des dernières années dans ces trois axes principaux : la structure stellaire, les atmosphères et les paramètres fondamentaux.

## LES GRANDES AVANCÉES SUR LA PÉRIODE 2019-2023

### Structure interne et processus dynamiques

Les observations à notre disposition sont maintenant d'une telle qualité qu'il n'est plus possible de se contenter de ce qui est communément appelé le *modèle standard*. Il est maintenant admis que les processus dynamiques (qui peuvent influencer la structure interne des étoiles sur des échelles de temps très différentes) doivent être inclus dans la modélisation des intérieurs stellaires. Dans la période 2019-2023, cela s'est traduit par de nombreux travaux autour de la question du transport de mo-

ment cinétique et des éléments chimiques dans les étoiles mais également du rôle des régions de transition entre régions radiatives et convectives. Enfin, comment ces avancées sont-elles incluses dans les modèles stellaires a été une question importante.

## Transport du moment cinétique et des éléments chimiques

### *Transport du moment cinétique*

Comprendre les effets de la rotation sur la structure interne des étoiles est une étape clé pour progresser dans la modélisation de l'évolution stellaire. Néanmoins, la modélisation du mélange rotationnel se heurte actuellement à l'incertitude qui subsiste sur le(s) processus qui transportent le moment cinétique dans les étoiles et les échelles de temps sur lesquelles il(s) opère(nt). Sur la période 2019-2023, la communauté française a été très investie dans l'obtention de nouvelles contraintes observationnelles sur la rotation stellaire dans le but de mieux comprendre le transport de moment cinétique. En ce qui concerne la rotation de surface, les mesures photométriques du satellite *Kepler* ont permis leur détermination de façon homogène pour plus de 20 000 étoiles (Santos et al. 2019, Breton et al. 2021). Les techniques de machine learning utilisées et validées par Breton et al. [2021] sont prometteuses pour l'exploitation des données de TESS et de la future mission spatiale PLATO. Concernant la rotation interne des étoiles, l'astérosismologie est actuellement le seul outil qui permette d'en obtenir la mesure. L'interprétation des données du satellite *Kepler* a permis de déterminer la rotation interne de 37 étoiles de type  $\gamma$  Doradus (étoiles de 1.3 à 1.9  $M_{\odot}$  de séquence principale présentant des modes d'oscillation de gravité) [Ouazzani et al., 2019]. L'étude suppose une rotation solide dans l'étoile, ce qui semble corroboré par les quelques cas où une estimation de la rotation différentielle a pu être obtenue [Van Reeth et al., 2018]. Ouazzani et al. [2019] ont montré que les rotations mesurées sont trop lentes par rapport aux prédictions des modèles d'évolution incluant un transport de moment cinétique purement hydrodynamique. Cela démontre la nécessité d'invoquer un processus de transport de moment cinétique additionnel, en cohérence avec les résultats obtenus auparavant pour le Soleil et pour les étoiles géantes rouges. Notons également la détec-

tion dans des étoiles  $\gamma$  Doradus de modes résultant du couplage entre les modes purement inertiels piégés dans le cœur convectif et les modes gravito-inertiels de la zone radiative [Ouazzani et al., 2020]. Ces résultats ouvrent la perspective de sonder la stratification en densité et la rotation à l'intérieur même du cœur convectif dans ces étoiles. Des profils de rotation quasiment uniformes ont également été mesurés dans deux étoiles sous-géantes proches de la TAMS observées avec *Kepler* [Deheuvels et al., 2020]. Cela montre que le cœur et l'enveloppe restent fortement couplés après la fin de la séquence principale. En combinant ces résultats avec les mesures de rotation interne d'étoiles plus évoluées, Eggenberger et al. [2019] ont montré que l'efficacité du transport de moment cinétique décroît au cours de l'évolution sur la branche des sous-géantes, par opposition à l'augmentation de l'efficacité du transport observée le long de la branche des géantes rouges [Eggenberger et al., 2017]. Cela fournit une contrainte observationnelle forte pour identifier le(s) mécanisme(s) de transport qui sont à l'œuvre.

De ces travaux, qui couplent les contraintes observationnelles aux modèles, il résulte que la recherche d'un ou plusieurs processus physique pour redistribuer le moment cinétique est une question qui reste prégnante dans les étoiles de faibles masses (à la fois pour la séquence principale mais également pour les stades plus avancés), mais le devient également pour des étoiles plus massives que sont les  $\gamma$ -Dor.

### *Transport des éléments chimiques*

Une question importante qui subsiste est de savoir si le mécanisme responsable du transport additionnel de moment cinétique dans les étoiles transporte aussi les éléments chimiques, et si oui avec quelle efficacité. Dumont et al. [2021a] ont tenté de reproduire simultanément les contraintes sur la rotation et sur l'abondance de surface en lithium des étoiles de type solaire. Les auteurs ont montré qu'il est nécessaire d'invoquer deux processus paramétriques différents pour rendre compte de ces deux classes de contraintes. Dumont et al. [2021b] ont étendu ces conclusions au cas des étoiles de type F et G, mais sans parvenir à reproduire de façon satisfaisante les propriétés de la diminution d'abondance en  ${}^7\text{Li}$  centrée sur une température de  $\sim 6600$  K



(connue sous le nom de *lithium dip*).

Dans les étoiles géantes rouges, la diminution soudaine de l'abondance de surface en lithium au moment du "luminosity bump" est interprétée comme la conséquence du mélange provoqué que le déclenchement d'une instabilité thermohaline dont l'origine reste débattue. Charbonnel et al. [2020] ont combiné des mesures d'abondance de lithium dans plus de 800 géantes rouges aux parallaxes issues de Gaia pour montrer que les modèles incluant un mélange rotationnel (formalisme de Zahn 1992) et un mélange thermohaline sont en bon accord avec les observations. Il est à noter toutefois que le formalisme de Zahn [1992] surestime le taux de rotation différentielle dans les géantes rouges et donc également l'efficacité du mélange rotationnel.

Enfin, la modélisation de la diffusion atomique reste un enjeu important, car quand elle est prise en compte, elle induit des abondances de surface non-réalistes pour l'hélium et les métaux dans les étoiles de masses supérieures à  $1.2 M_{\odot}$ . En réalité, elle est en compétition avec d'autres processus de transport, dont le mélange rotationnel. Il est difficile d'estimer son impact car, comme mentionné plus haut, les profils de rotation interne des étoiles sont incorrectement prédits par les modèles stellaires actuels. En considérant un transport de moment cinétique suivant le formalisme de Zahn [1992], Deal et al. [2020] ont montré que le mélange rotationnel s'oppose efficacement à la diffusion atomique et permet de rendre compte des abondances de surface en hélium et en métaux issues des observations. Pour les étoiles plus massives, un mélange additionnel est nécessaire pour reproduire les observations. En revanche, si le transport de moment cinétique est plus efficace que prédit par Zahn [1992], comme le démontrent les observations, un mélange supplémentaire des éléments chimiques est quelque soit la masse.

### Interfaces entre zones convectives et radiatives

Les régions aux interfaces entre zones radiatives et convectives ont été identifiées depuis des dizaines d'années comme jouant un rôle clé dans la compréhension des intérieurs stellaires. En effet, elles sont le lieu où un important mélange des éléments chimiques est associé à un transport de moment cinétique efficace mais elles sont également fondamen-

tales car influent toute la dynamique des régions radiatives. Pour ce qui concerne la question du mélange qui se produit à la frontière des zones convectives, elle est cruciale car celui-ci affecte fortement la structure et l'évolution des étoiles. Il est clair d'un point de vue à la fois théorique et observationnel que les mouvements convectifs pénètrent sur une certaine distance dans la zone stable selon le critère de Schwarzschild (phénomène d'overshooting), mais les détails de ce processus (distance d'overshooting, efficacité du mélange et stratification en température dans cette zone) restent incertains.

Dans les codes d'évolution stellaire 1D, ce phénomène est généralement inclus de façon simpliste en utilisant une distance caractéristique de mélange fixe dans le temps et d'une étoile à l'autre. Au cours de la période 2019-2023, des efforts ont été fournis pour affiner cette modélisation. Augustson & Mathis [2019] ont étudié la dépendance de la distance d'overshooting à la vitesse de rotation en couplant un modèle de convection en rotation aux équations linéarisées de la pénétration convective dérivées par Zahn [1991]. Ils ont obtenu une nouvelle prescription pour le coefficient de diffusion des éléments chimiques dans la zone d'overshooting, qui diminue quand la vitesse de rotation augmente. À partir de simulations numériques 2D, Baraffe et al. [2023] ont trouvé que la distance d'overshooting augmente avec la luminosité et la taille du cœur convectif, et donc avec la masse stellaire, en accord avec les contraintes observationnelles venant des systèmes binaires et de l'astérosismologie. Les distances d'overshooting prédites à partir de ces modèles ne parviennent toutefois pas à rendre compte correctement des temps de vie en séquence principale des étoiles massives. Il a aussi été montré que la modification du gradient de température par les mouvements de pénétration convective dans la zone d'overshooting sous l'enveloppe convective solaire (comme prédit par les simulations numériques) pourrait permettre de réduire les écarts qui existent entre les modèles solaires et les mesures héliosismologiques (Baraffe et al. 2022). Par ailleurs, Noll & Deheuvels [2023] ont montré que certaines hypothèses simplificatrices fréquemment faites dans les codes d'évolution stellaire mènent à une extension incorrecte des cœurs convectifs en présence d'overshooting. Pour éviter ces écueils, il est nécessaire (i) de prendre en compte le caractère non-instantané du mélange



convectif et (ii) d'utiliser un réseau de réactions nucléaires qui ne suppose pas que le lithium et le beryllium sont à leur abondance d'équilibre.

De nombreuses contraintes observationnelles ont démontré l'existence d'une zone de mélange au-delà de la limite formelle des enveloppes et des cœurs convectifs. L'astérosismologie est un outil particulièrement adapté car les interfaces entre les zones mélangées par la convection et les zones stables affectent les ondes qui les traversent. Elles produisent des modulations périodiques des fréquences des modes d'oscillation dont les caractéristiques renseignent sur les propriétés de ces interfaces (position dans l'étoile, intensité des discontinuités). Certaines étoiles F observées avec *Kepler* présentent des modulations de grande amplitude, qui restaient inexpliquées. Deal et al. [2023] ont montré que ces modulations pourraient être produites par une pénétration convective sur une distance de 1 à 2 échelle de hauteur de pression  $H_p$ , supérieure à celle mesurée pour le Soleil. Les étoiles qui avaient un cœur convectif en séquence principale le perdent quand l'hydrogène est épuisé au cœur. Toutefois, le profil de composition chimique garde une empreinte de ce cœur convectif, qui peut être sondée par les modes mixtes dans les étoiles sous-géantes de par son impact sur le profil de la fréquence de Brunt-Väisälä. Noll et al. [2021] ont développé une méthode de modélisation sismique permettant d'extraire ces informations. Ils ont ainsi montré que pour KIC 10273246, sous-géante de masse  $1.22 \pm 0.03 M_\odot$  observée avec *Kepler*, les modèles incluant un overshooting de cœur sur une distance de  $0.15 H_p$  présentent un accord significativement meilleur avec les observations sismiques. Des contraintes sur l'extension des zones convectives pourraient également être apportées par l'étude des modes mixtes dans les étoiles géantes rouges. Pinçon et al. [2019] et Pinçon et al. [2020] ont en effet proposé un cadre théorique permettant d'interpréter deux grandeurs sismiques caractérisant les modes mixtes : le terme de phase  $\varepsilon_g$  qui intervient dans l'expression asymptotique des périodes des modes de gravité et le couplage  $q$  entre la cavité des modes p et celle des modes g. Ces deux grandeurs, qui sont mesurées dans plusieurs milliers de géantes rouges observées avec *Kepler*, renseignent sur le profil de la fréquence de Brunt-Väisälä dans la région séparant le cœur d'hélium de la base de l'enveloppe convective. Ils sont donc porteurs d'informations sur le mé-

lange aux limites des zones convectives.

Outre les interfaces internes, les étoiles de faibles masses et de masses intermédiaires possèdent une région convective externe. Elles sont importantes car elles influent sur la structure interne des étoiles, mais sont très mal modélisées dans les modèles stellaires. Afin de progresser sur cette question des simulations 3D d'hydrodynamique radiative ont été développées depuis maintenant plus d'une vingtaine d'années. Depuis lors, des grilles de simulations 3D sont en développement et utilisées à la fois pour étudier l'évolution des propriétés de la convection de surface dans le diagramme HR et pour améliorer la description des couches externes des modèles stellaires (voir la sous-section suivante). Sur le premier point, citons les résultats de Rodríguez Díaz et al. [2022b] qui ont développé une large grille à l'aide du code STAGGER. Ces simulations ont été validées grâce aux données issues de *Kepler* et ont permis de déterminer des relations d'échelles pour ce qui concerne les propriétés de la granulation de surface dans le diagramme HR. Notons enfin que ces régions sont le lieu privilégié où se situe le couplage entre convection turbulente et ondes. Elles affectent en particulier les oscillations qui sont utilisées pour faire de l'astérosismologie et constituent à l'heure actuelle le principal obstacle pour exploiter pleinement les informations contenues dans ces oscillations [Belkacem et al., 2021]. D'un point de vue plus positif, ce couplage est une occasion unique d'utiliser les modes d'oscillations pour sonder les propriétés de la convection turbulente dans ces régions. Les aspects énergétiques associés aux oscillations (l'excitation et l'amortissement des modes) permet d'envisager cela et des développements théoriques ont été proposés [Belkacem et al., 2019; Philidet et al., 2021, 2022] qui donnent des perspectives prometteuses car elles ouvrent la voie à la possibilité de sonder les propriétés de la turbulence.

## Modélisation des intérieurs stellaires

*En cours de rédaction*

## Atmosphères Stellaires

Dans la grande majorité des cas, les informations que nous recueillons sur les étoiles proviennent de l'analyse des photons qui s'échappent au niveau de leurs atmosphères stellaires. C'est ce constat qui a conduit au développement de méthodes permettant

de décoder de manière fiable les informations contenues dans les spectres stellaires.

## Transfert de rayonnement et modèles d'atmosphères

Presque toutes les techniques modernes de modélisation des atmosphères stellaires incluent un traitement hors-ETL (NLTE) dans le calcul du champ de rayonnement et des populations atomiques. De nombreuses hypothèses sous-jacentes, parfois non formulées, sont toutefois présentes dans ces calculs. Une approche rigoureuse du problème NLTE complet a été développée qui résout de manière autoconsistante les écarts par rapport aux distributions d'équilibre des photons ainsi que des particules massives constituant le plasma atmosphérique [Paletou & Peymirat, 2021; Paletou et al., 2023]. Bien que limitée dans un premier temps à des modèles atomiques simples (2 niveaux), cette approche devra être à terme généralisable aux modèles complexes utilisés dans les modèles d'atmosphères.

A partir des prédictions réalisées avec le code d'évolution STAREVOL et en se basant sur des modèles hors-ETL 1D calculés avec le code CMFGEN, Martins & Palacios [2021] ont produit des spectres d'étoiles massives dans des environnements pauvres en métaux. Cette approche permet d'obtenir des séquences spectroscopiques tout le long des chemins évolutifs. Le résultat principal de cette étude a été de fournir une explication au déficit apparent en étoiles de masses supérieures à  $60 M_{\odot}$ , que la littérature observationnelle récente mettait en avant. Le principe de cette étude a été étendu dans Martins & Palacios [2022] aux étoiles de très grandes masses ( $M > 150 M_{\odot}$ ). Les spectres visible et UV de ces étoiles sont dominés par les raies de HeII 4686 Å et 1640 Å durant toute l'évolution sur la séquence principale. L'analyse des propriétés de ces étoiles est essentielle pour comprendre les spectres des régions où de la formation stellaire intense est observées dans les galaxies lointaines. L'estimation des propriétés spectrales des proto-amas qui abriteraient une étoile supermassive (SMS) montre que les SMS devraient être détectables dans les proto-GC et qu'ils pourraient être découverts grâce à l'imagerie en profondeur du JWST [Martins et al., 2020a]. Ce même type d'analyse s'applique à une variété d'autres cas, depuis la discrimination entre les différents scénarios de pollueurs dans les amas globulaires pour expliquer les

mesures d'abondance de He [Martins et al., 2021], en passant par l'étude du rôle des binaires et de l'émission chromosphérique sur la photométrie HST des étoiles des amas globulaires [Martins et al., 2020b], ou enfin l'étude détaillée du contenu stellaire massif de jeune amas massif observé dans le cadre du le cadre du survey ESO VISTA Variables in the Vía Láctea [amas VVV CL074, Martins et al., 2019].

Ces approches NLTE sont toutefois très coûteuses en temps et ressources de calcul. Dans de nombreux contextes, on peut se limiter à une approche purement ETL, qui permet le calcul de grilles plusieurs milliers de modèles. L'utilisation de grilles de modèles d'atmosphères ETL (et 1D) calculés avec le code MARCS a permis à Salsi et al. [2022] d'explorer l'effet des paramètres fondamentaux stellaires sur la brillance de surface et les couleurs des étoiles tardives. La comparaison détaillée entre les relations brillance de surface-couleur (SBCR) théoriques et les SBCR empiriques obtenues dans une série de travaux récents [Salsi et al., 2020, 2021] montre qu'il est impératif de tenir compte de la métallicité et de la gravité de surface lors de l'étalonnage ou de l'utilisation des SBCR. Ces SBCR sont notamment utilisées dans la détermination de distances de systèmes binaires extragalactiques et des paramètres planétaires de système autour d'étoiles de types tardifs.

Dans une certaine limite, l'approche ETL est aussi valide dans le cas des atmosphères des supergéantes rouges (RSG). En se basant sur des spectres obtenus pour des RSGs dans trois galaxies à faible métallicité (WLM et les deux nuages de Magellan), et via modèles d'atmosphère LTE 1D calculés avec le code MARCS, González-Torà et al. [2021] a permis de montrer que les RSGs de WLM ont une température effective moyenne environ 300 K plus élevée que celle dans l'un ou l'autre des nuages de Magellan, ce qui est en accord qualitatif avec les prédictions théoriques. Néanmoins, une analyse de synthèse de population montre que les RSGs dans les modèles évolutionnaires sont trop froides d'environ 200 K par rapport aux observations, à toutes les métallicités. Cela pourrait être dû à une mauvaise estimation du paramètre de longueur de mélange pour les modèles 1D d'étoiles massives.

## Contraintes sur la perte de masse

La théorie des vents radiatifs permet de calculer les taux de perte de masse des étoiles chaudes et

massives, et prédit une décroissance continue de ces taux de perte de masse avec la luminosité. Des taux de perte de masse jusqu'à 100 fois plus faibles que prédits théoriquement sont au contraire mesurés et ce quel que soit le statut évolutif des étoiles dès lors qu'elles sont en dessous d'un régime de luminosité seuil qui a été identifié dans de Almeida et al. [2019]. Cette découverte implique que la cause des vents faibles est à rechercher dans des propriétés liées au champ de rayonnement, plus que dans le statut évolutif des étoiles elles-mêmes.

La mesure des taux de perte de masse et des vitesses terminales des vents d'étoiles OB des Nuages de Magellan (métallicité  $0.5Z_{\odot}$  et  $0.2Z_{\odot}$ , pour le LMC et SMC, respectivement) à partir de leurs spectres UV a permis de montrer que la perte de masse varie comme  $\dot{M} \propto Z_{\star}^{0.5-0.8}$ , mais que cette dépendance s'affaiblit, jusqu'à potentiellement s'annuler aux plus faibles luminosités [Marcolino et al., 2022]. L'analyse des vitesses terminales suggère une faible dépendance  $v_{\infty} \propto Z_{\star}^n$ , avec  $n \sim 0.1 - 0.2$ .

Alors que la masse perdue durant la phase supergéante rouge (RSG) est en proportion plus grande que durant la séquence principale, il y a étonnamment peu d'études sur la manière dont les vents altèrent les spectres des étoiles massives froides. Si l'on prend en compte la présence d'un vent dans le calcul des spectres des RSG, des taux de perte de masse plus élevés entraînent une absorption plus forte dans les bandes de TiO, ce qui fait que l'étoile apparaît comme un type spectral plus tardif, bien que sa température effective reste constante [Davies & Plez, 2021]. En outre, le vent imite de nombreuses caractéristiques observées d'une "MOLsphère" (i.e. une coquille *ad hoc* quasi-statique de gaz moléculaire, responsable d'une extra-absorption dans le spectre de raies), fournissant potentiellement une explication de l'assombrissement récent de Bételgeuse, au cours duquel le flux optique a chuté d'un ordre de grandeur alors que le flux dans le proche infrarouge est resté pratiquement constant.

### Contraintes sur les abondances de surface

Les modèles d'évolution prédisent que la métallicité impacte les effets du mélange rotationnel, visibles notamment à travers les abondances de surface de ces étoiles. La modélisation des spectres UV et visibles d'étoiles massives du SMC confirme notamment que ces étoiles à faible métallicité sont plus

évoluées chimiquement que leurs homologues galactiques [Bouret et al., 2021]. Ces résultats (et ceux sur les vents mentionnés plus haut) sont à présent étendus sur de plus grand échantillons et à d'autres métallicités (par exemple le LMC), dans le cadre du Legacy Program ULLYSES [Vink et al., 2023].

La composition chimique de surface nous renseigne sur les processus de mélange internes des étoiles, en particulier ceux dus à la rotation et au magnétisme [e.g. Monier et al., 2019], ainsi que sur l'évolution. La présence et l'abondance de certains éléments nous renseigne aussi sur les processus et conditions physiques internes dans les supernovae dont ils sont issus [e.g. Bergemann et al., 2019].

Ces dernières années ont vu la poursuite active de la recherche et de la caractérisation des étoiles avec une très faible teneur en métaux, activité qui est grande utilisatrice de modèles d'atmosphères. Le but ultime est ici l'identification d'étoiles primitives [Bonifacio et al., 2019; Caffau et al., 2020], les instruments actuels permettant de mesurer avec précision les abondances [François et al., 2020; Caffau et al., 2021] dans des volumes de plus en plus vastes du disque notre Galaxie et de son bulbe [e.g. le projet TOPoS, Bonifacio et al., 2021]. Ces étoiles fournissent des informations sur la nucléosynthèse qui a contribué à l'enrichissement de l'Univers lors de ses premières phases [Caffau et al., 2019; Spite et al., 2019; Caffau et al., 2021].

Finalement, un autre aspect des atmosphères stellaires nécessitant une attention particulière concerne le régime de masse faible à ultra-faible et l'interface avec les objets sub-stellaires, où des modèles de nuages, des molécules complexes et une compréhension de leur distribution d'énergie spectrale sont nécessaires. De nombreuses études récentes se sont concentrées sur la détermination des propriétés de ces étoiles Kulenthirarajah et al. [2019]; Lodieu et al. [2019]; Cristofari et al. [2022a,b]; Sarro et al. [2023] et ont montré qu'il existe des lacunes dans notre connaissance de ces atmosphères complexes.

### Paramètres fondamentaux

L'une des questions les plus importantes en astrophysique concerne la datation des phénomènes astrophysiques. Pour les étoiles, l'âge est un paramètre essentiel qui a des intérêts pour la compréhension de la physique de ces objets mais qui est aussi important au-delà de la physique stellaire. Dans

ce contexte, il faut être capable de caractériser précisément et exactement les propriétés globales des étoiles ou leur paramètres fondamentaux (masse, composition chimique, rayon,...). La communauté française est très impliquée sur cette thématique et au coeur des efforts faits autour des études de type *benchmark*, du développement des outils et de la production des catalogues, et leur exploitation pour mieux comprendre les exoplanètes, le voisinage solaire, les populations galactiques et les échelles de distance. La mission Gaia est évidemment un moteur important dans cette dynamique avec la publication et l'exploitation des DR2 et DR3 dans la période 2019-2023.

### Vers une détermination exacte des paramètres stellaires

Comprendre les biais observationnels et ceux associés aux modèles stellaires est un objectif d'une partie de la communauté qui permet d'améliorer l'exactitude de la détermination des paramètres stellaires. Cet effort passe par la mise en synergie de multiples approches observationnelles telles que l'astérosismologie, l'utilisation des systèmes binaires et des amas ou encore de l'interférométrie.

L'exploitation des instruments à l'OHP a contribué à cet objectif. Halbwachs et al. [2020] ont observés dix systèmes binaires dits *double-lined* et l'utilisation simultanée de données Gaia et interférométrie issues de PIONIER ont permis une détermination des orbites et donc leurs masses avec une précision de l'ordre de 1%. Ces systèmes servent comme référence pour des relevés, et de contraintes pour les modèles d'évolution stellaire (voir également chapitre "Interactions"). Toujours en s'appuyant sur les instruments de l'OHP, l'observation d'étoiles pour lesquelles des données sismiques sont disponibles a permis d'étudier la relation âge-abondance et ses limitations [Morel et al., 2021]. A contrario, l'utilisation combinée de l'astérosismologie et de données interférométriques obtenues grâce à VEGA/CHARA [Creevey et al., 2019] a permis de confirmer la robustesse et le haut degré d'exactitude de la relation d'échelle reliant la gravité de surface des étoiles (de séquence principale et évoluées) aux propriétés globales des spectres d'oscillations.

D'autres études exploitant l'interférométrie et l'astérosismologie ont été menées pour les étoiles Ap Perraut et al. [2020]; Deal et al. [2021]. La détermination

précise et exacte des paramètres fondamentaux de ces étoiles chimiquement particulières (et pour certaines abritant de forts champs magnétiques) est un enjeu important car c'est un pré-requis pour comprendre les processus de transport. Par exemple, Perraut et al. [2020] ont réussi à contraindre la métallicité initiale d'une dizaine de ces étoiles et ainsi obtenir des indications sur l'efficacité de la diffusion atomique.

Enfin, notons que la caractérisation d'étoiles de référence Gaia (*Gaia Benchmark Stars*) a été révisée par Soubiran et al. [2023]. Les auteurs proposent une nouvelle détermination observationnelle de  $T_{\text{eff}}$  et  $\log g$  pour 200 étoiles qui permettra d'obtenir les métallicités et les abondances de façon beaucoup plus précise. L'enjeu est important car ces étoiles sont utilisées comme étoiles de référence pour calibrer les relevés spectroscopiques ainsi que pour améliorer les modèles d'évolution stellaire et d'atmosphère.

### Production des paramètres fondamentaux

Alors qu'une partie de la communauté se focalise sur des étoiles de référence ou des objets prototypiques, une grande partie de la communauté française est également impliquée dans le développement de méthodologies permettant d'estimer les propriétés stellaires à grande échelle.

Par exemple, un certain nombre de développements et d'outils associés sont motivés par la préparation de la mission PLATO. Citons par exemple le développement de l'outil SPInS pour l'inférence des paramètres stellaires par Lebreton & Reese [2020]. Il s'agit d'un code en accès libre qui est fondé sur une analyse bayésienne permettant d'obtenir les masses, les âges et les rayons (parmi d'autres paramètres). Dans la même veine, Gent et al. [2022] ont présenté l'un des outils qui sera utilisé dans le pipeline PLATO pour dériver automatiquement les paramètres spectroscopiques des cibles de la mission. Toujours dans la perspective PLATO, Samadi et al. [2019] ont développé le simulateur des courbes de lumière de PLATO et Bugnet et al. [2019] ont mis au point un algorithme de classification permettant d'identifier automatiquement les pulsateurs de type solaire, conçu pour être appliqué aux données du satellite TESS, mais pourront être utiles pour exploiter les données de la mission spatiale PLATO par la suite.



Pour ce qui concerne les diamètres angulaires, en soutien à l'exploitation de l'instrument MATISSE, Cruzalèbes et al. [2019] ont fourni un nouveau catalogue de diamètres angulaires et identifié des étoiles de référence pour les bandes L et N, tandis que Robbe-Dubois et al. [2022] s'est focalisé sur l'étude d'un échantillon d'étoiles de référence. Ainsi, la caractérisation précise de ces étoiles étalons s'avère essentielle pour optimiser l'exploitation scientifique de l'instrument MATISSE.

Enfin, une part importante de la communauté française est impliquée dans la production des données Gaia. Plusieurs articles ont été publiés entre 2019 et 2023 à l'occasion des DR2 et DR3 de Gaia. Pour ce qui concerne cette dernière, les équipes françaises ont été aux avant-postes avec par exemple les publications suivantes :

- Katz et al. [2023] qui présente le catalogue des vitesses radiales pour 34 millions d'étoiles obtenus pour la DR3 de Gaia.
- à partir des spectres RVS de Gaia, Recio-Blanco et al. [2023] présente la méthode d'analyse spectroscopique qui a permis d'obtenir un catalogue paramètres stellaires (incluant la composition chimique) pour environ 6 millions d'étoiles.
- Creevey et al. [2023] présente le pipeline Apsis utilisé dans Gaia pour dériver les paramètres astrophysiques des étoiles, des objets extra galactiques et du milieu interstellaire pour près de 2 milliards d'objets.
- Halbwachs et al. [2023] présente l'analyse du traitement des données astrométriques des étoiles binaires (voir chapitre "Interactions").
- Babusiaux et al. [2023] présente la validation du catalogue Gaia DR3.

Notons que de nombreux autres articles, dans lesquels la communauté française est fortement impliquée, ont été publiés.

## Les paramètres fondamentaux pour la physique stellaire et les populations stellaires

Au-delà de la production des catalogues, les données ainsi obtenues ont permis d'avancer sur un certain nombre de sujets que nous détaillons ci-dessous et qui sont à l'interface entre la physique stellaire et la physique galactique.

### *Recensement du voisinage solaire*

Depuis les premières mesures de parallaxe au 19<sup>ème</sup> siècle, le recensement des étoiles dans un volume limité ne cesse d'évoluer. L'astrométrie de *Gaia* a permis de faire un bon dans ce recensement avec la publication du Gaia Catalogue of nearby stars [Gaia Collaboration et al., 2021]. Ce catalogue produit un échantillon complet et homogène (complétude >95% jusqu'au type spectral M8) jusqu'à 100 pc, permettant des exploitations diverses sur les populations stellaires.

En marge de ce travail, un recensement complet des étoiles, naines brunes et exoplanètes à moins de 10 pc du soleil a été effectué [Reylé et al., 2021]. Cette liste reflète autant que possible l'état actuel de nos connaissances du voisinage solaire. Elle fournit des étoiles de référence qui peuvent être utilisées pour définir des échantillons d'étalonnage de futures observations détaillées avec les instruments de pointe actuels et du futur.

L'utilisation de techniques d'imagerie à fort contraste et le développement d'algorithmes pour le traitement de ces données, par exemple Chomez et al. [2023a], ont permis de faire de nouvelles découvertes autour des étoiles les plus proches. C'est le cas du système hiérarchique d'étoiles B HIP81208, connu pour abriter une naine brune et une étoile M tardive, où Chomez et al. [2023b] a mis en évidence une naine brune gravitationnellement liée à la composante naine M à l'aide des données SPHERE. La recherche d'exoplanètes a permis de découvrir une multitude d'informations sur le régime stellaire de faible masse.

### *Archaeologie galactique*

L'archéologie galactique consiste à comprendre l'histoire de la Voie Lactée à travers les propriétés chimiques et dynamiques des populations stellaires qui composent la Voie lactée et à travers l'identification et la caractérisation de signatures fossiles des accrétions passées. Cette discipline a trouvé son essor ces dernières années grâce aux contraintes observationnelles fournies par les grands relevés spectroscopiques (GES, GALAH, APOGEE), astrométriques (*Gaia*), mais également l'astérosismologie (*Kepler*, K2) qui offre la possibilité de déterminer les âges. L'analyse croisée de tels échantillons a permis d'étudier la formation et l'évolution du disque de la Voie lactée à l'aide du modèle de la Galaxie de Besançon [Lagarde et al., 2021]. L'analyse de grands relevés



spectroscopiques a notamment permis d'étudier le comportement du lithium dans des étoiles géantes [Magrini et al., 2021; Charbonnel et al., 2020]. Le projet AMBRE, avec l'obtention de paramètres atmosphériques et d'abondances chimiques de 200 000 étoiles [Santos-Peral et al., 2020], pour certaines couplées avec l'astrométrie de *Gaia*, a permis également des avancées dans la discipline avec la datation des étoiles à partir de rapport d'abondance [Palla et al., 2022], la caractérisation de l'activité stellaire [Gomes da Silva et al., 2021], et l'origine du soufre dans la Voie lactée [Perdigon et al., 2021]. Nombreuses autres études qui couplant la chimie avec les données dynamiques ont aussi permis de faire des avancées dans la compréhension de l'évolution du disque de la Galaxie Santos-Peral et al. [2021, 2023]; Gaia Collaboration et al. [2023b]; Kordopatis et al. [2023].

#### *Échelle distance*

En combinant l'interférométrie avec d'autres techniques, il est possible de réaliser des études pour mieux comprendre les échelles de distance de notre groupe local. L'analyse détaillée des atmosphères stellaires a permis d'améliorer les relations période-luminosité qui sont responsables pour la détermination des distances. Par exemple, Breuval et al. [2021, 2022] a étudié l'impact de la métallicité sur la luminosité des Céphéides et a ensuite proposé une calibration améliorée de la loi pour en tenir compte, tandis que Nardetto et al. [2023] a étudié l'impact des enveloppes circumstellaires des Céphéides et a déduit que la SBCR doit tenir compte de ces effets pour obtenir des distances fiables à un niveau de précision inférieur à 1%. Les distances au LMC [Javanmardi et al., 2021], au SMC [Pietrzyński et al., 2019] et à diverses galaxies ont été déterminées par la suite [Javanmardi et al., 2021] avec une très grande précision en utilisant ces méthodes. Autres études tel que Rivet et al. [2020] a pu estimer une distance précise de 1,56 kpc à l'étoile de référence P Cyg.

#### *Amas stellaires*

Les amas sont des laboratoires pour l'étude de nombreux processus physiques stellaires et galactiques, car leurs morphologies dans le HRD ou le CMD imposent de fortes contraintes sur des paramètres inconnus des étoiles. Toutes ces études reposent sur la connaissance de l'évolution et de la physique atmosphérique des étoiles. Par exemple, la reproduction des CMDs, qui permet entre autres de déterminer les âges des amas, repose sur le calcul de modèles d'évo-

lution stellaire adaptés aux propriétés des populations (abondances particulières, enrichissement en hélium) et le calcul de photométrie synthétique via des modèles d'atmosphère. Ces deux types de modèles doivent non seulement inclure les processus physiques pertinents au sein des étoiles (transport des éléments chimiques incluant la diffusion atomique, transport du moment cinétique, mélanges rotationnel et thermohaline) mais aussi être cohérents entre eux ce qui n'est pas le cas actuellement.

Dans ces dernières années, des avancées majeures ont été faites. En exploitant le catalogue Gaia DR2, Bossini et al. [2019] a dérivé des âges, des modules de distance, et des paramètres d'extinction pour un échantillon de 269 amas ouverts. Les données de Gaia EDR3 ont permis à Tarricq et al. [2021] de fournir le plus grand catalogue de vitesses radiales (RV) pour les amas ouverts. En combinant leurs âges et cinématiques, leurs résultats ont révélé que la courbe de rotation de la galaxie montre plusieurs creux qui correspondent aux ondulations dérivées des modèles non axisymétriques de la galaxie. Tarricq et al. [2022] a réanalysé des amas ouverts afin de trouver des membres dans les régions périphériques pour mieux comprendre leurs propriétés structurelles, et ils ont trouvé que les amas sont plus étendus que ce qui avait été prévu. Palakkatharappil & Creevey [2023] s'est concentré sur l'amas NGC 2477 et, en combinant Gaia, les données spectroscopiques et l'astérosismologie de TESS, il a été possible d'affiner l'âge de l'amas à moins de 10%, malgré le rougissement différentiel observé à travers l'amas.

Mais les amas globulaires ont vu également des avancées : Martins et al. [2020b] ont étudié le rôle des binaires et de l'émission chromosphérique sur la photométrie HST des étoiles des amas globulaires. Leurs résultats ont montré qu'il est peu probable que les binaires expliquent entièrement la forme de la distribution étendue des étoiles de la première population. Martins et al. [2021] s'est concentré sur la détermination de la composition maximale en hélium des étoiles membres par l'étude de la photométrie synthétique, et a ensuite montré qu'il est peu probable que des étoiles plus riches en hélium que 0,3 soient présentes dans NGC6752.

## CONCLUSION

# INTERACTIONS : ÉTOILE-PLANÈTE.S, ÉTOILE-DISQUE, ÉTOILE-ÉTOILE.S, POPULATIONS STELLAIRES

## INTRODUCTION

Le thème interaction a clairement émergé au cours de la période (2015-2018). Ce thème se veut une déclinaison large du phénomène d'interaction entre l'étoile et une (ou plusieurs) composante(s) de son environnement (ou son environnement lui-même pris au sens large). Sur ce thème aussi, une interface majeure est attendue avec le PNP et le Comité Exoplanète Transverse (sur les interactions étoile-planète; étoile-disque), avec PCMI (sur les aspects astres jeunes enfouis, régions de formation stellaire) et avec l'ASHRA (sur la caractérisation de l'environnement, transfert de masse, etc.). Les questions actuelles sur ce thème sont : Quels sont les paramètres clefs des interactions étoiles/disques/planètes? Comment les disques évoluent-ils lors de la vie des étoiles? Quel est leur rôle, via leurs interactions avec leur hôte stellaire? Quelles sont les propriétés liées aux interactions qui modifient les propriétés des étoiles? Ces grandes questions sont les principaux leviers permettant de transformer notre compréhension de l'évolution des étoiles et de leurs systèmes planétaires. La DR3 de Gaia a ouvert récemment des perspectives majeures concernant l'étude des binaires qui présentent non seulement un grand intérêt pour l'étude des processus à l'oeuvre, dans différents régimes de masse et période, en lien avec les processus de formation, mais aussi pour la détermination des paramètres fondamentaux, en particulier la masse. Les interactions avec les étoiles et les disques circumstellaire produisent des effets dynamiques observables, par exemple liés aux survols stellaires sur les disques formant des planètes. Des déformations et des disques brisés sont par exemple des signatures distinctes des survols rétrogrades. Ces survols stellaires ont des implications pour la formation des planètes et la démographie des exoplanètes. Le grand

nombre d'exoplanètes proches découvertes jusqu'à présent a déclenché un regain d'intérêt pour la compréhension des interactions magnétiques dans d'autres systèmes étoile-planète. Dans la suite, nous reprenons les grandes lignes des activités de recherches concernant ces thèmes, menées au sein de la communauté française sur la période 2019-2023.

## LES GRANDES AVANCÉES SUR LA PÉRIODE 2019-2023

### Interactions étoile-planète

Les interactions magnétiques entre une planète et son environnement entraînent des aurores et des chocs dans le système solaire. Le grand nombre d'exoplanètes proches découvertes jusqu'à présent a déclenché un regain d'intérêt pour la compréhension des interactions magnétiques dans d'autres systèmes étoile-planète. De multiples effets magnétiques ont alors été dévoilés, tels que l'inflation ou le réchauffement des planètes, la migration des planètes, la fuite de matière planétaire et même certaines modifications de l'activité apparente de l'étoile hôte.

### Architecture des systèmes et migrations

Astoul et al. [2019] et Astoul et al. [2021] proposent ainsi une étude de l'impact du magnétisme stellaire et de la rotation différentielle stellaires sur les effets de marée étoile-planète. Dans les systèmes planétaires à très courte période orbitale, les interactions de marée étoile-planète sont connues pour gouverner l'évolution tardive de l'architecture orbitale des systèmes et de la rotation de leur étoile hôte. Les temps caractéristiques de variation des paramètres orbitaux et de rotation des corps, sont dictés par l'amplitude de la dissipation des marées qui varie considérablement avec la masse, la rotation

et la métallicité des étoiles ainsi qu’avec la structure et la dynamique internes des étoiles et des planètes. (A. Astoul – Thèse 2020) a étudié deux mécanismes physiques clés pour modéliser et caractériser la dissipation de marée dans les enveloppes convectives de ces objets : la rotation différentielle et le magnétisme. La contribution du magnétisme sur le forçage de marée, c’est-à-dire sur l’excitation des ondes, reste négligeable devant la contribution hydrodynamique classiquement utilisée. A contrario, le mécanisme de dissipation Ohmique des ondes magnéto-inertielles est un mécanisme très efficace, voire prépondérant devant la dissipation visqueuse, pour des étoiles de type M à F, de la pré-séquence principale à la fin de la séquence principale, dans toute leur enveloppe convective.

Les simulations montrent également les effets à long terme de migration planétaire liés aux couples magnétiques. Ahuir et al. [2021] a étudié l’évolution orbitale d’une planète en prenant en compte simultanément les couples magnétiques et de marées, afin d’expliquer la distribution des planètes proches observées et montre que les interactions magnétiques étoile-planète affectent de manière significative la distribution des super-Terres autour des étoiles en rotation lente, tandis que les effets de marées façonnent la distribution des planètes géantes. Grace aux équations générales d’évolution séculaire des interactions de marée du code séculaire appelé ESPM, Revol et al. [2023] explorent l’évolution séculaire d’un système étoile-planète sous les interactions de marée, à la fois gravitationnelles et thermiques, induites respectivement par la composante quadripolaire du potentiel gravitationnel et l’irradiation de la surface planétaire. Ils montrent pour des planètes de type Vénus une évolution possible du spin-orbite et les résonances pour les orbites excentriques et explorent la possibilité de résonances spin-orbite provoquées par l’obliquité de la planète. De la même manière que les résonances spin-orbite d’ordre élevé induites par l’excentricité, l’obliquité de spin permet l’excitation de modes de Fourier haute fréquence qui permettent à certaines résonances spin-orbite d’être stables. [\[A compléter\]](#)

## Aurores et atmosphères d’exoplanètes

*[paragraphe sur la partie simulations en cours de rédaction]*

L’observation des émissions radio aurorales pla-

nétaires est une méthode qui permet de détecter les champs magnétiques exoplanétaires prédits par les études théoriques. Ces observations des champs magnétiques des exoplanètes apportent des contraintes sur les propriétés planétaires difficiles à étudier autrement, telles que la structure intérieure, l’échappement atmosphérique et les interactions étoile-planète. La traînée magnétique pourrait être un facteur important dans la dynamique des atmosphères exoplanétaires. De plus, les champs magnétiques peuvent contribuer à l’habitabilité durable des exoplanètes terrestres. Récemment, [Turner et al., 2021] a publié la première détection possible d’une exoplanète en radio autour de l’étoile tau Boo à l’aide d’observations LOFAR. Ce résultat a permis de détecter une émission variable de 14 à 30 MHz. En supposant que l’émission provienne de la planète, il est possible de dériver un champ magnétique polaire de surface maximal pour tau Boo b compris entre 5 et 11 G cohérent avec les prédictions théoriques, et si cette détection est confirmée, elle placera contraintes importantes sur la théorie de l’effet dynamo.

De manière plus générale, les résultats SPIROU ont montré un impact direct de l’étoile sur l’expansion des atmosphères exoplanétaires. Le consortium ATMOSPHERIX créé par F. Debras en 2020, rassemblant une trentaine de chercheurs, théoriciens et observateurs Français, travaille sur ces observations spectroscopiques à haute résolution d’atmosphères exoplanétaires. Les objectifs scientifiques de ce groupe sont de caractériser la composition, la dynamique et l’échappement atmosphérique des exoplanètes en transit, et de profiter d’une forte synergie sol-espace (avec JWST et ARIEL). L’autre objectif de ce consortium est de faire émerger et de structurer une expertise Française en spectroscopie à haute résolution pour les atmosphères d’exoplanètes à même de se positionner efficacement sur les grands instruments au sol tels que SPIROU, MAROON-X, NeoNarval, SPIP, CRIRES+, également dans la perspective d’ANDES à l’ELT. Les deux premiers articles présentent le pipeline de réduction de données SPIROU Klein et al. [2023]; Debras et al. [2023].

## Interactions étoile-étoile

L’étude des binaires présentent non seulement un grand intérêt pour l’étude des processus à l’oeuvre, dans différents régimes de masse et période, en lien

avec les processus de formation, mais aussi pour la détermination des paramètres fondamentaux, en particulier la masse. Les travaux de Halbwegs et al. [2020] en sont un exemple marquant (voir chapitre "Structure interne et atmosphère").

La DR3 de Gaia a ouvert récemment des perspectives majeures concernant l'étude des binaires [Gaia Collaboration et al., 2023a], en augmentant très significativement (de plus d'un ordre de grandeur) les catalogues de binaires avec des orbites caractérisées : binaires astrométriques ( $\sim 135\,000$ ), spectroscopiques ( $\sim 185\,000$ ), à éclipse ( $\sim 87\,000$ ). A noter que les binaires résolues seront dans la DR4. L'analyse de ces données massives, s'appuyant sur des modèles du plus simple au plus complexe [Halbwegs et al., 2023] afin d'identifier les différentes configurations, a pu être appliquée en aveugle à des millions d'étoiles. Des observations de suivi de certaines sources avec des observatoires au sol (par exemple Sophie à l'OHP) sont effectuées sur un nombre limité d'objets, par exemple pour identifier des possibilités d'artefact instrumental, ou en cas de candidat compagnon très massif (trou noir). Il a également été possible dans certains cas de combiner diverses solutions (éclipse et spectroscopie, spectroscopie et astrométrie, lorsque les périodes le permettent), afin de mieux caractériser ces binaires : accès à davantage de paramètres contraints, précision améliorée, vérification de compatibilité des solutions, identification d'outliers).

L'étude des binaires a aussi bénéficié des avancées en imagerie directe et en interférométrie du fait du gain en résolution angulaire possible en utilisant les plus grands télescopes. Par exemple, un grand nombre de systèmes stellaires multiples ont été observés dans le cadre du grand relevé SpHere INfrared for Exoplanet (SHINE). Le relevé SHINE s'est focalisé sur la recherche de compagnons substellaires orbitant autour de jeunes étoiles proches ( $< 300$  ua) en utilisant l'imagerie directe [Langlois et al., 2021]. Dans ce cadre, la probabilité d'occurrence de compagnons substellaires selon le type d'étoile a été estimée à 23, 6 et 12% pour les étoiles BA, FGK et M, respectivement [Vigan et al., 2021]. Bien que l'échantillon de 463 étoiles observé ne comportait pas d'étoiles avec des compagnons stellaires connus dans le champ de vue de l'instrument SPHERE ( $< 5,5$  arcsec), 78 compagnons stellaires supplémentaires Bonavita et al. [2022]. 27% de ces systèmes com-

portent trois composantes stellaire ou plus. Ces données SPHERE ont été combinées avec celles de la littérature et des archives, les courbes de lumière de TESS, les parallaxes et les mouvements propres de Gaia, pour caractériser ces systèmes : La combinaison de toutes ces données a permis de contraindre les orbites de 25 de ces systèmes. Il a également été possible de comparer la fréquence binaire de cet échantillon pour la plage de séparation 50-500 mas (période de quelques années à quelques dizaines d'années) avec les études précédentes et de mettre en évidence certaines tendances intéressantes dans le rapport de masse et la distribution des périodes. En particulier la distribution du rapport de masse des binaires détectées entre 0,05 et 0,5 arcseconds a mis en évidence deux pics distincts, dont un qui comprend des systèmes de masse presque égale et une seconde qui culmine à un rapport de masse de 0.21. Ce résultat semble en désaccord avec les affirmations précédentes de distributions monomodales fluides d'études antérieures et pourrait provenir de différences liées à la constitution de l'échantillon. Pour les quelques objets pour lesquels une telle estimation était possible, les valeurs des masses dérivées des arguments dynamiques sont en bon accord avec les prédictions du modèle. Les spins stellaires et orbitaux apparaissent assez bien alignés pour les 12 étoiles disposant de suffisamment de données, ce qui favorise une origine de fragmentation du disque. Ces résultats soulignent l'importance de combiner différentes techniques pour résoudre des problèmes complexes tels que la formation de binaires et montrent comment de grands échantillons peuvent être utiles à plusieurs fins.

$\beta$  Lyr A est un objet prototypique de binaire semi-détachée dans une phase de transfert rapide de masse entre deux étoiles très massives. Ce système a été observé de manière intensive avec un très grand nombre de techniques (courbes de lumières multi-longueur d'onde, interférométrie, spectroscopie à haute, distribution spectrale d'énergie...) : le modèle de transfert radiatif a été amélioré afin de reproduire l'ensemble de ces observables [Brož et al., 2021] afin de contraindre la forme du disque d'accrétion, montrant que l'émission est formée dans une atmosphère étendue du disque, associée à deux jets étendus en expansion rapide et une coquille symétrique ayant un rayon de  $70 R_{\odot}$ . Ce modèle, bien que très élaboré, ne rend pas encore compte de toute la



richesse des observations, ouvrant la voie à l'étude de processus.

## Interactions étoile-disque

L'impact des interactions avec les étoiles dans la formation des disques est décrite par Cuello et al. [2023]. Cette étude étudie les effets dynamiques des survols stellaires sur les disques formant des planètes. Les survols progrades, paraboliques et pénétrant le disque sont les plus destructeurs. Les survols rasants et pénétrants en particulier conduisent à la capture de matière du disque pour former un disque circum-secondaire très mal aligné par rapport au disque autour de l'étoile primaire. L'un ou les deux disques peuvent alors subir des événements d'accrétion et d'explosion extrêmes, similaires à ceux observés dans les étoiles de type FU Orionis. Les déformations et les disques brisés sont des signatures distinctes des survols rétrogrades. Certains systèmes stellaires ont récemment été observés avec des disques pour lesquels un survol stellaire ou bien une rencontre sont suspectés, notamment UX Tau [Ménard et al., 2020], RW Aur, AS 205, Z CMa et FU Ori ou encore HD100453 [Gonzalez et al., 2020]. Enfin, ces survols stellaires ont des implications pour la formation des planètes et la démographie des exoplanètes, y compris les empreintes possibles d'un survol dans le système solaire dans les orbites des objets transneptuniens et l'obliquité du Soleil.

Des campagnes d'observations à grande échelle, incluant de l'interférométrie, de la spectropolarimétrie, de la spectroscopie à haute résolution angulaire et de la photométrie multicolore, ont été organisées afin d'étudier la région d'interaction entre le disque et l'étoile dans des systèmes jeunes. Elles permettent de caractériser l'intensité et la topologie du champ magnétique dans des étoiles jeunes de plusieurs classes, depuis les proto-étoiles de classe I et T Tauri de faible masse jusqu'aux étoiles de Herbig Ae-Be [Fig. 4 de Villebrun et al., 2019a; Pouilly et al., 2020, 2021]. Le SPIRou Legacy Survey (2019-2024) a notamment permis de révéler les propriétés magnétiques des proto-étoiles profondément enfouies. En combinant ces mesures avec des analyses temporelles de la variabilité spectrale et photométrique (K2, TESS) il est possible de déduire la structure et la dynamique de la région d'accrétion magnétosphérique qui s'étend depuis le bord interne du disque jusqu'à la surface de l'étoile [Donati et al., 2019,

2020; Bouvier et al., 2020a,b; Sousa et al., 2021]. Le développement, en parallèle, des modèles d'accrétion magnétosphérique et de transfert de rayonnement hors-ETL dans les étoiles T Tauri permet de prédire les flots d'accrétion et leurs signatures spectrales qui sont comparés aux observations [Pantolmos et al., 2020; Tessore et al., 2021].

En interférométrie, l'exploitation scientifique de l'instrument GRAVITY (GRAVITY collaboration 2017) sur une centaine d'étoiles jeunes (étoiles de Herbig et T Tauri) observées dans le continuum en bande K et dans plusieurs raies d'émission telles que la raie d'hydrogène Br $\gamma$  et les raies de têtes de bande du CO (Caratti et al. 2020), permet d'étudier les corrélations entre les propriétés de l'étoile (type spectral, masse, luminosité, taux d'accrétion) et celles du disque interne (flux, présence de sillons, morphologie plate ou évasée). Les premières observations GRAVITY de la raie Br $\gamma$  dans des étoiles de T Tauri ont été publiées dans Bouvier et al. [2020a], où la région d'accrétion magnétosphérique dans le disque jeune de pré-transition DoAr44 est sondée.

## CONCLUSION



# EVOLUTION STELLAIRE JUSQU' AUX STADES ULTIMES

## INTRODUCTION

On considère ici l'évolution stellaire au delà de la séquence principale, pour les étoiles de toutes masses. Cet axe a émergé des journées PNPS 2022, avec une première question clé autour de l'origine et la caractérisation de la perte de masse qui est souvent importante lors des stades évolués. Une deuxième question centrale est l'interprétation des nombreux phénomènes à haute énergie et/ou transitoires ou multimessager qui marquent les stades ultimes de la vie stellaire et qui portent une information très riche sur l'évolution stellaire, et les interactions binaires (ou multiples).

Les dernières phases de l'évolution stellaire des étoiles massives (supergéantes ou RSG) ou de masses faible et intermédiaire (géantes rouges ou RGB/AGB) sont associées à des pertes de masse très importantes, ayant des conséquences tant pour le recyclage cosmique que pour l'évolution de l'étoile. Ces phénomènes de perte de masse sont encore mal connus car faisant intervenir des processus aussi divers que la pression de radiation, les ondes acoustiques ou de choc, les ondes d'Alfvén, le magnétisme et la formation de poussière. Les progrès récents se basent sur l'exploitation des grands instruments sol de la discipline, notamment l'interférométrie optique (PIONIER, GRAVITY & MATISSE/VLTI et VEGA/CHARA) et submm (ALMA, NOEMA), l'imagerie (VLT/SPHERE) et la spectropolarimétrie Visible (ESpADO/S/CFHT, Narval/TBL). De plus, ils associent une modélisation (par ex. avec le code d'hydrodynamique radiative CO5BOLD et les codes de transfert radiatif OPTIM3D, RADMC3D et CMFGEN) soucieuse d'intégrer la plupart des processus à l'oeuvre (convection, champ magnétique, circulation d'ondes de choc, pulsation, présence de molécules et de poussière) et permettant de suivre en 3D l'écoulement de la matière à travers l'atmosphère et

l'enveloppe circumstellaire.

La perte de masse fait partie des éléments clés qui déterminent les propriétés de l'objet compact final que l'on observe à plus haute énergie et/ou avec les ondes gravitationnelles. Après les premières détections en 2015, une moisson d'une centaine d'évènements est maintenant cataloguée [Abbott et al., 2021], et la campagne d'observation O4 de la collaboration LIGO/Virgo/KAGRA triplera ce nombre d'ici 2 ans environ. De manière parallèle les grands relevés à haute cadence comme PESSTO, ZTF, et très prochainement VRO/LSST révèlent une grande variété de supernovae. En combinaison avec des suivis spectroscopiques et des modélisations (notamment avec le code de transfert radiatif hors ETL CMFGEN), ils permettent de mieux contraindre les types et masses de étoiles progénitrices et leur perte de masse. Pour les sources haute énergie, toutes les informations fournies par Gaia ont ouvert de nouvelles possibilités pour mieux caractériser et comprendre les étoiles évoluées dans le Galaxie. De manière globale, l'interprétation des transitoires et/ou à haute énergie entre dans s'appuie maintenant sur une statistique qui augmente et qui permet l'interprétation, entre autres autour de l'évolution et de la structure stellaire. On trouve l'usage du code public d'évolution stellaire MESA et de méthodes de synthèse de populations. Ce travail s'effectue à l'interface avec le PNHE et également le PNCG, avec un intérêt pour certaines sources individuelles bien caractérisées, et de nouvelles possibilités offertes par l'observation de populations de plus en plus complètes.

## LES GRANDES AVANCÉES SUR LA PÉRIODE 2019-2023

## Perte de masse : origines et propriétés

La connaissance de la perte de masse et la structure des enveloppes des étoiles AGB a largement bénéficié des observations haute résolution angulaire et haute dynamique pour déterminer la géométrie et la dynamique des systèmes et les confronter aux modèles. Perrin et al. [2020] observent la formation localisée de petits grains de poussière autour l'étoile pulsante Mira, en accord avec les modèles où les pulsations et la convection sont à l'origine de la perte de masse. L'instrument MATISSE/VLTI a livré sa première moisson de résultats : L'atmosphère étendue et l'enveloppe circumstellaire de l'étoile évoluée VX SGR ont pu être reconstruites pour la 1ère fois dans les bandes L, M et N de l'IR [Chiavassa et al., 2022]. Drevon et al. [2022] déterminent la présence de molécules à une distance plus proche de l'étoile que la poussière, en accord avec les modèles dynamiques. La présence de cellules convectives est utilisée par Chiavassa et al. [2020] pour expliquer les incertitudes de mesures Gaia pour les étoiles AGB. Sur les étoiles froides, le PNPS a soutenu la communauté nationale en finançant des travaux originaux et en accompagnant sa structuration autour de collègues de labos différents (IRAP, LUPM, LAB, Lagrange et LESIA). Il a ainsi permis la mise en synergie d'équipes de compétences et de moyens complémentaires, et joué un rôle d'incubateur à projet, les travaux se poursuivant notamment depuis 2021 dans le cadre de l'ANR PEPPER.

Le relevé ATOMIUM avec ALMA mais également VLT/SPHERE et VLTI/MATISSE inclut de nombreux collègues en France. Decin et al. [2020] établit un lien clair entre la structure de nébuleuses planétaires causées par les étoiles AGB et la présence de compagnons de faible masse. Parallèlement, l'étude de la poussière (structuration en clumps et la composition chimique) en polarimètre et avec des simulations avec le code RAMDC3D [Montargès et al., 2023] démontre que la formation de poussière s'opère de façon extrêmement localisée dans les zones internes des environnements stellaires, ce qui a un impact sur les estimations de perte de masse qui devront prendre en compte cette distribution (3D) de matière.

Pour les étoiles massives (les RSG), la synergie des observations en spectropolarimétrie et en imagerie/interférométrie a apporté des connaissances

et contraintes fondamentales sur les structures gouvernant les processus physiques à la surface (champ de vitesse, turbulence, magnétisme) avec notamment le nombre/taille, la position/hauteur, le temps de vie et donc l'évolution de ces cellules convectives géantes. L'exploitation de la polarisation linéaire associée aux raies atomiques (découverte sur Betelgeuse en 2016) a été poursuivie permettant de raffiner la méthodologie livrant des cartes spectropolarimétriques de la surface stellaire [López Ariste et al., 2023]. Une 1ère approche 3D des cellules convectives en surface de Betelgeuse a même été obtenue [López Ariste et al., 2022], permettant de tracer la dynamique des flux convectifs et confirmant le rôle important (voire probablement dominant) de ce processus dans le déclenchement d'événements de perte de masse. Ces cartes spectropolarimétriques sont facilement confrontables aux informations obtenues via l'interférométrie [Montargès et al., 2018] et cette approche a aussi été étendue à d'autres d'étoiles [ex. étoile de type Mira, López Ariste et al., 2019].

La spectaculaire perte d'éclat de la supergéante rouge Betelgeuse en 2019-2020 a été intensément suivie et analysée par une approche multi-technique et multi-longueur d'onde, mobilisant les efforts de la communauté nationale et même internationale. De remarquables observations, obtenues avant/pendant/après le phénomène, avec SPHERE/VLT et GRAVITY/VLTI peuvent s'expliquer par une occultation partielle du disque stellaire par un nuage de gaz et de poussière récemment formé et provenant de l'étoile [Montargès et al., 2021]. Ces travaux, qui ont fait l'objet d'une intense campagne de communiqués de presse, confirment le caractère inhomogène et épisodique d'une perte de masse dont l'origine est liée à une activité photosphérique. La technique de tomographie atmosphérique, appliquée à des spectres à haute résolution obtenus avant/après le phénomène [Kravchenko et al., 2021], a mis en évidence l'effet combiné d'ondes de choc et de la convection photosphérique pour produire une rapide expansion d'une partie de l'atmosphère de Betelgeuse. Les observations MATISSE [Cannon et al., 2023] sont compatibles avec ce scénario, même si l'hypothèse d'une zone froide sur la photosphère ne peut être écartée. Une explication alternative, basée sur la présence d'une enveloppe moléculaire [Davies & Plez, 2021] est détaillée dans la partie "structure interne/atmosphère".

Du côté des Céphéides, la compréhension de la nature et structure des enveloppes circumstellaires a évolué grâce aux travaux de thèse de V. Hocdé qui a montré la présence observationnelle d'une couche de gaz ionisé [Hocdé et al., 2020a,b, 2021]. Ces étoiles pulsantes sont d'une importance cruciale en cosmologie en raison de leur utilisation comme chandelles standards cosmiques permettant d'estimer les distances dans l'Univers, et de contraindre la constante de Hubble  $H_0$ .

La modélisation hydrodynamique est également utilisée pour interpréter les observations. À l'aide de simulations de WR 104, Soullain et al. [2023] proposent des lois d'échelles pour les observations de binaires Wolf-Rayet productrices de poussières (rayon de sublimation, taux de mélange entre les vents et aspect de la spirale de poussière). Castellanos-Ramírez et al. [2021] mettent en lumière la structure grande échelle des environnements de géantes rouges en présence de différents types de compagnons.

### Comment les étoiles ont-elles évolué pour donner les objets compacts et phénomènes transitoires qu'on observe ?

Pour les naines blanches et les étoiles de branche horizontale extrême de type spectral B (étoiles sdB), l'activité en France s'est concentrée sur l'acquisition et l'analyse d'un large échantillon de données photométriques depuis l'espace avec la mission TESS et à l'exploitation du potentiel sismique de ces étoiles (projet ANR INSIDE 2018-2023, P.I.S. Charpinet). L'observation systématique des objets compacts évolués avec TESS (11,600 cibles à ce jour, dont plusieurs centaines de pulsateurs) a permis l'exploitation sismique de ces étoiles. Des informations inédites ont ainsi été obtenues sur la structure et la composition chimique du cœur d'hélium en fusion de l'étoile sdB TIC 278659026, ouvrant une fenêtre sur l'évolution notoirement incertaine des cœurs stellaires dans cette phase évolutive (Charpinet et al. 2019b). Cette étude est complétée par les efforts de cartographie de la stratification chimique au cœur des naines blanches, qui garde l'empreinte des processus physiques à l'œuvre pendant la phase de fusion d'hélium au cœur (Charpinet et al. 2019a, Giammichele et al. 2022). Ces travaux indiquent que la fraction d'oxygène au cœur des naines blanches est environ 15% plus importante (en masse) que prédit par les modèles d'évolution standard et que l'exten-

sion du cœur en fin de phase de brûlage de l'hélium est environ 40% plus importante (en masse également). Les processus clés à revisiter sont ceux liés aux mélanges à l'interface du cœur d'hélium convectif (overshoot, semi-convection/mélange partiel, instabilités). En particulier, la question de l'existence ou non de l'instabilité des "Breathing Pulses" en fin de phase de brûlage de l'hélium se pose, car ceux-ci permettent d'obtenir des naines blanches avec la quantité d'oxygène qui est mesurée par la sismologie (Giammichele et al. 2022).

Un suivi spectroscopique de grande envergure de sources infrarouges a permis d'établir d'augmenter le catalogue d'étoiles R Cor Bor d'environ 50% [Tisserand et al., 2020]. Ces étoiles supergéantes pauvres en hydrogène et riches en carbone sont probablement issues de la fusion de deux naines blanches. Ces étoiles font partie de la classe plus large des étoiles HdC (hydrogen-deficient carbon stars) dont une nouvelle classe a été mise au jour, les dLHdC (dustless HdC stars), paradoxalement dépourvues d'enveloppe de poussières carbonées. En utilisant les données des relevés 2MASS et DR3 de GAIA, et grâce à un suivi spectroscopique [Tisserand et al., 2022], cette population, aux caractéristiques distinctes des HdC, a été révélée et sa distribution Galactique a pu être précisée. Récemment un premier travail de classification des sources HdC [Crawford et al., 2023] a notamment déjà mené à une étude approfondie de l'abondance de surface de strontium des différentes sous-catégories d'étoiles [Crawford et al., 2022]. La caractérisation de ces populations qui semblent avoir leur propre séquence d'évolution apportent de nouvelles contraintes aux scénarios de fusion de systèmes binaires des phases ultimes.

Lamberts et al. [2019] présentent un modèle de population des binaires de naines blanches Galactiques à très courte période (<5 h) en préparation au détecteur d'ondes gravitationnelles spatial LISA. Dans Göteborg et al. [2020], des binaires avec des "stripped stars" (étoiles où les enveloppes ont été ôtées par interaction avec un compagnon évolué) sont également considérées comme des sources possibles d'ondes gravitationnelles. Leur nombre et période orbitale renseignera sur les transferts de masse. À la fois les naines blanches et les "stripped stars" possèdent des contreparties électromagnétiques potentiellement détectables.

Les ondes gravitationnelles sont un nouveau mes-

sager riche en renseignements sur l'évolution stellaire et binaire. Une petite centaine de détections a été réalisée par la collaboration LIGO/Virgo/KAGRA, ce qui permet une première mesure de spectre de masse et des taux de coalescences de étoiles à neutrons et trous noirs. Ces aspects sont étroitement liées à la perte de masse, les épisodes de transfert de masse et les mécanismes d'explosion des supernova, qui impactent la masse de l'objet compact et l'impulsion (kick) qu'il peut recevoir à la naissance. Les populations locales de binaires évoluées, dont les binaires X apportent également de nouvelles informations dans une volonté globale de comprendre les populations. García et al. [2021] reproduisent les coalescences de trous noirs de masse faible à l'aide de simulations MESA, et de modèles de transfert de masse où l'efficacité est élevée. Les informations positions et mouvements propres de binaires X apportées par la (E)DR3 de Gaia permettent de retracer les origines de 15 membres de cette population, et d'en associer la moitié à la formation dans les bras spiraux, l'autre moitié à des amas stellaire jeunes [Fortin et al., 2022]. [Fortin et al., 2022] appliquent une méthode similaire pour estimer la vitesse des étoiles à neutrons à la formation lors d'une supernova.

Avec l'avènement de relevés du ciel transitoire (PANSTARRS, ASAS-SN, ZTF, bientôt VRO/LSST) on découvre une diversité de types de supernova, dans la forme et l'intensité de leurs courbes de lumière ainsi que leur propriétés spectrales. L'interprétation des ces observations a conduit à des développements méthodologiques importants, soit pour la modélisation de la physique des atmosphères des supernovae (thermonucléaires issues de l'explosion de Naines Blanches, dites de type Ia, et à effondrement de coeur, dites de type II et Ib/c), soit pour le post-processing de cette modélisation. Le but est ultimement de prédire des observables synthétiques (courbes de lumière et évolution temporelle des spectres allant de l'UV à l'IR) qui peuvent être directement comparées aux observations pour contraindre la physique introduite dans les modèles.

La collaboration SNRadTrans de comparaison de codes de transfert radiatif pour les SN a mené une large étude sur 10 codes de transfert radiatif appliqués à des problèmes tests de SN Ia [Blondin et al., 2022] afin de regarder comment l'émission du même ensemble de modèles de test standardisés est simulée par les codes de transfert radiatif actuellement

utilisés. Les résultats des différents codes, y compris les courbes de lumière, les spectres et l'évolution de plusieurs propriétés physiques en fonction du rayon et du temps, sont rendus publics sous forme électronique.

Plus près des observations, la modélisation de données spectro-polarimétriques de la supernova de type II (SN) 2012aw avec un code de transfert radiatif 2D polarisé développé pour les supernovae a permis de contraindre le degré d'asymétrie de l'explosion d'une SN à effondrement de coeur [Dessart et al., 2021]. Cette étude fournit des preuves supplémentaires de l'asymétrie générique des éjectas de SN de type II, dont les observations spectropolarimétriques sont une sonde très précise.

La perte de masse étant un phénomène déterminant dans l'évolution des étoiles massives (i.e. les phases de pertes de masses pré-SN, voir section précédente), on s'attend à une interaction avec le matériel circumstellaire (CSM) dans les supernovae d'effondrement de coeur (CCSNe). Une approche semi-analytique de ces interactions a été proposée pour le traitement de ces interactions [Dessart & Hillier, 2022], qui a permis de montrer que leurs caractéristiques peuvent être déchiffrée sur les propriétés des spectres optiques et UV notamment. Ce dernier contient des signatures essentielles qui fournissent des contraintes critiques pour déduire l'histoire de la perte de masse et le fonctionnement interne des progéniteurs de SN à effondrement du noyau au moment de leur mort. Les observations précoces de supernovae de type II-P (plateau) indiquent que la majorité de leurs progéniteurs supergéants rouges sont enveloppés par de grandes quantités de matière circumstellaire au moment de l'explosion, dont la densité est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle observée autour des supergéantes rouges typiques. Des tests menés avec les outils développés pour la modélisation spectroscopiques des RSG [Davies & Plez, 2021], favorisent un scénario dans lequel une succession de phase très courtes ( $< 1$  an) de perte de masse accrue avant l'explosion et prévoient des phases de forte variabilité photométrique dans l'optique et l'infrarouge dans les semaines ou les mois précédant l'effondrement du coeur stellaire [Davies et al., 2022].

Au cours de la phase nébulaire des CCSNe, les instabilités fluides produisent une structure complexe d'éjecta en 3D, avec un mélange considérable



d'éléments à l'échelle macroscopique, mais pas à l'échelle microscopique. Cette structure constitue un formidable défi pour la modélisation détaillée du transfert radiatif à hors-ETL, qui est généralement limitée à 1D dans les codes numériques. Une méthode nouvelle qui permet un mélange macroscopique sans aucun mélange microscopique a été développée, qui permet de fournir des propriétés spectrales aux temps nébulaires qui sont plus fiables, notamment en termes d'intensité des raies d'émission individuelles [Dessart & Hillier, 2020]. Ceci permet de contraindre les rendements en métaux des CCSNe, ainsi que la masse du progéniteur. La méthode fonctionne pour tous les types de SN.

Les mécanismes des supernova à effondrement de coeur et la nature du reste compact sont fortement dépendants du profil de rotation et champ magnétiques internes de l'étoile progénitrice [Buellet et al., 2023] et peuvent aussi présenter des signatures de la structure convective de l'étoile progénitrice [Abdikamalov & Foglizzo, 2020]. Certains de ces effets pourraient être contraints par des observations avec les ondes gravitationnelles ou les neutrinos [Bugli et al., 2023].

Dans les supernovae de type Ia (SN Ia) cette fois, de nouveaux diagnostics spectroscopiques ont été mis en évidence par les modèles, étayés par des comparaisons à des données JWST de la supernova 2021aefx dans la phase nébulaire. Ces travaux ont nécessité de nouveaux calculs des forces de collision et soulignent la nécessité de disposer de données collisionnelles plus précises pour les transitions interdites observées dans ces phases tardives de l'évolution des supernovae. Ces nouvelles données atomiques (pour le Ni III) seront publiées prochainement dans le CDS. Les modèles peuvent expliquer les principales caractéristiques de SN 2021aefx sur toute la gamme de longueurs d'onde de l'optique à l'infrarouge moyen.

Cependant, aucun modèle, ou mécanisme, n'émerge comme une correspondance privilégiée, et les spectres prédits sont similaires les uns aux autres malgré des mécanismes d'explosion très différents. Cela suggère que des ingrédients physiques clés manquent soit dans les modèles d'explosion, soit dans le post-traitement du transfert radiatif, soit dans les deux.

## CONCLUSION



# ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE

*Note : les références de ce chapitre seront complétées*

## INTRODUCTION

L'astrophysique de laboratoire vise à apporter une aide expérimentale à des études souvent portées par l'observation et la modélisation. Elle permet d'être parfaitement complémentaire aux observations et de fournir des données quand ces dernières ne sont pas réalisables. De plus, elle ouvre la possibilité de tester les observations, les modèles ou les codes dans des contextes expérimentaux bien établis, dans lesquels les états initiaux et finaux peuvent être bien caractérisés et contrôlés.

L'astrophysique de laboratoire a pris une grande importance au cours des dernières années, comme en témoigne le decadal Survey on Astronomy and Astrophysics 2020 (Astro2020<sup>1</sup>), qui reconnaît que l'astrophysique de laboratoire est essentielle "for enabling science across astrophysics and to realize the full potential of recent and imminent major observatories". Le rapport conclut que le soutien à la recherche en astrophysique de laboratoire « doit être considéré comme une priorité élevée » : dans ce contexte, en 2022 le NSF-NASA-DOE Astronomy and Astrophysics Advisory Committee (AAAC) a ainsi demandé la création d'un groupe de travail ad hoc pour pouvoir mettre en place les meilleurs moyens de répondre aux directives de ce rapport<sup>2</sup>.

En France, l'essor de l'astrophysique de laboratoire est de plus en plus reconnu et bénéficie du soutien de plusieurs instituts du CNRS, parmi lesquels l'Institut National de Physique (INP), l'Institut National de Chimie (INC) et de l'Institut National des sciences de l'Univers (INSU). En physique stellaire, cette approche est un axe méthodologique transverse reconnu depuis de nombreuses années. Ces recherches en laboratoires, à vocation astrophysique stellaire, répondent aux besoins de créer de bases de données riches et exhaustives pour interpréter les observations d'une qualité de plus en plus élevée, mais concernent aussi l'étude des phénomènes plus extrêmes. Les travaux de la communauté cherchent

à répondre aux questions suivantes : Quelles sont les propriétés atomiques et moléculaires dans les intérieurs stellaires et les atmosphères ? Quelles sont les propriétés physiques des poussières dans les disques protoplanétaires et les régions de chocs ? [à compléter] Ainsi, ces travaux recouvrent ainsi différentes étapes de l'évolution stellaire, de la naissances aux stades ultimes, couvrant ainsi une grande partie de nos thèmes prioritaires.

## LES GRANDES AVANCÉES SUR LA PÉRIODE 2019-2023

Les avancées sur la période 2019-2023 comprennent des thématiques soutenues de façon récurrente par le PNPS et visant à enrichir les bases de données pour répondre à un besoin continu de données physiques (Physique atomique et moléculaire, Spectres moléculaires de référence visible/IR), des progrès sur des projets précédemment initiés (Evolution des poussières dans les régions de chocs, Phénomènes d'accrétion, EOS), ainsi que de nouvelles approches, tant expérimentales (LEOPARS, EXPERTS, ...) que théoriques (similitudes en régime radiatif). Certains exemples sont présentés dans la suite. La liste de thèmes présentés n'a pas l'ambition d'être exhaustive, mais permet de donner des exemples représentatifs de la diversité des approches.

### Physique atomique et moléculaire

#### Spectroscopie VUV pour les plasmas astrophysiques non-LTE

Des études à haute résolution dans le domaine de l'ultraviolet sous vide (VUV) sont réalisées pour les spectres d'émission complexes d'ions multichargés d'éléments lourds (métaux de transition et terres rares), en utilisant le spectrographe à réseau de 10 mètres à Meudon, un instrument unique en Europe. Ces études fournissent des données atomiques fondamentales, telles que les longueurs d'onde, les niveaux d'énergie et les probabilités de transition radiative de ces ions pour la modélisation des plasmas astrophysiques non-LTE. De nombreuses applications ont été faites (voir chapitre "Structure interne et atmosphère"). Une application de longue

1. <https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>

2. <https://www.nsf.gov/mps/ast/aaac/labastro.jsp>

date, mais toujours d'actualité, est l'identification des éléments chimiques dans les spectres stellaires et la détermination de leur abondance [e.g. Grevesse & Sauval, 1998; Magg et al., 2022]. Plus récemment, des longueurs d'onde de laboratoire précises d'ions du fer ou du nickel ont été utilisées comme références pour la détection d'une éventuelle variation des constantes fondamentales en fonction de la gravité de surface dans les spectres HST de naines blanches [ref]. Pour modéliser les opacités des kilonovae formées lors de fusions d'étoiles à neutrons, les fortes contributions des ions lanthanides et actinides fournies par les calculs théoriques doivent être validées par des données expérimentales [ref]. Un projet initié par un PRC CNRS/NSFC avec l'Université de Fudan vise à combiner une source compacte d'ions EBIT avec le spectrographe de 10 mètres pour étudier les ions du fer dans les conditions coronales et éventuellement élaborer une méthode de mesure du champ magnétique solaire [ref]. Enfin, l'étalonnage de l'intensité dans le VUV est un défi pour les études de spectro-polarimétrie dans la perspective de la mission HWO [anciennement LUVOIR, Ferrari et al., 2019].

#### LEOPARS : Laser-plasma Experiment for Opacity measurement Relevant to Stellar physics

Les opacités jouent un rôle majeur dans nombre d'applications. De la fusion nucléaire à l'astronomie en général et à la physique stellaire en particulier, ces paramètres fondamentaux dérivés des données de la physique atomique conditionnent fortement les modélisations et simulations des étoiles et de leur environnement. Par exemple, le problème de la composition solaire, vieux de plus de 15 ans, et les incertitudes qui affectent les opacités nécessitent une approche multi-disciplinaire Expériences-Théorie Applications. En effet, tous les codes de calcul théorique d'opacités donnent des résultats en fort désaccord avec les mesures expérimentales d'opacités du Fer réalisées sur la Z-machine du SANDIA national laboratory (SNL) [Bailey et al., 2015]. Après des années d'efforts pour mettre en place une équipe regroupant toutes les compétences françaises requises pour couvrir ces trois approches, avec des acteurs issus de plusieurs instituts (INSU-AA, INP), le développement sur le long terme d'une plateforme dédiée auprès des lasers de puissance a été lan-

cée. A la suite du projet MUMEO (MULTI MEasurement of Opacities, PI F. Delahaye), soutenu par Plas@Par et le CS de l'Observatoire de Paris, qui a permis d'initier cette approche multi-disciplinaire, de réunir l'équipe et de définir la trajectoire à long terme pour développer le type d'expériences requises (à l'aide d'expériences préliminaires sur Gekko à ILE-Osaka, Japan), le projet LEOPARS (Laser-plasma Experiment for OPacity measurement Relevant to Stellar physics, PI F. Perez) est né. Une première campagne avec ces instruments a été effectuée au LULI sur LULI2000 en Mai 2023. Une nouvelle campagne aura lieu sur la nouvelle installation APOLLON en Novembre-Décembre 2023. Les résultats du SANDIA pourront être testés en utilisant une méthode expérimentale différente (lasers de puissance vs Z-machine) et apporter davantage de points de référence de mesures d'opacités pour permettre aux théoriciens de calibrer leurs codes sur la base de résultats expérimentaux plus nombreux. Les évolutions éventuelles des opacités théoriques seront alors incluses dans la modélisation du Soleil comme de différents types d'étoiles. Toutes ces données nouvelles seront ajoutées aux résultats déjà mis à la disposition de la communauté stellaire ainsi que de la communauté scientifique en général via le site du projet The Opacity Project (<https://cds.unistra.fr/topbase/home.cunto> et al. 1993)

#### LabSPIR : spectroscopie laser en conditions contrôlées de radicaux moléculaires présents dans les atmosphères des étoiles froides

Les spectres dans les visibles et le proche-infrarouge des étoiles naines M sont dominés par les bandes moléculaires d'oxydes et d'hydrures métalliques. Alors que la spectroscopie haute-résolution de ces bandes recèle un immense potentiel pour la caractérisation de ces étoiles froides (température effective, gravité de surface, composition chimique, vitesse radiale, champs magnétiques), elle reste actuellement limitée par la disponibilité et la précision des données moléculaires et des listes de raies spectrales disponibles. Afin de combler ce manque, notamment pour l'exploitation des spectropolarimètres haute-résolution ESPaDOnS, Néo-NARVAL, SPIRou, CRIFRES+ et bientôt SPIP (voir chapitre "Champ magnétique et activité stellaire"), une collaboration entre l'université de Lyon, le Laboratoire Univers et Particules de Montpellier et l'Université de New Brunswick a en-

trepris des mesures en laboratoire de molécules diatomiques identifiées dans les spectres stellaires et connues pour être sensibles au champ magnétique. L'approche consiste à produire des espèces telles que FeH ou CrH par réaction chimique in-situ afin d'obtenir des profils de raies Doppler étroits (température rotationnelle < 500 K), ce qui permet de résoudre le motif Zeeman / Paschen-Back pour des valeurs modérées de champs magnétiques correspondant aux conditions stellaires (2-6 kG) : ceci rend possible l'ajustement des énergies des termes spectroscopiques correspondant et la détermination des facteurs de Landé pour chaque niveau. L'apport d'optiques dédiées permettant de travailler en lumière polarisée circulairement (financé entièrement par le PNPS) a été déterminant pour ce projet, permettant de remonter à des signaux en Stokes V. Les premières comparaisons avec les spectres stellaires observés de FeH et CrH ouvrent d'importantes perspectives pour la vélocimétrie et la magnétométrie des étoiles naines M [Crozet et al., 2023].

## Propriétés des poussières

EXPERTS (EXploring Planet formation with lab ExpeRimentTS) : Mesures des propriétés optiques des poussières protoplanétaires par analogie micro-onde

L'opacité des poussières joue un rôle clé dans les processus de refroidissement et de rayonnement des enveloppes et disques circumstellaires. Leur calcul repose souvent sur la théorie de Mie dans laquelle les poussières sont assimilées à des particules sphériques compactes ou poreuses. Hors les modèles théoriques de croissance des poussières comme les observations de poussières cométaires du Système Solaire montrent que les poussières de taille de l'ordre du micron peuvent avoir une forme très irrégulière (agrégats fractals). Il est possible de déterminer les propriétés optiques de telles poussières par des mesures en laboratoire (opacités d'absorption, fonction de phase en diffusion). Dans ce contexte, le projet EXPERTS (EXploring Planet formation with lab ExpeRimentTS) a été initié en 2019. Soutenu par un financement *80Prime* de l'INSU, ce projet porté par François Ménard à l'IPAG a permis de fabriquer des analogues de poussières irrégulières circumstellaires par impression 3D et d'en mesurer les propriétés optiques. L'idée du projet repose

sur l'invariance des propriétés optiques des poussières avec le rapport entre leur taille et la longueur d'onde du rayonnement : les analogues construits en laboratoire sont des objets solides de taille centimétrique dont les propriétés optiques sont mesurées dans le domaine micro-ondes. Ces mesures permettront notamment d'aider à l'interprétation des observations en lumière diffusée des disques circumstellaires comme avec SPHERE (voir chapitre "Origines"). Des premiers résultats du projet ont été publiés dans Tobon Valencia et al. [2022].

## Evolution des poussières dans les régions de chocs

Les chocs jouent un rôle essentiel dans le cycle de vie des étoiles. Bien qu'il soit admis que les poussières, qui occupent une place importante dans les environnements stellaires, subissent de profondes altérations sous l'effet des chocs (voir chapitre "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes"), les détails de ces processus et leur étendue demeurent mal connus. L'enjeu est primordial car la détermination de la nature des fragments libérés en phase gazeuse pourrait conduire à l'identification de nouveaux traceurs moléculaires des chocs.

Pour contribuer à cette question, l'équipe constituée autour de L. Biennier et A. Georges, de l'Institut de Physique de Rennes, mène des expériences réalisées à l'aide de tubes à choc développés à l'IISc de Bangalore (Inde) permettant de porter un mélange gazeux contenant les analogues de poussières à des températures entre 2500 et 10000 K pendant quelques millisecondes. Récemment de nombreux efforts ont été portés sur l'altération induite par l'onde de choc de l'emblématique fullerène C60 au moyen de l'analyse de l'émission optique in situ. Le spectre révèle la présence de C2 à travers sa signature spécifique mais aussi de fragments carbonés de plus grande taille via l'observation d'un continuum d'émission de type corps noir. Dans les régions de choc, C2 devrait réagir rapidement avec H2 pour donner C2H. Les résultats obtenus soutiennent les observations astronomiques ciblées de C60 et C2H comme substitut de C2 (Chakraborty et al, 2023). La génération de C2 ne résulte pas seulement de l'exposition des fullerènes aux ondes de choc. Des résultats expérimentaux préliminaires suggèrent que le C2 peut également être formé par l'exposition aux chocs d'autres

analogues poussière carbonée.

En parallèle, la collaboration, comprenant A. Gusdorf, P. Lesaffre (LPENS-Paris), E. Dartois, O. Lacinbala (ISMO-Orsay), S. Kassi (Liphy-Grenoble), A. Simon (LCPQ-Toulouse), E. Arunan (IISC-Bangalore, Inde), V. Chandrasekaran (VIT-Vellore, Inde), a également procédé à l'analyse ex-situ des résidus solides générés en soumettant des nanoparticules de carbure de silicium SiC à une onde de choc de 5000 K. Le spectre de diffraction X indique la formation de nanocristaux de Si (lors de la phase de condensation post-choc) et une réduction de la taille des particules tandis que les images TEM démontrent la formation de nanostructures de carbone (nanotubes, graphène, graphite...). Ces travaux sur les processus induits par les chocs dans des grains de carbure de silicium suggèrent que les environnements incluant les enveloppes circumstellaires d'étoiles en fin de vie devraient conduire à la formation d'une grande variété d'allotropes du carbone (Chandrasekaran et al. 2023)

*En cours de rédaction*

## Phénomène d'accrétion et éjection

### Jets magnétisés autour des étoiles jeunes

La formation des étoiles repose sur des processus d'éjection par accrétion, qui combinent une chute gravitationnelle avec de puissants écoulements sortants. Ces phénomènes impliquent la chute de matière des nuages moléculaires sur le disque protoplanétaire d'une étoile sous l'effet de la gravité, ainsi que l'accrétion magnétosphérique le long des lignes de champ magnétique à la surface de l'étoile. Simultanément, les jeunes étoiles émettent des jets et des vents rapides, essentiels pour contrôler la formation des étoiles, gérer le moment angulaire et façonner d'éventuels systèmes planétaires (voir chapitre "Origines").

Une compréhension globale de ces processus nécessite des observations, des modèles théoriques et des expériences en laboratoire. Dans le contexte des phénomènes d'accrétion-éjection, plusieurs expériences ont été menées, en particulier à l'aide de laser de puissance. Revet et al. [2019] a développé les aspects de conception et d'échelle des colonnes d'accrétion magnétisées étudiées pour la première fois dans Revet et al. [2017]. En outre, des mesures réalisées avec des rayons X effectuées par (Filippov

et al. 2019) ont fourni des preuves irréfutables de la formation d'une coquille de plasma autour d'un plasma choqué. Ces recherches ont été approfondies dans Burdonov et al. [2020], en explorant des scénarios d'accrétion asymétrique. Notamment, l'accrétion inclinée de matière à la surface d'une étoile a entraîné une asymétrie prononcée de la structure du plasma, une éjection latérale de matière, un confinement réduit de la matière et une diminution de l'échauffement. Ces résultats impliquent des perturbations potentielles de la chromosphère et des impacts sur les niveaux d'activité coronale. Les expériences ont aussi mis en lumière le développement de l'instabilité de Rayleigh-Taylor magnétisée, telle qu'observée dans Khair et al. [2019] et Burdonov et al. [2022]. Des recherches en laboratoire, présentées dans Revet et al. [2021], ont permis d'étudier les effets du désalignement entre les flux astrophysiques et les champs magnétiques sur la collimation des jets. De faibles désalignements ont entraîné la création d'une tuyère magnétique, dirigeant les flux sortants vers des jets collimatés, tandis qu'un désalignement plus important a perturbé la formation des jets. Ces résultats soulignent l'importance du désalignement dans la régulation de la collimation des jets sur les objets célestes.

### Processus d'accrétion autour des étoiles à neutrons

Pour justifier de la pertinence des maquettes millimétriques utilisées dans les expériences de laboratoire, il est nécessaire d'établir un cadre rigoureux pour évaluer le caractère astrophysique d'une telle expérience. Ce sont les lois d'échelle et les propriétés de similarité de ces systèmes qui établissent un lien mathématique entre ces deux échelles sous certaines conditions [Ryutov et al., 1999; Falize et al., 2011]. Ainsi, les résultats obtenus en laboratoire peuvent directement être utilisés pour apporter des éléments de réponses aux problématiques que nous avons à l'échelle astrophysique grâce à la validation de certains modèles théoriques ou numériques.

Cependant, dans certains régimes physiques, la pression radiative dépasse fortement la pression thermique au sein du plasma étudié. Ce rapport des pressions est actuellement impossible à reproduire en laboratoire avec les installations actuelles. Avec le travail de thèse de V. Tranchant, l'équipe du CEA menée par E. Falize et L. Van Box Som, a donc pro-



posé une approche alternative afin de pallier aux difficultés expérimentales par la généralisation du concept de lois d'échelle [Tranchant et al., 2022]. Ces travaux théoriques reposent sur une mathématisation des expériences de ressemblances en suivant la classification de Takabe [2001]. En s'appuyant sur les symétries de Lie et l'analyse d'équivalence [Lisle, 1992], l'équipe a réussi à obtenir un ensemble de transformations qui généralisent les lois d'échelle et qui lient explicitement des systèmes aux propriétés microscopiques fondamentalement différentes et évoluant dans différents régimes radiatifs. Ces symétries d'équivalence permettent, ainsi, théoriquement, d'augmenter le nombre de degrés de liberté initialement permis par les transformations de similitude.

Cette approche a été appliquée au problème du transport radiatif dans les disques d'accrétion lors de sursauts X de type I intervenant à la surface d'étoiles à neutrons (voir chapitre "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes"). Ce transport se fait sous la forme d'une onde de Marshak radiative [Marshak, 1958]. Les transformations d'équivalence réussissent à relier ces écoulements fortement radiatifs, que l'on rencontre dans les environnements de hautes énergies à l'échelle astrophysique, à des écoulements que l'on peut reproduire à l'échelle du laboratoire, à l'aide des lasers de puissance, dans des régimes faiblement radiatifs [Moore et al., 2015; Courtois et al., 2022]. Le dimensionnement d'une expérience sur les installations LMJ et NIF a été proposé afin d'étudier, en laboratoire, la propagation d'ondes radiatives en régime supersonique équivalente à celles générées lors de l'interaction entre un sursaut X à la surface d'une étoile à neutrons et son disque d'accrétion. L'étude paramétrique menée sur les incertitudes expérimentales a permis de mettre en exergue les possibilités offertes par ces nouvelles méthodes de transformation ainsi que de vérifier la précision des prédictions réalisées sur les modèles étudiés. De plus, les techniques d'équivalence permettent de prendre en compte les écarts aux caractéristiques des matériaux au sein même des transformations.

En conclusion, ces travaux novateurs permettent d'aller sonder en laboratoire des régimes radiatifs inaccessibles jusqu'à aujourd'hui. Le développement d'un projet expérimental est en cours pour créer une plate-forme d'astrophysique de laboratoire pour ces

expériences inédites.

## CONCLUSION



## ANNEXES

*Version préliminaire*

TABLE 1 – Liste des orateurs PNPS à la SF2A.

Année	Nom	Titre
2019	Jean-François Donati	Exploring new worlds with SPIRou at CFHT
2020	<i>édition annulée</i>	
2021	Florentin Millour	1ers résultats stellaires avec MATISSE
2022	Astrid Lamberts	Gravitational waves, a new way to study stars
2023	Sébastien Deheuvels	Détection et mesure de forts champs magnétiques dans le coeur d'étoiles géantes rouges

TABLE 2 – Contribution à des ateliers aux journées SF2A.

2019 (Nice)
Stellar physics and Gaia
Le nouvel outil d'observation MATISSE
Interaction étoile-disque
Faire de l'astrophysique avec les ondes gravitationnelles
2020 : <i>Journées annulées</i>
2021 (distanciel)
Atelier général ASHRA : bilan et prospective de l'interférométrie optique
Atelier général de l'AS SKA : SKA, son éclaireur français NenuFAR, et ses précurseurs
Détecter et caractériser des exoplanètes en présence d'activité stellaire
Stellar multiplicity / Multiplicité stellaire
Simuler la formation des galaxies et de leurs étoiles
2022 (Besançon)
Le Soleil est-il une étoile de type solaire?
Gravitational-wave astronomy and multimessenger astrophysics
L'astrophysique française à l'heure du JWST : opportunités et défis
Stellar multiplicity / Multiplicité stellaire
Simuler la formation des galaxies et de leurs étoiles
2023 (Strasbourg)
Demain l'ELT!

TABLE 3 – Liste des Ecoles Evry Schatzman.

Année	Titre	Porteur	PN associés
2019	Processus multidimensionnels en physique stellaire	Isabelle Baraffe	
2020	Interactions étoiles-planètes	Lionel Bigot	PNP
2021	Formation et caractérisation des exosystèmes avec SPIRou	Claire Moutou	PNP
2022	<i>édition annulée</i>		
2023	Gaia et la physique stellaire	Carine Babusiaux	PNCG
2024	Les disques proto-planétaires à l'ère de JWST	Catherine Dougados	PCMI, PNP

TABLE 4 – Soutien à des ateliers et conférences.

Titre	Porteur	Lieu	Date
2019			
ASTROSIM2019 : Ecole numérique pour l'astrophysique	Boris Dintrans	Montpellier	Janv.-Févr. 2019
Life3E'2019- Search for life : from early Earth to Exoplanets	Muriel Gargaud-Claeys	Quy Nhon, Vietnam	Mars 2019
The multiple approaches to plasma physics from laboratory to astrophysics	Benoît Cerutti	Les Houches	Mai 2019
9th Meeting on Hot Subdwarfs and Related Objects	Stéphane Charpinet	Hendaye	Juin 2019
The feedback in the star formation process / EWASS 2019	Benoît Commerçon	Lyon	Juin 2019
Statistics for Astrophysics : variability and time series analysis	Didier Fraix-Burnet	Autrans	Octobre 2019
ExoJC-2019 - Exoplanètes Jeunes Chercheurs	Magali Deleuil	Bordeaux	Mars 2019 (AO2018??)
2020			
Rencontre annuelle des chercheurs en exoplanétologie : Exosystèmes I	Magali Deleuil	Paris	Janvier 2020
SFtools-bigdata : The close structural connection between gas and young stars, focus on current and new tools of data analysis	Isabelle Joncour	en ligne	Octobre 2020
Atelier sur les sciences et techniques pour l'étude des champs magnétiques dans le contexte de la formation des étoiles	Frédérique Motte	en ligne	Décembre 2020
2021			
Transport and mixing of tracers	Héloïse Méheut	hybride	Juin 2021
Rencontres annuelles des chercheurs en exoplanétologie : ExoSystèmes II	Magali Deleuil	Toulouse	Novembre 2021
Atelier Core2Disk II : all about dust to solar nebulae	Anaëlle Maury	IPa Orsay, hybride	Mai 2021
2022			
Ecole ATHENA – L'univers à l'heure de la spectroscopie à haute résolution spatialement résolue en rayons X	Etienne Pointcouteau	Toulouse	Juin 2022
Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun (21ème édition)	Pascal Petit	Toulouse	Juillet 2022
Caractérisation des exoplanètes : des planètes transitionnelles aux Jupiters avec les missions spatiales JWST, Ariel et les observations au sol	Thierry Fouchet	Les Houches	Septembre 2022
EXO-ELT - Atelier sur l'Etude de la Formation Planétaire et des Exoplanètes avec l'ELT	Gaël Chauvin	Fréjus	Novembre 2022
2023			
Rencontres annuelles des chercheurs en exoplanétologie : ExoSystèmes III	Magali Deleuil	Marseille	Janvier 2023
Atelier Core2disk III : le rôle du champ magnétique dans l'évolution des disques et dans la formation planétaire	Benoît Tabone	IPa Orsay	Sept-Oct 2023
The Alpha Centauri system. Prospects for neighboring worlds	Lionel Bigot	Nice	Juin 2023
The Physics of Star Formation : From Stellar Cores to Galactic Scales	Benoît Commerçon	Lyon	Juin 2023
Cosmic turbulence and magnetic fields : physics of baryonic matter across time and scales	Pierre Lesaffre	Cargèse	Septembre 2023
Beyond Boussinesq for Astrophysical and Geophysical fluids : Numerical tools and experiments of the future	Isabelle Baraffe	Lyon	Octobre 2023
14th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths for Laboratory and Astrophysical Plasmas	Christian Balança	Paris	Juillet 2023
HEPRO-8	Martin Lemoine	Paris	Octobre 2023

TABLE 5 – Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
CEA	André	Ondes gravito-inertielles dans les étoiles et les planètes géantes : propagation, dissipation et échanges de moment cinétique	S. Mathis, A.-S. Brun	2019
CEA	Breton	Etude de la rotation des étoiles de type solaire en séquence principale, de la surface jusqu'au coeur	R.-A. Garcia, A.-S. Brun	2022
CEA	Bessila	Impact de la rotation et du magnétisme sur l'excitation des oscillations stellaires par la convection : prédictions pour l'astérosismologie spatiale	S. Mathis	2023
CEA	Moisset	Modélisation théorique des processus de transport et de mélange pour les modèles d'évolution stellaire multi-dimensionnels	S. Mathis	2023
CEA	Benbakoura	Evolution des étoiles de faible masse en interaction : observations multi-techniques et modélisation des systèmes multiples	R. A. Garcia	2019
CEA	Astoul	Impact du magnétisme et de la rotation différentielle sur les marées dans les étoiles de faible masse et les planètes géantes gazeuses	S. Mathis, C. Baruteau	2020
CEA	Ahuir	Dynamique et évolution des systèmes étoile-planète. Impact des interactions magnétiques et de marées	A.-S. Brun, S. Mathis, A. Strugarek	2021
CEA	Dhouib	Dissipation de marée et sismologie des planètes géantes et des étoiles à l'heure des missions spatiales	S. Mathis	2023
CEA	Perri	Le Soleil magnétique et la météorologie de l'espace : étude du couplage non-linéaire entre dynamo, activité magnétique et vent solaire	A.-S. Brun	2019
CEA	Bugnet	Caractérisation globale des étoiles de type solaire et magnétisme interne le long de leur évolution : intelligence artificielle en support de l'astérosismologie et nouvelles contraintes théoriques pour les champs magnétiques internes	R. A Garcia, S. Mathis	2020
CEA	Noraz	Magnétisme des étoiles : rôle de la rotation et de la métallicité sur la dynamo et le vent	A.-S. Brun, A. Strugarek	2022
CEA	Panetier	Caractérisation des cycles magnétiques du Soleil et des étoiles	R.-A. Garcia	2023
CEA	Doebele	Dyablo-Whole Sun : étude du magnétisme solaire avec un code AMR exascale	S. Brun, M. DeLorme	2023
CEA	Mignon-Risse	On the formation of massive stars : a numerical approach	M. Gonzalez	2020

(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
CEA	Ajeddig	Probing the role of magnetic fields in star-forming filaments and protostellar cores : Observations with NIKA2-Pol	P. André	2022
CEA	Cabedo-Soto	Constraining the physicochemical conditions of star-forming gas : high angular resolution observations of the B335 Class 0 protostar	A. Maury	2021
CEA	Le Gouellec	Constraining the dust grain alignment mechanisms responsible for the (sub-) millimeter dust polarization observed in class 0 protostellar cores	A. Maury	2021
CEA	Brucy	De la dynamique galactique à la formation stellaire : comment est régulé le taux de formation d'étoiles?	P. Hennebelle	2022
CEA	Berliat	Origine du moment cinétique et influence des jets protostellaires sur la formation d'étoiles	P. Hennebelle	2021
CEA	Zhang	Explorer la nature filamentaire de la formation d'étoiles dans le nuage moléculaire California	P. André	2021
CEA	Ali-Ahmad	Comment les étoiles se forment-elles? Le second effondrement et ses conséquences	M. Gonzalez, P. Hennebelle	en cours
CEA	Ngo	Population des disques protoplanétaires	P. Hennebelle	en cours
CEA	Cai	Origine et dynamique des amas de proto-étoiles	P. André	en cours
CEA	Dong	Champ magnétique et formation d'étoiles le long des filaments moléculaires : observations du programme "B-FUN" avec NIKA2-POL et préparation du polarimètre spatial B-BOP	P. André	en cours
CEA	Goy	Coévolution du champ magnétique et de la poussière durant l'effondrement gravitationnel d'un cœur dense préstellaire	P. Hennebelle	en cours
CEA	Carpine	Exploring the pristine conditions for transforming interstellar dust into planetesimals around the youngest solar-type protostars	A. Maury	2026
CEA	Verrier	Etude analytique de l'influence de la poussière sur le couplage du gaz avec le champ magnétique au cours de la formation stellaire.	P. Hennebelle	2026
CEA	Pagani	Explosion asymétrique des supernovae gravitationnelles	T. Foglizzo, J. Guilet	2019
CEA	Reboul Salze	L'instabilité magnetorotationnelle dans les proto-étoiles à neutrons	J. Guilet, T. Foglizzo	2021
CEA	Buellet	Signal multi-messager des explosions de supernovae	T. Foglizzo, J. Guilet	2023



(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
CEA	Barrère	Modélisation de la formation des magnétars	J. Guilet, T. Foglizzo	2023
CRAL	Lebreuilly	Formation d'étoiles : étude dynamique de la poussière interstellaire	B. Commerçon	2020
CRAL	Lombart	Croissance des grains par méthode de Galerkin pour la formation des planètes	G. Laibe	2020
CRAL	Vericel	Pièges à poussière auto-induits dans les disques protoplanétaires : du rôle des lignes de gel à la formation des planétésimaux	J.-F. Gonzalez	2020
CRAL	Denneulin	Approche inverse pour la reconstruction des environnements circumstellaires en polarimétrie avec l'instrument d'imagerie directe ESO / VLT SPHERE IRDIS	M. Langlois, E. Thiebaut	2020
CRAL	Hirsch	Evolution and appearance of the inner regions of circumbinary discs	J.-F. Gonzalez	2021
CRAL	Jaupart	Statistical approach to astrophysical flows in star forming clouds : towards the stellar initial mass function	G. Chabrier	2021
CRAL	Flasseur	Object detection and characterization from faint signals in images : applications in astronomy and microscopy	M. Langlois, E. Thiebaut	2020
CRAL	Michoulier	Sédimentation de grains poreux dans les disques protoplanétaires : influence sur l'épaisseur de la couche de poussière et la formation de planétésimaux	J.-F. Gonzalez	2023
CRAL	Lenoble	Formation of the first stars : collapse and fragmentation of primordial gas clouds.	B. Commerçon, J. Rosdahl	2023
CRAL	Dallant	D	M. Langlois, E. Thiebaut	2023
CRAL	Thé	Méthodes de démixage et de déconvolution d'objets dans des images - Applications en imagerie astronomique à haut-contraste	M. Langlois, E. Thiebaut	2023
GEPI	Matas Pinto	Étoiles particulières, pauvres en métaux, à l'époque de Gaia	E. Caffau, M. Spite	2022
GEPI	Lombardo	Explorer l'histoire de la Galaxie grâce à la spectroscopie stellaire	P. Bonifacio, P. François	2022
GEPI	Cerqui	L'histoire de la formation stellaire de la voie lactée	M. Hayward	en cours
GEPI	Pagnini	L'évolution précoce et tardive de notre Galaxie à travers la lentille des amas globulaires	P. Di Matteo	en cours
IAP	König	Improving exoplanet detection by better characterizing stellar activity and variability	G. Hébrard, G. Hussain	2022

(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
IAS	Manchon	On the transport of angular momentum in stellar radiative zones in 2D	F. Baudin, J. Cadilhe Marques	2021
IAS	Degott	Modélisation activité stellaire, densité spectrale du bruit photométrique d'origine stellaire	F. Baudin, J. Cadilhe Marques	2023
IPAG	Desgrange	Imagerie des disques et des exoplanètes avec l'instrument SPHERE au VLT : repousser les limites de ses performances actuelles avec le projet d'upgrade SPHERE+	J. Milli, G. Chauvin, T. Henning	encours
IPAG	Roggero	Star-disk interactions in young stars : dippers as seen with K2	J. Bouvier, F. Ménard	2021
IPAG	Leclerc	Les binaires et exoplanètes vues par Gaia	C. Babusiaux	2022
IPAG	Lanthermann	Mise en œuvre de PhotoDiode à Avalanche (APD) pour l'interférométrie astronomique en proche infra-rouge : Application à la binarité des étoiles massives	K. Perraut, J.-B. Le Bouquin	2019
IPAG	Dethier	Développer ou adapter des modèles numériques d'évaporation d'atmosphère exoplanétaires exposées au rayonnement intense des étoiles jeunes.	J. Bouvier, V. Bourrier	2023
IPAG	Mignon	Recherche d'exoplanètes telluriques autour des naines M : caractérisation fine de l'effet de l'activité stellaire et étude statistique des populations planétaires	X. Delfosse, N. Meunier	2021
IPAG	Larue	Recherches de planètes extra-solaires par vitesse radiale : chromaticité du signal d'activité stellaire	X. Delfosse	encours
IPAG	Villenave	Constraining the physical processes of protoplanetary disk evolution	F. Ménard, M. Benisty	2020
IPAG	Pouteau	L'Origine de la Masse des Etoiles dans notre Galaxie	F. Motte	2022
IPAG	Pouilly	Vers la détection de planètes à courte période enfouies dans les disques circumstellaires des étoiles jeunes	J. Bouvier, E. Alecian	2021
IPAG	Ospina-Zamudio	Implosion radiative et formation stellaire induite vues par ALMA	B. Lefloch	2019
IPAG	Nony	Formation d'amas d'étoiles massives et collision de nuages	F. Motte	2019
IPAG	Martel	Magneto-thermal winds in proto-planetary discs	G. Lesur	2022
IPAG	Jacquemin Ide	Magnetically driven jets and winds launched from turbulent accretion disks	J. Ferreira, G. Lesur	2021
IPAG	De Valon	Origine et impact des jets/flots protostellaires à l'ère d'ALMA et JWST	C. Dougados, S. Carbit	2021

(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
IPAG	Zimniak	Signatures observationnelles d'écoulements magnétiques émis par les disques d'accrétion turbulents	J. Ferreira	2023
IPAG	Thomasson	Fragmentation des nuages moléculaires et formation des systèmes stellaires jeune	I. Joncour, E. Moraux	2023
IPAG	Tanius	Déchiffrer l'évolution chimique des disques proto-planétaires dans leur environnement natal	A. Faure, R. Le Gal	2023
IPAG	Stadler	Détection de protoplanètes par étude cinématique des disques protoplanétaires	M. Benisty	2023
IPAG	Rom	Effet de l'environnement sur la formation des étoiles et des naines brunes : Étude de la partie faible masse de l'IMF dans les amas massifs jeunes	E. Moraux, K. Muzic	2023
IPAG	Nowacki	Apport de l'instrument VLTI/Gravity+ à l'étude des interactions entre les étoiles jeunes et leur disque proto-planétaire. Caractérisation du miroir déformable de l'optique adaptative	K. Perraut, J.-B. Le Bouquin	2023
IPAG	Mauxion	Interaction des disques protoplanétaires enfouis avec leur environnement	G. Lesur, S. Maret	2023
IPAG	Jannaud	Simulations numériques MHD de jets astrophysiques	J. Ferreira	2023
IPAG	Demars	Caractérisation des Processus d'Accrétion sur les Compagnons de Masse Planétaire	M. Bonnefoy, C. Dougados	2023
IPAG	Delabrosse	Origine et impact des flots protostellaires à l'ère de JWST	C. Dougados	2023
IPAG	Alaguero	Formation planétaire au sein de systèmes stellaires multiples	F. Ménard, N. Cuello	2023
IPAG	Chevalier	Définir les cœurs pré- et proto-stellaires via des approches théoriques, numériques et observationnelles	F. Motte, F. Louvet	2023
IRAP	Lazzarotto	Modélisation du spectre d'intensité des étoiles en rotation rapide	M. Rieutord	2023
IRAP	Galoy	Sismologie des étoiles en rotation rapide	F. Lignières, J. Ballot	en cours
IRAP	Gouhier	Dynamique des zones radiatives stellaires en rotation différentielle	F. Lignières, L. Jouve	2022
IRAP	Noll	Étude de l'extension des cœurs convectifs par la sismologie des étoiles sous-géantes	S. Deheuvels	2021
IRAP	Gagnier	Dynamique des étoiles massives proches de la rotation critique	C. Charbonnel, M. Rieutord	2020

(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
IRAP	Evano	Analyse semiclassique des modes d'oscillation chaotiques dans les étoiles en rotation rapide	F. Li-gnières	2019
IRAP	Kulenthirarajah	Caractérisation des paramètres stellaires d'étoiles froides à partir des spectres haute résolution	J.-F. Donati	2019
IRAP	Yu	À la recherche de Jupiters chauds autour d'étoiles jeunes	C. Moutou, J.-F. Donati	2019
IRAP	Belotti	Recherche de mondes habitables avec SPIRou : problématique de l'activité stellaire	P. Petit, J. Morin	2023
IRAP	Ould-Elhkim	Systèmes planétaires autour d'étoiles de faible masse avec SPIRou	C. Moutou, J.-F. Donati	2023
IRAP	Cristofari	Caractériser les propriétés atmosphériques de naines rouges à partir de spectres SPIRou	J.-F. Donati	2022
IRAP	Finociety	Caractériser le champ magnétique et l'activité des étoiles jeunes avec SPIRou	J.-F. Donati	2022
IRAP	Cang	Modeling the activity of late-type stars with spectropolarimetry and photometry	P. Petit, J.-F. Donati	2021
IRAP	Zaire	Dynamos of cool stars : Guiding theory to advanced models with spectropolarimetric observations	J.-F. Donati, L. Jouve	2021
IRAP	Klein	Caractériser les systèmes planétaires de naines rouges actives proches avec SPIRou	J.-F. Donati	2020
IRAP	Wafflard-Fernandez	Signatures observationnelles de la migration planétaire dans l'émission des poussières froides des disques protoplanétaires	C. Baruteau	2020
IRAP	Su	Analyse des pulsateurs compacts évolués dans les binaires observés par TESS	S. Charpinet	2023
IRAP	Pilate	Imagerie de la photosphère des super-geantes rouges : l'origine de la perte de masse	A. Lopez Ariste	2023
LAB	Boutin-Basillais	Nouvelle contribution à la théorie des figures. : Les systèmes polytropiques multi-objets multicouches en rotation différentielle	J.-M. Huré	2020
LAB	Tarricq	Revisiting the memberships, structural parameters and kinematics of stellar clusters in the Milky Way	C. Soubiran	2021
LAB	Staelen	Système autogravitant multicouches en rotation différentielle : structure et stabilité	J.-M. Huré	2023
LAB	Nguyen	Formation des planètes observée avec ALMA : propriétés du gaz et de la poussière des disques protoplanétaires orbitant autour des étoiles jeunes de faible masse	A. Dutrey, N. Diep Pham, M. Gerin	2019
LAB	Molet	Analyse moléculaire des coeurs massifs dans la région de formation d'étoiles W43-MM1	D. Despois	2019

(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
LAB	Bonne	La formation du gaz dense à l'origine des étoiles de faible et de haute masse	S. Bon-temps, N. Schneider	2020
LAB	Gavino	Observation and modeling of disks about young stars with ALMA : implication for planetary formation	A. Dutrey	2020
LAB	Miret-Roig	COSMIC-DANCE : A comprehensive census of nearby star forming regions,	H. Bouy, J. Olivares Romero	2020
LAB	Vaille-Manet	Recherche et étude des phases précoces de la formation des étoiles massives	S. Bon-temps	2023
LAB	Collin-Dufresne	Compétition coagulation-fragmentation des grains dans les disques proto-planétaires et impact sur l'observation de la formation planétaire.	E. Di Folco, A. Pierens	
LAB	Rodrigues	The past and future of the closest stellar nursery : a 6D approach	H. Bouy	
LAB	Kessler	Origine et recherche des molécules complexes lors de la formation des étoiles massives - approche(s) statistique(s) et IA d'extraction d'information.	C. Bon-temps, T. Csengeri	
LAB	Marinho	Observation et modélisation de l'enveloppe circumstellaire d'étoiles évoluées : étude des vents stellaires	E. Herpin	2023
Lagrange	Boucheau	Evolution stellaire en rotation rapide. Apports de l'interférométrie et de l'astérosismologie	A. Domiciانو	2020
Lagrange	Hocdé	L'environnement des Céphéides et l'étalonnage des échelles de distances dans l'univers	N. Nardetto, E. Lagadec	2020
Lagrange	Salsi	L'étalonnage de la relation brillance de surface couleur : distance des binaires à éclipses dans le groupe local et préparation de la mission PLATO	N. Nardetto, D. Mourard	2021
Lagrange	Maimone	Modélisation 3D, ab initio et simultanée de l'atmosphère des exo-planètes et de leurs étoiles hôtes	A. Chivassa	2022
Lagrange	Palakkatharappil	Les ages précis des étoiles à l'ère des grandes missions spatiales Gaia et Plato et son lien avec notre Voie Lactée	O. Creevey	2022
Lagrange	Pannetier	Développement de l'instrument CHARA/SPICA	D. Mourard	2022
Lagrange	Rodriguez-Dias	Caractérisation du bruit convectif stellaire pour la détection des exoplanètes	V. Aguirre Børsen-Koch, L. Bigot	2023
Lagrange	Jonak	A new investigation of stellar masses	D. Mourard	en cours



(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
Lagrange	Ebrahimkuty	Studying the center to limb intensity variation of stars across the HR diagram	D. Mourard, A. Domicciano	en cours
Lagrange	Béguin	Magnetic field and convection in evolved stars and their role in the mass-loss processes	A. Chivassa	en cours
Lagrange	Bailleul	La relation brillance de Surface Couleur des Céphéides : Etalonnage des échelles de distances dans l'univers	N. Narretto	en cours
Lagrange	Santos	Galactic archaeology of the Milky Way disc with the Gaia space mission	A. Recio-Blanco	2021
Lagrange	Zhao	The Diffuse Interstellar Band at 862 nm	M. Schultheis	2021
Lagrange	Contursi	Production des éléments s dans la Voie Lactée : apports des relevés spectroscopiques au sol et dans l'espace	P. De Laverny	2023
Lagrange	Nieuwmunster	Les systèmes stellaires les plus denses de l'Univers : le disque nucléaire	M. Schultheis	en cours
Lagrange	Gonzalez-Ribera	Galactic archeology : deciphering the primitive phases of the Milky Way with the WEAVE survey	G. Kordopatis, V. Hill	en cours
Lagrange	Saldanha	Disques et vents autour des étoiles massives : apport de la seconde génération d'instruments HRA au VLT & VLTI	A. Domicciano, A. Meilland	2020
Lagrange	Perdigon	Méthodes approchées pour le transfert de rayonnement dans les milieux circumstellaires	M. Faurobert, G. Niccolini	2022
Lagrange	Abello	Etude statistique des étoiles massives en spectro-interférométrie multi-bandes avec la nouvelle génération d'instruments au VLTI et à CHARA	A. Meilland, A. Domicciano	en cours
Lagrange	Kravchenko	Exploring the Physics and Abundances of Evolved Stars Atmospheres	A. Chivassa	2019
Lagrange	Drevon	Exploitation de l'instrument MATISSE / VLTI : imagerie des étoiles évoluées	P. Cruza-lebes, F. Millour	2023
Lagrange	Srinivasan	Origine des trois noirs observés avec LIGO/Virgo, comparaison avec la Voie Lactée	A. Lamberts, M-A. Bizouard	2023
Lagrange	Bruel	Canaux de formation des binaires de trous noirs	A. Lamberts	2023
LAM	Suin	Numerical simulations of feedback from high-mass stars	A. Zavagno	en cours
LAM	Lopez	Lumière sur la diversité des petits mondes en transit d'étoiles solaires	A. Santerne	2021

(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
LAM	Heidari	Overcoming the stellar activity impact on exoplanet detection and characterization	I. Boisse, F. Vakhili	2022
LAM	Cortès-Zuleta	Stellar activity characterization of M-dwarfs using optical and near-infrared spectra from SOPHIE and SPIRou.	I. Boisse	2023
LAM	Grouffal	Characterisation of transiting exoplanets in the habitable zone	A. Santerne	en cours
LAM	Zhang	The impact of high-mass stars on star formation properties	A. Zavgno	2020
LAM	Berthelot	Apprentissage machine pour l'étude de la formation stellaire galactique	A. Zavgno	2023
LERMA	Durepaire	Instabilités MHD dans les couches radiatives stellaires	L. Petitdemange, K. Belkacem	2023
LERMA	Nairabeze	Convective - Radiative Interfaces and Stellar ages	L. Petitdemange, K. Belkacem	2023
LERMA	Tranchant	Nouvelle classe d'expériences d'astrophysique de laboratoire : Application aux processus d'accrétion autour des étoiles à neutrons	A. Ciardi, E. Falize	2019
LERMA	Marret	L'instabilité non-résonnante de dérive : de la théorie à l'expérience	A. Ciardi, R. Smets	2019
LERMA	Guyot	Simulations magnétohydrodynamiques couplées avec méthode PIC ('Particle-In-Cell') : application à l'étude de mécanismes d'accélération d'ions dans des plasmas astrophysiques et de laboratoire.	A. Ciardi, P. Savoini	2019
LERMA	Anis	Étude des propriétés radiatives d'ions de terres rares : cas des ions Er <sup>3+</sup> , Dy <sup>3+</sup> et Ho <sup>3+</sup>	D. Deghiche, L. Tchang-Brillet	2021
LERMA	Colombo	Radiation hydrodynamic and magnetohydrodynamic models of plasma flows accreting onto Classical T Tauri Stars	S. Orlando, C. Stehlé, L. Ibgui	2019
LESIA	Houdayer	Inférence des propriétés physiques de régions d'ionisation stellaires au moyen de glitches sismiques	M.-J. Goupil, D. Reese	2022
LESIA	Philidet	Étude du couplage entre convection turbulente et oscillations de type solaire	M.-J. Goupil, K. Belkacem	2021
LESIA	Bouchaud	Évolution stellaire en rotation rapide. Apports de l'interférométrie et de l'astérosismologie	A. Domicciano de Souza, D. Reese	2020

(suite) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
LESIA	Christophe	Diagnostics sismiques des intérieurs stellaires avec Kepler : rotation et interfaces	Y. Lebreton, M.-J. Goupil, R.-M. Ouazzani	2019
LESIA	Chomez	Recherche de planètes extrasolaires en imagerie directe	A. Boccaletti, A.-M. Lagrange	en cours
LESIA	Teinturier	Modélisation 3D et caractérisation d'atmosphères d'exoplanètes et de naines brunes par courbes de phases	B. Bézard	en cours
LESIA	Breuval	L'échelle de distance des Céphéides : de l'étalonnage Gaia local aux galaxies lointaines	P. Kervella	2021
LESIA	Trahin	Etalonnage de l'échelle des distances dans l'ère Gaia : Les étoiles pulsantes RR Lyrae et Céphéides	P. Kervella	2019
LESIA	Bras	Modélisation optimisée des Céphéides pour l'échelle des distances extragalactiques	P. Kervella	en cours
LESIA	Thomson-Paressant	Sonder le magnétisme dans les étoiles delta Scuti	C. Neiner	2023
LESIA	Gutteridge	Magnéto-astérosismologie des étoiles chaudes	C. Neiner, C. Catala	en cours
LESIA	Dréau	Analyse sismique des géantes rouges sur la branche asymptotique	B. Mosser, Y. Lebreton	2022
LPENS	Florentin	Développement d'instabilités dans les écoulements astrophysiques conducteurs	G. Gisinger, L. Petitdemange	2023
LPP	Menu	Champs magnétiques générés par effet dynamo dans les objets astrophysiques en rotation	Sébastien Galtier, Ludovic Petitdemange	2019
LULI	Lahmar	Etude expérimentale et théorique des opacités stellaires	P. Audebert, S. Le Pape (LULI) F. Perez, F. Delahaye (LERMA)	2023
LUPM	Dumont	Les processus de transport dans les étoiles de type-solaire	A. Palacios, C. Charbonnel	2021

(suite et fin) Liste des thèses en physique stellaire soutenues sur la période. L'année mentionnée est l'année de soutenance.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
LUPM	Brunn	Effets des particules énergétiques produites par reconnexion magnétique sur les disques et jets des étoiles jeunes	A. Marcolini, C. Sauty	2023
LUPM	Georgiev	Magnétisme dans les étoiles froides évoluées	A. Lèbre, R. Konstantinova-Antova	2021
LUTH	Saincir	Approximation numérique de modèles d'hydrodynamique radiative et applications à la physique stellaire	C. Michaut	2019
LUTH	Pascal	Modélisation de l'évolution d'une proto-étoile à neutrons	Micaela Oertel	2021
LUTH	Guerra	Couplage entre l'accrétion, le vent et l'irradiation dans un binaire proche avec un pulsar milliseconde	Zakaria Meliani codir Guillaume Voisin	2023
Strasbourg	Jain	Les populations stellaires des amas globulaires : contraintes sur la physique stellaire et relations subtiles entre couleurs et environnement	A. Lançon	2021
UTINAM	Ravinet	La frontière étoiles - naines brunes, de Gaia à Euclid	C. Reylé, N. Lagarde	en cours
UTINAM	Déforêt	3D extinction mapping of the Milky Way with the Besançon Galaxy Model in the Gaia era	J. Montillaud, A. Robin	en cours
UTINAM	Cornu	Modeling the 3D Milky Way using Machine Learning with Gaia and infrared surveys	J. Montillaud, A. Robin	2020
UTINAM	Bögner	Multiwavelength studies of cold Galactic interstellar clouds	J. Montillaud, C. Reylé, V. Toth	2023

TABLE 6 – Liste des HDR en physique stellaire sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Année
IAS	Boumier Patrick	Structure interne des astres via la sismologie : du principe de mesure à la pérennisation de l'accès aux données	2019
GEPI	Haywood Misha	The mass growth of the Milky Way and its connection to the stellar populations of our Galaxy	2019
CRAL	Commerçon Benoît	Dynamique des fluides astrophysiques pour la formation des étoiles	2020
CRAL	Laibe Guillaume	Dusty planet formation	2020
IRAP	Rincon François	Instabilités, turbulence et champs magnétiques dans les fluides et plasmas astrophysiques	2020
IRAP	Baruteau Clément	Formation et évolution orbitale des systèmes planétaires	2020
Lagrange	Creevey Orlagh	Connaissance précise des étoiles pour des applications dans les études de la Voie Lactée et des exo-planètes	2020
Lagrange	Lagadec Eric	Perte de masse des étoiles évoluées dans la galaxie et le Groupe Local	2020
GEPI	Di Matteo Paola	Modelling the Milky Way in the Gaia era	2020
CEA	Guilet Jérôme	Modelling stellar explosions and compact objects : the role of instabilities and magnetic fields	2021
IPAG	Berger Jean-Philippe	Interférométrie monomode infrarouge pour l'observation d'environnements protoplanétaires	2021
LESIA	Belkacem Kévin	Astérosismologie des étoiles de faible masse et couplage oscillations / convection turbulente	2021
LUTH	Le Tiec Alexandre	Modélisation unifiée de l'émission d'AGN détectés en rayons gamma	2021
CEA	Strugarek Antoine	Magnétisme dans les systèmes stellaires	2022
LERMA	Petitdemange Ludovic	Modelling deep conducting layers in planets and stars	2023
LAM	Santerne Alexandre	????	2023
Lagrange	Lamberts Astrid	Stellar populations of gravitational wave progenitors	2023
IRAP	Jouve Laurène	Magnétisme et rotation dans les intérieurs convectifs et radiatifs stellaires	2023



TABLE 7 – Détail des réponses méthodologiques au sondage 2022.

Catégorie méthodologique	Contenu
Observations	<i>Méthode d'observation</i> : imagerie, interférométrie (les 2 en lien avec l'HRA), spectroscopie, photométrie, spectropolarimétrie, polarimétrie, vitesses radiales, astérosismologie (ces deux dernières concernées aussi l'analyse de données) <i>Domaine de longueur d'onde</i> : domaines visible, IR, submm, mm, radio, X, UV, gamma
Analyse de données	Recoupement avec la méthodologie observation et des noms d'instruments <i>Des approches mathématiques génériques</i> : analyse bayésienne, processus gaussiens, séries temporelles, extraction d'objet, agrégation, statistique, algorithmes grand contraste <i>Des approches spécifiques à la thématique</i> : astérosismologie, vitesses radiales, analyse de spectre et continuum, cinématique, mouvements propres, modélisation courbes de lumière, activité stellaire, amas, transits, opacités, paramètres fondamentaux, chimie, abondances
Grands relevés	<i>Relevés des SNO</i> : Gaia, SLS <i>Liés à des instruments</i> : NIRPS, Sophie, 2MASS, SPICA, Pristine, TESS, PLATO, ALMA (Large Program) <i>Liés des objets</i> : transients, supernovae <i>Liés à des approches</i> : $\gamma$ , synthèse spectrale, spectroscopie, imagerie
Théorie / modélisation	Disque, accréation, jets, chocs; grains, poussières; dynamique des disque, stabilité planétaire; modèle de la galaxie, synthèse de population, synthèse spectrale; évolution stellaire; structure interne, turbulence, rotation, diffusion microscopique, accélérations radiatives, hydrodynamique, MHD, instabilités, nucléosynthèse, oscillations, astérosismologie; atmosphères stellaires, transfert radiatif, activité stellaire; dynamique orbitale; chimie; émission radio
Simulations numériques	Recoupement avec la catégorie "Théorie / Modélisation" <i>Processus physiques</i> : atmosphère, synthèse spectrale, transfert radiatif; hydrodynamique, MHD dont RAMSES, 3D; dynamo; chimie théorique; évolution stellaire; oscillations; dynamique orbitale, N-corps; formation des disques, disques, jets; vents stellaires; granulation <i>Méthodes HPC</i> : surtout calcul parallèle, un peu de CPU/GPU
Instrumentation	Recoupement avec la catégorie "Observations" et la liste des moyens (voir chapitre dédié), et peuvent concerner des éléments spécifiques des instruments (détecteurs, logiciels) <i>Méthodes observationnelles</i> : interférométrie, spectroscopie, spectroscopie Doppler, spectropolarimétrie, photométrie, imagerie, HRA, polarimétrie <i>Domaine de longueur d'onde</i> : $\gamma$ , visible, IR, submm <i>En termes d'instruments</i> : VLTI (MATISSE, GRAVITY), PLATO, SPICA, SPIRou / NIRPS / Sophie / SPIP / NeoNarval; C3 VISION; MARSU; MOONS, WEAVE, Spiakid (Attention : liste non exhaustive étant donné que les réponses n'étaient pas homogènes)
Big data/IA	Méthodes statistiques, réseaux de neurones, clustering, machine learning
Expérience de laboratoire	Chocs, jets hypersoniques; spectroscopie UV; production de listes de raies moléculaires et magnétisme; équation d'état

## BIBLIOGRAPHIE

- Abbott R., et al., 2021, arXiv e-prints, p. arXiv:2111.03606
- Abdikamalov E., Foglizzo T., 2020, MNRAS, 493, 3496
- Ahuir J., Brun A. S., Strugarek A., 2020, A&A, 635, A170
- Ahuir J., et al., 2021, A&A, 650, A126
- André P., et al., 2019, A&A, 629, L4
- André P. J., Palmeirim P., Arzoumanian D., 2022, A&A, 667, L1
- Arzoumanian D., et al., 2022, A&A, 660, A56
- Astoul A., et al., 2019, A&A, 631, A111
- Astoul A., et al., 2021, A&A, 647, A144
- Augustson K. C., Mathis S., 2019, ApJ, 874, 83
- Augustson K. C., Brun A. S., Toomre J., 2019, ApJ, 876, 83
- Aurière M., et al., 2007, A&A, 475, 1053
- Bógner R., et al., 2022, A&A, 667, A137
- Babusiaux C., et al., 2023, A&A, 674, A32
- Bailey J. E., et al., 2015, Nature, 517, 56
- Balbus S. A., Hawley J. F., 1991, ApJ, 376, 214
- Baraffe I., et al., 2022, A&A, 659, A53
- Baraffe I., et al., 2023, MNRAS, 519, 5333
- Barrère P., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2306.12296
- Baruteau C., et al., 2019, MNRAS, 486, 304
- Baruteau C., et al., 2021, MNRAS, 505, 359
- Belkacem K., et al., 2019, A&A, 625, A20
- Belkacem K., et al., 2021, A&A, 646, L5
- Bellotti S., et al., 2022, A&A, 657, A107
- Bellotti S., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2307.01016
- Benisty M., et al., 2021, ApJ, 916, L2
- Benisty M., et al., 2023, in Inutsuka S., et al., eds, Vol. 534, Astronomical Society of the Pacific Conference Series. p. 605
- Bergemann M., et al., 2019, A&A, 631, A80
- Blazère A., et al., 2016, A&A, 586, A97
- Blondin S., et al., 2022, A&A, 668, A163
- Boccaletti A., et al., 2020, A&A, 637, L5
- Bohn A. J., et al., 2022, A&A, 658, A183
- Bonavita M., et al., 2022, A&A, 663, A144
- Bonifacio P., et al., 2019, MNRAS, 487, 3797
- Bonifacio P., et al., 2021, A&A, 651, A79
- Bonne L., et al., 2022, A&A, 665, A22
- Boro Saikia S., et al., 2022, A&A, 658, A16
- Bossini D., et al., 2019, A&A, 623, A108
- Bouchaud K., et al., 2020, A&A, 633, A78
- Bouret J. C., et al., 2021, A&A, 647, A134
- Bouvier J., et al., 2020a, A&A, 636, A108
- Bouvier J., et al., 2020b, A&A, 643, A99
- Bouvier M., et al., 2021, A&A, 653, A117
- Bouvier M., et al., 2022, ApJ, 929, 10
- Breton S. N., et al., 2021, A&A, 647, A125
- Breuval L., et al., 2021, ApJ, 913, 38
- Breuval L., et al., 2022, ApJ, 939, 89
- Bron E., et al., 2021, A&A, 645, A28
- Brouillet N., et al., 2022, A&A, 665, A140
- Brož M., et al., 2021, A&A, 645, A51
- Brown E. L., et al., 2022, MNRAS, 514, 4300
- Brucy N., Hennebelle P., 2021, MNRAS, 503, 4192
- Brucy N., et al., 2023, A&A, 675, A144
- Brun A. S., et al., 2022, ApJ, 926, 21
- Brunn V., et al., 2023, MNRAS, 519, 5673

- Buellet A. C., et al., 2023, *A&A*, 674, A205
- Bugli M., et al., 2023, *MNRAS*, 520, 5622
- Bugnet L., 2022, *A&A*, 667, A68
- Bugnet L., et al., 2019, *A&A*, 624, A79
- Bugnet L., et al., 2021, *A&A*, 650, A53
- Burdonov K., et al., 2020, *A&A*, 642, A38
- Burdonov K., et al., 2022, *A&A*, 657, A112
- Buyschaert B., et al., 2019, *A&A*, 622, A67
- Cabedo V., et al., 2021, *A&A*, 653, A166
- Cabedo V., et al., 2023, *A&A*, 669, A90
- Caffau E., et al., 2019, *A&A*, 628, A46
- Caffau E., et al., 2020, *MNRAS*, 493, 4677
- Caffau E., et al., 2021, *A&A*, 651, A20
- Cang T. Q., et al., 2020, *A&A*, 643, A39
- Cang T. Q., et al., 2021, *A&A*, 654, A42
- Cannon E., et al., 2023, *A&A*, 675, A46
- Carmona A., et al., 2023, *A&A*, 674, A110
- Castellanos-Ramírez A., et al., 2021, *MNRAS*, 507, 4044
- Charbonnel C., et al., 2020, *A&A*, 633, A34
- Charpinet S., et al., 2019a, *A&A*, 628, L2
- Charpinet S., et al., 2019b, *A&A*, 632, A90
- Chevalier S., et al., 2023, *A&A*, 678, A19
- Chiavassa A., Brogi M., 2019, *A&A*, 631, A100
- Chiavassa A., et al., 2020, *A&A*, 640, A23
- Chiavassa A., et al., 2022, *A&A*, 658, A185
- Chomez A., et al., 2023a, *A&A*, 675, A205
- Chomez A., et al., 2023b, *A&A*, 676, L10
- Colombo S., et al., 2019, *A&A*, 631, A41
- Commerçon B., et al., 2022, *A&A*, 658, A52
- Cortés-Zuleta P., et al., 2023, *A&A*, 673, A14
- Courtois C., et al., 2022, *Physics of Plasmas*, 29, 123301
- Crawford C. L., et al., 2022, *A&A*, 667, A85
- Crawford C. L., et al., 2023, *MNRAS*, 521, 1674
- Creevey O., et al., 2019, *A&A*, 625, A33
- Creevey O. L., et al., 2023, *A&A*, 674, A26
- Cristofari P. I., et al., 2022a, *MNRAS*, 511, 1893
- Cristofari P. I., et al., 2022b, *MNRAS*, 516, 3802
- Cristofari P. I., et al., 2023, *MNRAS*, 522, 1342
- Crozet P., et al., 2023, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2310.04497
- Cruzalèbes P., et al., 2019, *MNRAS*, 490, 3158
- Csengeri T., et al., 2019, *A&A*, 632, A57
- Cuello N., Ménard F., Price D. J., 2023, *European Physical Journal Plus*, 138, 11
- Dalal S., et al., 2021, *A&A*, 651, A11
- Damian B., et al., 2021, *MNRAS*, 504, 2557
- David-Uraz A., et al., 2019, *MNRAS*, 487, 304
- Davies B., Plez B., 2021, *MNRAS*, 508, 5757
- Davies B., Plez B., Petrault M., 2022, *MNRAS*, 517, 1483
- De Simone M., et al., 2022, *MNRAS*, 512, 5214
- Deal M., et al., 2020, *A&A*, 633, A23
- Deal M., et al., 2021, *A&A*, 650, A125
- Deal M., et al., 2023, *A&A*, 673, A49
- Debras F., et al., 2023, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2308.14511
- Decin L., et al., 2020, *Science*, 369, 1497
- Deheuvels S., et al., 2020, *A&A*, 641, A117
- Deheuvels S., et al., 2023, *A&A*, 670, L16
- Dessart L., Hillier D. J., 2020, *A&A*, 643, L13
- Dessart L., Hillier D. J., 2022, *A&A*, 660, L9

- Dessart L., et al., 2021, A&A, 651, A19
- Donati J. F., Landstreet J. D., 2009, ARA&A, 47, 333
- Donati J. F., et al., 2019, MNRAS, 483, L1
- Donati J. F., et al., 2020, MNRAS, 498, 5684
- Donati J. F., et al., 2023a, MNRAS,
- Donati J. F., et al., 2023b, arXiv e-prints, p. arXiv:2307.14190
- Donati J. F., et al., 2023c, MNRAS, 525, 455
- Drevon J., et al., 2022, A&A, 665, A32
- Drossart P., et al., 2022, in 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July. p. 565
- Dumont T., et al., 2021a, A&A, 646, A48
- Dumont T., et al., 2021b, A&A, 654, A46
- Eggenberger P., et al., 2017, A&A, 599, A18
- Eggenberger P., et al., 2019, A&A, 621, A66
- Emeriau-Viard C., Brun A. S., 2017, ApJ, 846, 8
- Evano B., Lignières F., Georgeot B., 2019, A&A, 631, A140
- Falize E., Michaut C., Bouquet S., 2011, The Astrophysical Journal, 730, 96
- Ferrari M., et al., 2019, in American Astronomical Society Meeting Abstracts #233. p. 148.09
- Finociety B., Donati J. F., 2022, MNRAS, 516, 5887
- Finociety B., et al., 2023, MNRAS, 526, 4627
- Fortin F., García F., Chaty S., 2022, A&A, 665, A69
- Fouqué P., et al., 2023, A&A, 672, A52
- François P., et al., 2020, A&A, 642, A25
- Fréour L., et al., 2023, MNRAS, 520, 3201
- Fuller J., Piro A. L., Jermyn A. S., 2019, MNRAS,
- GRAVITY Collaboration et al., 2019, A&A, 632, A53
- GRAVITY Collaboration et al., 2021, A&A, 655, A73
- Gagnier D., et al., 2019, A&A, 625, A89
- Gaia Collaboration et al., 2021, A&A, 649, A6
- Gaia Collaboration et al., 2023a, A&A, 674, A34
- Gaia Collaboration et al., 2023b, A&A, 674, A38
- Gaia Collaboration et al., 2023c, A&A, 674, A39
- Galametz M., et al., 2019, A&A, 632, A5
- Galametz M., et al., 2020, A&A, 644, A47
- Galli P. A. B., et al., 2019, A&A, 630, A137
- Galli P. A. B., et al., 2020a, A&A, 634, A98
- Galli P. A. B., et al., 2020b, A&A, 643, A148
- Galli P. A. B., et al., 2021a, A&A, 646, A46
- Galli P. A. B., et al., 2021b, A&A, 654, A122
- García A. J. L., Gonzalez J.-F., 2020, MNRAS, 493, 1788
- García Hernández A., et al., 2009, A&A, 506, 79
- García F., et al., 2021, A&A, 649, A114
- Gaudel M., et al., 2020, A&A, 637, A92
- Gaudel M., et al., 2023, A&A, 670, A59
- Gent M. R., et al., 2022, A&A, 658, A147
- Giammichele N., Charpinet S., Brassard P., 2022, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 9, 879045
- Gomes da Silva J., et al., 2021, A&A, 646, A77
- González-Torà G., et al., 2021, MNRAS, 505, 4422
- Gonzalez J.-F., et al., 2020, MNRAS, 499, 3837
- González M., et al., 2021, A&A, 647, A14
- Götberg Y., et al., 2020, ApJ, 904, 56
- Gouhier B., Lignières F., Jouve L., 2021, A&A, 648, A109
- Gouhier B., Jouve L., Lignières F., 2022, A&A, 661, A119
- Grevesse N., Sauval A. J., 1998, Space Sci. Rev., 85, 161
- Grosso N., et al., 2020, A&A, 638, L4
- Grunhut J. H., et al., 2017, MNRAS, 465, 2432

- Guillet V., et al., 2020, A&A, 643, A17
- Halbwachs J. L., et al., 2020, MNRAS, 496, 1355
- Halbwachs J.-L., et al., 2023, A&A, 674, A9
- Heidari N., et al., 2022, A&A, 658, A176
- Hennebelle P., 2021, A&A, 655, A3
- Hennebelle P., et al., 2022, A&A, 668, A147
- Hocdé V., et al., 2020a, A&A, 633, A47
- Hocdé V., et al., 2020b, A&A, 633, A47
- Hocdé V., et al., 2021, A&A, 651, A92
- Houdayer P. S., et al., 2021, A&A, 655, A85
- Houdayer P. S., Reese D. R., Goupil M.-J., 2022, A&A, 663, A60
- Hui-Bon-Hoa A., 2021, A&A, 646, L6
- Hui-Bon-Hoa A., Pain J. C., Richard O., 2022, A&A, 658, A70
- Jacquemin-Ide J., Ferreira J., Lesur G., 2019, MNRAS, 490, 3112
- Jaupart E., Chabrier G., 2021, ApJ, 922, L36
- Jaupart E., Laibe G., 2020, MNRAS, 492, 4591
- Javanmardi B., et al., 2021, ApJ, 911, 12
- Jouve L., Lignières F., Gaurat M., 2020, A&A, 641, A13
- Katz D., et al., 2023, A&A, 674, A5
- Kervella P., Arenou F., Thévenin E., 2022, A&A, 657, A7
- Khlar B., et al., 2019, Phys. Rev. Lett., 123, 205001
- Klein B., Donati J. F., 2020, MNRAS, 493, L92
- Klein B., et al., 2021a, MNRAS, 500, 1844
- Klein B., et al., 2021b, MNRAS, 502, 188
- Klein B., et al., 2022, MNRAS, 512, 5067
- Klein B., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2308.14510
- Kluska J., et al., 2020, A&A, 636, A116
- Kokoulina E., et al., 2021, A&A, 652, A61
- König P. C., et al., 2022, A&A, 666, A183
- Kordopatis G., et al., 2023, A&A, 669, A104
- Kravchenko K., et al., 2021, A&A, 650, L17
- Kulenthirarajah L., et al., 2019, MNRAS, 487, 1335
- Kumar R., Jouve L., Nandy D., 2019, A&A, 623, A54
- Lagarde N., et al., 2021, A&A, 654, A13
- Lamberts A., et al., 2019, MNRAS, 490, 5888
- Langlois M., et al., 2021, A&A, 651, A71
- Le Gal R., et al., 2020, ApJ, 898, 131
- Le Gal R., et al., 2021, ApJS, 257, 12
- Le Gouellec V. J. M., et al., 2019, ApJ, 885, 106
- Le Gouellec V. J. M., et al., 2020, A&A, 644, A11
- Lebreton Y., Reese D. R., 2020, A&A, 642, A88
- Lebreuilly U., Commerçon B., Laibe G., 2020, A&A, 641, A112
- Lebreuilly U., et al., 2021a, ApJ, 917, L10
- Lebreuilly U., et al., 2021b, ApJ, 917, L10
- Lehmann L. T., Donati J. F., 2022, MNRAS, 514, 2333
- Lehmann L. T., et al., 2024, MNRAS, 527, 4330
- Lesur G. R. J., 2021, A&A, 650, A35
- Lesur G., et al., 2023, in Inutsuka S., et al., eds, Vol. 534, Astronomical Society of the Pacific Conference Series. p. 465
- Li G., et al., 2022, Nature, 610, 43
- Li G., et al., 2023, A&A accepted
- Lignières F., et al., 2009, A&A, 500, L41
- Lisle I., 1992, ] <http://dx.doi.org/10.14288/1.0079820>
- Lodieu N., et al., 2019, A&A, 628, A61
- Lombart M., Laibe G., 2021, MNRAS, 501, 4298
- Lombart M., Hutchison M., Lee Y.-N., 2022, MNRAS, 517, 2012



- Lopez T., 2021, Theses, Aix Marseille Université, <https://hal.science/tel-03254426>
- López Ariste A., et al., 2019, A&A, 632, A30
- López Ariste A., et al., 2022, A&A, 661, A91
- López Ariste A., et al., 2023, A&A, 670, A62
- Louvet F., et al., 2021, A&A, 653, A157
- Magg E., et al., 2022, A&A, 661, A140
- Magrini L., et al., 2021, A&A, 651, A84
- Maimone M. C., 2022, Theses, Université Côte d'Azur, <https://theses.hal.science/tel-04050163>
- Marchand P., et al., 2019, A&A, 631, A66
- Marchand P., et al., 2023, A&A, 670, A61
- Marcolino W. L. F., et al., 2022, MNRAS, 511, 5104
- Maret S., et al., 2020a, A&A, 635, A15
- Maret S., et al., 2020b, A&A, 635, A15
- Marsden S. C., et al., 2023, MNRAS, 522, 792
- Marshak R. E., 1958, Physics of Fluids, 1, 24
- Martel É., Lesur G., 2022, A&A, 667, A17
- Martins F., Palacios A., 2021, A&A, 645, A67
- Martins F., Palacios A., 2022, A&A, 659, A163
- Martins F., et al., 2019, A&A, 627, A170
- Martins F., et al., 2020a, A&A, 633, A9
- Martins F., et al., 2020b, A&A, 635, A52
- Martins F., Chantreau W., Charbonnel C., 2021, A&A, 650, A162
- Martioli E., et al., 2020, A&A, 641, L1
- Martioli E., et al., 2022, A&A, 660, A86
- Mathis S., Bugnet L., 2023, A&A, 676, L9
- Mathis S., et al., 2021, A&A, 647, A122
- Maury A. J., et al., 2019a, A&A, 621, A76
- Maury A. J., et al., 2019b, A&A, 621, A76
- Maury A., Hennebelle P., Girart J. M., 2022, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 9, 949223
- Meduri D. G., Lignières F., Jouve L., 2019, Phys. Rev. E, 100, 013110
- Meduri D., Jouve L., Lignières F., 2023, accepted in A&A
- Ménard F., et al., 2020, A&A, 639, L1
- Men'shchikov A., 2023, A&A, 675, A185
- Mercimek S., et al., 2022, A&A, 659, A67
- Meunier N., Lagrange A. M., 2019a, A&A, 625, L6
- Meunier N., Lagrange A. M., 2019b, A&A, 629, A42
- Meunier N., Lagrange A. M., 2020a, A&A, 638, A54
- Meunier N., Lagrange A. M., 2020b, A&A, 642, A157
- Meunier N., Lagrange A. M., 2022, A&A, 659, A104
- Meunier N., et al., 2019, A&A, 627, A56
- Meunier N., Lagrange A. M., Borgniet S., 2020, A&A, 644, A77
- Meunier N., et al., 2022, A&A, 658, A57
- Meunier N., et al., 2023, A&A, 676, A82
- Michoulier S., Gonzalez J.-F., 2022, MNRAS, 517, 3064
- Mignon-Risse R., et al., 2020, A&A, 635, A42
- Mignon-Risse R., et al., 2021a, A&A, 652, A69
- Mignon-Risse R., González M., Commerçon B., 2021b, A&A, 656, A85
- Mignon L., et al., 2023, A&A, 675, A168
- Miret-Roig N., et al., 2020, A&A, 642, A179
- Miret-Roig N., et al., 2022a, Nature Astronomy, 6, 89
- Miret-Roig N., et al., 2022b, A&A, 667, A163
- Molet J., et al., 2019, A&A, 626, A132
- Monier R., et al., 2019, AJ, 158, 157
- Montargès M., et al., 2018, A&A, 614, A12
- Montargès M., et al., 2021, Nature, 594, 365

- Montargès M., et al., 2023, A&A, 671, A96
- Moore A. S., et al., 2015, J. Quant. Spec. Radiat. Transf., 159, 19
- Morel T., et al., 2021, A&A, 646, A78
- Motte F., et al., 2022, A&A, 662, A8
- Moutou C., et al., 2020, A&A, 642, A72
- Namekata K., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2311.07380
- Nardetto N., et al., 2023, A&A, 671, A14
- Nicholson B. A., et al., 2021, MNRAS, 504, 2461
- Noll A., Deheuvels S., 2023, A&A, 676, A70
- Noll A., Deheuvels S., Ballot J., 2021, A&A, 647, A187
- Nony T., 2019, PhD thesis, Universite de Bordeaux, Talence, France
- Noraz Q., et al., 2022a, A&A, 658, A144
- Noraz Q., et al., 2022b, A&A, 667, A50
- Olivares J., et al., 2023, A&A, 671, A1
- Ouazzani R. M., et al., 2019, A&A, 626, A121
- Ouazzani R. M., et al., 2020, A&A, 640, A49
- Palakkatharappil D. B., Creevey O. L., 2023, A&A, 674, A146
- Paletou F., Peymirat C., 2021, A&A, 649, A165
- Paletou F., Sampoorana M., Peymirat C., 2023, A&A, 671, A93
- Palla M., et al., 2022, A&A, 663, A125
- Pantolmos G., Zanni C., Bouvier J., 2020, A&A, 643, A129
- Pascucci I., et al., 2023, in Inutsuka S., et al., eds, Vol. 534, Astronomical Society of the Pacific Conference Series. p. 567
- Perdigon J., et al., 2021, A&A, 647, A162
- Perraut K., et al., 2020, A&A, 642, A101
- Perri B., et al., 2021, ApJ, 910, 50
- Perrin G., et al., 2020, A&A, 642, A82
- Petit V., et al., 2019, MNRAS, 489, 5669
- Petit P., et al., 2021, A&A, 648, A55
- Petit P., et al., 2022, A&A, 666, A20
- Petitdemange L., Marcotte F., Gissinger C., 2023, Science, 379, 300
- Petrov L., Kovalev Y. Y., Plavin A. V., 2019, MNRAS, 482, 3023
- Philidet J., et al., 2020, Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 114, 336
- Philidet J., Belkacem K., Goupil M. J., 2021, A&A, 656, A95
- Philidet J., Belkacem K., Goupil M. J., 2022, A&A, 664, A164
- Phuong N. T., et al., 2020a, A&A, 635, L9
- Phuong N. T., et al., 2020b, A&A, 635, A12
- Pietrzyński G., et al., 2019, Nature, 567, 200
- Pinçon C., Takata M., Mosser B., 2019, A&A, 626, A125
- Pinçon C., Goupil M. J., Belkacem K., 2020, A&A, 634, A68
- Pinte C., et al., 2019, Nature Astronomy, 3, 1109
- Pinte C., et al., 2020, ApJ, 890, L9
- Pouilly K., et al., 2020, A&A, 642, A99
- Pouilly K., et al., 2021, A&A, 656, A50
- Pouteau Y., et al., 2022, A&A, 664, A26
- Prat V., et al., 2019, A&A, 627, A64
- Prat V., et al., 2020, A&A, 636, A100
- Reboul-Salze A., et al., 2021, A&A, 645, A109
- Reboul-Salze A., et al., 2022, A&A, 667, A94
- Recio-Blanco A., et al., 2023, A&A, 674, A29
- Revet G., et al., 2017, Science Advances, 3, e1700982
- Revet G., et al., 2019, High Energy Density Physics, 33, 100711

- Revet G., et al., 2021, *Nature Communications*, 12, 762
- Revol A., et al., 2023, *A&A*, 674, A227
- Reylé C., et al., 2021, *A&A*, 650, A201
- Rincon F., 2021, *Physical Review Fluids*, 6, L121701
- Riols A., Lesur G., 2019, *A&A*, 625, A108
- Riols A., Lesur G., Menard F., 2020, *A&A*, 639, A95
- Rivet J. P., et al., 2020, *MNRAS*, 494, 218
- Robbe-Dubois S., et al., 2022, *MNRAS*, 510, 82
- Robitaille J. F., et al., 2020, *A&A*, 641, A138
- Rodríguez Díaz L. F., et al., 2022a, *MNRAS*, 514, 1741
- Rodríguez Díaz L. F., et al., 2022b, *MNRAS*, 514, 1741
- Russeil D., et al., 2020, *A&A*, 642, A21
- Ryutov D., et al., 1999, *ApJ*, 518, 821
- Salsi A., et al., 2020, *A&A*, 640, A2
- Salsi A., et al., 2021, *A&A*, 652, A26
- Salsi A., et al., 2022, *A&A*, 662, A120
- Samadi R., et al., 2019, *A&A*, 624, A117
- Santos-Peral P., et al., 2020, *A&A*, 639, A140
- Santos-Peral P., et al., 2021, *A&A*, 653, A85
- Santos-Peral P., et al., 2023, *A&A*, 672, A166
- Santos A. R. G., et al., 2019, *ApJS*, 244, 21
- Sarro L. M., et al., 2023, *A&A*, 669, A139
- Sauty C., et al., 2022, *A&A*, 664, A176
- Schuller F., et al., 2021, *A&A*, 651, A36
- Sikora J., 2019, PhD thesis, Queens University, Canada
- Simon M., et al., 2019, *ApJ*, 884, 42
- Soubiran C., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2310.11302
- Soulain A., et al., 2023, *MNRAS*, 518, 3211
- Sousa A. P., et al., 2021, *A&A*, 649, A68
- Spite M., et al., 2019, *A&A*, 624, A44
- Strugarek A., et al., 2019, *ApJ*, 881, 136
- Strugarek A., et al., 2022, *MNRAS*, 512, 4556
- Sulis S., Mary D., Bigot L., 2020, *A&A*, 635, A146
- Sulis S., et al., 2022, *A&A*, 667, A104
- Sulis S., et al., 2023, *A&A*, 670, A24
- Tabone B., et al., 2020, *A&A*, 640, A82
- Tabone B., et al., 2022, *MNRAS*, 512, L74
- Takabe H., 2001, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 143, 202
- Takehiro S.-i., Brun A. S., Yamada M., 2020, *ApJ*, 893, 83
- Tarricq Y., et al., 2021, *A&A*, 647, A19
- Tarricq Y., et al., 2022, *A&A*, 659, A59
- Tayler R. J., 1973, *MNRAS*, 161, 365
- Tessore B., et al., 2021, *A&A*, 647, A27
- Thomasson B., et al., 2022, *A&A*, 665, A119
- Thomson-Paressant K., et al., 2021, *MNRAS*, 500, 1992
- Tisserand P., et al., 2020, *A&A*, 635, A14
- Tisserand P., et al., 2022, *A&A*, 667, A83
- Tobon Valencia V., et al., 2022, *A&A*, 666, A68
- Tranchant V., et al., 2022, *The Astrophysical Journal*, 936, 14
- Turner J. D., et al., 2021, *A&A*, 645, A59
- Valdivia V., et al., 2019, *MNRAS*, 488, 4897
- Van Reeth T., et al., 2018, *A&A*, 618, A24
- Vericel A., et al., 2021, *MNRAS*, 507, 2318
- Vigan A., et al., 2021, *A&A*, 651, A72
- Villebrun F., et al., 2019a, *A&A*, 622, A72
- Villebrun F., et al., 2019b, *A&A*, 622, A72

Villenave M., et al., 2020, A&A, 642, A164  
Vink J. S., et al., 2023, A&A, 675, A154  
Wade G. A., et al., 2016, MNRAS, 456, 2  
Wafflard-Fernandez G., Baruteau C., 2020, MNRAS,  
493, 5892  
Wafflard-Fernandez G., Lesur G., 2023, arXiv e-  
prints, p. arXiv:2305.11784  
Waugh R. F. P., et al., 2021, MNRAS, 505, 5104  
Zahn J., 1991, A&A, 252, 179  
Zahn J. P., 1992, A&A, 265, 115  
Zaire B., et al., 2022, MNRAS, 517, 3392  
Zavagno A., et al., 2020, A&A, 638, A7  
Zavagno A., et al., 2023, A&A, 669, A120  
Zhang J., et al., 2023, ApJ, 953, 65  
de Albuquerque R. M. G., et al., 2020, A&A, 636, A86  
de Almeida E. S. G., et al., 2019, A&A, 628, A36  
de Valon A., et al., 2020, A&A, 634, L12  
de Valon A., et al., 2022, A&A, 668, A78