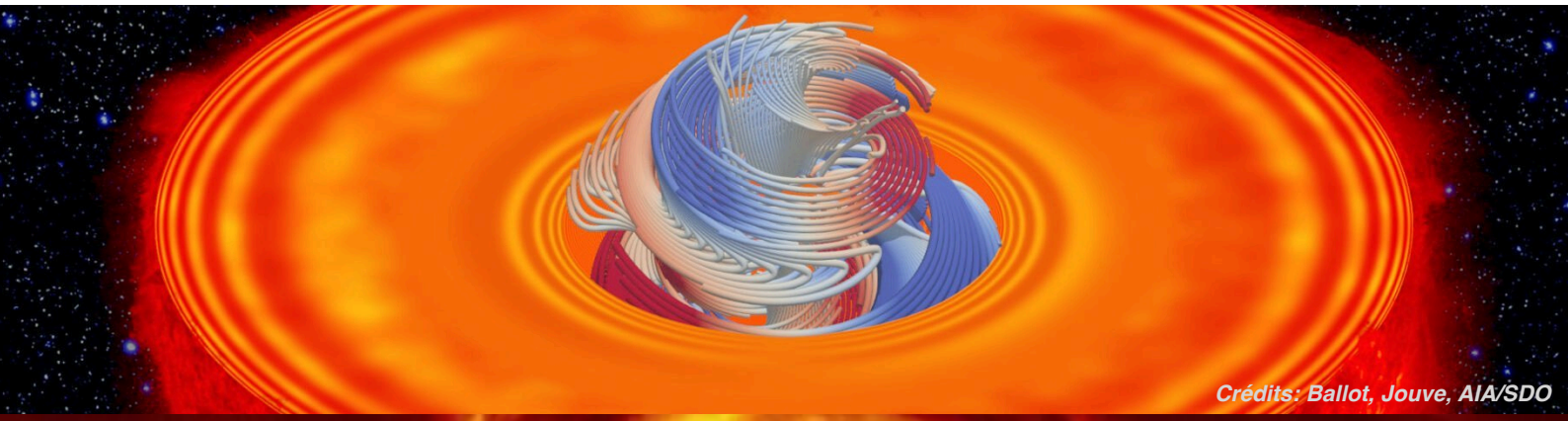
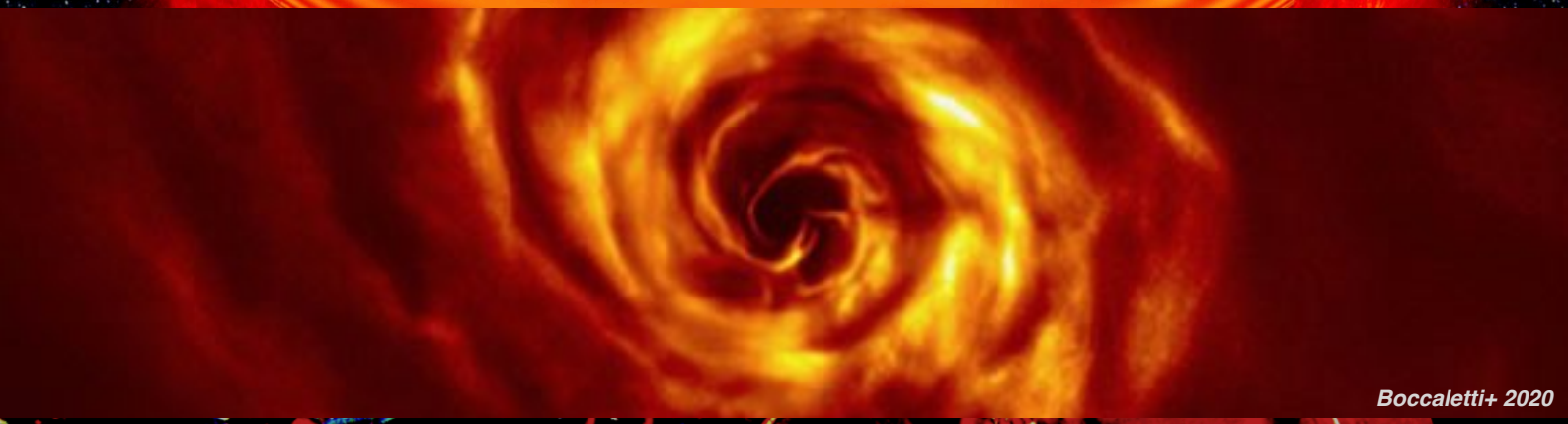
Programme National de Physique Stellaire


Crédits: Ballot, Jouve, AIA/SDO


Boccaletti+ 2020

Crédits: Champion, Delahaye

Bilan 2019-2023
Prospective 2024-2028

PNPS
Programme National de Physique Stellaire

cnrs

cnes
CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

cea

Table des matières

Le conseil scientifique du PNPS : fonctionnement et bilan **6**
Les missions et la composition du CS . . . 6
Financement de projets . . . 7
Animation et formation . . . 9
Représentants du CS dans les comités . . . 11

Panorama de la communauté PNPS **13**
Cartographie de la communauté PNPS . . . 13
Personnels permanents . . . 13
Thèses et Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) . . . 15
Recrutements sur la période 2019-2023 . . . 17
Distinctions . . . 18
Périmètre scientifique . . . 18
Thématiques . . . 18
Méthodologies . . . 19
Interfaces . . . 20

Les moyens au coeur des activités du PNPS **24**
Les instruments, équipements et les infrastructures . . . 24
Les télescopes de 2M nationaux . . . 26
Les services nationaux d'observation . . . 28
Les codes de simulations numériques . . . 30

Origines : formation stellaire et disques protoplanétaires **31**
Introduction . . . 31
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 . . . 33
Etoiles de pré-séquence principale : accrétion/éjection, structure, environnement . . . 34
Caractérisation des disques protoplanétaires . . . 34
Dynamique et évolution des disques protoplanétaires . . . 35
La fonction de masse . . . 36
Conclusion . . . 37

Champ magnétique et activité stellaire **38**
Introduction . . . 38
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . 38

Champ magnétique dans les zones radiatives . . . 39
Champ magnétique dans les zones convectives . . . 41
Impact de la variabilité stellaire sur la détectabilité et la caractérisation des exoplanètes . . . 45
Conclusion . . . 46

Evolution, structure interne et atmosphère **47**
Introduction . . . 47
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . 47
Structure interne et processus dynamiques . . . 47
Atmosphères Stellaires . . . 52
Paramètres fondamentaux . . . 54
Conclusion . . . 57

Interactions : étoile-planète.s, étoile-disque, étoile-étoile.s, populations stellaires **59**
Introduction . . . 59
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . 59
Interactions étoile-planète . . . 59
Interactions étoile-étoile . . . 61
Interactions étoile-disque . . . 62
Conclusion . . . 63

Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes **64**
Introduction . . . 64
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . 64
Perte de masse : origines et propriétés . . . 65
Comment les étoiles ont-elles évolué pour donner les objets compacts et phénomènes transitoires qu'on observe ? . . . 66
Conclusion . . . 69

Astrophysique de laboratoire **70**
Introduction . . . 70
Les grandes avancées sur la période 2019-2023 . . . 70
Physique atomique et moléculaire . . . 71
Propriétés des poussières . . . 73
Phenomènes d'accrétion et éjection . . . 74
Conclusion . . . 75

Prospective 2024-2028 **76**
Organisation du colloque de prospective . . . 76
Les grandes évolutions thématiques et méthodologiques . . . 77
Les grandes questions scientifiques et les évolutions à venir . . . 77
Les évolutions méthodologiques . . . 81
Moyens et priorités instrumentales . . . 83
Les enjeux de la mandature 2024-2028+ . . . 88
Des compétences structurantes à conserver et renforcer . . . 88

Perénniser les lignes de forces 89
Préparer l'avenir en soutenant les évolutions majeures 90
Positionner le PNPS dans un écosystème de recherche en mutation 90

A Annexes **95**

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(rice). 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, Paris
- 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 choisi 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 à 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.

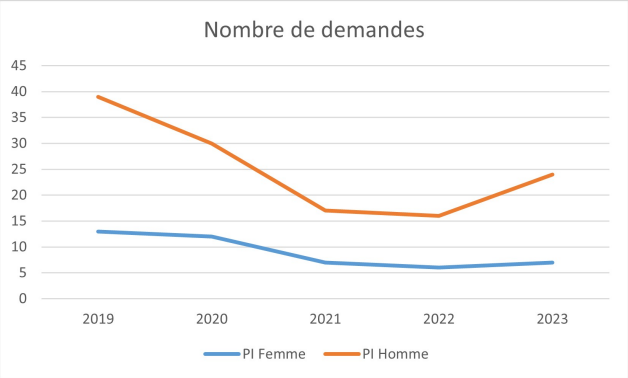


Figure 1 – Nombre de demandes sur l'ensemble des AO (hors budget de fonctionnement du CS). L'évolution est similaire pour les porteurs femmes et hommes, avec une proportion de 26% de demandes portées par des femmes, ce qui est représentatif de la communauté.

Ainsi, à la fois le nombre et le montant total des demandes faites au CS du PNPS ont 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 important 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

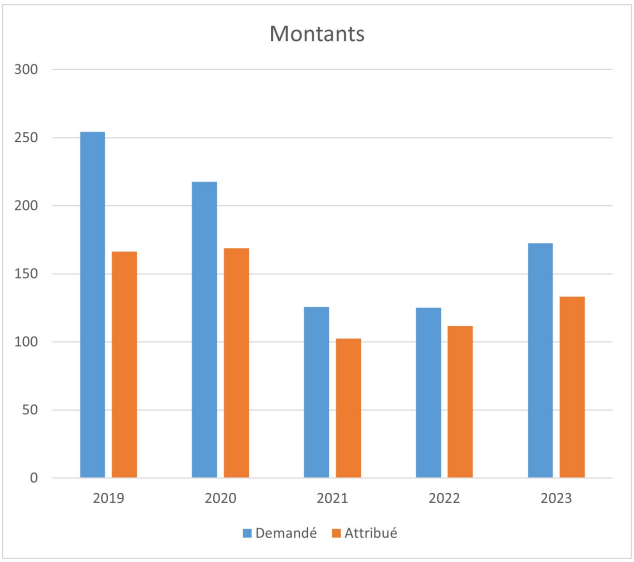


Figure 2 – Montants demandés et attribués (en k€) par AO. Notons que le pourcentage d'attribution est en moyenne de 84% pour les femmes et de 74% pour les hommes.

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 le chapitre *Panorama de la communauté* 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, agences spatiales et PIA. Les montants sont bien sûr 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 euro-

péens (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.

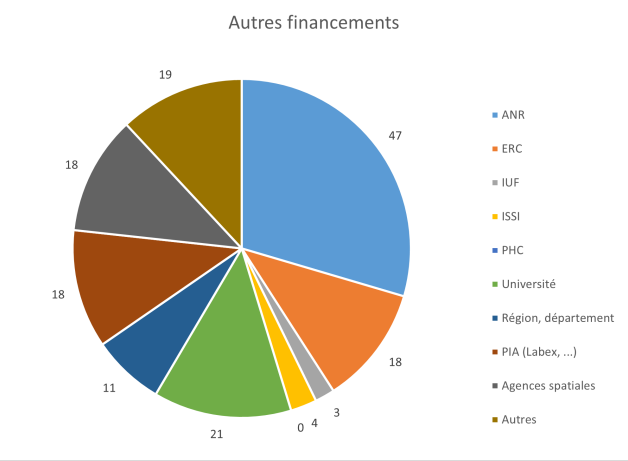


FIGURE 3 – Nombre de personnes, ayant répondu au sondage 2022, ayant beneficié de financements autres que ceux des PNs et AS.

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€ attribués), 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 inférieure donne 331 publications avec une baisse notable en 2021-2022 durant la période pandémique [1]. Au-delà du rôle du CS, nous avons établi une liste de publications de la communauté PNPS à l'aide d'une requête ADS basée sur les mots-clés pertinents et les membres de la communautés PNPS comme auteur (jusqu'en 5ème position), suivi d'une sélection manuelle pour éliminer les publications n'entrant pas dans ce cadre (publications hors thématiques PNPS, homonymes...), ce qui a ammené à une liste de 1134 publications sur la période 2019-2023.

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.

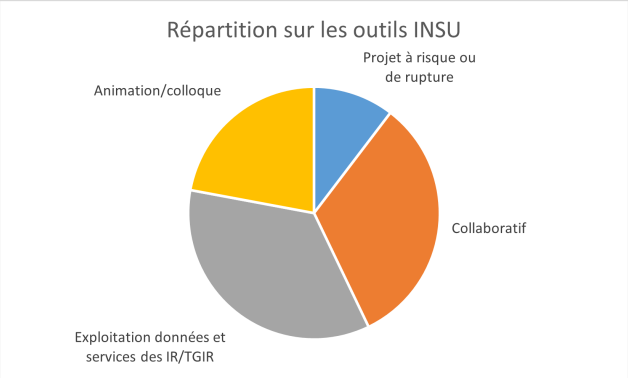


FIGURE 4 – Répartition des demandes sur les outils INSU (depuis l'AO 2021 inclus).

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 émarger à plusieurs outils (il est en particulier possible d'être à la fois sur Collaboratif, Exploitation 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

Pour le nombre de demandes et des montants demandés / 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.

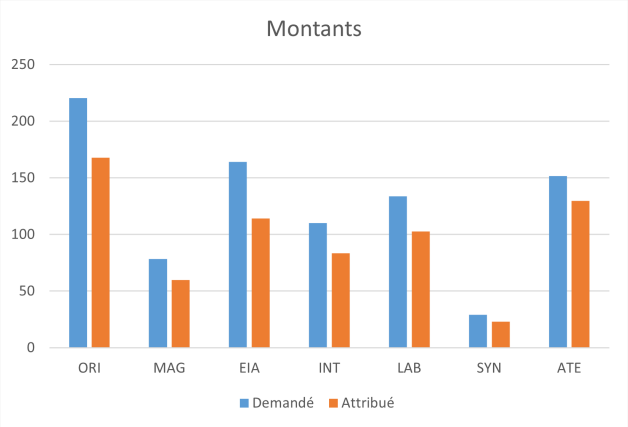


FIGURE 5 – Montant demandés et attribués (en k€) par thème prioritaire et intégré sur la période 2019-2023.

Enfin, de nombreuses demandes émargent également 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.

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 des écoles Evry Schatzman), des actions plus ponctuelles (par ex. le financement 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 7 en appendice. 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 8 en appendice).

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 9 de l'appendice 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 lesquels 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 10 de l'appendice 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 bénéficié d'une refonte en 2021, sous la responsabilité de Clément Baruteau. Le site est hébergé par le CNRS (https://pnps.cnrs.fr/).

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

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	2021-2025
	Astrid Lamberts	COSMERGE	2021-2024
	Alexandra Recio Blanco	ArchéoGal	2015-2020
LESIA	Sylvestre Lacour	exoVLTI	2021-2025
	Pierre Kervella	UnlockCepheids	2015-2020
LUPM	Dahbia Talbi	ODUST	2022-2026
IPAG	Frédérique Motte	COSMHIC	2021-2025
	Mickaël Bonnefoy	FRAME	2021-2025
	Xavier Delfosse	SPLASH	2018-2023
	François Ménard	Planet-forming Disks	2016-2021
	Evelyne Alecian	PROMETHEE	2023-2026
IPGP	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

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

Laboratoire	Nom du porteur	Titre	Années
CEA	Anaëlle Maury	MagneticYSOs	2016-2022
	Anaëlle Maury	PEBBLES	2023-2028
	Patrick Hennebelle	ECOGAL	2021-2026
	Allan Sacha Brun	Whole Sun	2019-2026
	Stéphane Mathis	SPIRE	2015-2021
	Jérôme Guilet	MagBURST	2017-2023
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
	Myriam Benisty	PROTOPLANETS	2021-2026
IRAP	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 Pietrzynski	CepBin	2016-2021
	Pierre Kervella et al.	UniverScale	2021-2027

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 utilisée 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 PNPS, 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 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 spectro-polarimètre 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.

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, voir https://cet.cnrs.fr/) 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 (jusque 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 demande 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.

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 - jusque 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 [1]. Pour aller plus loin et affiner notre analyse, nous nous sommes appuyés 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-étoile. 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 3), 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), effectuée aux mêmes dates. La seconde source d'information évoquée ci-dessus correspond aux entretiens effectués lors de la période Juin-Septembre 2023 entre la direction du PNPS et les équipes identifiées comme ayant une part significative de leurs activités autour des thèmes de physique stellaire (voir Table 4). 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.

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

Table 3 – Sondage effectué par le PNPS en direction de la communauté en Février-Mars 2022 : quelques chiffres clés

Source	Nombre
Enquête 2022-2023	181 réponses
	147 permanents
	31 non-permanents
	6 émérites
Dir. Unités	15 laboratoires
forum-étoile	334 abonnés

Cartographie de la communauté PNPS

Personnels permanents

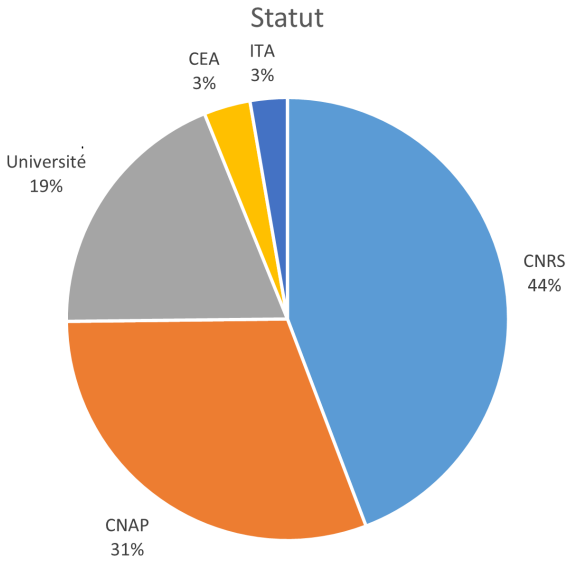
Le nombre de permanents dans le domaine de la physique stellaire (principalement des chercheurs mais aussi des ingénieurs fortement intégrés dans les équipes) ayant répondu à l'enquête est de 147, auxquels s'ajoutent 6 émérites. Nous estimons également qu'il y a de l'ordre de 70 permanents en plus impliqués en physique stellaire d'après les abonnés sur la liste forum-étoile. 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. 7, panel du haut).

La répartition hommes-femmes pour les permanents (elle est similaire sur l'ensemble des personnels ayant répondu au sondage) est présentée en Fig. 7 (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 astronomie-astrophysique en France (soit 23% de femmes, basé sur les 707 personnes dans les corps du CNRS, CNU et CNAP en 2020 [2]; 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

2. http://sf2a.eu/Bot_Buat.pdf

TABLE 4 – 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 effectué 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 étoile
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
IAS	*Physique Solaire et Stellaire*
GEPI	Physique stellaire et galactique
LPENS	Astrophysique
CRAL	*AstroENS*
CRAL	AIRI
AIM	étoiles/soleil LDE3
AIM	MIS / formation stellaire LFEMI
ObAS	*Non applicable*
LUTH	*Non applicable*



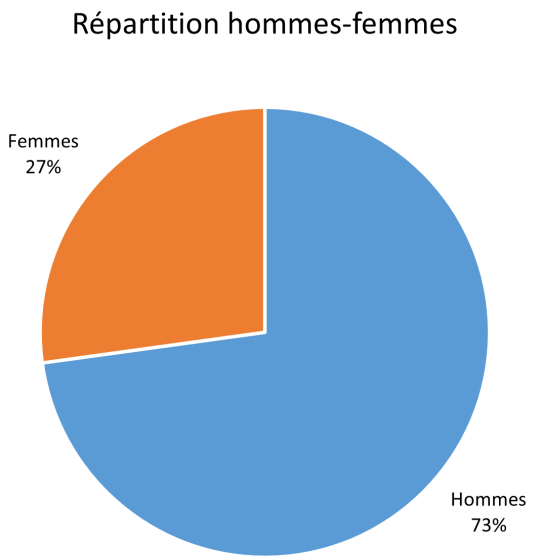


FIGURE 7 – (Figure du haut) Statut sur l'ensemble des permanents (portant sur 147 réponses). Note : "Université" correspond ici aux maîtres de conférence et professeurs uniquement, afin d'identifier les personnels CNAP. (Figure du bas) Répartition hommes/femmes sur l'ensemble des permanents.

physique stellaire (Fig. 8). 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)

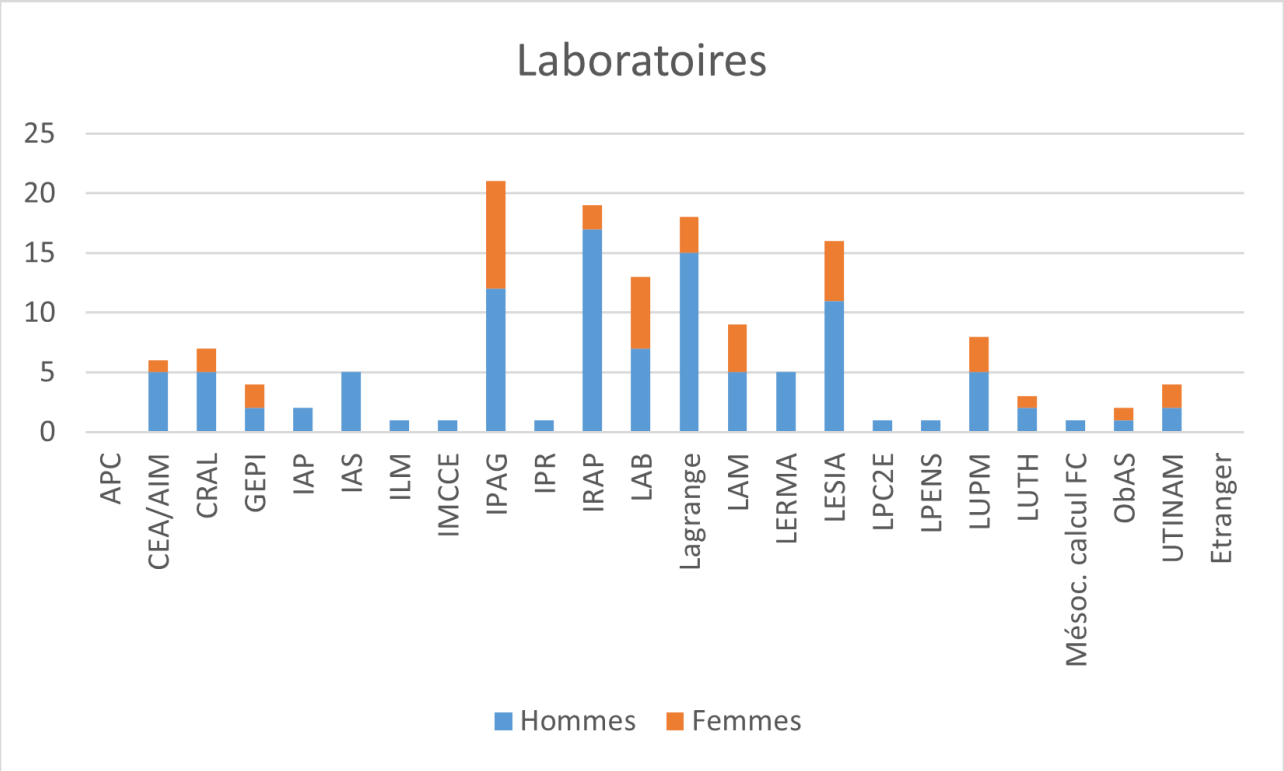


FIGURE 8 – Répartition des permanents hommes (bleu) et femmes (orange) par laboratoire (sur 184 réponses).

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 de 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. 9). Il y a bien-sûr quelques pôles importants (avec 6 laboratoires incluants plus de dix permanents) mais aucun pôle dominant ne se dégage de la cartographie (voir aussi Fig. 8). Une comparaison avec la situation telle que présentée dans le bilan 2015-2018 semble montrer que cette répartition est relativement stable.

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 22 en appendice donne un recensement exhaustif des thèses soutenues et en cours. Il apparait que le nombre total des thèses est de 174 (102 soutenues et 72 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 com-

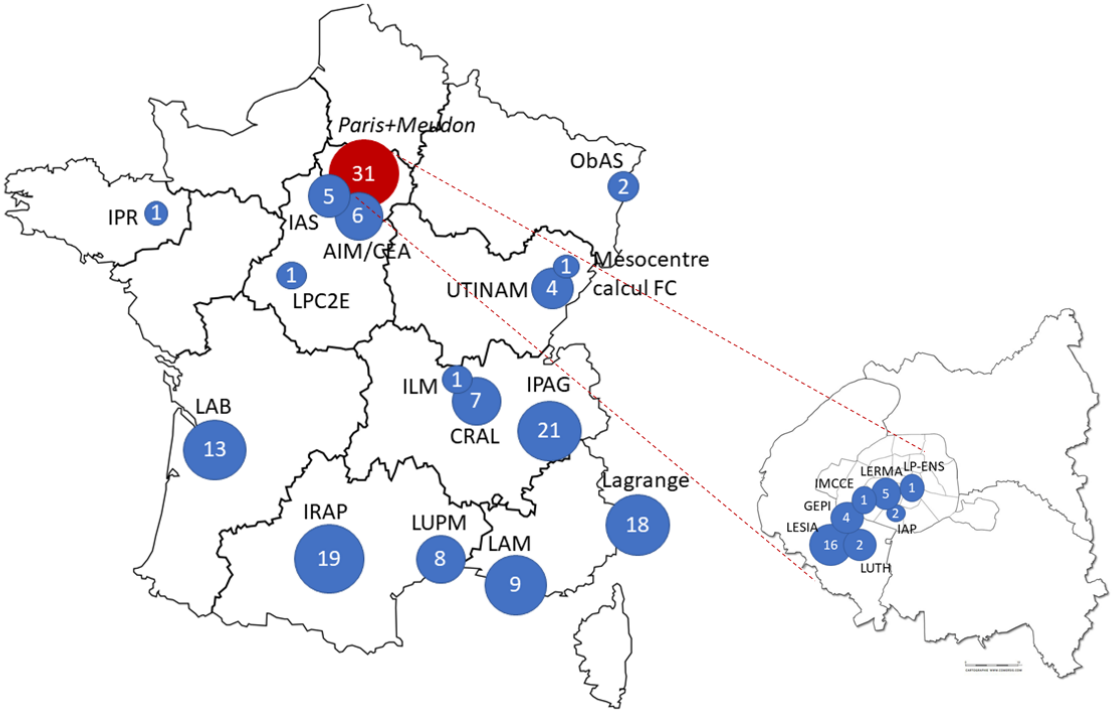


FIGURE 9 – Répartition géographique des personnels permanents ayant répondu à l'enquête par laboratoire, correspondant à un total de 22 laboratoires en France.

munauté, que l'on peut également corréler 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. 10, 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 Evolution / 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 Fig. 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. 11, qui permet d'estimer la proportion de thèses qui se situent aux interfaces du PNPS. Il apparait que 55 % des thèses sont centrées quasi-exclusivement sur des questions relevants uniquement du PNPS et pour 83 % des thèses elles constituent la part essentielle 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.

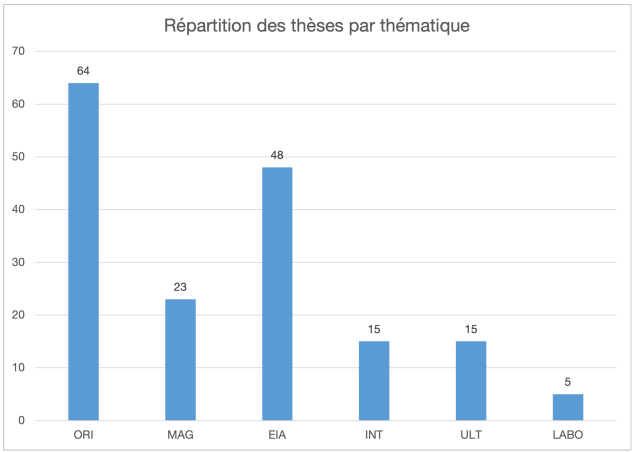


FIGURE 10 – Répartition des thèses par thématique.

Enfin, pour ce qui concerne les HDR, 18 ont été

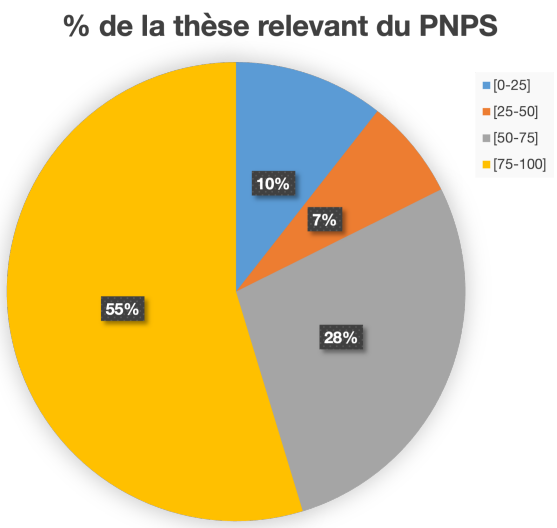


FIGURE 11 – Proportion des travaux de thèse relevant du périmètre du PNPS.

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 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 23 en appendice 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 liées 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. 12). 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 ils reposent 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. 13. 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. 11), 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 forts pourcentages d'activité PNPS.

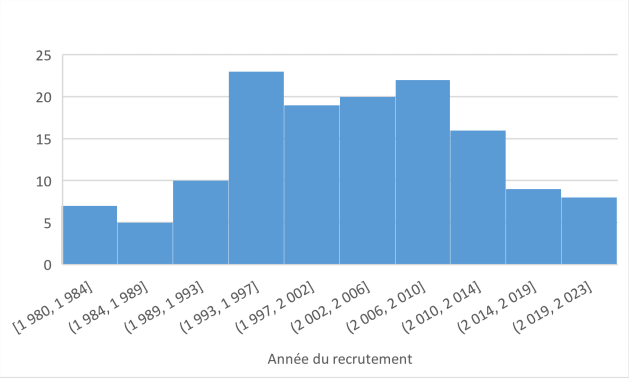


FIGURE 12 – Distribution du nombre de recrutement en fonction de l'année de recrutement (chercheurs permanents, 139 réponses).

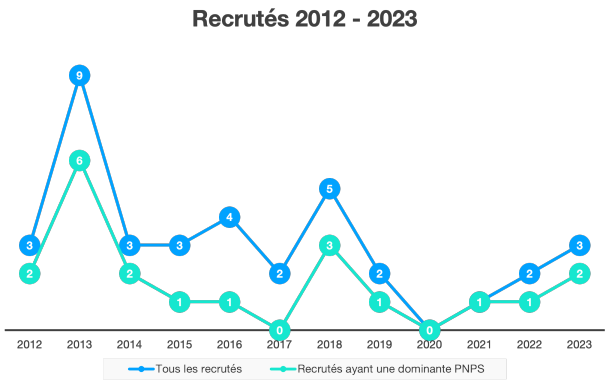


FIGURE 13 – Nombre de recrutements ayant au moins une part de leurs activités relevant du PNPS. La courbe bleue représente le nombre total de recrutements avec une composante PNPS (même faible) et la courbe verte est celle des recrutés pour lesquels les activités PNPS représentent la part dominante.

Distinctions

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

- 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'Academie 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-Lussac 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
- Stéphane Blondin (LAM), Prix Bessel Humboldt en 2022
- Collaboration Gaia, prix Berkeley en 2023
- Astrid Lamberts (Lagrange), médaille de bronze du CNRS en 2023

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.

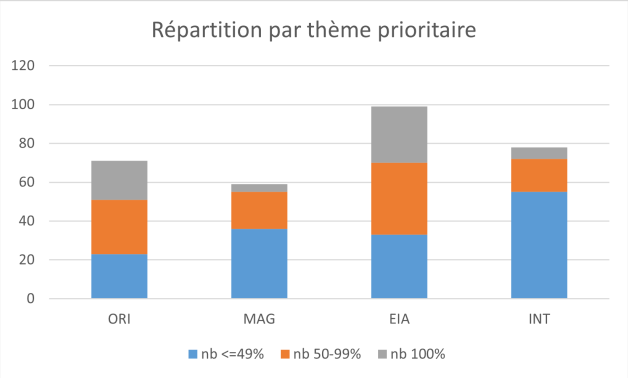


FIGURE 14 – Répartition des réponses par thème prioritaire. Le code couleur indique le pourcentage d'émargement à chaque thème. 173 personnes ont répondu à cette rubrique, avec des réponses possibles sur nos 4 thèmes prioritaires identifiés entre 2019 et 2022.

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. 14 (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 hétérogénéité. 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. 15 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 du 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 la prochaine période. Sur les axes transverses (voir Fig. 16 panel du haut), le constat est similaire avec un mélange entre approche méthodologie et thématique scientifique (voir la Ssection 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 16. 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 se 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.

Un nombre important de réponses concerne l'axe méthodologique Synergie, avec une prédominance de l'activité sur objet prototypique. Ce constat peut paraitre paradoxal étant donné le faible nombre de projets présentés dans ces catégories 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 thèmes prioritaires et non sur ce thème transverse. Ces approches sont mentionnées dans les chapitres thématiques, et portent par exemple sur des objets

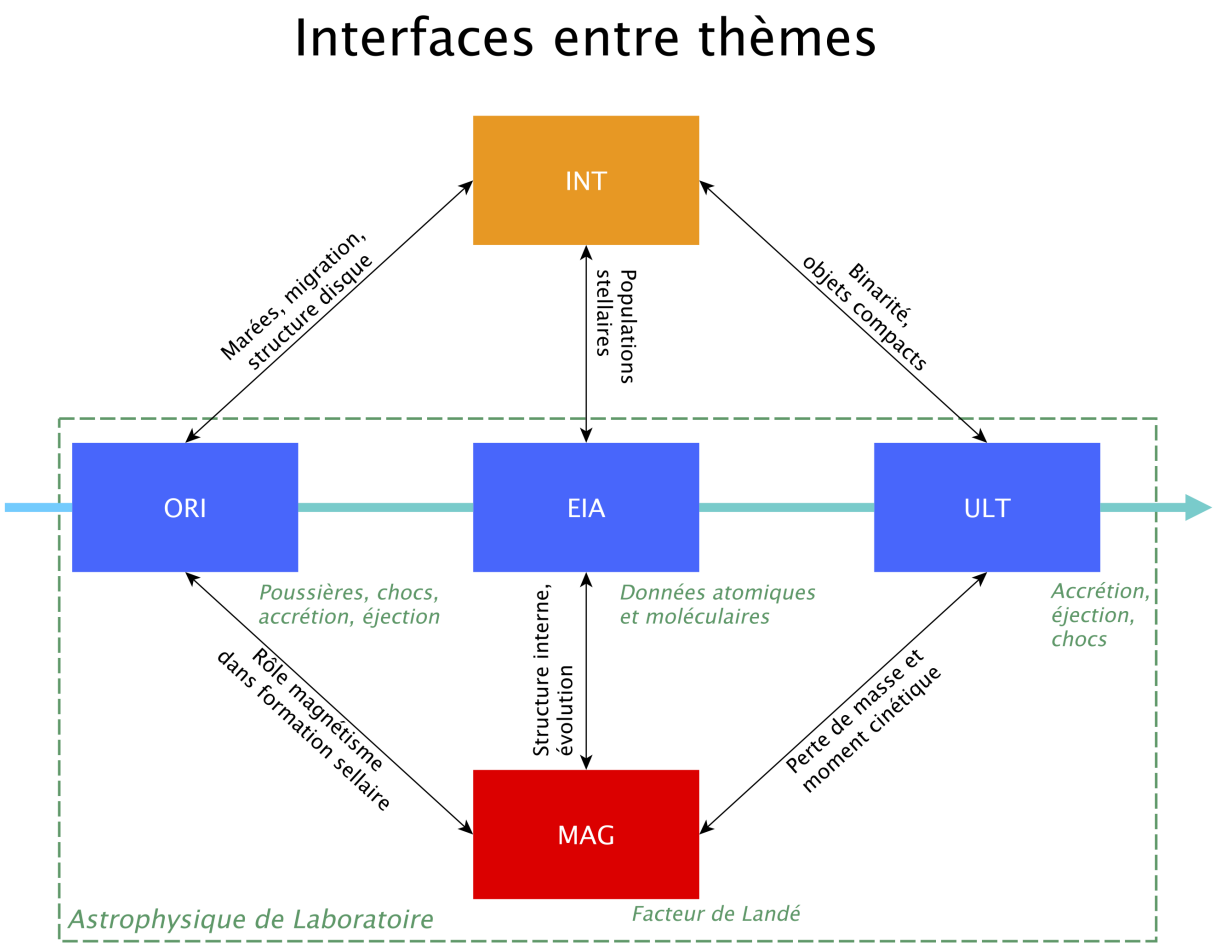


FIGURE 15 – Interfaces principales entre les thèmes du PNPS.

prototypiques tels que Bételgeuse observées à l'aide d'une 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 projets 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-estimé, 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. 17. 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

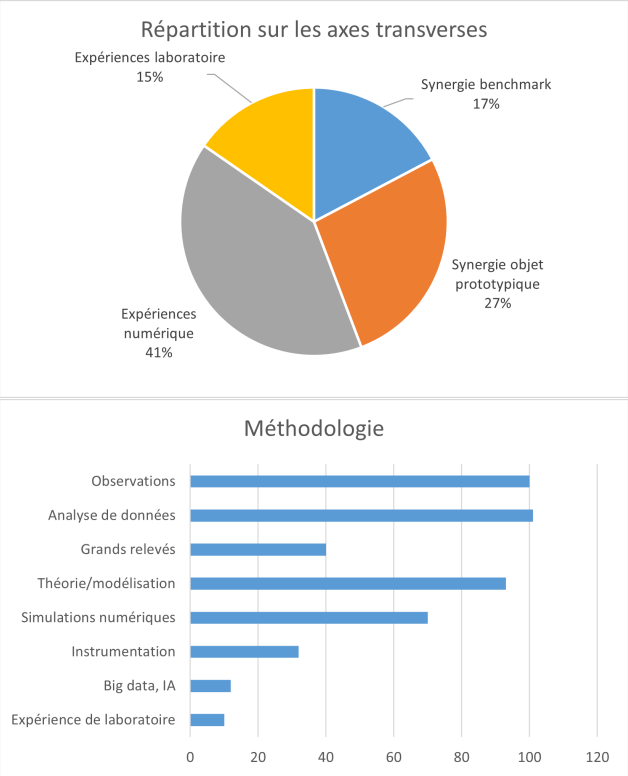


FIGURE 16 – **Panel du haut :** Répartition sur les axes transverses. 71 personnes ont répondu pour un total de 104 indications d'axes transverses (les réponses multiples étaient possibles). **Panel du bas :** Répartition sur les approches méthodologiques, en nombre de réponses sur chaque approche (les réponses multiples étaient possibles). 171 personnes ont répondu à cette rubrique. Le détail du contenu des catégories méthodologique est détaillé dans la Table 24.

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 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 liées 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 l'IN2P3 (thème "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes").

Suite à ce constat, nous précisons ci-dessous l'ampleur de ces interfaces de manière quantitative. 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 émargeant 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. 18 (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. 18. 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).

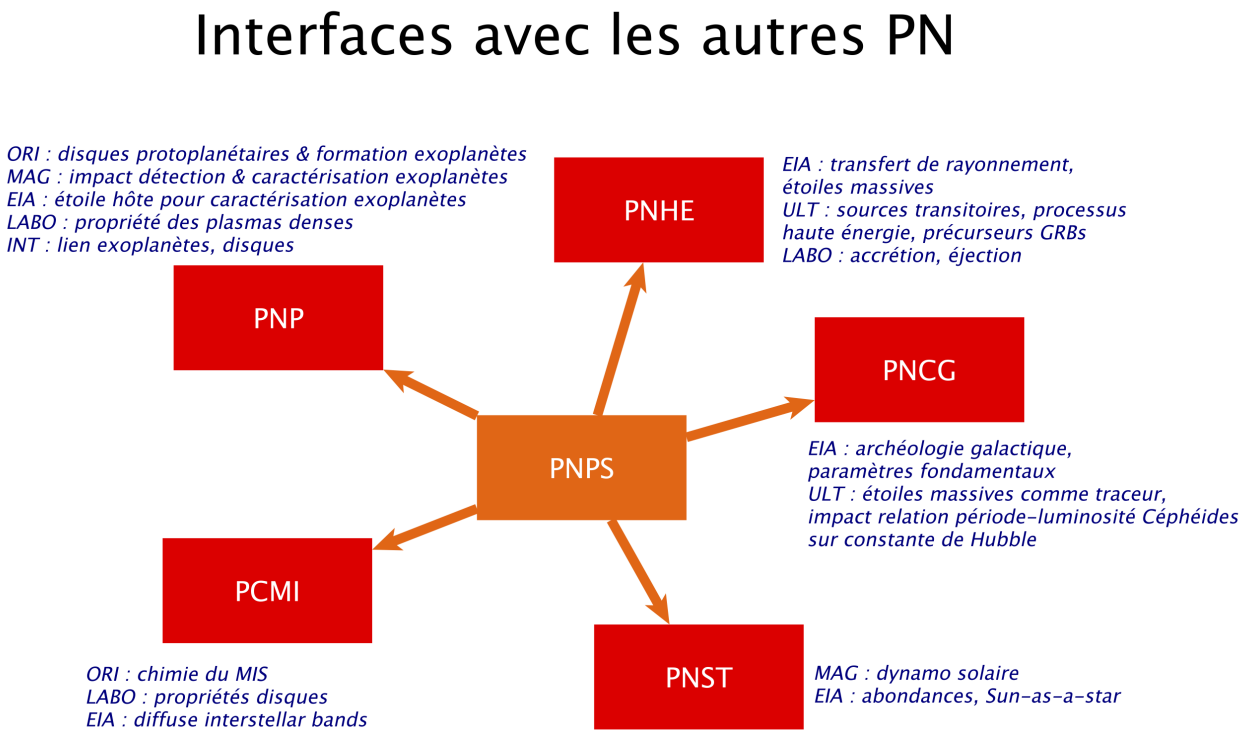


FIGURE 17 – Interfaces principales avec les autres PN.

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 en 2021-2022 par ce comité[3] 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 inclut 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 majoritairement 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 présents (nous notons que si le thème ULT avait été présent dans l'enquête, il serait clairement apparu ici). Enfin, le PNST quant 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. 19 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. 20 présente les interfaces avec les

3. https://www.cet.cnrs.fr/docs/rendu_enquete_exoplanetes.pdf

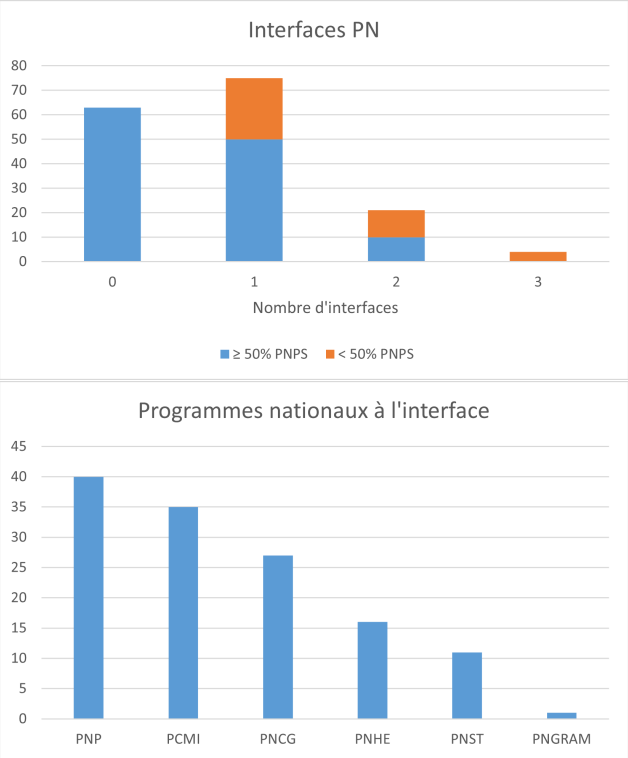


FIGURE 18 – Nombre de PNs à l'interface (en haut) et PNs concernés par ces interfaces (en bas). 173 personnes ont répondu à cette rubrique

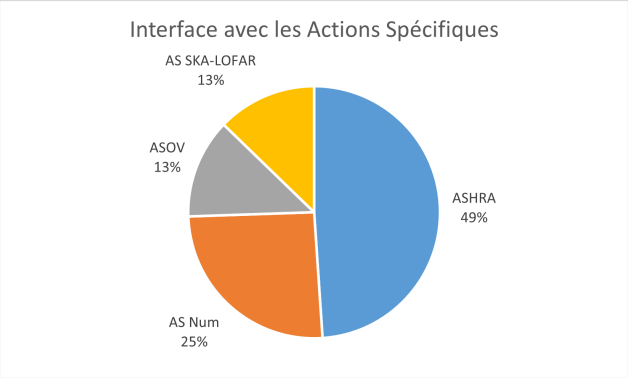


FIGURE 19 – Répartition des réponses entre les 4 AS listées portant sur 44 personnes et 47 indications (3 réponses multiples). 173 personnes ont répondu à cette rubrique.

autres instituts du CNRS pour 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

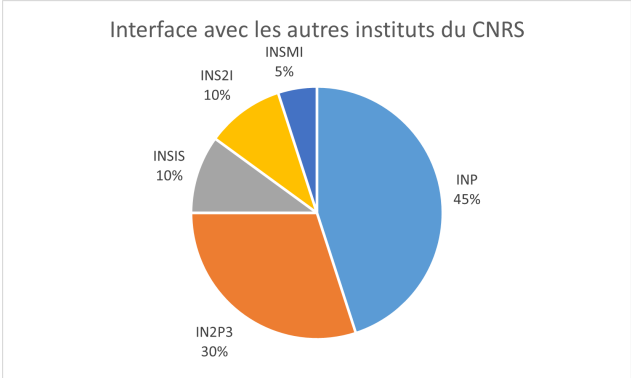


FIGURE 20 – Répartition des interfaces avec d'autres instituts du CNRS, portant sur 18 personnes ayant ce type d'interface. 173 personnes ont répondu à cette rubrique.

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.

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.

Les instruments, équipements et les infrastructures

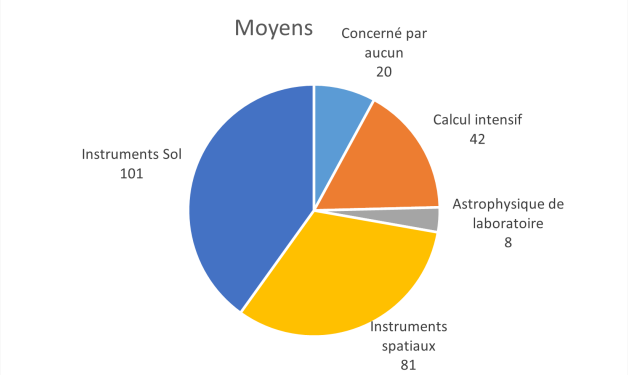


Figure 21 – Répartition des moyens sur 4 grands types d'infrastructures obtenue par le sondage 2022 auprès de la communauté PNPS.

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 années. 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 récemment 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 sollicité pour préciser quels étaient les instruments, équipements et infrastructures dont elle dépendait pour mener à bien ses projets. Ainsi, la Fig. 21 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, représente la majorité des réponses positives (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. 22, 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

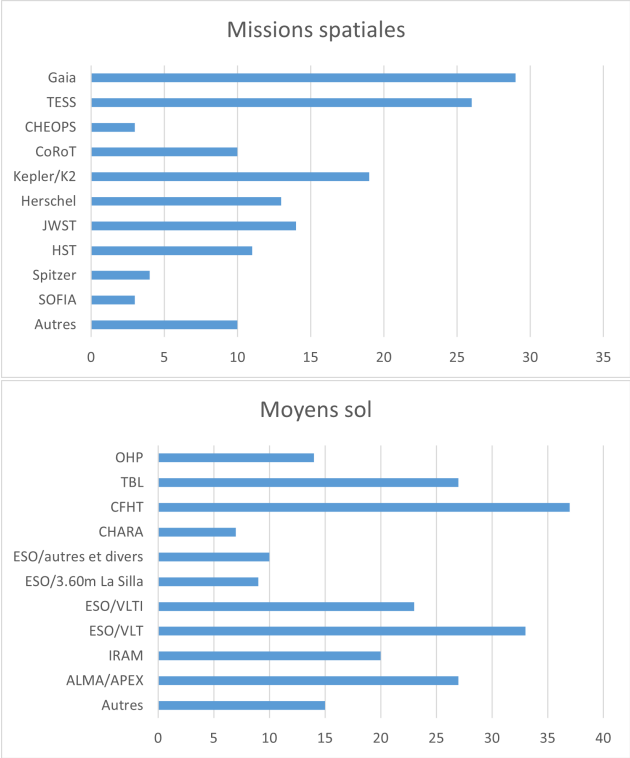


FIGURE 22 – Répartition des instruments spatiaux (panel du haut) et sol (panel du bas) obtenu par le sondage 2022 auprès de la communauté PNPS. Pour ce qui concerne les instruments sol, ils ont été regroupés en différentes catégories (*IRAM* : NOEMA et 30m; *ESO/VLT* : SPHERE, SINFONI, MUSE,ESPRESSO, 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 Nançay, 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 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) 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. Autour de la spectro-polarimétrie, une expertise française reconnue internationalement, permet la mesure et l'étude des champs magnétique stellaires. 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

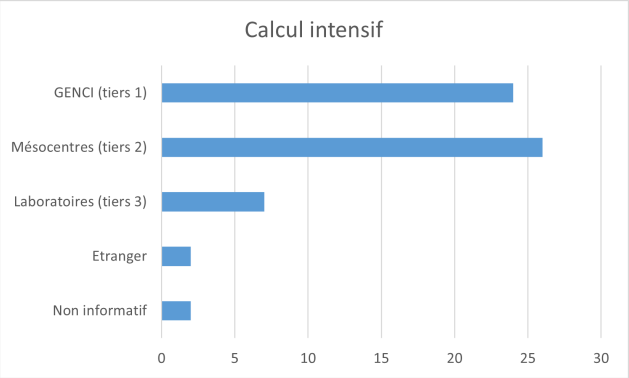


FIGURE 23 – Répartition des moyens calcul intensif.

La Fig. 23 montre 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 noms 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'IDRIS) 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 simulations 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. 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 laboratoire 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 laboratoire.

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.

Le nombre de demandes de temps sur chaque T2m et pour chaque PN est représenté en haut des Figs. 24 et 25. 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 après 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. 24 et 25. 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/nuit pour les semestres d'hiver et 5.5h/nuit 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 résul-

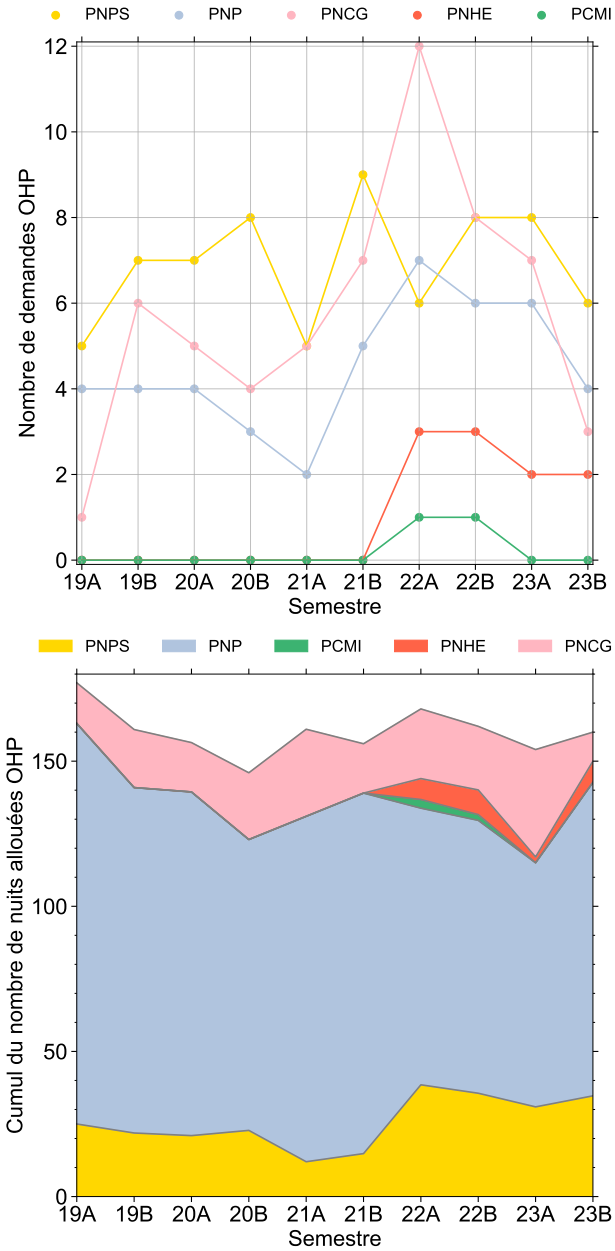


FIGURE 24 – Nombre de demandes de temps (haut) et cumul du nombre de nuits allouées (bas) par programme national sur le T193.

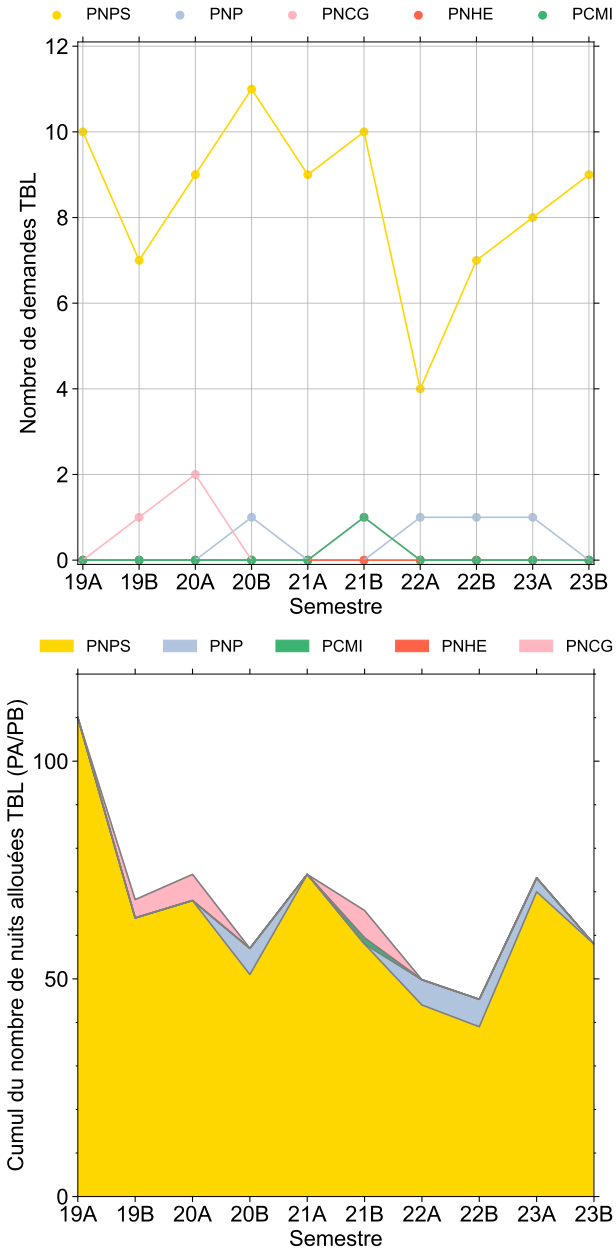


FIGURE 25 – Nombre de demandes de temps (haut) et cumul du nombre de nuits allouées (bas) par programme national sur le TBL.

tats 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. 26. 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) dominent largement la répartition des demandes en thèmes prioritaires et reflètent essentiellement les demandes de temps sur le TBL. Les demandes labellisées "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), avec des études spectropolarimétriques d'étoiles de pré-séquence principale, est en progression mais cela reste marginal.

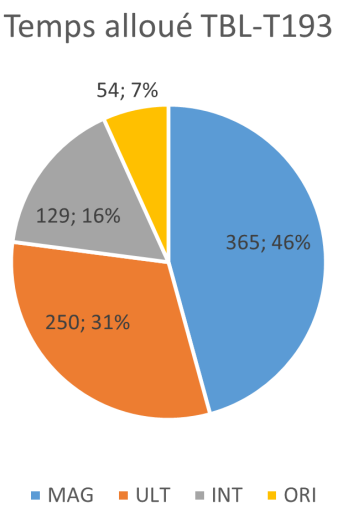


FIGURE 26 – Répartition du temps (en nuits) alloué sur les T2m pour les demandes PNPS par thème prioritaire entre 2019A et 2023B.

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, a sondé 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.

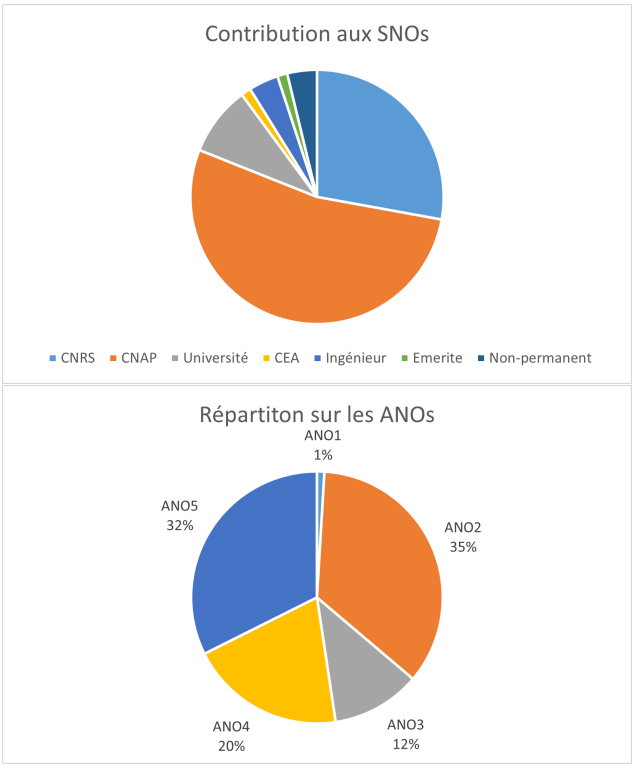


FIGURE 27 – Répartition des réponses des personnes contribuant aux SNO (79 personnes) en fonction du type de poste (en haut) et en fonction de l'ANO (en bas, réponses multiples possibles).

Plus précisément, la Fig. 27 montre la répartition en terme 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 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 PNs. Réciproquement, certaines personnes ayant répondu à notre enquête

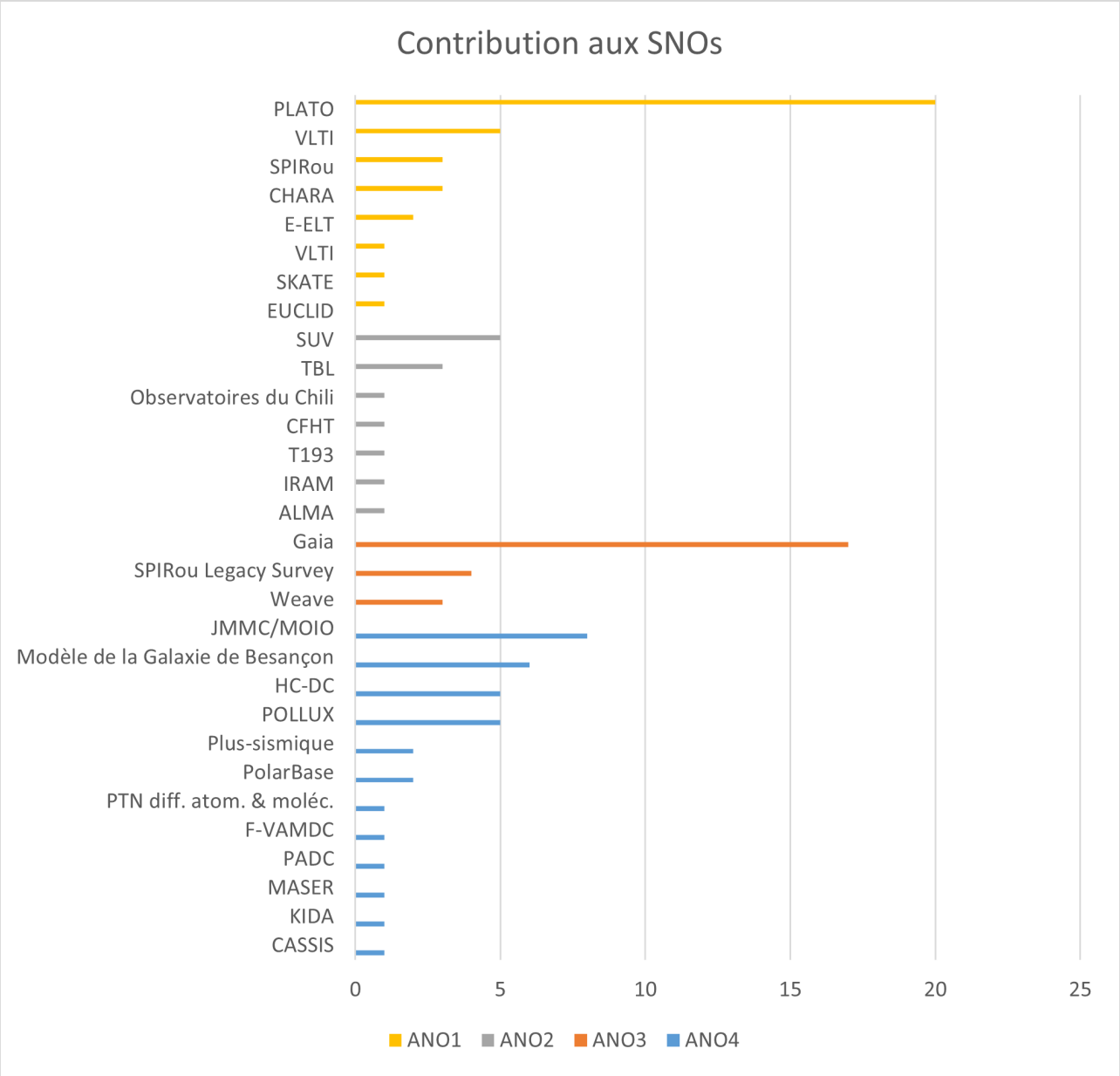


FIGURE 28 – Répartition des contributions aux SNOs (en nombre de réponses). La seule réponse ANO1 concernait Gaia, et a été regroupée ici avec les réponses Gaia en ANO4.

peuvent être engagées dans un SNO n'ayant aucun rapport avec le PNPS, ce qui n'apparait donc pas ici. La liste complète des SNO concernés est présentée sur la Fig. 28 (nous n'y avons pas inclus l'une des réponses, JUICE, car ce SNO ne concerne pas directement le PNPS).

Ainsi, la Fig. 28 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 d'un 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, MARCS, Stagger-code ;
- Interactions : IDEFIX, PLUTO, PHANTOM, RAMSES
- Evolution stellaire jusqu'aux stades utlimes : 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, Turbospectrum (en code de post-processing sur les modèles d'atosphère produits par MARCS, Stagger-code et CO5BOLD), 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 labellisation de la nouvelle ANO Code Communautaire. Après la première campagne de labellisation, 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, contrairement à 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 [1] à la communauté en décembre 2023. Ce type d'action devra être amplifié à l'avenir.

1. https ://www.ias.u-psud.fr/cesam2k20/

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 des 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 magnéto-hydrodynamiques 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 magnéto-hydrodynamiques 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 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 milieu interstellaire (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; Bőgner 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 et al., 2020, 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 [Louvet 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 sytèmes 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 stellaire 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 for-

mation stellaire y compris dans les régions les plus internes participant directement à la construction de l'étoile, avec des processus accrétion-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 venus 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'accrétion 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'accrétion 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., 2024] 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 solides 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'observation 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; Finociety 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., 2019; 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 detectée 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 méca-

nismes 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 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 magnéto-hydrodynamiques 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 companions 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 [Villenave 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 companions planétaires découverts dans l'émission infrarouge des poussières et dans l'émission du gaz en Hα, 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 companions planétaires [Benisty et al., 2021].

Les observations au VLTI avec PIONIER, MATISSE ou GRAVITY tracent l'émission des parties internes des disques protoplanétaires (en deça 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 les 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 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 $10^{-7} M_\odot$ 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 re-

censements 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 ages 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

La dernière période a été marquée par l'exploitation des grands relevés de régions de formation d'étoiles, par les premières observations polarimétriques permettant de tracer le champ magnétique, et par des études détaillées d'objets à haute résolution angulaire permettant d'amener des contraintes clés pour les développements théoriques majeurs pour la formation des étoiles et de leurs disques.

Parmi les grandes questions posées à l'issue de la période précédente figurait la question de l'universalité de la fonction de masse initiale des étoiles, et il semblerait que la période qui vient de s'achever ait apporté des éléments clés permettant aujourd'hui de remettre en doute son universalité. Ces observations ont aussi permis de trouver les premiers coeurs préstellaires massifs, et de mieux comprendre les mécanismes à l'oeuvre dans les régions formant de grands nombres d'étoiles, et des étoiles massives.

Aux plus petites échelles, des résultats importants ont été obtenus, démontrant le rôle majeur du champ magnétique pour réguler les flots d'accrétion de l'envelope vers la jeune proto-étoile, via des observations et des modèles MHD. Il a de plus été démontré l'efficacité du freinage du moment cinétique, responsable pour limiter la taille des disques protostellaires. Enfin, des observations sont venues questionner la vision de l'évolution des poussières généralement admise, suggérant une évolution précoce vers des grains micrométriques, ce qui pourrait avoir des conséquences importantes sur le couplage du champ magnétique dans les envelopes protostellaires, et sur les scénarios d'évolution des disques protoplanétaires.

En ce qui concerne l'évolution du gaz des disques protoplanétaires, elle semble contrôlée davantage par une accrétion laminaire de matière résultant de la formation de vents magnétisés à la surface des disques que par une accrétion turbulente de matière résultant d'instabilités magnéto-hydrodynamiques. Ce changement de paradigme nécessite de continuer à revisiter les modèles de formation et évolution des systèmes planétaires. Les observations de disques ont révélé des structures dans leur émission, qui ont très probablement des origines multiples. Certaines structures sont très suggestives de la présence de planètes à grande distance dans leur disque, ce qui permet de continuer à contraindre les modèles de formation et évolution planétaire.

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 des 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 des *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), principalement 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]. Les limites du désert magnétique ne sont pas encore bien définies et la nature exacte de quelques objets particuliers qui le peuplent, reste à approfondir [cf Blazère et al., 2020, par exemple]. L'origine de la dichotomie magnétique (champs intenses vs champs nuls ou faibles) observée dans les étoiles OBA est activement débattue. 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., 2019], 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 asssociées 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 [e.g. Buysschaert et al., 2019; Prat et al., 2019, 2020; Dhouib et al., 2022]. 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 [David-Uraz et al., 2019]. Des approches plus classiques combinant spectropolarimétrie et études des modes de pulsations déduits de suivis spectroscopiques sur des cibles de choix telles que les variables pulsantes δ Sct et β 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 spectropolarimétrique depuis plus de 15 ans suggère la présence de tâches 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 γ 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]. Lignières et al. [2023] ont récemment obtenu des expressions perturbatives de l'effet d'un champ magnétique de géométrie quelconque sur les modes g d'étoiles en rotation rapide. Ils ont ainsi proposé plusieurs signatures possibles de telles champs qui pourront être recherchées dans les données sismiques de *Kepler* et TESS. Dans les étoiles géantes rouges, les multiplets rotationnels (ensemble de modes d'oscillation de même ordre radial n et de même degre l) des modes mixtes sont généralement symétriques, 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 précieuses 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 travaux, dédiés à l'étude 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. Un mécanisme similaire d'amplification du champ magnétique a pu également être identifié dans une simulation de fusion d'étoiles à neutrons [Kiuchi et al., 2023], ce qui confirme le rôle possible des magnétars comme moteur central des sursauts γ courts. Plus récemment, les travaux de Petitdemange et al. [2023]; Daniel 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, non seulement pour les étoiles géantes rouges, mais aussi pour les protoétoiles à neutrons [Barrère et al., 2022, voir chapitre "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes"].

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, 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 coeur [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'amplitude 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 fran-

çaise 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, et plus récemment pour les protoétoiles à neutrons [Raynaud et al., 2020, 2022] (voir chapitre "Evolution stellaire jusqu'aux stades ultimes"). 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 système 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 première 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 sur 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 magnétique dépendante du temps [Finociety & Donati, 2022], mesure combinée du champ magnétique à petite échelle et des paramètres atmosphériques [Cristofari et al., 2023a], 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 de long-terme des étoiles froides de séquence principale permet de mesurer les propriétés des cycles magnétiques des 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 régimes 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 grâce à 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 polarité 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 quadrupolaires [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'activité, 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., 2024]. 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 obtenues en photométrie 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 Struture 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]. De possibles signatures de cycles courts analogues au cycle de Rieger solaire, potentiellement connectés à l'action d'ondes magnéto-inertielles dans la tachocline, ont été détectées sur un échantillon de 10 étoiles observées par Kepler Breton et al. [2024], mettant en évidence la présence de zones de longitudes actives. Les courbes de lumière ont également été utilisées pour déterminer les périodes de rotation stellaire (voir chapitre "Evolution, structure interne et atmosphère").

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, par exemple la supergranulation [Meunier & Lagrange, 2019a, 2020b] ou encore la circulation méridienne [Meunier & Lagrange, 2020a], ce qui représente un potentiel pour étudier des processus encore mal com-

pris 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., 2022] 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 montrent les résultats récents obtenus sur AD Leo [Zhang et al., 2023].

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 de 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 correlations 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 rotationnelle (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 suggérée 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 exoplanètaires par spectroscopie infrarouge est un enjeu majeur aujourd'hui avec le JWST et l'arrivée de la mission ARIEL dans laquelle la comunauté française est très investie. La question de la contamination 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 décorréler le spectre de l'absorption stellaire avec celui d'exoplanètes dans la même bande moléculaire [Chiavassa & Brogi, 2019; Maimone, 2022].

Conclusion

Une des grandes questions identifiées lors du précédent bilan est celle de l'origine de la dichotomie magnétique des étoiles massives et de masses intermédiaires. Sur la période, des avancées observationnelles ont permis de montrer que cette dichotomie est déjà présente en phase pré-séquence principale. Des simulations numériques ont également étayé l'hypothèse selon laquelle cette dichotomie pourrait être produite par le développement d'instabilités MHD qui dissiperaient le champ magnétique à grande échelle. La question reste cependant ouverte.

Le bilan précédent mentionnait parmi les questions centrales celle de l'influence du champ magnétique sur les oscillations. De grandes avancées dans ce domaine ont été obtenues, avec le développement de plusieurs travaux théoriques estimant les effets du champ magnétique sur les modes de gravité dans les étoiles de séquence principale et sur les modes mixtes dans les géantes rouges. La période a été marquée par l'obtention des premières détections sismiques de champ magnétique dans le cœur d'étoiles géantes rouges, ouvrant la voie à de nouvelles contraintes observationnelles pour étudier l'origine des champs magnétiques stellaires et leur impact sur la rotation interne. La communauté française a eu un rôle de leader dans ces travaux. En parallèle des efforts ont été faits pour étendre la liste d'étoiles bénéficiant de mesures de champs magnétiques de surface et d'une modélisation détaillée grâce à la détection de modes d'oscillations. Ces cibles offrent de nouveaux moyens de comprendre l'effet du champ magnétique sur la structure et l'évolution stellaire.

Au cours de la période, des avancées significatives ont également été obtenues concernant les interactions entre la rotation et le champ magnétique, avec la mise en évidence par des simulations numériques multidimensionnelles du développement d'instabilités MHD (instabilité de Tayler, instabilité magnéto-rotationnelle) dans les zones radiatives, potentiellement lié au déclenchement de phénomènes de dyanmo. Cela représente une étape importante pour la détermination de l'impact des champs magnétiques sur le transport de moment cinétique dans les intérieurs stellaires.

La communauté française reste très investie dans les mesures spectropolarimétriques de champs magnétiques stellaires. Sur la période, ces travaux se sont focalisés sur le magnétisme des étoiles de type solaire avec l'instrumentation dans le visible (ESPaDOnS, Narval puis Néo-Narval) et des naines M, dont les observations spectropolarimétriques sont montées en puissance avec la mise en service de SPIRou au CFHT, qui a inspiré de nouvelles approches théoriques et de nouvelles méthodes d'analyse. Ces travaux ont notamment permis la détection et caractérisation d'exoplanètes autour d'étoiles actives, l'exploration de la dynamo pour les rotateurs lents et la mise en évidence de variabilité à long terme, potentiellement liée à des cycles magnétiques, des champs magnétiques des étoiles M.

Les travaux sur la compréhension des effets de la variabilité stellaire sur les vitesses radiales, qui impacte la recherche d'exoplanètes et leur caractérisation, a fortement progressé durant la période avec des approches diverses et complémentaires. Des travaux ont permis l'étude de processus importants non pris en compte jusqu'à présent. La communauté française est également très active dans la recherche d'indicateurs d'activités variés, et en particulier dans l'IR avec l'avènement de SpiRou. Enfin, des avancées essentielles pour développer des outils robustes et quantifier les performances de détection et de caractérisation ont été effectuées.

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 magnéto-hydrodynamiques 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. En plus de 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 moment 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 inclues 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 transporte(nt) 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 55 000 étoiles [Santos et al., 2019; Breton et al., 2021; Santos 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. La communauté française est très impliquée dans l'implémentation des outils d'analyse de la rotation et de l'activité stellaire dans le logiciel de PLATO avec une stratégie basée sur les techniques de machine learning (Breton et al., soumis). 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 γ 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 détection dans des étoiles γ Doradus de modes résultant du couplage entre les modes purement inertiels piégés dans le cœur convectif et les modes gravito-intertiels 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. Notons que des efforts ont également été faits, à la fois par des simulations MHD 3D [Breton et al., 2022] et l'analyse des données *Kepler* [Breton et al., 2023] pour identifier des observables permettant de sonder la dynamique au coeur des étoiles de type solaire en séquence principale, telles que les ondes de gravité. Enfin, pour des étoiles plus massives, la modélisation sismiques des données CoRoT d'une étoile Be a aussi permis de montrer que le transport de moment cinétique par les ondes excités stochastiquement dans le cœur des étoiles Be est à l'origine des éjections de matière par ces étoiles [Neiner et al., 2020]. Ceci apporte enfin une explication au phénomène Be, c'est-à-dire à la formation d'un disque circumstellaire autour de ces étoiles.

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 γ-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}Li centrée sur une température de $\sim$ 6600 K (connue sous le nom de *lithium dip*).

Dans les étoiles géantes rouges, la diminution de l'abondance de surface en lithium au moment du "luminosity bump" est interprétée comme la conséquence du mélange provoqué par 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 nécessaire 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 stellaire. 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 fondamentales 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 de la fréquence 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'études 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 ε_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 mélange 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 internes 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. [2022] 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 oscilla-

tions [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

La modélisation des intérieurs stellaires est une préoccupation constante de la communauté qui a donné lieu à de nombreux travaux. Les efforts se sont structurés autour de trois axes complémentaires, à savoir : le développement des codes d'évolution stellaire 1D et l'utilisation des résultats des simulations MHD 3D qui sont implémentés dans les codes d'évolution stellaire 1D, ainsi que le développement du code 2D ESTER.

Pour ce qui concerne les codes 1D, l'accent a d'abord été mis sur l'amélioration de la description de la microphysique (équations d'état, opacité, taux de réactions nucléaires). Par exemple, Hui-Bon-Hoa [2021] a inclut la dépendance des opacités aux abondances relatives des métaux individuels alors que Hui-Bon-Hoa et al. [2022] ont évalué l'impact des nouvelles opacités du nickel dans les modèles stellaires. Des sections efficaces monochromatiques du nickel ont été calculées avec le code SCO-RCG et des modèles stellaires calculés avec le code de Toulouse-Genève. À haute température ($T > 10^6$ K), l'effet des nouvelles opacités est petit. A des températures plus basses, cependant, l'opacité du nickel calculée avec le code SCO-RCG est jusqu'à six fois plus élevée que celle calculée par OP ou OPAL. L'excitation de pulsations d'étoiles comme les β Cep ou les SPB peut en être fortement affectée.

Un autre aspect important est lié à la détermination de l'abondance en hélium, qui ne peut être obtenue par des observations, et qui pose problème étant donné la dégénérescence entre l'abondance en hélium et la masse initiale (un autre paramètre libre) : une étoile avec une abondance initiale en He se comporte presque comme une étoile plus massive. Une façon de déterminer l'abondance en He dans la zone convective de surface est d'utiliser les « glitches » d'ionisation : l'ionisation d'éléments abondants baisse l'exposant adiabatique Γ_1 dans cette région, ce qui change la vitesse du son et le motif asymptotique des fréquences des modes p. Houdayer et al. [2021] ont développé un traitement thermodynamique de la région d'ionisation et présenté une approximation analytique de l'exposant Γ_1. Cette analyse a permis l'étude des perturbations structurelles qui causent le « glitch ». L'effet de la localisation de la zone d'ionisation et la dégénérescence des électrons peut avoir un effet plus fort sur le « glitch » que l'abondance en He en soi. Suivant cet étude, Houdayer et al. [2022] ont ainsi étudié l'effet de ces perturbations sans passer par le biais des modèles stellaires. L'inférence des propriétés qui causent le « glitch » devient alors possible même si il reste une dégénérescence entre l'abondance d'He et la dégénérescence des électrons.

Enfin, toujours pour les modèles 1D, les processus de transport sont au coeur des préoccupations. Citons par exemple le travail de Deal et al. [2020] qui ont modélisé le couplage de la diffusion atomique avec le transport à grande échelle et en particulier avec la rotation. En utilisant le code CESTAM, les auteurs ont montré que pour des masses inférieures à 1,3 $M_\odot$, la rotation domine le transport des éléments chimiques et réduit fortement l'effet de la diffusion atomique, avec des modifications nettes de l'abondance de surface similaires aux valeurs solaires. Ce résultat illustre l'importance de la prise en compte du couplage entre les processus de transport. Une autre approche pour prendre en compte la complexité des interactions entre processus de transport dans les modèles 1D consiste à utiliser des prescriptions issues des simulations MHD 3D. Les résultats récents de Petitdemange et al. [2023]; Daniel et al. [2023] démontrent à la fois la possibilité d'avoir la dynamo de Tayler-Spruit dans des régions radiatives mais également l'importance du couplage avec la turbulence pour le transport de moment cinétique en est une illustration. Les auteurs proposent des prescriptions qu'il restera à implémenter dans les codes 1D et à confronter aux observations. Ceci illustre une approche qui aura vocation à se généraliser dans les années à venir.

Au-delà des modèles d'évolution stellaire 1D, le passage au 2D est un enjeu pour la communauté française. Cela est particulièrement important pour des étoiles en rotation rapide pour lesquelles les mo-

dèles en 2D sont alors nécessaires. Dans ce contexte, Gagnier et al. [2019] ont utilisé le code de structure interne en 2D ESTER pour calculer l'évolution d'étoiles chaudes en rotation rapide pendant la séquence principale. La perte de masse anisotropique a été prise en compte. Les étoiles avec une masse initiale entre 5 et $7M_\odot$ atteignent toujours la vitesse de rotation critique si leur vitesse initiale est supérieure à 50% de la vitesse critique. Les étoiles de masse supérieure ne l'atteignent pas à cause de la perte de masse provoquée par la pression du rayonnement. Bouchaud et al. [2020] ont également utilisé le code ESTER pour calculer un modèle 2D d'Altaïr, dans le but de déterminer les paramètres fondamentaux de cette étoile. Les paramètres de surface issus d'ESTER ont permis la création de cartes d'intensité avec des modèles d'atmosphère. L'ajustement des observables calculées à partir des ces cartes d'intensité aux observations (spectrométriques et interférométriques) ont permis la détermination de plusieurs paramètres fondamentaux d'Altaïr. Pour ce qui concerne les oscillations des étoiles en rotation rapide, il existe une grande diversité et il nous manque encore une classification claire et significative de ces modes qui permettrait de les identifier dans les spectres d'oscillation denses de ces étoiles. Cela a jusqu'ici limité l'interprétation que l'on peut faire de ces modes pour sonder la structure interne des étoiles en rotation rapide. Au-delà d'une certaine rotation, deux familles de modes se distinguent essentiellement : les modes d'îlots et les modes chaotiques. Evano et al. [2019] ont montré que ces derniers, dans la limite des petites longueurs d'onde, présentent une pseudo-régularité en fréquence, proche de la grande séparation des modes d'ilôts. Cela montre que la recherche de régularités dans les modes d'oscillations des δ Scuti (déjà fructueuse, e.g., García Hernández et al. 2009) pourrait être utilisée pour mettre en évidence de tels modes.

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 polueurs 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 couteuses 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 (voir aussi plus bas, dans la section sur paramètres fondamentaux, le paragraphe sur les échelles dee distance).

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⊙ et 0.2Z⊙, 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 ~ 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 métallicité (par exemple le LMC), dans le cadre du progamme héritage ULLYSES [Vink et al., 2023].

La composition chimiques 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 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 contribuée 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 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 observationels 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 multiple approches observationelles 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 interférométrique 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 interférométrique obtenues grâçe 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 menés pour les étoiles Ap Perraut et al. [2020]; Deal et al. [2021]. La détermina-

tion précise et exacte des paramètres fondamentaux de ces étoiles chimiquement particulières (et pour certaines abritant de fort 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.

Une autre approche originale est basée sur l'exploitation de spectre IR obtenus avec SPIRou pour un échantillon de naines M, qui ont l'avantage de prendre en compte le champ magnétique dans l'analyse des spectres [Cristofari et al., 2022b,a, 2023a,b]. Outre l'analyse de la sensibilité aux paramètres, les paramètres fondamentaux ont pu être estimés avec une bonne précision pour un échantillon de 44 naines M, ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour les futurs relevés effectués avec SPIRou.

Enfin, notons que la caractérisation d'étoiles de référence Gaia (*Gaia Benchmark Stars*) a été revisité par Soubiran et al. [2023]. Les auteurs proposent une nouvelle détermination observationelle de $T_{\rm eff}$ 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 utile pour exploiter les données de la missions 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 fournit un nouveau catalogue de diamètres angulaires et identifié des étoiles de réference 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 cataloque 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.

L'exploitation du catalogue Gaia est également présentée par la communauté française de physique stellaire. Par exemple, Gaia Collaboration et al. [2023a] présente l'énorme potentiel du contenu binaire du Gaia DR3, ainsi que des découvertes d'exoplanètes candidates et d'objets compacts (voir chapitre "Interactions"). Gaia Collaboration et al. [2023c] propose un échantillon d'or de paramètres astrophysiques pour les OB, les FGKM, les naines ultra-froides, les analogues solaires et les étoiles de carbone. Kervella et al. [2022] exploitent Gaia DR2 et Hipparcos pour révéler de nombreux compagnons stellaires et sub-stellaires, et Chevalier et al. [2023] exploitent également Gaia DR3 avec d'autres catalogues pour caractériser précisément 43 systèmes binaires et ont determine une relation masse-luminosité empirique jusqu'à 0.12 $M_\odot$.

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 19ème 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.

Les 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 a 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 avancees dans la comprehension de l'evolution 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. D'autres études telles que Rivet et al. [2020] ont pu estimer une distance précise de 1,56 kpc à l'étoile de réference 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'évolution 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.

Ces dernières années, des avancés majeures ont été faites. En exploitant le catalogue Gaia DR2, Bossini et al. [2019] ont dérivé les âges, les modules de distance, et les 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 estimation des âges et la cinématique, ils 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 ouvertes 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 avec les données Gaia, les données spectroscopiques et l'astérosismologie de TESS, il a été possible d'affiner l'âge de l'amas avec une précision de moins de 10%, malgré le rougissement différentiel observé à travers l'amas.

Pour ce qui concerne les amas globulaires, il y a également eu 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'etude 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

La dernière période a été marquée par des développements théoriques majeurs découlant de l'exploitation de plusieurs missions au sol et dans l'espace. En ce qui concerne plus particulièrement les intérieurs stellaires, nous pouvons mentionner le rôle critique des missions spatiales fournissant des séries temporelles de photométrie à haute cadence telles que *Kepler*, CoRoT et TESS pour l'astérosismologie et l'étude de la rotation et de l'activité des étoiles. Avec la mission PLATO à l'horizon, des modèles stellaires actualisés et fiables sont nécessaires pour l'estimation des paramètres stellaires tels que l'âge, pour l'étude de la formation et de l'évolution des exoplanètes. Des progrès importants ont été réalisés dans la modélisation stellaire 1D au cours de la période, notamment en ce qui concerne le transport de moment cinétique dans les intérieurs stellaires et le mélange à la frontière des zones convectives. Le développement de modèles 2D, notamment en ce qui concerne la rotation stellaire, émerge lentement et promet de laisser sa marque dans la prochaine période. Plusieurs questions restent cependant en suspens, par exemple en ce qui concerne l'impact de la stratification chimique sur le profil d'opacité des étoiles, et le traitement des interfaces entre les régions radiatives et de convection dans les étoiles,

ainsi que la manière d'intégrer les contraintes des modèles 2D dans les codes 1D. Un effort important de la part de la communauté derrière un code de structure et d'évolution de la communauté, CESAM2K20 [Deal et al., 2018, Manchon et al. in prep.], promet de maintenir l'élan de nouvelles avancées dans les intérieurs stellaires pour la prochaine période.

La deuxième livraison de données Gaia (DR2) a apporté des contraintes supplémentaires en fournissant pour la première fois une astrométrie et une photométrie précise qui ont permis d'estimer les propriétés fondamentales stellaires, une donnée essentielle pour progresser dans la connaissance des intérieurs et des atmosphères stellaires. Une grande partie de la communauté a été très active dans la contribution et l'exploitation de Gaia DR2 (2018), Gaia EDR3 (2020), et Gaia DR3 (2022). La fourniture de catalogues des millions d'étoiles s'est également accompagnée d'un effort similaire pour se concentrer sur des prototypes, ou des benchmarks, afin non seulement d'obtenir la haute précision que nous souhaitons, mais aussi de viser réellement l'exactitude en effectuant des analyses multi-techniques observationnelles. Grâce à Gaia, la dernière période a également vu un regain d'intérêt pour l'exploitation des amas pour la compréhension de la physique stellaire, des études des populations stellaires pour l'archéologie galactique, une meilleure compréhension du régime de très faible masse et de l'interface avec les naines brunes. Plus récemment, un nouvel intérêt a également été suscité dans l'analyse de systèmes multiples avec la disponibilité d'une astrométrie précise. La prochaine période promet d'apporter une multitude d'avancées dans ces domaines.

Les observatoires au sol qui contribuent à l'étude des intérieurs stellaires, des paramètres fondamentaux et des atmosphères comprennent ceux qui fournissent des données interférométriques et spectropolarimétriques, comme le TBL, CHARA, le VLT et les relevés galactiques. Ces derniers fournissent des paramètres spectroscopiques importants qui nous permettent de mieux déterminer les abondances chimiques ou de comprendre les processus physiques qui se produisent dans les atmosphères stellaires. Au cours de la dernière période, plusieurs travaux pionniers ont été réalisés sur les étoiles très pauvres en métaux et les étoiles massives. Il faut souligner l'importance cruciale de l'accès à des observations UV de qualité, et donc du HST, pour ces travaux. La mise à disposition de la communauté internationale d'une couverture systématique des étoiles massives des Nuages de Magellan en UV, avec HST dans le cadre du programme héritage ULLYSES (et la contrepartie de ULLYSES à l'ESO sur X-Shooter), est donc cruciale dans ce contexte pour poursuivre les études sur les atmosphères et les vents de ces étoiles. L'exploration des prédictions des modèles d'atmosphères (au sens large, i.e. photosphère + vents) a aussi permis de caractériser l'effet des paramètres fondamentaux stellaires pour un meilleur étalonnage des relations brillance de surface-couleur et leur utilisation pour la détermination de distances de systèmes binaires extragalactiques. Cette approche a aussi fournit une compréhension de l'évolution spectroscopique des étoiles massives et des prédictions de celle-ci jusque dans des régimes très pauvres en métaux. Ces derniers sont d'ores et déjà visés par des programmes sur JWST et font aussi l'objet de propositions de programmes sur les futurs instruments pour E-ELT tel que MOSAIC par exemple.

Sur tous ces derniers points, nous devrons être vigilants car l'expertise en matière d'atmosphères a décrue par rapport au bilan précédent alors qu'il y a une prise de conscience qu'elle doit être maintenue.

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 en outre 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 : interactions étoile-planète, étoile-étoile, étoile-disque. Certains aspects concernant les interactions sont également abordées dans le chapitre "Origines".

Les grandes avancées sur la période 2019-2023

Interactions étoile-planète

Les interactions étoile-planète peuvent être classées en trois catégories principales : les interactions radiatives, magnétiques et de marée. Les systèmes étoile-planète compacts représentent une grande partie des exoplanètes connues (30% des exoplanètes confirmées à ce jour orbitent autour de leur étoile en moins de 5 jours!). Dans ces systèmes, les trois interactions sont maximisées en raison de la proximité des deux corps et combinent leur action, ce qui entraîne des effets majeurs à court terme (de quelques jours à quelques milliers d'années; par exemple, l'échappement atmosphérique, le réchauffement des planètes et même certaines modifications de l'activité apparente de l'étoile hôte) et à long terme (de quelques millions à quelques milliards d'années; par exemple, la migration orbitale). Au cours des cinq dernières années, les équipes impliquées dans le PNPS ont été à la pointe de la compréhension physique de chacune de ces interactions pour lesquelles elles ont développé en synergie théorie et simulations numériques HPC.

Architecture des systèmes et migrations

Les équipes impliquées dans le PNPS ont simultanément développé des modèles théoriques et des simulations numériques pour les marées et leur dissipation dans les étoiles et les planètes. Cette dissipation est l'un des principaux moteurs de l'évolution orbitale des systèmes proches et de la rotation de leur étoile hôte et des planètes. Astoul et al. [2019] et Astoul et al. [2021] ont étudié l'impact du magnétisme et de la rotation différentielle stellaires sur les effets de marée étoile-planète. En particulier, Astoul et al. [2019] ont montré que la contribu-

tion du magnétisme sur le forçage de marée, c'est-à-dire sur l'excitation des ondes de marée à l'intérieur de l'étoile, 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, et ce de la pré-séquence principale à la fin de la séquence principale, dans toute leur enveloppe convective.

Par ailleurs, les interactions magnétiques étoile-planète peuvent aussi générer une migration orbitale, comme le montre Strugarek [2023] pour des planètes de faible masse autour d'étoiles de type solaire. Grâce au code ESPEM [acronyme français pour évolution des systèmes planétaires et magnétisme Benbakoura et al., 2019], Ahuir et al. [2021] ont étudié l'évolution orbitale d'une planète en prenant en compte simultanément les couples magnétiques et de marée, afin d'expliquer la distribution des planètes proches observées. Ils ont montré 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 marée façonnent la distribution des planètes géantes. Appliquées au champ d'étoiles abritant des planètes observées par la mission Kepler, les interactions de marée et magnétiques s'additionnent pour produire la distribution observée des systèmes étoile-planète en termes de période de rotation de l'étoile et de période orbitale de la planète [García et al., 2023]. Le code ESPEM a aussi été utilisé par Revol et al. [2023] pour explorer 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.

Aurores et atmosphères d'exoplanètes

De nombreuses simulations numériques pour comprendre le couplage magnétique d'une planète proche de son étoile hôte ont été menées. Lorsque la planète est proche, un couplage magnétique permet un échange de moment cinétique entre les deux corps. Les équipes impliquées dans le PNPS ont développé des modèles photo-chimiques avancés pour les interactions entre le rayonnement stellaire et la haute atmosphère des exoplanètes [García Muñoz, 2023; Gillet et al., 2023]. Les émissions radio créées dans les magnétosphères planétaires ouvrent la voie à la détection et à la caractérisation de magnétosphères exoplanétaires. Les interactions magnétiques d'une planète avec son environnement le long de son orbite peuvent laisser une trace observationnelle dans l'atmosphère stellaire en raison de la propagation des ondes d'Alfvén depuis le voisinage de la planète jusqu'à la couronne stellaire et même jusqu'à la chromosphère. Strugarek et al. [2019] et Strugarek et al. [2022] ont quantifié en utilisant des simulations numériques 3D ab-initio les énergies mises en jeu dans ces interactions magnétiques pour prédire l'amplitude et la phase d'un tel signal pour des systèmes proches tels que HD 189733, et conclu qu'elles conduisent à des effets observables. Il est aussi possible de prédire la phase et l'amplitude de telles interactions pour des exo-systèmes compacts bien observés, ce qui ouvre de nouvelles voies pour contraindre par observation les caractéristiques magnétosphériques de ces planètes Strugarek et al. [2019, 2022]. Ces résultats préparent ainsi au mieux l'analyse des données des futurs instruments au sol tel le spectropolarimètre SPIRou et dans l'espace comme le satellite PLATO.

L'observation des émissions radio aurorales planétaires est une méthode qui permet de détecter les champs magnétiques exoplanétaires prédits par les études théoriques. Ces observations des champs magnétiques 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 articles qui présentent le pipeline de réduction de données SPIRou sont 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 Halbwachs 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 (~ 135 000), spectroscopiques (~ 185 000), à éclipse (~ 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 [Halbwachs 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 ex. 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'occurence 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 comportent 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 de binaires 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 arcsec 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.

β 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 stellaire sur les disques formant des planètes. Les survols prograde, 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 circumsecondaire 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., 2019; 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 Brγ et les raies de têtes de bande du CO (Caratti et al. 2020), permet d'étudier les corrélation entre les propriétes 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 Brγ dans des étoiles de T Tauri ont étés publiées dans Bouvier et al. [2020a], où la région d'accrétion magnétosphérique dans le disque jeune de pré-transition DoAr44 est sondé.

Conclusion

La question des interactions étoile-planète est montée en puissance lors de ce mandat, tant sur des questions d'architecture des systèmes que sur les propriétés des atmosphères planétaires. L'approche adoptée dans le premier cas a essentiellement été constituée d'approches théoriques visant à étudier l'impact des effets de marée et du champ magnétique. Des résultats importants ont été obtenus sur leur impact sur les migrations, ce qui a pu être comparé aux distributions observées. La deuxième question se place dans un contexte instrumental riche qui permet de caractériser de plus en plus d'atmosphères d'exoplanètes. Des travaux à la fois théoriques et observationnels ont donc été effectués, faisant appel à un large panel d'outils et de processus (magnétisme, émissions radio, physico-chimie, etc…) afin d'étudier la détectabilité d'aurores exoplanétaires dans le domaine radio, associé aux propriétés de ces atmosphères. Une première détection candidate est ainsi très prometteuse pour la suite de ces activités.

Les interactions entre étoiles ont principalement bénéficié de travaux observationnels grâce à des instruments très variés, allant de la mission spatiale Gaia aux instrumentations en imagerie directe et interférométrie. Ceci a permit la découverte de nouvelles binaires, dont les propriétés orbitales peuvent être contraintes, et dont les propriétés statistiques peuvent reliées aux mécanismes de formation. Des résultats permettant l'étude conjointe de processus variés grâce à une approche multi-technique ont également été obtenus sur une binaire très massive.

Enfin, de même que pour les interactions étoiles-planètes, le domaine des interactions étoiles-disques est lui aussi en forte expansion, en particulier pour des objets jeunes (voir aussi le chapitre Origines). Des résultats originaux ont été obtenus concernant les possibilités de survols stellaires et de rencontres pour expliquer les propriétés de certains disque protoplanétaires, avec un possible impact sur la démographie des exoplanètes et leur formation. Ces travaux font intervenir des simulations numériques ainsi que des observations multi-techniques, incluant des moyens phares de notre communauté (par ex. SPIRou, GRAVITY).

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 (ESpaDOnS/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 variétés 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, dont la nature reste inconnue, ont pu être reconstruites pour la première fois dans les bandes L, M et N de l'IR [Chiavassa et al., 2022a]. Drevon et al. [2022] déterminent pour l'AGB R Sculptoris la présence de molécules avec MATISSE à une distance plus proche de l'étoile que la poussière, en accord avec les modèles dynamiques. De plus, Drevon et al. [2024] a pu imager (toujours avec MATISSE) la surface de Betelgeuse à travers le Great Dimming. La présence de cellules convectives est utilisée pour expliquer les incertitudes de mesures Gaia pour les étoiles AGB par Chiavassa et al. [2020] (en utilisant l'interférométrie pour imager la surface stellaire) et RSG par Chiavassa et al. [2022b], sur la base de simulations d'hydrodynamique radiative en 3D de la convection stellaire avec CO5BOLD et le code de transfert radiatif de post-traitement OPTIM3D pour le calcul de cartes d'intensités.

Afin de contraindre et de caractériser les mouvements atmosphériques dans les atmosphères étendues des RSGs, Kravchenko et al. [2019] ont utilisé une approche tomographique afin de déterminer le champ de vitesse résolu spatialement et en fonction du temps de l'étoile μ Cep. Par comparison entre une série de spectres à haute résolution spectra avec une série de simulations radiatives-hydrodynamiques 3D avec le code CO5BOLD, la méthode tomographique révèle un déphasage entre les variations de vitesse et les variations spectroscopiques et photométriques. Ce déphasage se traduit par une boucle d'hystérésis dans le plan température - vitesse avec une échelle de temps de quelques centaines de jours, qui est similaire à celle de la photométrie. La similitude entre l'échelle de temps de la boucle d'hystérésis mesurée dans μ Cep et l'échelle de temps des ondes acoustiques perturbant le schéma convectif suggère que ces ondes jouent un rôle important dans le déclenchement des boucles d'hystérésis.

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 première 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 le chapitre "Evolution, structure interne et atmosphère". Davies et al. [2022] et Dessart & Jacobson-Galán [2023] ont étudié l'impact de l'explosion d'une SN Type II sur la matière circumstellaire, mettant en evidence la nécessité d'un besoin de spectres et courbes de lumières pour contraindre ce milieu proche du progéniteur.

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 H0.

La modélisation hydrodynamique est également utilisée pour interpréter les observations. A l'aide de simulations de WR 104, Soulain 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.

Enfin, pour ce qui concerne les champs magnétiques, notons que les toutes premières détections de champs magnétiques dans des supergéantes ont été obtenues ces dernières années, notamment grâce au projet LIFE [Martin et al., 2018; Oksala et al., 2021]. Le taux de détection magnétique est supérieur dans ces étoiles chaudes évoluées à celui sur la séquence principale, laissant entrevoir l'apparition de champs dynamos dans les zones convectives qui se développent dans l'enveloppe radiative lorsque l'étoile vieillit.

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, PI 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'extension du cœur en fin de phase de brûlage de l'hélium est environ 40% plus importante (en masse égale-

ment). Les processus clefs 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 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 Götberg et al. [2020], des binaires avec des "strtipped stars" (étoiles où les enveloppes ont été ôtées par interaction avec un companion évolué) sont également considérées comme des sources possibles d'ondes gravitationnelles. Leur nombre et période orbitale renseignera sur les transferts de masse. A la fois les naines blanches et les "stripped stars" possèdent des contreparties électromagnétiques potentiellement détectables.

Les ondes gravitationnelles sont un nouveau messager 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 (PANSTARS,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 de 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. L'objectif 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 cœur (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 en 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 champs magnétiques internes de l'étoile progétrice [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; Bendahman et al., 2023]. [Bugli et al., 2020, 2021] ont étudié l'impact du champ magnétique afin d'expliquer les explosions les plus énergétiques, telles que les hypernovas associées aux sursauts gamma longs. Pour comprendre l'origine des champs magnétiques intenses susceptible d'affecter les mécanismes d'explosion, des modèles de dynamo dans des protoétoiles à neutrons ont étudié différents types d'instabilité : dynamo convective [Raynaud et al., 2020, 2022], MRI [Reboul-Salze et al., 2021, 2022] et dynamo de Tayler-Spruit [Barrère et al., 2022, 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 électron-ion 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) ont été publiées par 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 pri-

vilégiée, 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

La thématique des stades évolués a été identifiée en tant que telle en 2022, pour naturellement accompagner les développements autour du thème. Effectivement les questions autour de l'evolution stellaire menant aux objets compacts et phénomènes transitoires sont récentes (seule une dizaine d'évènements d'ondes gravitationnelles étaient connus en 2019) et constituent véritablement une direction nouvelle. A l'inverse, la question de la perte de masse est ancrée dans la communauté depuis longtemps, et lors de la dernière mandature elle était associée à la thématique "structure interne et atmosphère". En 2019, les questions émergentes concernaient : 1) formation et l'évolution des grains dans les enveloppes circumstellaires, 2) la contrainte et la compréhension des processus de perte de masse et 3) les pistes de développement des modèles gaz/poussière.

Ces dernières années ont clairement vu les avancées de la communauté autour de la perte de masse des étoiles évoluées, avec la combinaison de différents moyens observationnels comme l'interférométrie optique (PIONIER, GRAVITY & MATISSE/VLTI et VEGA/CHARA) et submm (ALMA, NOEMA), l'imagerie (VLT/SPHERE) et la spectropolarimétrie Visible (ESpaDOnS/CFHT, Narval/TBL) mais également les modèles théoriques. Cela a permis, par exemple, de proposer des modèles pour la perte d'éclat de Bételgeuse, en lien avec la dynamique des flux convectifs. A cela s'ajoute une structuration autour de l'ANR PEPPER, et au delà. Les nouvelles observations, notamment avec VLTI/MATISSE, ont permis de caractériser la géométrie des environnements de poussières de certaines étoiles (Wolf-Rayet, Céphéides, étoiles AGB). Cependant, le développement de modèles gaz/poussière reste limité.

Astrophysique de laboratoire

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'étroite synergie avec les codes, par exemple de MHD radiative comme FLASH, GORGON, FCI2 ou ParisDurham, est un aspect fondamental de cette discipline. Elle permet à la fois de dimensionner les expériences, de les interpréter, mais elle apporte aussi une validation expérimentale des méthodes numériques dans des contextes extrêmes.

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 [1]), qui reconnait 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 [2]. De manière similaire, le document Astronet science vision & infrastructure roadmap 2022-2035 recommande que les "Laboratories and archives are supported to effectively produce, archive, and provide fundamental data on atoms, molecules, and optical properties of solids for astrophysical and astrochemical purposes." [3]

En France, l'essor de l'astrophysique du laboratoire est de plus en plus reconnu et bénéficie du soutien de plusieurs instituts du CNRS, parmi lesquels CNRS Physique (ancien INP), CNRS Chimie (ancien INC) et du CNRS Terre & Univers (ancien 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 des bases de données riches et exhaustives pour interpréter les observations d'une qualité de plus en plus élevée, mais concernent aussi l'etude 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 dans les atmosphères ? Quelles sont les propriétés physiques des poussières dans les disques protoplanétaires et les régions de chocs ? Quels sont les mécanismes d'éjection de jets dans les processus d'accrétion ? Et quel est l'impact des champs magnétiques et des géométries d'accrétion sur les propriétés des jets ? Ces travaux recouvrent 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 comprennent des thématiques soutenues de façon récurrente par le PNPS et visant à

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
3. https ://www.astronet-eu.org/wp-content/uploads/flipbook/Astronet_Exec/files/downloads/Astronet_RoadMap2022-2035_ExecSummary_interactive.pdf

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 regions 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 date, mais toujours d'actualité, est l'identification des éléments chimiques dans les spectres stellaires et la détermination de leur abondance [e.g. 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 [Hu et al., 2020]. 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 [Chikh et al., 2021]. 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 [Xu et al., 2022]. 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. 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 lancée. 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 [Burdonov et al., 2021] en Novembre-Décembre 2023. Les résultats du SANDIA pourront être testées 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.html Cunto et al., 1993].

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

Les spectres visibles et 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, CRIRES+ 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 entrepris 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 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 matériaux sous conditions extrêmes relevantes pour les exo-planètes

Comprendre le comportement des matériaux sous des conditions de pression et de température extrêmes est crucial pour améliorer les modèles des intérieurs planétaires et pour élucider leur structure, leur formation et leur évolution. Cette problématique devient de plus en plus captivante aujourd'hui, en raison de la découverte continue d'exoplanètes de diverses tailles et compositions. En étroite synergie avec les calculs ab initio, les expériences de compression dynamique par laser offrent la possibilité de mesurer l'équation d'état ainsi que les propriétés optiques et de transport des matériaux dans des conditions de pression et de température extrêmes. Les avancées dans ce domaine englobent des mesures optiques de plus en plus précises, et l'utilisation innovante de rayons X provenant de sources générées par laser, de lasers à électrons libres ou de synchrotrons pour des investigations microscopiques. La France réunit certains des chercheurs les plus éminents dans le domaine des expériences de compression par choc, ainsi que des experts mondiaux en calcul ab initio, dans le but commun de fournir des propriétés cruciales de matériaux fondamentaux pour une meilleure compréhension des intérieurs planétaires. Dans l'étude [Brygoo et al., 2021], des preuves expérimentales ont été obtenues démontrant l'immiscibilité de l'hydrogène et de l'hélium dans les conditions internes de Jupiter. Ces découvertes apportent un appui microphysique aux modèles qui suggèrent une stratification de l'intérieur de Jupiter pour expliquer les observations des missions spatiales Juno et Galileo. D'autres études ont été menées sur la fusion des phases super ioniques ainsi que sur l'estimation de la conductivité des glaces planétaires dans des conditions prédites par des modèles chauds et super-adiabatiques d'Uranus, Neptune et des exoplanètes de type Mini-Neptune. Les résultats suggèrent une augmentation de la conductivité dans les couches fluides et riches en eau où peut être généré l'effet dynamo [Hernandez et al., 2023]. De façon similaire, l'utilisation de mesures de réflectivité optique à diverses longueurs d'onde combinées à des calculs ab initio a permis d'obtenir des informations sur la conductivité élec-

trique des silicates dans des conditions thermodynamiques pertinentes pour les manteaux des Super-Terres. Ces résultats corroborent l'hypothèse selon laquelle les océans de magma profonds pourraient générer un champ magnétique dans ces types de planètes [Guarguaglini et al., 2021]. Les propriétés du fer et des alliages de fer ont également été étudiées à l'aide de diagnostics par rayons X [Krygier et al., 2022].

Propriétés des poussières

EXPERTS (EXploring Planet formation with lab ExpeRimenTS) : 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 ExpeRimenTS) 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 porté 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 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., 2024]. 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 par-

ticules 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.

Des travaux alternatifs reposent sur l'étude de l'évolution des poussières silicatées [Demyk et al., 2022] ou encore des hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH) [Foschino et al., 2019] autour des proto-étoiles et dans les milieux denses. Ces données, à la frontière avec le PCMI, sont utilisées pour affiner l'interprétation des observations des poussières autour des proto-étoiles, comme détaillé dans le chapitre "Origine".

Phenomènes 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 Khiar 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.

Généralisation du concept de lois d'échelle et processus d'accrétion autour des étoiles à neutrons

Pour justifier de la pertinence des maquettes millimétriques typiques des expériences de laboratoire, il est nécessaire d'établir un cadre rigoureux pour évaluer la pertinence 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]. 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 plusieurs contextes astrophysiques, 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 V. Tranchant, l'équipe du CEA menée par E. Falize et L. Van Box Som, a donc proposé 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 mathématisa-

tion 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 [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

L'importance croissante de l'astrophysique de laboratoire se manifeste de manière de plus en plus indéniable. Cela est explicite dans la nécessité de mieux interpréter les observations, de plus en plus précises, et de comprendre divers aspects de la physique stellaire, incluant leur formation, leur évolution et leur interaction avec leur environnement. Si les projets déjà initiés lors du précédent bilan ont été considérablement développés (notamment avec de nouveaux diagnostics, des collaborations renforcées, l'implementation de nouveaux dispositifs expérimentaux, etc.,) et se focalisent sur des aspects de plus en plus pointus, il est notable que des nouveaux projets ont émergé au cours des quatre dernières années. Il est également important de souligner la mise à disposition de la communauté de nouveaux grands instruments, comme le laser Apollon, ou le EuropeanXFEL. Avec les développements de nouvelles approches théoriques, ces instruments élargissent considérablement la gamme des diagnostics et des régimes accessibles dans ces expériences en laboratoire.

Prospective 2024-2028

Organisation du colloque de prospective

Le 5ème colloque de prospective du PNPS a eu lieu du 9 au 11 janvier 2024 à Marseille (https://pnps-2024.sciencesconf.org/) et a permis de réunir une centaine de personnes travaillant sur les thématiques de physique stellaire (de l'ordre de 80 personnes en présentiel et une vingtaine en distanciel). Il faisait suite à l'organisation de 2 journées à mi-parcours en juin 2022 et à une enquête auprès de la communauté qui ont permis de dresser le bilan présenté dans les chapitres précédents.

L'objectif de ce colloque était de rassembler la communauté physique stellaire française dans le cadre de cet exercice de prospective, afin de susciter des échanges sur le bilan des cinq dernières années et des principales questions de prospective. Les sessions étaient de deux types : sessions de présentations essentiellement organisées selon nos axes prioritaires (une présentation du bilan par un membre du CS du PNPS, suivie de présentations soumis ou sollicitées par le CS) ; sessions de discussions portant sur la prospective. Les trois sessions de discussions (plus de 5h réparties sur les 3 journées) ont été organisées en 3 sous-groupes, chacun animé par une personne extérieure au CS, avec l'objectif de favoriser l'expression de toute la communauté. Une session de restitution a eu lieu en fin de colloque. Les échanges en sous-groupe ont donc représenté plus de 15h d'échanges riches et fructueux, et ont permis d'apporter de nombreuses réponses, avec une grande complémentarité entre les groupes, formant une base solide qui a nourri ce document de prospective. Tous les groupes ont abordé toutes les questions posées, qui étaient organisées en trois parties :

Thématiques et méthodologies :

- Quelles sont les questions scientifiques qui vous semblent être actuellement en émergence et qui prendront de l'ampleur à l'horizon des 5 à 15 prochaines années ? Sur lesquelles sommes-nous bien ou mal positionnées (moyens humains, compétences, ...) ?
- Quelles sont les grandes questions scientifiques sur lesquelles la communauté PNPS française vous semble être en retrait ou en perte de vitesse ? Sur lesquelles un effort particulier (formation, structuration, ...) vous paraît devoir être fait pour améliorer son positionnement ?
- Les activités de la communauté PNPS autour des questions du BigData et de l'IA sont modestes en comparaison à d'autres domaines AA. Pour quelles questions scientifiques ces méthodologies vous paraissent devoir être développées ?
- Les thèmes prioritaires du PNPS vous semblent-ils appropriés ? Couvrent-ils suffisamment les activités de la communauté ?
- Les thèmes prioritaires mélangent des approches thématiques et méthodologiques. Ainsi, ils sont non-exclusifs et peuvent avoir des interfaces complexes. Quelles sont vos propositions pour améliorer cette structuration et augmenter la visibilité des activités du PNPS ?

Moyens :

- Quels sont les moyens et actions nécessaires pour assurer et optimiser l'exploitation scientifiques des missions spatiales majeures pour le PNPS que sont Gaia, JWST et PLATO, ainsi que les défis et enjeux ?
- Quels sont les projets instrumentaux (Sol & Espace) qui vous paraissent devoir être des priorités pour la communauté PNPS dans les 5 à 15 ans à venir ? Et pourquoi ?
- Quelles sont les pistes et moyens nécessaires pour assurer le positionnement de la communauté française en spectropolarimétrie (et

plus généralement quel est l'avenir des T2m et des observations au CFHT) ?

- Comment soutenir et valoriser les expériences d'Astrophysique de Laboratoire et de R&D d'intérêt pour le PNPS (en particulier ceux qui ne sont pas dans le soutien immédiat à un projet) ? Comment assurer la maintenance et garantir la continuité de l'expertise sur un temps long ?

- Les infrastructures existantes (et à venir) auxquelles la communauté PNPS a accès sont-elles suffisantes pour répondre aux questions scientifiques clés ? Les moyens numériques, concernant les codes communautaires (ou pas), les infrastructures de calcul, de stockage et partage des données (de tous types) sont-ils adaptés aux enjeux à venir ?

Organisation :

- Dans le cadre de la restructuration des Programmes Nationaux AA, quel rôle pour les ex-PN (futures AT) ?

- Les périmètres des Programmes Nationaux (actuels) sont-ils suffisament bien définis ? Les interfaces entre les Programmes Nationaux (actuels) sont-elles claires et satisfaisantes ?

- Si un Programme National (ou Action Thématiques dans la nouvelle terminologie) systèmes exoplanétaires était mis en place, où placer la nouvelle interface avec le PNPS ? Quel serait le périmètre le plus pertinent pour le PNPS ?

- Le nombre de SNO dans le domaine Astronomie-Astrophysique est important (>100) et la question sera probablement posée de les structurer autrement. Par ailleurs, la prospective organisationnelle INSU en cours pointe vers un renforcement des synergies entre SNO et Infrastructures de Recherche. Comment voyez vous une telle synergie ? Avez-vous des propositions sur une meilleure structuration des SNOs ?

- Quelles sont les actions possibles au niveau des Programmes Nationaux pouvant réduire l'impact environnemental de nos activités ? Est-ce que le PNs (ou futurs AT) vous paraissent être le bon niveau pour mener ces actions ?

Les grandes évolutions thématiques et méthodologiques

La compréhension des processus physiques et chimiques qui contrôlent la structure et l'évolution des étoiles, depuis les stades les plus précoces jusqu'au stades ultimes, est le fil conducteur de la physique stellaire. Cette question porte néanmoins bien au-delà car la connaissance des étoiles irrigue la grande majorité des disciplines en astrophysique et en fait une thématique centrale qui sera dans la décennie à venir au coeur des préoccupations d'une large communauté.

Les grandes questions scientifiques et les évolutions à venir

Nous décrivons ci-dessous les grandes questions prioritaires de la physique stellaire pour la période à venir et, parmi elles, celles qui émergent et/ou qui auront vocation à prendre de l'ampleur dans la décennie à venir.

Les questions prioritaires pour la période 2024-2028

Ainsi, les grandes questions scientifiques dans le périmètre du PNPS pour la décennie à venir peuvent se décliner de la façon suivante :

- Quelles sont les processus physiques et les propriétés du milieu interstellaire qui permettent de transformer le gaz du milieu interstellaire en proto-étoiles puis en étoiles ?
- Quelles sont les propriétés de l'environnement des proto-étoiles, les interactions entre les différentes composantes (disques, jets, poussières, régions de chocs, ...) et leur impact sur l'évolution de l'étoile et la formation des planètes ?
- Quels sont les effets des processus dynamiques (associés à la rotation, au champ magnétique, à la convection, à la turbulence, au transport des éléments chimiques et des propriétés atomiques et moléculaires) sur la structure interne et l'évolution des étoiles ?
- Comment améliorer la précision et l'exactitude de la détermination des paramètres fondamentaux des étoiles (et en particulier leurs âges) à travers l'ensemble du diagramme HR ?
- Quel est l'impact des propriétés des étoiles sur l'évolution de la galaxie et la cinématique dans les amas ?

- Quelle est l'origine du magnétisme stellaire, ses propriétés (topologie, évolution temporelle, cycles, ...) et son impact (rotation, rotation différentielle) dans les zones radiatives et convectives ?
- Quel est l'impact de la variabilité stellaire (magnétisme, dynamique photosphérique) sur la détectabilité et la caractérisation des exoplanètes ?
- Quels processus stellaires impactent les propriétés orbitales (migrations, effets de marée, ...) et atmosphériques des exoplanètes ?
- Quels sont les processus à l'œuvre dans les interactions étoile-étoiles et avec leur environnement des binaires serrées ?
- Quelles sont les origines physiques et les propriétés de la perte de masse des étoiles massives et des étoiles les plus évoluées ?
- Comment les étoiles ont-elles évolué pour former les objets compacts et phénomènes transitoires observés ?

Ces questions sont pour partie dans la continuité de la période précédente. Nous avons cependant identifié des thématiques qui devraient monter en puissance, sur la base d'expertises fortes de la communauté française et des avancées récentes.

Questions émergentes sur le thème Origines

Le thème Origines, central pour le PNPS, a connu de nombreuses avancées dans les dernières années grâce en particulier aux observations obtenues par les grands interféromètres ALMA/NOEMA, les instruments du VLT mais également plus récemment JWST. Cette dynamique aura vocation à s'accentuer autour de deux questions liées à la transformation de la matière et aux disques circumstellaires lors des phases de la formation stellaire, thématique importantes et fortement représentées dans la communauté s'intéressant à la formation stellaire et planétaire.

- *La transformation de matière du milieu interstellaire en étoiles.*

Aux échelles et stage évolutifs durant lesquelles la matière du MIS est transformée en étoiles, les avancées récentes permettent d'espérer répondre à plusieurs questions dans la décennie à venir. Parmi celles-ci, il sera crucial d'obtenir des observations permettant de tester si la masse et le moment cinétique des étoiles sont définis au moment de la formation des coeurs pré-stellaires, ou durant les phases plus dynamiques qui transfèrent la matière de ces coeurs vers les étoiles, lorsque celles-ci commencent à s'y former. Par exemple, l'exploration des très petites échelles protostellaires dans l'infrarouge et le (sub-)mm permettront sans aucun doute d'apporter des clés de compréhension sur les mécanismes d'accrétion, vers le disque et vers la proto-étoile elle-même. De même, si le panorama de moyens instrumentaux le permet, il faudra certainement comparer les observations aux modèles afin d'établir si le champ magnétique et la turbulence aux échelles des nuages moléculaires sont en partie responsables de la régulation des spectres de masse et de rotation des étoiles à leur arrivée dans la phase pré-séquence principale. La prochaine période verra aussi la montée en puissance des études permettant de sonder la dépendance de ces propriétés aux conditions physiques régnant dans différents environnements Galactiques, et la compréhension fine des phénomènes physiques en jeu aux toutes petites échelles, où peu de contraintes sont disponibles à l'heure actuelle.

- *Vers une vision globale des disques circumstellaires et protoplanétaires.*

Depuis peu, la conjonction de technique observationnelles avec par exemple l'interférométrie (Gravity, MATISSE, ALMA) et le couplage haute résolution angulaire / haute dynamique (JWST, et à terme ELT/METIS) permet d'espérer appréhender l'étude des disques circumstellaires et protoplanétaires en donnant des contraintes à toutes les échelles et selon plusieurs dimensions (structure, dynamique, composition chimique). Un des objectifs de ces observations multi-longueurs d'ondes sur les disques protoplanétaires sera de comprendre l'évolution des particules solides vers des graines de planètes, mais aussi la dynamique du gaz dans les disques. En parallèle, le défi sera de pouvoir suivre numériquement l'évolution des disques circumstellaires depuis leur formation et durant leur évolution séculaire pour construire des modèles de synthèse de protoplanètes autour d'étoiles de type solaire et jusqu'à leur dissipation. L'apport des développements de codes 3D MHD publics tournés vers le GPU pour permettra enfin de combler le fossé entre les modèles de disques protostellaires et les disques protoplanétaires. Enfin, les efforts se focaliseront certainement sur le rôle du disque circumstellaire dans l'évolution des propriétés stellaires durant la phase pré-séquence principale, mais aussi de l'activité de

la jeune étoile sur l'évolution des systèmes planétaires qui se développent dans son disque.

Questions émergentes sur le thème Champs magnétiques et activité stellaire

Le *magnétisme stellaire* va rester un thème majeur pour la communauté française. Au sein de ce thème, des résultats de ces dernières années ouvrent des champs nouveaux qui permettront de fournir des diagnostics nouveaux sur certaines régions de l'étoile ou sur la diversité des processus en cause. Deux axes importants auront certainement vocation à se développer, à savoir :

- *Le champ magnétique dans les intérieurs stellaires : origine(s), évolution, et impact sur la structure et la dynamique interne des étoiles.*

Cet axe résulte de la conjonction de deux résultats importants. Premièrement, la détection de champs magnétiques par une équipe française dans le coeur des étoiles évoluées par l'astérosismologie, avec des prospectives vers les étoiles de séquences principales (grâce aux pulsateurs de type γ-Doradus). En effet, c'est la première fois que nous avons accès aux champs magnétiques dans les intérieurs stellaires. Deuxièmement, le développement rapide des simulations MHD en géométrie sphérique ont permis de mettre en évidence la dynamo de Tayler-Spruit et d'étudier les instabilités de type MRI (Magneto-Rotational Instability). Le développement des simulations numériques portant sur les interactions entre champ magnétique et rotation bénéficieront des observations directes sur l'intensité et la topologie du champ magnétique grâce à des observations sur le long-terme. Ces études pionnières, encore une fois portées par la communauté française, sont très encourageantes pour avancer sur notre compréhension de l'origine du champ magnétique mais également sur son évolution et son impact sur la structure et la dynamique interne, et plus généralement sur l'évolution des étoiles. Enfin, la mise en synergie de ces avancées observationnelles et théoriques laisse entrevoir un bond significatif dans les prochaines années avec un leadership de la communauté française.

- *Comprendre et modéliser l'activité stellaire : passer du qualitatif au quantitatif.*

Les résultats récents obtenus en radio, avec la première détection d'un sursaut de type II pour une autre étoile que le Soleil ouvre également une voie complètement nouvelle, très intéressante dans un contexte instrumental favorable avec LOFAR, NenuFar, et l'arrivée prochaine de SKA. Au-delà de l'ouverture de cette nouvelle fenêtre sur l'activité stellaire, la synergie avec les autres approches dans lesquelles la communauté française est fortement impliquée (spectropolarimétrie dans le visible et l'IR, émission chromosphérique) a vocation à se développer pour obtenir une vision multi-échelle et avancer sur notre compréhension des processus physiques sous-jacents, certains étant très mal connus pour des étoiles autres que le Soleil (supergranulation, circulation méridienne). Cela est et sera d'autant plus crucial dans les années à venir que l'étude de l'impact de la variabilité stellaire présente un fort enjeu avec PLATO car sa caractérisation et modélisation est actuellement le facteur limitant pour déterminer avec précision la masse des petites planètes. A contrario, l'étude de l'activité stellaire dans ce contexte est un domaine en expansion car au centre des préoccupations pour la caractérisation des atmosphères exoplanétaires (dans la perspective de la mission ARIEL par exemple) mais également de la compréhension des interaction étoiles-planètes. La communauté française possède des compétences variées et fortes qui doivent pouvoir lui permettre de contribuer significativement à ces avancées.

Questions émergentes sur le thème Evolution, structure interne et atmosphères

L'arrivée prochaine des données issues de la mission PLATO (lancement prévu fin 2026) couplées aux prochaines fournitures de la mission Gaia, aux grands relevés de spectroscopie (WEAVE, 4MOST), ainsi que les relevés d'interférométrie (par ex. SPICA) promettent de permettre un bond à la fois quantitatif et qualitatif sur notre connaissance des intérieurs et atmosphères stellaires. Cette perspective guidera une grande partie de la communauté PNPS à l'horizon d'une dizaine d'année et nécessitera en amont et aval des développements théoriques. L'enjeu sera de permettre à la communauté française de tirer au mieux profits de ces données afin d'obtenir un retour scientifique à la mesure de son investissement dans ces projets.

- *Comment les processus dynamiques et leurs interactions (ondes, turbulence, champ magnétique,...)*

influencent et façonnent la rotation et la composition chimique des étoiles ?

Le transport et la redistribution du moment cinétique et des éléments chimiques est une question centrale et omniprésente dans la physique stellaire. Cependant, notre mauvaise compréhension des processus magnéto-hydrodynamiques dans les régions radiatives constitue actuellement une pierre d'achoppement qui sera sans aucun doute au centre des préoccupations de la communauté française dans les années à venir. Cela passera par un développement et une utilisation accrue des simulations numériques lourdes qui seules permettront d'appréhender la complexité de ces processus physiques et de leurs interactions, par essence multi-échelles et non-linéaires. Ces études nourriront ainsi le développement des codes d'évolution stellaire (par ex, 2D avec ESTER et 1D avec CESAM2k20) qui permettent de faire le pont avec les observations et ainsi valider notre description des intérieurs stellaires.

Ainsi, avancer sur cette question est fondamental pour la compréhension de la structure et de l'évolution des étoiles mais également pour être en mesure de fournir des estimations à la fois précises et exactes des paramètres fondamentaux des étoiles (en particulier leurs âges) ce qui permettra d'irriguer des domaines de l'astrophysique bien au-delà du PNPS.

- *Prédire l'âge des étoiles de façon précise et exacte : un enjeu central et transversal.*

L'amélioration de la précision et l'exactitude de la détermination des paramètres fondamentaux des étoiles (et en particulier leurs âges) à travers l'ensemble du diagramme HR est un fil conducteur qui guide une part importante de la communauté depuis maintenant de longues années. Des progrès considérables ont été faits mais les défis restent importants tant du point de vue de la modélisation des processus dynamiques discutés ci-dessus que du point de vue observationel. Sur ce dernier aspect, la prochaine période verra l'émergence de la mise en synergies de techniques (photométrie de haute précision, spectroscopie, interférométrie et astronmétrie) sur une grande échelle. Il s'agit là d'une occasion unique, que la communauté française devra saisir au mieux, de faire un bond en avant sur la détermination des paramètres fondamentaux. Cela ouvrira en particulier des perspectives sans précédent sur notre capacité à reconstruire l'histoite dynamique et chimique des étoiles de notre galaxie.

- *Etoiles très massives et super-massives.*

Les étoiles très massives présentes un intérêt pour leur impact sur la compréhension des premières galaxies et de la ré-ionisation. La présence de ces étoiles, ainsi que de potentielles étoiles super massives (encore jamais observées) peuvent affecter les mesures de masse des premières galaxies vues par JWST et aider à réconcilier les modèles de formation des premières galaxies avec les contraintes observationnelles. Les étoiles super massives présentent également un intérêt comme graines des premiers trous noirs de masse intermédiaires, ainsi que pour la compréhension des populations multiples dans les amas globulaires. Quant aux étoiles de population III, leur détection et leur caractérisation intervient comme une brique essentielle pour les études focalisées sur les premières phases de formation de ces métaux dans l'Univers primordial. L'avènement de nouveaux moyens observationnels tels que JWST, VLT/MOONS, SUBARU/PFS, ainsi que les interféromètres millimétriques au sol ALMA et NOEMA marquent un tournant dans cette quête (qui s'accélérera avec la mise en service du Roman Space Telescope, des instruments ELT HARMONI et MOSAIC, ou de SKA). Au-delà de l'aspect intrinsèquement lié à la physique stellaire, la communauté PNCG va être très utilisatrice de résultats, et notamment de modèles, produits par la physique stellaire, et des interactions entre communautés seront essentielles.

Questions émergentes sur le thème Stades ultimes

La thématique de l'*évolution stellaire* jusqu'aux objets compacts est par essence une émergence, identifiée courant 2022 comme telle par le PNPS, qui a vocation à se développer dans les années à venir. L'astrophysique multimessager, avec en particulier la multiplication des détections d'ondes gravitationelles, en est un des moteurs important. Le second moteur est lié aux phénomènes transitoires qui recevront une attention accrue dans les années à venir avec l'arrivée de moyens dédiés (Le Large Survey of Space and Time du Vera Rubin Observatory et son broker français FINK, le satellite SVOM avec un lancement prévu mi-2024 et ses stations sol ainsi qu'un ensemble de télescopes robotiques dédiés tels que le

réseau GRANDMA, Tamarins ou le NTE). Le lien avec PNHE est évident mais le PNPS a vocation à jouer un rôle de plus en plus important avec en particulier un focus sur l'étude des populations de sources et la compréhension de leur structure et évolution. Dans ce contexte, deux grandes questions explicitées ci-dessous semblent se dégager.

- *Comment les étoiles évoluent-elles pour donner les objets compacts et phénomènes transitoires qu'on observe ?*

Des échantillons de plus en plus grands d'observations d'objets compacts et phénomènes transitoires sont maintenant à notre disposition (catalogue LIGO/Virgo/KAGRA GWTC-3 $\simeq$ 300 objets, relevés photométriques, relevés haute cadence pour les transitoires,...). Etant donné le contexte très favorable, ces échantillons s'étofferont significativement dans les années à venir. L'enjeu sera alors de proposer une vision cohérente en terme de compréhension des populations mais également de décrire la physique de ces objets et cela passera par l'étude détaillée d'objets pour lesquels de nombreuses données auront été obtenues.

Etant donné que les objets compacts et explosions de SNe portent de nombreuses traces de l'évolution stellaire et des interactions entre étoiles, de telles analyses permettront de contraindre l'évolution stellaire dans des contextes autrement difficilement accessibles (étoiles massives, étoiles individuelles, univers lointain, métallicité variée...). Dans ce contexte, le lien entre Univers local et lointain est un sujet qui a vocation à prendre de l'importance étant donné que la signature dans l'Univers lointain (par ex. coalescences de TN, SNe) peuvent avoir des progeniteurs dans l'Univers proche, dont l'étude sera naturellement plus aisée bien que les populations aient des caractéristiques différentes (différence de métallicité, etc...).

- *Quelles sont l'origine et les propriétés de la perte de masse lors des stades finaux des étoiles de toute masse ?*

Important à la fois pour l'évolution stellaire (perte de masse, moment cinétique, lien SN) et l'évolution cosmique (enrichissement chimique, production de poussières), la compréhension de la perte de masse des étoiles et en particulier dans les stades d'évolution les plus avancés est cruciale. L'origine physique de cette perte de masse est néanmoins différente selon la masse et le stade évolutif, avec de nombreux phénomènes qui entrent en jeu : la pression de radiation, les ondes acoustiques, les poussières, les chocs, les ondes d'Alfven, la convection turbulente. Cela continuera de poser un défi dans les années à venir, mais la question de la compréhension des mécanismes de génération des vents stellaire sera sans aucun doute fondamentale avec en particulier la nécessité d'apporter une vision globale. En effet, il s'agira de déterminer comment ces mécanismes dependent des paramètres fondamentaux des étoiles. Pour cela, la communauté française dispose d'atouts avec une expertise observationnelle forte (HRA, haute dynamique, (spectro)polarimétrie), très bien illustrée lors de la perte d'éclat de Betelgeuse 2019-2020. Ce savoir-faire sur des approches multi-techniques et une montée en puissance de leur mise en synergie avec les simulations multi-D seront cruciales pour avancer sur la question.

Les évolutions méthodologiques

Lors de l'enquête 2022, la plupart des personnes qui ont répondu à la question sur l'évolution méthodologique ne prévoient aucune évolution méthodologique (89%). Ce constat a été conforté par l'analyse du CS ainsi que le retour de la communauté lors du colloque de prospective. Quelques évolutions ont cependant été notées, comme l'émergence de la magnéto-astérosismologie, et dans un domaine différent la volonté affichée d'aller plus avant vers l'analyse de grands relevés, la combinaison d'approches observationnelles, ou encore l'utilisation des nouvelles données arrivant dans les prochaines années. Nous avons également identifié des évolutions majeures dans les années à venir sur les approches BigData et IA d'une part, et sur les codes de simulations numériques lourdes d'autre part.

BigData et IA

Lors du bilan effectuté par le CS, corroboré par l'enquête effectuée en 2022 ainsi que lors du colloque de prospective, il n'est pas apparu que la communauté PNPS est fortement impliquée dans le développement des approches BigData et IA. Néanmoins, nous constatons cependant une diversité d'actions en ce sens, mais encore trop peu visibles et très peu structurées. Ces développements sont de natures très diverses, certaines approches IA sont fortement liées au BigData (gros volumes de données, classification, grilles), mais d'autres peuvent

concerner le traitement de données (par exemple images ou spectres) qui ne sont pas forcément massives. Quelques exemples portant sur des thématiques très différentes sont la détection de filaments dans les régions de formation d'étoile, l'amélioration du traitement des raies telluriques en spectroscopie, les signaux complexes comme ceux causés par la variabilité stellaire et le filtrage de l'activité lors de la recherche et la caractérisation d'exoplanètes. Notons que l'exploitation de grands relevés tels que Gaia commencent également à s'appuyer sur des approches IA, de même que pour l'interrogation d'archives (ALMA, NOEMA). Ces problématiques vont devenir plus prégnantes avec l'arrivée des énormes quantitée de données issues des prochaines génération d'instruments (par ex. LSST et SKA), mais aussi des données produites par les simulations numériques lourdes avec en particulier le passage à l'exascale.

Bien que les problématiques autour des questions du BigData et de l'IA ne soient pas nouvelles, elles sont en constante évolution et elles diffusent assez rapidement dans la communauté PNPS. Cette dernière est parsemée d'initiatives encore trop isolées et un effort de structuration et d'accompagnement à faire pour que la communauté PNPS puissent bénéficier à plein de ces évolutions et des opportunitées associées. Pour cela, il faudra favoriser la mise en réseau de compétences complémentaires, qui nécessiteront de faire converger des cultures et expertises bien spécifiques afin qu'elles soit associées pour faire avancer les questions astrophysiques. Cela concerne bien évidemment le développement de collaborations entre mathématiciens, astrophysiciens, et spécialistes du traitement du signal. Nous notons que ces problématiques se posent déjà dans d'autres domaines de l'astrophysique et que des compétences se développent dans d'autres PNs. Des actions transversales sont donc certainement nécessaires avec dans un premier temps le lancement d'une action de recensement et de coordination qui pourrait bénéficier à toute l'astrophysique.

Numérique

Nous déclinons la problématique du numérique selon deux volets, les codes (éventuellement communautaires, mais pas uniquement) et le traitement de données. Dans les deux cas, des perspectives existent avec les problématiques IA et/ou BigData discutées ci-dessus, par exemple en lien avec de gros volumes de données. Cette problématique liée au coût des calculs, du stockage de données et des transferts est également un enjeu lié à l'impact environnemental de nos activités (voir plus bas).

Les infrastructures HPC existent et sont accessibles à la communauté PNPS. Les choix matériels effectués, indépendamment de notre communauté, imposent cependant des contraintes fortes. Les codes doivent en effet être ré-écrits pour bénéficier des meilleures infrastructures de calcul en cours et à venir, et plusieurs projets sont en cours dans notre discipline (Idefix, Dyablo) qui nécessitent d'être soutenus et coordonnés. Des ingénieurs calcul dédiés à ce type de projet sont en effet nécessaires pour assurer la portabilité et la pérennité de ces codes sur le long terme. Ces ressources manquent actuellement : elles sont de manière générale assurée de manière ponctuelle sur des financements sur projets (par exemple ERC), avec des postes peu attractifs (salaires, CDD), non pérennes, et peu reconnus. La question est posée de mutualiser ce type de postes, par exemple au niveau des mésocentres (mais qui risquent d'être éloignées des contraintes astrophysiques, une proximité avec les utilisateurs de ces codes étant très importantes), ou au niveau des OSUs (permettant ainsi une mutualisation avec d'autres domaines de l'INSU qui peuvent avoir des problématiques similaires) ou des laboratoires.

En complément, la problématique du stockage des données de simulation et leur utilisation par une large communauté se pose de manière similaire à celle de la question des données d'observation. Une initiative telle que la base de données *Galactica*, initié localement, et visant à un effort de partage de ce type de données afin d'éviter les multiples copies et une utilisation optimale est à encourager et étendre plus largement, par exemple dans le cadre de l'ANO-CC.

La problématique du numérique, et en particulier le stockage de données, concerne également le traitement de données massives. Les besoins en stockage augmentent continuellement, et leur mutualisation est complexe. Leur exploitation nécessite de plus en plus des expertises différentes et complémentaires. Le traitement de données massif est actuellement impossible sur les centres de calcul nationaux, et il serait intéressant d'entamer, au niveau de la communauté PNPS et plus largement, une ré-

flexion sur la façon optimale d'analyser les données brutes sans les dupliquer. Le besoin reste à quantifier.

Moyens et priorités instrumentales

Le PNPS joue et doit continuer à jouer un rôle majeur pour structurer la communauté autour des nouveaux instruments. Cela nécessite de définir les priorités et de les porter à tous les niveaux. Ces priorités, explicitées ci-dessous, sont issues du sondage 2022, des discussions entre le CS et la communauté à l'occasion des rencontres avec les équipes mais également du colloque de prospective. Avant de détailler ces priorités, notons deux éléments qui ont été importants pour guider les choix effectués par le CS. Tout d'abord, à l'heure des projets de type E-ELT, il est essentiel pour notre communauté de conserver une implication forte sur les 4-8 m au sol, ainsi que sur des instrumentations plus modestes, par exemple pour conserver une capacité à faire du suivi long terme, la dimension évolution temporelle étant importante pour les problématiques abordées en physique stellaire. Notons également que la communauté française étant fortement impliquée dans le développement instrumental, des expertises fortes et uniques ont été acquises et qu'il est donc essentiel de maintenir notre positionnement dans certaines filières où la communauté française est incontournable (par ex. la spectropolarimétrie ou encore l'interférométrie).

En ce qui concerne les priorités pour la période à venir, elles ont été établies sur la base d'un recensement de l'ensemble des moyens utilisés par la communauté PNPS (présentées en annexe). Certains de ces instruments bénéficient d'une contribution française directe (contribution instrumentale dans le cadre d'un consortium) ou indirecte (instrumentation ESO en général), d'autres n'impliquent pas de moyens mis par la France ou bien sont des instruments d'équipes et ne sont à ce titre pas mentionnés. Ces instruments ont également des statuts très différents : certains ne sont plus en opération et leur exploitation portent sur les données d'archives, nous n'indiquons donc aucun de ces instruments dans nos priorités; la plupart sont en opération, et nous indiquons des priorités (tableau 5) pour l'importance de la poursuite de leur exploitation par la communauté et des moyens associés. Ces mêmes besoins sur le soutien aux opérations concernent les instruments acquis et en préparation, et qui entreront en opération dans les quelques années à venir. Enfin, la dernière catégorie d'instruments ne sont pas encore acquis, et nous indiquons clairement nos priorités dans le tableau 6.

Une tendance majeure qui a émergé, avec le NewSpace, est le développement de nanosatellites scientifiques. Ils représentent un changement de paradigme pour de nouveaux concepts d'observation et d'exploration spatiale. Dans le domaine de la physique stellaire, on peut lister par exemple les projets de nanosatellites pour le développement du premier interféromètre annulant spatial (ExoLight) pour étudier la lumière exo-zodiacale, un démonstrateur technologique et scientifique de la spectropolarimétrie UV (CASSTOR), ou l'étude des naines jeunes actives hôtes d'exoplanètes (MARSU). Le nombre important de projets de nanosatellites portés par la communauté témoigne du dynamisme et de l'enthousiasme de notre communauté pour ce nouvel outil scientifique. Abstraction faite des questions de financement, qui demeurent un élément bloquant dans la plupart des cas, l'état d'avancement technique de ces divers projets permettrait d'envisager leur lancement dans les quelques années à venir.

Par la suite, nous détaillons les raisons qui ont amenés aux priorités présentées dans le tableau 6 en nous focalisant sur les filières pour lesquelles les prochaines années seront cruciales.

Infrarouge lointain

Suite à l'abandon du projet SPICA qui était en compétition pour l'appel d'offre M5 de l'ESA en octobre 2020, aucun instrument n'observe actuellement dans l'infrarouge lointain. Comme l'a démontré le satellite Herschel, ce domaine de longueur d'onde est pourtant fondamental pour avancer quant à notre connaissance de la formation stellaire : il permet par exemple retracer l'évolution du gaz, de la glace et de la poussière pour un certain nombre de régions clés de formation d'étoiles et de cartographier le champ magnétique dans les régions de poussière dense où les étoiles se forment afin de déterminer comment ce champ influe sur le processus de formation. Il s'agit d'un domaine où la communauté française est en pointe et il nous apparait donc prioritaire de militer pour un instrument à ces longueurs d'ondes.

Le programme APEX de la NASA ouvre une op-

TABLE 5 – Moyens en exploitation ou en construction prioritaires pour le PNPS.

Catégorie	Indispensables	Nécessaires	Souhaitables
Spatial	Gaia ; JWST ; PLATO	LISA ; TESS	CHEOPS ; EUCLID ; FERMI-LAT ; SVOM ; XMM
Sol	ALMA ; CFHT/ESPaDOnS, SPIRou, VISION ; CHARA/SPICA ; NOEMA ; T193/SOPHIE(RED) ; TBL/SPIP, NeoNarval ; VLT/SPHERE(+) ; VLTI/GRAVITY(+), MATISSE ;	E-ELT/METIS, HARMONI ; LOFAR/NenuFAR ; 3.60m/NIRPS ; APEX/Concerto-Artemis	VLT/SINFONI, FLAMES, MUSE, XSHOOTER ;E-ELT/MICADO
Laboratoire	Lasers multi kJ	Tubes à choc	Laser MJ

TABLE 6 – Moyens non-acquis prioritaires pour le PNPS.

Catégorie	P0	P1	P2
Missions spatiales	New-Athena ; Polarimétrie UV (CASSTOR, POLSTAR, HWO/POLLUX) ; PRIMA	FIRSST ; THESEUS	LEM ; LIFE
Projets sol	E-ELT/ANDES, PCS	SKA	E-ELT/MOSAIC ; MSE ; WST
Sans cadre programmatique	Photométrie haute précision VLT/Spectropol.	VLTI/future génération	
Laboratoire	Lasers de puissance	Tubes à choc, Z-Pinch	XFEL

portunité avec les projets PRIMA et FIRSST qui sont en compétition. PRIMA (The PRobe for-Infrared Mission for Astrophysics) est un telescope spatial dans l'infrarouge lointain, comportant un télescope de 1,8 m de diamètre refroidi par cryogénie. Il contient un imageur spectrophotométrique multibande pour l'imagerie hyperspectrale (R=10) de 24 à 80 μm, et des capacités polarimétriques dans 4 filtres à large bande de 80 à 235 μm (PRIMAger). FIRSST est un spectromètre polyvalent offrant des modes de haute résolution (R 130 et jusqu'à 4400) de 24 à 235 μm. Les deux instruments offrent une couverture spectrale instantanée sans précédent, permettant de cartographier de très grands échantillons d'objets protostellaires et d'environnements autour d'étoiles évoluées, afin d'y mesurer les propriétés des poussières et des champs magnétiques. Son impact sera aussi important pour mesurer la composition du gaz et la minéralogie dans les disques protoplanétaires. Pour ce qui concerne FIRSST, il est conçu pour être un télescope de classe 2m, équipé d'un spectromètre dans l'infrarouge lointain (~30-300 μm) et d'un récepteur hétérodyne à grande longueur d'onde (~200-600 μm). La spectroscopie avec FIRSST permettra d'apporter des contraintes sur les masses des disques protoplanétaire grâce aux observations de l'émission de la molécule HD, et tracera les propriétés de l'eau, grâce à des mesures directes du rapport H/D, à travers toutes les étapes de la formation des étoiles et des planètes.

Des équipes françaises sont impliquées dans ces deux projets mais tant pour ce qui concerne les objectifs scientifiques que pour l'implication des équipes relevant du PNPS, une forte priorité doit être mise sur PRIMA.

A plus long terme, le projet européen de grand télescope au sol AtLAST pourrait présenter d'intéressantes potentialités scientifiques pour explorer les conditions de formation des étoiles avec une résolution inégalée (le design actuel comporte un télescope de 50m fonctionnant entre 30μm et 3mm), mais la réalisation de cet observatoire reste encore très incertaine au vu du budget important et non-sécurisé à ce jour.

Photométrie de haute précision

La photométrie de haute précision et sur des temps longs est une filière qui a été en grande partie portée par la communauté française avec en particulier les missions CoRoT et PLATO mais également des implications dans les missions de la NASA (Kepler, TESS). En terme d'objectifs scientifiques, pour ce qui concerne la physique stellaire, ce type d'ob-

servations permet de sonder l'intérieur des étoiles en utilisant l'astérosismologie, d'étudier l'activité stellaire des étoiles, les interactions étoiles-planètes, ou encore d'étudier les objets compacts. Il s'agit donc d'observatoires assez généralistes, qui en synergies avec les grands relevés astrométriques (Gaia) et spectroscopiques (par ex. WEAVE, 4MOST) sont très prometteurs pour les décennies à venir. Cela est particulièrement important pour la communauté française dont une large fraction travaille sur la thématique "Structure interne Atmosphère Evolution".

Ainsi, le développement du projet PLATO et son exploitation seront centraux dans la période à venir car il s'agit d'un projet structurant pour la communauté PNPS. En effet, PLATO permettra pour la première fois la mise en synergie sur des étoiles proches de la photométrie de haute précision, de l'astrométrie, de la spectroscopie et de l'interférométrie. Cela permettra de faire à la fois un saut qualitatif sur le niveau de précision des contraintes apportées aux étoiles observées mais également quantitatif en augmentant significativement le nombre d'étoiles pour lesquelles nous auront des contraintes sans précédent.

Pour l'avenir, au-delà du projet PLATO, il est essentiel que cette filière reste une priorité forte de la communauté française. C'est fondamental pour avancer sur notre compréhension de l'intérieur des étoiles mais également sur notre capacité à fournir des estimations à la fois précises et exactes des paramètres fondamentaux. En effet, un projet post-PLATO pointe naturellement vers l'astéosismologie des amas ouvert et globulaires. Les étoiles d'un même amas partageant une histoire commune (âge, composition chimique), cela permettra de décupler la capacité de la sismologie à sonder les intérieurs stellaires et répondre aux grands enjeux autour de notre compréhension des processus dynamiques s'y déroulant. C'était un des objectifs du projet Haydn (M7/ESA) qui n'a pas été sélectionné. Néanmoins, le besoin demeure prégnant et le potentiel en terme de résultats scientifiques fait qu'un tel projet devra rester une priorité pour l'avenir.

Spectro-polarimétrie

La spectropolarimétrie est une technique instrumentale qui est fondamentale pour avancer sur notre compréhension du magnétisme stellaire. Outre la détection, elle permet de caractériser l'intensité du champ magnétique mais également sa topologie. Les équipes françaises ont été pionnières sur le sujet à la fois dans le développement instrumental mais également dans l'exploitation des données. Ainsi, ces mêmes équipes ont un positionnement et un leadership qu'il convient de consolider. Cela est d'autant plus important que ces dernières années, un saut à la fois quantitatif et qualitatif a été permis grâce à cette technique observationnelle à la fois pour les étoiles de faibles masses mais également pour les étoiles massives et de masses intermédiaires. Cela a été rendu possible par le développement et l'exploitation d'instruments comme ESPaDOnS@CFHT & NARVAL@TBL dans le visible et plus récemment SPIRou@CFHT dans l'infrarouge (et prochainement avec SPIP@CFHT) qui permettent d'étudier le magnétisme des étoiles froides en synergie avec la détection et la caractérisation des planètes. Le niveau de maturité de la filière de spectropolarimétrie n'est donc plus à démontrer mais les incertitudes quant à l'avenir du CFHT et les difficultés conjoncturelles du TBL évoqués dans le document de bilan font peser un risque à moyen terme sur la filière alors que les questions scientifiques qu'elle permet d'aborder sont fondamentales.

Ainsi, pour à la fois répondre aux questions scientifiques prioritaires pour la prochaine période et assurer la pérenité de la filière, deux axes se dégagent :

- *péréniser l'exploitation de l'existant et préparer l'avenir :* il convient d'avoir accès à des instruments sur des telescopes de la classe des 2-4 m afin de pourvoir assurer le suivi long terme des sources pour avancer sur les questions relatives à l'activité stellaire et aux cycles magnétiques mais également être en mesure de faire des grands relevés. L'arrivée très prochaine de SPIP et VISION au TBL est donc une priorité. Les instruments ESPaDOnS et SPIRou, actuellement en phase d'exploitation, doivent également être pérennisés. Quel que soit l'avenir du CFHT, il apparait essentiel de s'assurer de la continuité de l'exploitation de ces instruments qui donnent des résultats scientifiques de premier plan et pour lesquels la communauté française est leader. Ces priorités ne doivent pas empêcher la communauté française de préparer l'avenir. Ce fut une des questions discutées lors du colloque de prospective du PNPS et il est apparu que le développement d'un spectropolarimètre sur le VLT

doit être priorisé. En effet, il permettrait la détection et la caractérisation de champs magnétiques faibles, d'aller vers des étoiles plus faibles, de couvrir de manière inégallée le diagramme HR. Enfin, cette option permettrait de disposer de capacité de spectropolarimétrie performante dans l'hémisphère sud, ce qui est par exemple très important dans le contexte PLATO et le suivi des cibles.

- *la spectropolarimétrie UV dans l'espace :* faire de la spectropolarimétrie UV revient à ouvrir une nouvelle fenêtre dont le potentiel est énorme car cela permet d'adresser un très grand nombre de questions scientifiques avec par exemple la détection de la lumière UV polarisée réfléchie par les exoplanètes (ainsi que leurs environnements circumplanétaires et leurs lunes), la caractérisation des magnétosphères des étoiles et des planètes, ainsi que de leurs interactions, et d'autres sujets. C'est l'objectif de l'instrument POLLUX (dont le leadership est français) sur la mission NASA Habitable World Observatory (HWO). Il s'agit d'un instrument permettant la spectroscopie de sources ponctuelles à haute résolution spectrale (R dans le domaine 60000 - 120000) avec de la polarimétrie linéaire et circulaire. La France est leader sur cette filière de la polarimétrie UV avec des développements R&D CNES amonts, un projet de nanosat CASSTOR et une participation sur le projet de la SMEX/NASA Polstar centré sur les magnétosphères des étoiles massives et leurs environnements. Ainsi, une feuille de route est déjà tracée avec comme objectif long terme l'instrument POLLUX à l'horizon 2040. Etant donné le potentiel transformant de cette filière et le leadership des équipes françaises sur les développements instrumentaux et l'exploitation scientifique en spectropolarimétrie, le CS du PNPS considère les instruments CASSTOR, POLSTAR, et POLLUX comme étant de très hautes priorités.

Spectroscopie haute résolution

La communauté française est impliquée de longue date dans le développement et l'exploitation de spectromètres à haute résolution spectrale, avec une utilisation massive pour la détection d'exoplanètes par la méthode des vitesses radiales. Ces instruments sont également utilisés par la communauté stellaire pour compléter des observations spectropolarimétriques, par exemple avec SOPHIE sur le T193 de l'OHP, avec des intérêts forts pour la caractérisation de la variabilité stellaire et leur impact sur détection de planètes, à la fois en visible (SOPHIE) et dans l'IR (NIRPS, et prochainement SOPHIE-RED). La complémentarité visible-IR permet également d'étudier la chromaticité de cette variabilité. SOPHIE, bien que massivement utilisé sur la thématique exoplanètes (voir document CET, découvertes, estimation des masses..), est également utilisée pour des recherches variées en physique stellaire, par exemple : suivi de certaines sources Gaia pour identifier de possibles artefact instrumentaux et mesure de vitesses radiales absolues, étude de systèmes stellaires particuliers (systèmes triples, géantes rouges, Cepheids, étoiles Be, étoiles déficientes en métaux), caractérisation de naines brunes, étude de systèmes jeunes (Herbig, protoplanètes), caractérisation des interactions étoiles-planètes,

Parmi les instruments futurs, ANDES sur l'E-ELT est celui qui présente le plus grand intérêt pour la communauté stellaire française, concernant plusieurs de nos thématiques. ANDES permettra d'accéder aux propriétés du gaz dans les régions internes des disques protoplanétaires, régions dans lesquels de nombreux processus impacte la dynamique du gaz, grâce à une très haute résolution spectrale et spatiale. Il sera possible de mieux caractériser certains types d'étoiles dans notre galaxie, comme la composition chimique de naines M, ainsi que la présence de champ de vitesse et des processus d'accrétion, la caractérisation de la photosphère de protoétoiles très jeunes, ou bien encore l'étude de l'impact de la rotation sur le gravity darkening et les propriétés photosphériques des supergéantes rouge et les abondances. Plusieurs membres de la communauté française sont activement impliqués dans les 2 white papers concernant les exoplanètes, incluant les disques protoplanétaires Roederer et al. [2023] et les étoiles et populations stellaires Palle et al. [2023]. Certains de ces travaux pourront être étendus à des étoiles à grande distance, y compris dans d'autres galaxies (par exemple sur l'étude des Céphéides, et potentiellement l'astérosismologie d'étoiles lointaines si l'étude de faisabilité est positive. ANDES permettra également de mieux caractériser les photosphères stellaires et leur impact sur la caractérisation des atmosphères de planètes en transit. Les autres instruments de l'E-ELT de pre-

mière et deuxième génération présente un intérêt en général très ciblé, par exemple METIS sur les disque protoplanétaires. Il sera important d'être attentifs dans les années à venir de soutenir la structuration de la communauté française autour de ces instruments et, pour ANDES, de finaliser l'engagement financier. Nous notons également que ces instruments représentent un investissement sur le long terme très lourd de la communauté, à la fois financier et humain : il faudra également veiller à ce que ces instruments aient une durée de vie suffisante et que la communauté puisse également les exploiter sur le long terme (voir section "Impact environnemental").

Haute résolution angulaire & haut contraste

La haut résolution angulaire joue un rôle clé en physique stellaire, en premier lieu pour l'étude des environnements circumstellaires, des objets jeunes aux étoiles évoluées en passant par les compagnons comme les naines brunes. L'étude des disques protoplanétaires, des jets et des processus d'accrétion repose sur des approches multi-techniques afin de tracer les différentes composantes (gaz, poussières...), mais également multi-échelles, afin de sonder des régions à différentes distances de l'étoile. Les zones les plus proches sont ainsi la cible privilégiée de l'interférométrie, tandis que les parties externes des disques sont accessible par l'imagerie haut contraste. De mêmes, l'interférométrie permet de cartographier les surfaces stellaires des objets évolués (granulation par exemple), tandis que l'imagerie donne accès aux enveloppes. Enfin, l'interférométrie permet la détermination précise de rayons stellaires pour des échantillons de plus en plus importants, ce qui, en conjonction avec les données Gaia, jouera important dans le cadre de la mission PLATO, à la fois en physique stellaire (modèles d'atmosphères et évolution stellaire) et pour la caractérisation des rayons des planètes en transit. La communauté française est à la pointe sur ces deux techniques, avec des activités fortes en R&D (avec de nombreuses personnes impliquées dans l'ASHRA) et des contributions à la construction d'instruments majeurs pour notre discipline.

Dans ce contexte, il est critique de poursuivre l'exploitation des instruments dans lesquelles la communauté est fortement engagée, que ce soit en interférométrie avec les instruments du VLTI (GRAVITY, MATISSE, avec l'arrivée à court terme de GRAVITY+) ou l'instrument SPICA sur CHARA, et en imagerie à haut contraste au sol (SPHERE au VLT, avec l'arrivée prochaine de SPHERE+) ou dans l'espace (JWST). GRAVITY+ va permettre une forte amélioration de la sensibilité, un accès à toutes les régions du plan galactique et une précision accrue. Ces performances permettront d'étudier des échantillons plus importants et non biaisés, et de tester les modèles dans un domaine de paramètres plus large, notamment vers les petites ou grandes masses, et les objets plus jeunes. Le recouvrement avec d'autres approches (photométrie, spectroscopie, spectropolarimétrie) permettra également une meilleure synergie entre techniques. Par ailleurs, SPHERE+ permettra d'observer des objets plus faibles et plus rouges que l'instrument actuel, et d'aller vers des objets plus jeunes.

A plus long terme, la communauté est active pour la préparation de futurs instruments ambitieux. En interférométrie, la future mission LIFE, interféromètre moyen-infrarouge dans l'espace grâce à un vol en formation, a pour principal objectif la caractérisation d'exoplanètes et l'etude leur habitabilité ainsi que la recherche de bio-marqueurs, mais il pourra permettre de traiter des cas scientifiques intéressant pour la physique stellaire, comme l'étude des régions de formations de planètes dans la zone habitable, les régions internes de formation stellaire ou les étoiles évoluées. Enfin, dans le domaine de l'imagerie, SPHERE+ joue le rôle de démonstrateur pour PCS et est donc important pour positionner la communauté française sur cet instrument de 3ème génération pour l'E-ELT. PCS sera de grand intérêt pour l'étude des disques circumstellaires et protoplanétaires et les environnements des étoiles évoluées.

Astrophysique de laboratoire

Les mesures effectuées lors d'expérience en laboratoire correspondent à un besoin fort de la communauté PNPS. L'Astrophysique de Laboratoire a ainsi été un thème transverse au PNPS depuis de nombreuses années qui le rend visible et reconnu. Nous constatons cependant des difficultés de plusieurs natures. Les investissements sur ces expériences se font généralement sur projet (type ANR ou ERC), ce qui pose un problème de pérennisation des expériences (par exemple plasma thermique. Le

coût de ces expériences est assez élevé (plusieurs dizaines de k€ par expérience), auquel il faut ajouter les coût de maintenance et d'opération des grands instruments, comme les lasers de puissance. Bien que moins élevés par rapport à certains instruments typiquement AA, ceux-ci restent trop élevés à l'échelle du PNPS ou d'un laboratoire (par exemple $\sim 500ke/$an pour un laser de taille moyenne comme le LULI2000 du laboratoire LULI). Ces moyens nécessitent donc une coordination entre les instituts impliqués afin de garantir la sauvegarde des installations et assurer la continuité des programmes expérimentaux. Ces problèmes de pérennisation sont renforcés par des difficultés en terme de ressources humaines (voir plus bas), avec un lien entre les différentes communautés qui est à renforcer. La reconnaissance de ces travaux par une communauté "utilisatrice" peut également manquer et pourrait être améliorée en associant davantage les compétences dans les projets. Plusieurs pistes sont possibles, en premier lieu l'organisation d'un colloque (par exemple au niveau de la CSAA ou du futur PN-AA) pour rassembler les communautés astrophysiques et expériences en laboratoire (INSU, INP, INC), ou bien au niveau de la physique stellaire. Une mise en valeur des expérience pourrait également ce faire lors d'ateliers, de l'organisation de visites dans les laboratoires lors de certains colloques, ou bien avec la présentation de maquettes des expériences / modèles d'expérience lors des journées PNPS ou de la SF2A. Au delà, aller vers une structuration formelle aiderait à répondre à ces problématiques (AT transverse dédiée, IR, ...).

Les enjeux de la mandature 2024-2028+

Lors de cet exercice de bilan et prospective, nous avons identifié dans le bilan les lignes de force de la communauté française de physique stellaire. Cela a également été l'occasion de mettre en exergue les défis qui se poseront lors de la prochaine mandature et que nous détaillons ci-dessous.

Des compétences structurantes à conserver et renforcer

Un certain nombre d'outils et de savoir-faire associés sont essentiels pour la communauté française de physique stellaire tant ils sont omniprésents et irriguent bien au-delà du seul PNPS. Il est donc fondamental de préserver ces piliers faute de quoi le leadership scientifique mais également le rôle moteur joué par la communauté française dans les grands projets structurants de la discipline seront fortement fragilisés.

Modèles d'atmosphère : Les modèles d'atmosphères sont un passage obligé pour décrypter les informations que nous collectons dans les spectres stellaires. Ces modèles font appel à beaucoup de physique différente (macroscopique et microscopique, physique atomique et/ou moléculaire, etc.). Nous sommes à un stade où des modèles performants existent pour la plupart des étoiles dans le diagramme H-R (et maintenant pour les atmosphères d'exoplanètes). Ils incluent par exemple les traitements hors-ETL des populations atomiques des différentes espèces chimiques présentes dans les atmosphères et de la formation des raies spectrales correspondantes. Les pistes d'améliorations sont nombreuses. Pour n'en citer que quelques-unes, on peut parler par exemple de la prise en compte systématique des écarts à la symétrie sphérique (2D-3D), de l'amélioration du couplage hydrodynamique – transfert radiatif (notamment dans les codes qui traitent aussi les vents stellaires), de la prise en compte de la dépendance en temps de l'équation de transfert, du couplage modèles d'évolution – modèles d'atmosphères etc. De tels outils sont cruciaux pour extraire des informations quantitatives des données qui sont délivrées par les spectrographes installés sur la génération actuelle de grands instruments sols et spatiaux. Ils le seront encore à l'avenir pour les instruments sur le VLT (e.g. MOONS), l'ELT (ANDES, HARMONI, MOSAIC) et plus loin HWO, par exemple pour identifier et caractériser les étoiles de populations III. Le constat fait lors du colloque de prospective est celui d'une perte de vitesse et de compétence de notre communauté sur l'utilisation des modèles d'atmosphères. Le développement de ces modèles quant à lui ne tient plus qu'à quelques personnes, toutes à l'étranger (depuis le décès de France Allard) et qui vont partir à la retraite. Il faudrait mettre en place une stratégie pro-active au niveau du PNPS pour combler ces lacunes qui se développent. Cela passe peut-être par l'organisation d'ateliers ou d'écoles dédiés, encore que l'expérience montre qu'il est difficile de remplir ces écoles sur ces sujets. Il faut surement d'abord renforcer la formation initiale au niveau master. Il faut aussi noter que travaux existent dans d'autres pays, soutenues par des ERCs, sur le développement/amélioration des modèles d'atmo-

sphères. Il faut décider au niveau de notre communauté où nous souhaitons mettre le curseur, utilisateur ou développeur.

Codes d'évolution : La communauté française a historiquement joué un rôle fort dans le développement de codes de structure interne et d'évolution stellaire. Comme évoqué dans le bilan de la période 2019-2023, une forte dispersion de la communauté autour de plusieurs codes à été constaté et à fortement nuit à la visibilité de la communauté. Face à ce constat, le CS du PNPS à engagé un effort de structuration (en s'appuyant sur la création de l'ANO-CC "codes communautaires") afin de faire évoluer un de ces codes pour qu'il devienne un code communautaire et ainsi mettre en commun les savoirs-faire et énergies pour valoriser et rendre plus visible la communauté française au niveau international. Les actions ainsi engagées (workshop autour des codes communautaires en physique stellaire, etc...) ont abouti à la mise à disposition du code CESAM2k20 qui a par ailleurs été sélectionné par le consortium de la mission PLATO pour fournir les modèles stellaires qui permettront d'obtenir les paramètres fondamentaux des étoiles observées. Il reviendra donc au CS lors de la prochaine mandature de continuer et amplifier cette dynamique. Il est néanmoins apparu que cette stratégie n'a de sens que si, à l'instar des modèles d'atmosphères, la communauté française est capable d'assurer la pérennité de l'expertise en recrutant des jeunes chercheurs possédant les compétences nécessaires.

Astrophysique de laboratoire : la communauté de physique stellaire spécialisée dans l'astrophysique de laboratoire s'est fortement réduite depuis quelques années. Une partie des acteurs sont par exemple émérites : le vieillissement des acteurs et le non recrutement au sein de l'INSU-AA (les recrutements sur ce domaine traverses se faisant largement sur les autres instituts, INP et INC) est très inquiétant pour la discipline, tant pour le choix des travaux prioritaires pour accompagner les missions nécessitant des données fondamentales que pour la perte d'expertise. Alors qu'il s'agit d'une méthodologie essentielle qui nous apporte des contraintes physiques de grande valeur pour nos modèles et l'interprétation des observations, ce constat, déjà faits lors de précédents exercices de prospective, fait porter un risque sur la pérennité de ces activités. Comme le colloque de prospective du PNPS l'a démontré, il existe néanmoins une communauté de physiciens à l'INP qui fait de telles expérience de laboratoire ayant de nombreux liens avec la physique stellaire. La communauté PNPS est bien évidemment utilisatrice des résultats mais un effort doit être fait pour faire émerger davantage des collaborations directes et les pérenniser, afin de guider les expériences sur des questions prioritaires et de garantir un lien fort entre ces expériences et les applications sur lesquelles elles débouchent. Cette interaction est également nécessaire afin d'élargir le spectre des expériences de laboratoire pertinentes pour la physique stellaire. Il conviendra donc de faire un état des lieux en coordination avec les autres programmes nationaux et, si le constat est partagé, engager des actions au niveau de l'INSU pour développer les liens avec l'INP et l'INC sur ces sujets. L'étroite collaboration entre les chercheurs de l'INSU-AA et l'INP dans le cadre de l'astrophysique de laboratoire est en effet ancienne et toujours très active (il en est de même pour l'INC). Cependant elle est le fruit d'individus. Le fonctionnement en silo des différents instituts ne permettait pas de coordonner de façon plus systématique les activités transverses aux différents instituts : le GdR Lepice a vocation à changer cela dans une collaboration concertée entre l'INP et l'INSU-AA, avec un atelier déjà organisé en décembre 2021 autour de l'astrophysique de laboratoire avec les lasers de puissance et plasmas de laboratoire [1]. Il conviendra donc de valoriser et amplifier cette dynamique.

Perénniser les lignes de forces

Comme détaillé tout au long du bilan, le PNPS possède des forces reconnues internationalement lui permettant d'être leader sur un certains nombre de sujets et projets. Néanmoins, pour assurer que ces lignes de forces demeurent dans les années à venir, le CS du PNPS a identifié un certain nombre de points de vigilance qui nécessiteront d'engager des actions lors de la prochaine mandature.

La spectropolarimétrie : la communauté française est particulièrement en pointe dans le domaine du magnétisme stellaire en particulier via la spectropolarimétrie avec des instruments tels que ESPADONS, SPIRou, Narval. Néanmoins, les instruments dans l'hémisphère nord (sur les télescopes TBL et CFHT) pourraient se retrouver en difficulté de part

1. https://sites.google.com/view/extremelaboratoryastrophysics/workshop

l'incertitude sur l'avenir du CFHT à l'horizon d'une dizaine d'année mais également la difficulté de faire du suivi à l'échelle de quelques rotations stellaires par exemple au TBL. Ainsi, bien que la pertinence des instruments spectropolarimétriques disponibles fasse l'unanimité et motive l'arrivée prochaine de SPIP et VISION, il existe un risque non-nul d'une difficulté de disponibilité des instruments de spectropolarimétrie. Le colloque de prospective a permis d'aborder cette question et la communauté a alors conclu qu'il est maintenant nécessaire de proposer un instrument dans le visible et le proche infrarouge au VLT. Cela constituerai une opportunité de disposer d'un instrument performant dans l'hémisphère sud, qui permettra par exemple de faire un suivi des cibles PLATO mais sera également très complémentaire avec ANDES sur l'ELT. Enfin, notons que l'arrivée prochaine de l'ELT est une opportunité car elle pourrait permettre de faire baisser la pression sur le VLT et ainsi rendre possible des programmes de suivi qui sont essentiels en physique stellaire. Enfin, malgré une communauté forte, aucun recrutement n'a été effectué depuis 10 ans sur cette approche méthodologique, dans un contexte critique du point de vue expérimental, ce qui risque de nous fragiliser.

Le support à l'exploitation des projets Gaia et PLATO : une forte communauté, dont de nombreux membres de la communauté PNPS, s'est investie massivement dans la préparation et la mise à disposition des données des projets Gaia et PLATO. Il s'agit d'investissements sur le très long terme, avec une forte surcharge lié à la préparation des instruments et segments sols associées mais également pour Gaia aux productions des DR successives (DR1-DR3, puis la DR4 à partir de fin 2025 et la DR5 finale au delà de 2030). Ces activités mobilisent donc massivement les équipes impliquées dans plusieurs laboratoires et, faute de supports dédiés, porte préjudice à l'exploitation des données par ces mêmes équipes les empêchant d'avoir un retour scientifique à la hauteur des investissements consentis. Il apparait donc essentiel de mettre des moyens humains dédiés à la préparation de l'exploitation et à l'exploitation de ces missions tout au long des opérations. Pour ce qui concerne Gaia, il y a également un enjeu spécifique au regard de la très longue phase de production des données. En effet, une attention particulière doit être donnée à la préservation des expertises.

Préparer l'avenir en soutenant les évolutions majeures

Lors de cet exercice de prospective, plusieurs questions et/ou méthodologies émergentes ont été identifiées. Elles auront vocation à prendre de l'ampleur dans les années à venir mais pour que la communauté française puissent en tirer bénéfice, des efforts devront être faits pour les accompagner. Nous identifions trois points sur lesquels il faudra être particulièrement attentif et sur lesquels la prochaine mandature du PNPS devra être pro-active.

La radio cm. : Il y a maintenant plusieurs dizaines d'années, existait une communauté de physique stellaire avec des expertise autour de la radio cm. Cette communauté s'est très fortement réduite et à même quasiment disparu. Le renouveau de la radio avec les nouveaux résultats autour des pulsars, de la caractérisation des champs magnétiques stellaires, et des interactions étoiles-planètes ouvrent une nouvelle fenêtre grâce aux instruments LOFAR et NenuFAR. L'arrivée prochaine de SKA ne fera qu'accentuer cette thématique de manière très importante. Il est donc fondamental que le PNPS soit moteur d'un effort collectif visant à reconstruire une communauté autour de la radio cm en physique stellaire. Cela passe par de la valorisation, de la formation mais également de la mise en réseau qui devra en particulier se traduire par la mise en synergie avec le reste de la communauté s'intéressant aux champs magnétiques stellaires.

Le développement du HPC pour la physique stellaire : il y a une évolution rapide du numérique dans le domaine de la physique stellaire. Outre la labellisation de RAMSES en tant que code communautaire, on notera en particulier le développement de plusieurs codes (par ex. Idefix, DYABLO) qui intéressent fortement notre communauté et qui ont vocation à être éligible au passage à l'exascale. De tels codes devront être accompagnés dans leur développement d'un soutien en ingénieurs calcul. Cet accompagnement devra néanmoins se doubler d'un effort de structuration que devra initier le PNPS en coordination avec les autres PNs concernés.

Positionner le PNPS dans un écosystème de recherche en mutation

Les évolutions de l'écosystème de recherche sont multiples et de natures diverses. L'exercice de pros-

pective du PNPS a néanmoins fait ressortir quelques éléments marquants qui impactent notre communauté.

Quelques remarques d'ordre général

Tout d'abord, il ressort de l'exercice de prospective que les évolutions de notre système de recherche impactent nos activités, même si ce n'est bien sûr pas spécifique au PNPS. Le mode de fonctionnement de plus en plus basé sur les appels à projets à toutes les échelles, associés à la pénurie de moyens administratifs et techniques (et de manière générale les lourdeurs administratives), mettent une forte pression sur la communauté. Notre communauté a pu dans ce cadre obtenir un nombre important d'ANR et ERC au cours de ce mandat : il faut cependant garder à l'esprit que ceci a un coût important en terme d'investissement pour le montage des projets, mais également que cela rend plus difficile d'avoir des stratégies long terme cohérentes et coordonnées.

Une autre évolution impactante est le mode de sélection des demandes de temps sur des instruments comme ALMA ou les instruments de l'ESO. De nouvelles procédures d'évaluation impliquent que les demandes sont anonymes et évaluées par les porteurs de projet, qui ont des niveaux d'expertise très variables, qui rend de plus en plus difficile l'affichage d'une cohérence dans notre démarche scientifique et de notre expertise sur le long terme. Il en résulte un retour quelque peu aléatoire, tant dans les multiples avis -souvent très divergents- des rapporteurs (typique pour ALMA) que pour la nature des projets acceptés. Cela rend plus compliqué qu'il y a 5-10 ans la construction de projets ambitieux et cohérents sur le moyen terme, dans un contexte de compétition internationale considérablement renforcée dans notre domaine en 10 ans.

La place du PNPS dans l'INSU

L'exercice de prospective du PNPS est, de manière classique, en avance de phase avec celui de l'INSU/AA. La nouveauté à été la mise en place d'une prospective organisationnelle de l'INSU en 2023 qui a résulté en une restructuration significative qui affecte et va affecter fortement le PNPS. Bien qu'à l'heure de l'écriture de ces lignes la mise en pratique reste à définir précisément, deux évolutions majeures sont à mentionner :

- La création d'un programme national unique Astronomie & Astrophysique (PN-AA). Ainsi, à l'exception du PNP, les programmes nationaux deviendront des Actions Thématiques (ATs).
- La création d'un Comité Inter-Organisme (CIO) qui définira les axes prioritaires des PNs sur la base des prospectives.

Il s'agit donc d'évolutions impactantes qui ont été largement discutées lors de plusieurs réunions du conseil scientifique et lors du colloque de prospective du PNPS. De ces discussions, il ressort que la communauté PNPS est très satisfaite et attachée au fonctionnement actuel et que la transformation en AT doit se faire en garantissant que les missions (et moyens associés) soient conservés et respectent l'esprit des statuts définis lors de la création du PNPS. Par ailleurs, plusieurs éléments de la restructuration sont susceptibles de poser des difficultés. Tout d'abord, la dichotomie que souhaite mettre en avant l'INSU entre priorités (définies au niveau du CIO) et projets émergents pose question quant au niveau de granularité adopté. En effet, les ATs doivent pouvoir bénéficier d'une marge de manœuvre (afin de gagner en souplesse et réactivité) et cela suppose que les priorités du CIO restent relativement haut niveau. De plus, il ne faut pas oublier que des thématiques peuvent être non-prioritaires et non-émergeantes mais pour autant fondamentales car structurant et sur le long terme (prenons par exemple les efforts associés à l'astrophysique de laboratoire autour des opacités stellaires ou des données atomiques). Le second point de vigilance concerne la volonté de faire remonter les actions d'animation au niveau du PN-AA (ou la CSAA). Après un passage en revue des actions d'animations du PNPS ces dernières années, il est apparu de façon unanime que le PNAA ou la CSAA ne sont pas le bon niveau de granularité pour mener à bien efficacement ces actions d'animations, par exemple : soutien à des ateliers et conférences sur des thématiques du PNPS, proposition des thèmes de l'Ecole Evry Schatzman, organisée annuellement (implications forte du CS dans le SOC de cette école), échanges directs avec la communauté (lettre régulière, colloque de prospective, rencontres avec les équipes, enquêtes, ...). Nous recommandons également d'éviter d'alourdir les procédures (appel d'offre par exemple), pour les porteurs de projet et pour le conseil scientifique, par exemple avec des indicateurs trop nombreux ou

source de perte de temps.

Interfaces

De manière générale, les interfaces avec pratiquement tous les PNs actuels sont actives. Dans la cadre de la restructuration des PNs en ATs, ses interfaces devront être redéfinies avec un PN-AA qui sera le garant des animations transverses. Notons néanmoins que dans la période précédente, l'avènement de l'ère du multi-messager a motivé l'émergence ou plutôt le regain d'intérêt pour les stades ultimes de l'évolution stellaire. L'interface entre PNHE et PNPS s'est d'ores et déjà renforcée mais cela a vocation à s'étoffer dans l'avenir, le PNPS s'intéressant plus particulièrement à la nature et aux propriétés physique des sources. L'autre point important, toujours en terme d'interface, concerne le besoin de clarification sur la thématique exoplanètes, détaillées ci-dessous.

La question de la création d'un AT exoplanètes ("systèmes exoplanétaires") a été explicitement posée lors du colloque de prospective. En effet, cette question sera posée lors de l'exercice de prospective INSU/AA. Les échanges lors du colloque de prospective ont abouti à une position claire et largement soutenue, à savoir qu'il y a un besoin de structuration et de visibilité de la communauté autour de la thématique des systèmes exoplanétaires et que la création d'une AT répond au besoin. Il a été souligné que cette thématique doit apparaitre explicitement dans le futur PN-AA, à la fois pour des raisons de cohérence scientifique et pour la visibilité de cette thématique et des travaux en AA. La mise en place du Comité Exoplanètes Transverse en 2020 a permis de commencer à construire et animer la communauté, mais son fonctionnement n'est pas entièrement satisfaisant et rajoute de la complexité. Nous avons par ailleurs jugé qu'une extension du PNPS pour englober cette thématique ne répondait pas au besoin de visibilité de la communauté exoplanètes. Elle ne permettrait pas non plus de constituer un conseil scientifique représentatives de l'ensemble des thématiques et méthodologies.

Un enjeu majeur sera d'éviter le cloisonnement, afin de bien définir et animer les interfaces, et la communauté de physique stellaire doit être impliquée dans la définition de ces interfaces. En particulier, une telle future AT ne doit pas vider les thèmes Origines et Interactions du PNPS. Nous avons identifié deux types d'interfaces. Celles repondant sur la nécessité de la connaissance de l'étoile hôte pour chercher ou caractériser des exoplanètes (variabilité stellaire, paramètres fondamentaux, spectres) correspondent à une *complémentarité des expertises* (pour ce qui concerne le PNPS la compréhension des processus stellaires au sein de la thématique physique stellaire), et resteront une interface sous cette forme. D'autres thématiques, en particulier sur les disques protoplanétaire, ou les interactions (étoile-planète ou étoile-disque) représentent des "objets" qui sont naturellement intéressants pour l'étude des étoiles d'une part, et des exoplanètes d'autre part, et donc des *objets communs*. Le cas des disques est peut-être particulier car il est actuellement à l'interface ente le PNPS, et PNP et le PCMI, ce qui est complexe. La communauté PNPS souhaite cependant que l'étude des disques reste une thématique du périmètre Physique Stellaire, pour des raisons à la fois thématique et méthodologiques : les disques ne sont pas nécessairement associés à l'existence de planètes; ces disques jouent également un rôle important pour la formation stellaire; de plus, il y a une proximité des processus physiques et des méthodologies de simulations avec les autres domaines du PNPS. Il faudra donc conserver la situation actuelle avec une thématique clairement présente dans plus qu'une seule AT. Les systèmes planétaires formés et disque de débris ont cependant vocation à être positionnés entièrement dans une AT Systèmes exoplanétaires.

Pour finir, notons que la communauté s'est interrogée sur le rôle du PEPR Origines. En effet, la restructuration de l'INSU fait apparaitre le PEPR sur le même plan que le PNAA ou encore le PNP. Dans ce contexte, deux interrogations ont émergé des discussions. Tout d'abord, le besoin de clarification autour de son positionnement thématique a été soulevé, les interfaces avec les PNAA et PNP étant apparu encore mal définies. Enfin, la communauté s'est interrogé sur la pertinence de structurer avec un outil dont l'horizon de financement est limité dans le temps, posant la question de la pérennité moyen terme du PEPR.

Les services nationaux d'observation

Comme décrit dans le chapitre présentant un bilan des moyens, la communauté PNPS est fortement impliquée dans une trentaine de SNO, principalement en ANO2-ANO3-ANO4-ANO5. En terme

de personnes impliquées, ils sont fortement dominés par PLATO (en ANO2) et Gaia (en ANO4), suivi par SUV (ANO2), JMMC/MOIO, le Modèle de la Galaxie de Besançon, HC-DC et la base de données POLLUX. Les autres SNO présentent des contributions moindres (en nombre de personnes y contribuant). Ceci est assez représentatif de la situation plus générale des SNOs dans le domaine AA. Nous n'avons pas identifié de manque fort en terme de SNO, à part le besoin de structurer et mutualiser davantage l'aspect diffusion de données issues des résultats de simulations numériques lourdes, par exemple dans le cadre de Galactica (voir ci-dessus), qui aurait vocation à s'étoffer et être labellisé en tant que SNO.

En termes de structuration, le constat est fait que le grand nombre de SNO peut conduire à une perte de visibilité. La communauté reste attaché à la distribution des SNOs sur différents OSUs, avec une mutualisation qui se fait à cette échelle pouvant permettre d'éviter un émiettement des ressources (ingénieurs), associé à une proximité des expertises spécifiques dans les laboratoires. La création des Centres d'expertises régionaux (en ANO5) reste ainsi un point fort de notre organisation. Réciproquement, les Pôles Thématiques (toujours en ANO5) n'ont pas forcément suffisamment émergé, à part le JMMC pour ce qui concerne le PNPS. Un éventuel rassemblement de SNOs dans le cadre d'IR, qui resterait à créer pour paver nos SNO, devra être très attentifs à prendre en compte la nature multiple des SNOs (instrumentation, opérations, grands relevés, centres de données), et à mettre en place un fonctionnement suffisamment transparent pour ce qui concerne les priorités de recrutements, CNAP en particulier, prenant suffisamment en compte les besoins locaux des différentes composantes des SNOs. Une structuration matricielle des SNO pourrait aider à mettre en place une structuration avec moins de services et plus visible : une dimension "Méthodologie" représentant différentes filières pourrait ainsi comporter (entre autres) spectroscopie / vélocimétrie / spectropolarimétrie ; photométrie ; astrométrie ; HRA/HD ; simulations numériques. La deuxième dimension pourrait être par exemple spatial, sol, modélisation/théorie. Cette approche permettrait en outre une continuité de service entre les actuelles ANO2-3-4-5 a minima et potentiellement l'ANO-CC.

Impact environnemental

Les réflexions sur l'impact environnemental de nos activités de recherche se sont fortement développées depuis le dernier exercice de prospective, comme en témoignent par exemple les activités dans le cadre Labos 1.5, les sessions lors des journées SF2A ou bien encore la mise en place de chartes dans certains laboratoires. Dans ce contexte, il est important de travailler sur cette problématique essentielle, et ce à tous les niveaux, y compris au niveau des PNs. Cette réflexion est importante mais, comme souligné lors des discussions du colloque de prospective, deux écueils doivent être évités. Tout d'abord, les actions au niveau des PNs ne peuvent se substituer à une réflexion plus globale qui doit être faite au niveau du CNRS et/ou de l'INSU et il faut être très attentif à ne pas ajouter des contraintes administratives (tels que de multiples indicateurs) qui seraient considérées par des entraves supplémentaires à la recherche. Ce dernier point a particulièrement été mis en avant par la communauté qui, comme chacun le sait, souffre actuellement d'une surcharge administrative importante.

Au niveau du CS du PNPS, lors de la mandature qui s'achève, une attention particulière a été portée sur la nature des missions financées. En particulier, les projets qui ont fait un effort de rationalisation des missions (conférence, collaborations) ont été privilégiés. Notons que la communauté est consciente de la problématique environnementale et que l'immense majorité des demandes intègre d'ores et déjà cette dimension. Pour aller plus loin, plusieurs possibilités ont été évoquées. Le poids pourrait être davantage mis sur les financement de stages, qui correspondent à un fort besoin RH dans les projets. Concernant les missions, la priorité pourrait être mise sur des financement de missions de proximité, même si cela doit rester souple, étant donné l'importance pour les plus jeunes de se créer un réseau (et pour les moins jeunes d'être présents entre autres pour que ces réseaux puissent se mettre en place). Il serait en outre souhaitable d'inciter à mettre en place des zooms collectifs pour les colloques, ce qui ajouterait du lien même lorsque que fait à distance, avec des inscriptions d'équipes plutôt que des individus. Les moyens des PNs ne permettent pas de financer les équipements dans les laboratoires pour permettre des conférences hybrides dans les meilleures conditions, mais il est important que les

laboratoires puissent s'équiper correctement pour répondre à ce besoin. Par ailleurs, il est également important de garantir l'exploitation optimale des données d'archives, en soutenant les projets concernés d'une part, et en facilitant la formation des chercheurs sur l'utilisation de ces données par des experts (atelier/école, appui sur des structurations existantes comme le JMMC, etc.). Les PNs jouent un rôle lors de l'implémentation de nouveaux projets instrumentaux, en émettant un avis sur les intérêts pour la communauté scientifique pour ces instruments : il est cependant important de mettre en avant le besoin d'exploiter complètement les instruments en opération, en garantissant un fonctionnement sur le long terme lorsque cela reste scientifiquement intéressant.

ANNEXES

TABLE 7 – Liste des orateurs PNPS à la SF2A.

Année	Nom	Titre
2019	Jean-François Donati	Exploring new worlds with SPIRou at CFHT
2020	*édition annulée*	
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 8 – 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 : *Journées annulées*
2021 (distanciel)
Atelier général ASHRA : bilan et prospective de l'interférométrie optique
Atelier général de l'AS SKA : SKA, son éclaireur français NénuFAR, 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 9 – 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	*édition annulée*		
2023	Gaia et la physique stellaire	Carine Babusiaux	PNCG
2024	Les disques proto-planétaires à l'ère de JWST	Catherine Dougados	PCMI, PNP

TABLE 10 – 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	Heloïse 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 11 – Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
CEA	André Quentin	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 Sylvain	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 Leila	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 Camille	Modélisation théorique des processus de transport et de mélange pour les modèles d'évolution stellaire multi-dimensionnels	S. Mathis	2023
CEA	Benbakoura Mansour	Evolution des étoiles de faible masse en interaction : observations muti-techniques et modélisation des systèmes multiples	R. A. Garcia	2019
CEA	Astoul Aurélie	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 Jérémy	Dynamique et évolution des systèmes étoile-planète. Impact des interactions magnétiques et de marées	A.-S. Brun, S. Mathis, A. Strugarek	2021
CEA	Dhouib Hachem	Dissipation de marée et sismologie des planètes géantes et des étoiles à l'heure des missions spatiales	S. Mathis	2023
CEA	Perri Barbara	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 Lisa	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 Quentin	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 Eva	Caractérisation des cycles magnétiques du Soleil et des étoiles	R.-A. Garcia	2023
CEA	Doebele Grégoire	Dyablo-Whole Sun : étude du magnétisme solaire avec un code AMR exascale	S. Brun, M. Delorme	2023
CEA	Mignon-Risse Raphaël	On the formation of massive stars : a numerical approach	M. Gonzalez	2020

TABLE 12 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

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

TABLE 13 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
CEA	Buellet Anne-Cécile	Signal multi-messager des explosions de supernovae	T. Foglizzo, J. Guilet	2023
CEA	Barrère Paul	Modélisation de la formation des magnétars	J. Guilet, T. Foglizzo	2023
CRAL	Lebreuilly Ugo	Formation d'étoiles : étude dynamique de la poussière interstellaire	B. Commerçon	2020
CRAL	Lombart Maxime	Croissance des grains par méthode de Galerkine pour la formation des planètes	G. Laibe	2020
CRAL	Vericel Arnaud	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 Laurence	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 Kieran	Evolution and appearance of the inner regions of circumbinary discs	J.-F. Gonzalez	2021
CRAL	Jaupart Etienne	Statistical approach to astrophysical flows in star forming clouds : towards the stellar initial mass function	G. Chabrier	2021
CRAL	Flasseur Olivier	Object detection and characterization from faint signals in images : applications in astronomy and microscopy	M. Langlois, E. Thiebaut	2020
CRAL	Michoulier Stéphane	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 Romain	Formation of the first stars : collapse and fragmentation of primordial gas clouds	B. Commerçon, J. Rosdahl	2024
CRAL	Dallant Jules	Combinaison d'observations multiépoques pour la détection d'exoplanètes et l'estimation conjointe de leurs orbites en imagerie directe à haut contraste	M. Langlois, E. Thiebaut	2023
CRAL	Thé Samuel	Méthodes de démélange et de déconvolution d'objets dans des images - Applications en imagerie astronomique à haut-contraste	M. Langlois, E. Thiebaut	2023
CRAL	Borderies Antonin	Formation d'étoiles : étude de la naissance de l'embryon protostellaire	B. Commerçon	en cours
GEPI	Matas Pinto Aroa del Mar	Étoiles particulières, pauvres en métaux, à l'époque de Gaia	E. Caffau, M. Spite	2022

TABLE 14 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
GEPI	Lombardo Linda	Explorer l'histoire de la Galaxie grâce à la spectroscopie stellaire	P. Bonifacio, P. François	2022
GEPI	Cerqui Valeria	L'histoire de la formation stellaire de la voie lactée	M. Haywood	en cours
GEPI	Pagnini Giulia	L'évolution précoce et tardive de notre Galaxie à travers la lentille des amas globulaires	P. Di Matteo	en cours
IAP	König Pierre-Cécil	Improving exoplanet detection by better characterizing stellar activity and variability	G. Hébrard, G. Hussain	2022
IAS	Manchon Louis	On the transport of angular momentum in stellar radiative zones in 2D	F. Baudin, J. Cadilhe Marques	2021
IAS	Degott Lucie	Modélisation activité stellaire, densité spectrale du bruit photométrique d'origine stellaire	F. Baudin, J. Cadilhe Marques	2023
IPAG	Desgrange Célia	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 Noemi	Star-disk interactions in young stars : dippers as seen with K2	J. Bouvier, F. Ménard	2021
IPAG	Leclerc Aurélia	Les binaires et exoplanètes vues par Gaia	C. Babusiaux	2022
IPAG	Lanthermann Cyprien	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 William	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 Lucile	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 Pierre	Recherches de planètes extra-solaires par vitesse radiale : chromaticité du signal d'activité stellaire	X. Delfosse	encours
IPAG	Villenave Marion	Constraining the physical processes of protoplanetary disk evolution	F. Ménard, M. Benisty	2020
IPAG	Pouteau Yohan	L'Origine de la Masse des Etoiles dans notre Galaxie	F. Motte	2022

TABLE 15 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
IPAG	Pouilly Kim	Vers la détection de planètes à courte période enfouies dans les disques circumstellaires des étoiles jeunes	J. Bouvier, E. Alecian	2021
IPAG	Ospina-Zamudio Juan	Implosion radiative et formation stellaire induite vues par ALMA	B. Lefloch	2019
IPAG	Nony Thomas	Formation d'amas d'étoiles massives et collision de nuages	F. Motte	2019
IPAG	Martel Etienne	Magneto-thermal winds in proto-planetary discs	G. Lesur	2022
IPAG	Jacquemin Ide Jonatan	Magnetically driven jets and winds launched from turbulent accretion disks	J. Ferreira, G. Lesur	2021
IPAG	De Valon Aloïs	Origine et impact des jets/flots protostellaires à l'ère d'ALMA et JWST	C. Dougados, S. Cabrit	2021
IPAG	Zimniak Nathan	Signatures observationnelles d'écoulements magnétiques émis par les disques d'accrétion turbulents	J. Ferreira	2023
IPAG	Thomasson Benjamin	Fragmentation des nuages moléculaires et formation des systèmes stellaires jeune	I. Joncour, E. Moraux	2023
IPAG	Tanious Maxime	Déchiffrer l'évolution chimique des disques proto-planétaires dans leur environnement natal	A. Faure, R. Le Gal	2023
IPAG	Stadler Jochen	Détection de protoplanètes par étude cinématique des disques protoplanétaires	M. Benisty	2023
IPAG	Rom Tamara	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 Hugo	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 Jonah	Interaction des disques protoplanétaires enfouis avec leur environnement	G. Lesur, S. Maret	2023
IPAG	Jannaud Thomas	Simulations numériques MHD de jets astrophysiques	J. Ferreira	2023
IPAG	Demars Dorian	Caractérisation des Processus d'Accrétion sur les Compagnons de Masse Planétaire	M. Bonnefoy, C. Dougados	2023
IPAG	Delabrosse Valentin	Origine et impact des flots protostellaires à l'ère de JWST	C. Dougados	2023
IPAG	Alaguero Antoine	Formation planétaire au sein de systèmes stellaires multiples	F. Ménard, N. Cuello	2023

TABLE 16 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
IPAG	Chevalier Simon	Définir les cœurs pré- et proto-stellaires via des approches théoriques, numériques et observationnelles	F. Motte, F. Louvet	2023
IRAP	Lazzarotto Axel	Modélisation du spectre d'intensité des étoiles en rotation rapide	M. Rieutord	2023
IRAP	Galoy Marion	Sismologie des étoiles en rotation rapide	F. Lignières, J. Ballot	en cours
IRAP	Gouhier Bastien	Dynamique des zones radiatives stellaires en rotation différentielle	F. Lignières, L. Jouve	2022
IRAP	Noll Anthony	Étude de l'extension des cœurs convectifs par la sismologie des étoiles sous-géantes	S. Deheuvels	2021
IRAP	Gagnier Damien	Dynamique des étoiles massives proches de la rotation critique	C. Charbonnel, M. Rieutord	2020
IRAP	Evano Benjamin	Analyse semiclassique des modes d'oscillation chaotiques dans les étoiles en rotation rapide	F. Lignières	2019
IRAP	Kulenthirarajah Logithan	Caractérisation des paramètres stellaires d'étoiles froides à partir des spectres haute résolution	J.-F. Donati	2019
IRAP	Yu Louise	À la recherche de Jupiters chauds autour d'étoiles jeunes	C. Moutou, J.-F. Donati	2019
IRAP	Belotti Stefano	Recherche de mondes habitables avec SPIRou : problématique de l'activité stellaire	P. Petit, J. Morin	2023
IRAP	Ould-Elhkim Merwan	Systèmes planétaires autour d'étoiles de faible masse avec SPIRou	C. Moutou, J.-F. Donati	2023
IRAP	Cristofari Paul	Caractériser les propriétés atmosphériques de naines rouges à partir de spectres SPIRou	J.-F. Donati	2022
IRAP	Finociety Benjamin	Caractériser le champ magnétique et l'activité des étoiles jeunes avec SPIRou	J.-F. Donati	2022
IRAP	Cang Tianqi	Modeling the activity of late-type stars with spectropolarimetry and photometry	P. Petit, J.-F. Donati	2021
IRAP	Zaire Bonnie	Dynamos of cool stars : Guiding theory to advanced models with spectropolarimetric observations	J.-F. Donati, L. Jouve	2021
IRAP	Klein Baptiste	Caractériser les systèmes planétaires de naines rouges actives proches avec SPIRou	J.-F. Donati	2020
IRAP	Wafflard-Fernandez Gaylor	Signatures observationnelles de la migration planétaire dans l'émission des poussières froides des disques protoplanétaires	C. Baruteau	2020

TABLE 17 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
IRAP	Su Wenchao	Analyse des pulsateurs compacts évolués dans les binaires observés par TESS	S. Charpinet	2023
IRAP	Pilate Quentin	Imagerie de la photosphère des super-geantes rouges : l'origine de la perte de masse	A. Lopez Ariste	2023
LAB	Boutin-Basillais Baptiste	Nouvelle contribution à la théorie des figures. : Les systèmes polytropiques multi-objets multicouches en rotation différentielle	J.-M. Huré	2020
LAB	Tarricq Yoann	Revisiting the memberships, structural parameters and kinematics of stellar clusters in the Milky Way	C. Soubiran	2021
LAB	Staelen Clément	Systeme autogravitant multicouches en rotation differentielle : structure et stabilité	J.-M Huré	2023
LAB	Nguyen Phuong	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 Jordan	Analyse moléculaire des coeurs massifs dans la région de formation d'étoiles W43-MM1	D. Despois	2019
LAB	Bonne Lars	La formation du gaz dense à l'origine des étoiles de faible et de haute masse	S. Bontemps, N. Schneider	2020
LAB	Gavino Sasha	Observation and modeling of disks about young stars with ALMA : implication for planetary formation	A. Dutrey	2020
LAB	Miret-Roig Nuria	COSMIC-DANCE : A comprehensive census of nearby star forming regions,	H. Bouy, J. Olivares Romero	2020
LAB	Valeille-Manet Maxime	Recherche et étude des phases précoces de la formation des étoiles massives	S. Bontemps	2023
LAB	Collin-Dufresne Thomas	Compétition coagulation-fragmentation des grains dans les disques proto-planétaires et impact sur l'observation de la formation planétaire.	E. Di Folco, A. Pierens	en cours
LAB	Rodrigues Tommy	The past and future of the closest stellar nursery : a 6D approach	H. Bouy	en cours
LAB	Kessler Nina	Origine et recherche des molécules complexes lors de la formation des étoiles massives - approche(s) statistique(s) et IA d'extraction d'information.	C. Bontemps, T. Csengeri	en cours
LAB	Marinho Louise	Observation et modélisation de l'enveloppe circumstellaire d'étoiles évoluées : étude des vents stellaires	F. Herpin	2023
Lagrange	Boucheau Kevin	Evolution stellaire en rotation rapide. Apports de l'interférométrie et de l'astérosismologie	A. Domiciano	2020

TABLE 18 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
Lagrange	Hocdé Vincent	L'environnement des Céphéides et l'étalonnage des échelles de distances dans l'univers	N. Nardetto, E. Lagadec	2020
Lagrange	Salsi Anthony	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 Maria Chiara	Modélisation 3D, ab initio et simultanée de l'atmosphère des exo-planètes et de leurs étoiles hôtes	A. Chiavassa	2022
Lagrange	Palakkatharappil Donil Bose	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 Cyril	Développement de l'instrument CHARA/SPICA	D. Mourard	2022
Lagrange	Rodriguez-Dias Luisa	Caractérisation du bruit convectif stellaire pour la détection des exoplanètes	V. Aguirre Børsen-Koch, L. Bigot	2023
Lagrange	Jonak Jurak	A new investigation of stellar masses	D. Mourard	en cours
Lagrange	Ebrahimkutty Nayeem	Studying the center to limb intensity variation of stars across the HR diagram	D. Mourard, A. Domiciano	en cours
Lagrange	Béguin Elisabeth	Magnetic field and convection in evolved stars and their role in the mass-loss processes	A. Chiavassa	en cours
Lagrange	Bailleul Manon	La relation brillance de Surface Couleur des Céphéides : Etalonnage des échelles de distances dans l'univers	N. Nardetto	en cours
Lagrange	Santos Pablo	Galactic archaeology of the Milky Way disc with the Gaia space mission	A. Recio-Blanco	2021
Lagrange	Zhao He	The Diffuse Interstellar Band at 862 nm	M. Schultheis	2021
Lagrange	Contursi Gabriele	Production des éléments s dans la Voie Lactée : apports des relevés spectroscopiques au sol et dans l'espace	P. De Laverny	2023
Lagrange	Nieuwmunster Niels	Les systèmes stellaires les plus denses de l'Univers : le disque nucléaire	M. Schultheis	en cours
Lagrange	Gonzalez-Ribera Isaure	Galactic archeology : deciphering the primitive phases of the Milky Way with the WEAVE survey	G. Kordopatis, V. Hill	en cours
Lagrange	Saldanha Elisson	Disques et vents autour des étoiles massives : apport de la seconde génération d'instruments HRA au VLT & VLTI	A. Domiciano, A. Meilland	2020

TABLE 19 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
Lagrange	Perdigon Jérémy	Méthodes approchées pour le transfert de rayonnement dans les milieux circumstellaires	M. Faurobert, G. Niccolini	2022
Lagrange	Abello Margaux	Etude statistique des étoiles massives en spectro-interférométrie multi-bandes avec la nouvelle génération d'instruments au VLTI et à CHARA	A. Meilland, A. Domiciano	en cours
Lagrange	Kravchenko Kateryna	Exploring the Physics and Abundances of Evolved Stars Atmospheres	A. Chiavassa	2019
Lagrange	Drevon Julien	Exploitation de l'instrument MATISSE / VLTI : imagerie des étoiles évoluées	P. Cruzalebes, F. Millour	2023
Lagrange	Srinivasan Rahul	Origine des trois noirs observés avec LIGO/Virgo, comparaison avec la Voie Lactée	A. Lamberts, M-A. Bizouard	2023
Lagrange	Bruel Tristan	Canaux de formation des binaires de trous noirs	A. Lamberts	2023
LAM	Suin Paolo	Numerical simulations of feedback from high-mass stars	A. Zavagno	en cours
LAM	Lopez Théo	Lumière sur la diversité des petits mondes en transit d'étoiles solaires	A. Santerne	2021
LAM	Heidari Neda	Overcoming the stellar activity impact on exoplanet detection and characterization	I. Boisse, F. Vakhili	2022
LAM	Cortès-Zuleta Pia	Stellar activity characterization of M-dwarfs using optical and near-infrared spectra from SOPHIE and SPIRou.	I. Boisse	2023
LAM	Grouffal Salomé	Characterisation of transiting exoplanets in the habitable zone	A. Santerne	en cours
LAM	Zhang Siju	The impact of high-mass stars on star formation properties	A. Zavagno	2020
LAM	Berthelot Loris	Apprentissage machine pour l'étude de la formation stellaire galactique	A. Zavagno	2023
LERMA	Durepaire Virgin	Instabilités MHD dans les couches radiatives stellaires	L. Petitdemange, K. Belkacem	2023
LERMA	Nairabeze Alexandre	Convective - Radiative Interfaces and Stellar ages	L. Petitdemange, K. Belkacem	2023
LERMA	Tranchant Victor	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 Alexis	L'instabilité non-résonnante de dérive : de la théorie à l'expérience	A. Ciardi, R. Smets	2019

TABLE 20 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
LERMA	Guyot Julien	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 Chikh	Etude des propriétés radiatives d'ions de terres rares : cas des ions Er3+, Dy3+ et Ho3+	D. Deghiche, L. Tchang-Brillet	2021
LERMA	Colombo Salvatore	Radiation hydrodynamic and magnetohydrodynamic models of plasma flows accreting onto Classical T Tauri Stars	S. Orlando, C. Stehlé, L. Ibgui	2019
LESIA	Houdayer Pierre	Inférence des propriétés physiques de régions d'ionisation stellaires au moyen de glitchs sismiques	M.-J. Goupil, D. Reese	2022
LESIA	Philidet Jordan	Etude du couplage entre convection turbulente et oscillations de type solaire	M.-J. Goupil, K. Belkacem	2021
LESIA	Bouchaud Kévin	Évolution stellaire en rotation rapide. Apports de l'interférométrie et de l'astérosismologie	A. Domiciano de Souza, D. Reese	2020
LESIA	Christophe Steven	Diagnostics sismiques des intérieurs stellaires avec Kepler : rotation et interfaces	Y. Lebreton, M.-J. Goupil, R.-M. Ouazzani	2019
LESIA	Chomez Antoine	Recherche de planètes extrasolaires en imagerie directe	A. Boccaletti, A.-M. Lagrange	en cours
LESIA	Teinturier Lucas	Modélisation 3D et caractérisation d'atmosphères d'exoplanètes et de naines brunes par courbes de phases	B. Bézard	en cours
LESIA	Breuval Louise	L'échelle de distance des Céphéides : de l'étalonnage Gaia local aux galaxies lointaines	P. Kervella	2021
LESIA	Trahin Boris	Etalonnage de l'échelle des distances dans l'ère Gaia : Les étoiles pulsantes RR Lyrae et Céphéides	P. Kervella	2019
LESIA	Bras Garance	Modélisation optimisée des Céphéides pour l'échelle des distances extragalactiques	P. Kervella	en cours
LESIA	Thomson-Paressant Keegan	Sonder le magnétisme dans les étoiles delta Scuti	C. Neiner	2023
LESIA	Gutteridge Chloé	Magnéto-astérosismologie des étoiles chaudes	C. Neiner, C. Catala	en cours

TABLE 21 – *(Suite)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
LESIA	Dréau Guillaume	Analyse sismique des géantes rouges sur la branche asymptotique	B. Mosser, Y. Lebreton	2022
LPENS	Florentin Daniel	Développement d'instabilités dans les écoulements astrophysiques conducteurs	G. Gissinger, L. Petitdemange	2023
LPP	Menu Mélissa	Champs magnétiques générés par effet dynamo dans les objets astrophysiques en rotation	Sébastien Galtier, Ludovic Petitdemange	2019
LULI	Lahmar Hannah	Etude expérimentale et théorique des opacités stellaires	P. Audebert, S. Le Pape (LULI) F. Perez, F Delahaye (LERMA)	2023
LUPM	Dumont Thibaut	Les processus de transport dans les étoiles de type-solaire	A. Palacios, C. Charbonnel	2021
LUPM	Brunn Valentin	Effets des particules énergétiques produites par reconnexion magnétique sur les disques et jets des étoiles jeunes	A. Marcowith, C. Sauty	2023
LUPM	Georgiev Stefan	Magnétisme dans les étoiles froides évoluées	A. Lèbre, R. Konstantinova-Antova	2021
LUTH	Saincir Océane	Approximation numérique de modèles d'hydrodynamique radiative et applications à la physique stellaire	C. Michaut	2019
LUTH	Pascal Aurélien	Modélisation de l'évolution d'une proto-étoile à neutrons	Micaela Oertel	2021
LUTH	Guerra Corentin	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 Rashi	Les populations stellaires des amas globulaires : contraintes sur la physique stellaire et relations subtiles entre couleurs et environnement	A. Lançon	2021

TABLE 22 – *(Suite et fin)* Liste des thèses en physique stellaire soutenues et en cours (au printemps 2024) sur la période.

Laboratoire	Nom	Titre	Encadrant	Année
UTINAM	Ravinet Thomas	La frontière étoiles - naines brunes, de Gaia à Euclid	C. Reylé, N. Lagarde	en cours
UTINAM	Déforêt Barnabé	3D extinction mapping of the Milky Way with the Besançon Galaxy Model in the Gaia era	J. Montillaud, A. Robin	en cours
UTINAM	CornuDavid	Modeling the 3D Milky Way using Machine Learning with Gaia and infrared surveys	J. Montillaud, A. Robin	2020
UTINAM	Bögner Rebeka	Multiwavelength studies of cold Galactic interstellar clouds	J. Montillaud, C. Reylé, V. Toth	2023

TABLE 23 – 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 etoiles	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'environnnements 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
Lagrange	Lamberts Astrid	Stellar populaitons of gravitational wave progrenitors	2023
IRAP	Jouve Laurène	Magnétisme et rotation dans les intérieurs convectifs et radiatifs stellaires	2023

TABLE 24 – Détail des réponses méthodologiques au sondage 2022.

Catégorie méthodologique	Contenu
Observations	*Méthode d'observation :* imagerie, interférométrie (les 2 en lien avec l'HRA), spectroscopie, photométrie, spectropolarimétrie, polarimétrie, vitesses radiales, astérosismologie (ces deux dernières concernent aussi l'analyse de données) *Domaine de longueur d'onde :* domaines visible, IR, submm, mm, radio, X, UV, gamma
Analyse de données	Recoupement avec la méthodologie observation et des noms d'instruments *Des approches mathématiques génériques :* analyse bayésienne, processus gaussiens, séries temporelles, extraction d'objet, aggrégation, statistique, algorithmes grand contraste *Des approches spécifiques à la thématique :* 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	*Relevés des SNO :* Gaia, SLS *Liés à des instruments :* NIRPS, Sophie, 2MASS, SPICA, Pristine, TESS, PLATO, ALMA (Large Program) *Liés des objets :* transients, supernovae *Liés à des approches :* γ, synthèse spectrale, spectroscopie, imagerie
Théorie / modélisation	Disque, accrétion, 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, nucléosythèse, oscillations, astérosismologie ; atmosphères stellaires, tranfert radiatif, activité stellaire ; dynamique orbitale ; chimie ; émission radio
Simulations numériques	Recoupement avec la catégorie "Théorie / Modélisation" *Processus physiques :* 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 *Méthodes HPC :* 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 specifiques des instruments (détecteurs, logiciels) *Méthodes observationnelles :* interférométrie, spectroscopie, spectroscopie Doppler, spectropolarimétrie, photométrie, imagerie, HRA, polarimétrie *Domaine de longueur d'onde :* γ, visible, IR, submm *En termes d'instruments :* 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

Bőgner 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., 2022, A&A, 668, A79

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

Benbakoura M., et al., 2019, A&A, 621, A124

Bendahman M., et al., 2023, in European Physical Journal Web of Conferences. p. 05002, doi:10.1051/epjconf/202328005002

Benisty M., et al., 2021, ApJ, 916, L2

Benisty M., et al., 2023, in Inutsuka S., et al., eds, Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 534, Protostars and Planets VII. p. 605

Bergemann M., et al., 2019, A&A, 631, A80

Blazère A., et al., 2016, A&A, 586, A97

Blazère A., et al., 2020, MNRAS, 492, 5794

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

Breton S. N., Brun A. S., García R. A., 2022, A&A, 667, A43

Breton S. N., et al., 2023, A&A, 679, A104

Breton S. N., Lanza A. F., Messina S., 2024, A&A, 682, A67

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., et al., 2020, ApJ, 896, L34

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

Brygoo S., et al., 2021, Nature, 593, 517

Buellet A. C., et al., 2023, A&A, 674, A205

Bugli M., et al., 2020, MNRAS, 492, 58

Bugli M., Guilet J., Obergaulinger M., 2021, MNRAS, 507, 443

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., 2021, arXiv e-prints, p. arXiv:2108.01336

Burdonov K., et al., 2022, A&A, 657, A112

Buysschaert 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

Chakraborty S., et al., 2024, A&A, 681, A39

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., 2022a, A&A, 658, A185

Chiavassa A., et al., 2022b, A&A, 661, L1

Chikh A., et al., 2021, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 272, 107796

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., 2023a, MNRAS, 522, 1342

Cristofari P. I., et al., 2023b, MNRAS, 526, 5648

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

Cunto W., et al., 1993, A&A, 275, L5

Dalal S., et al., 2021, A&A, 651, A11

Damian B., et al., 2021, MNRAS, 504, 2557

Daniel F., Petitdemange L., Gissinger C., 2023, Physical Review Fluids, 8, 123701

Dartois E., et al., 2024, Nature Astronomy, 8, 359

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., 2018, A&A, 618, A10

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

Demyk K., et al., 2022, A&A, 666, A192

Dessart L., Hillier D. J., 2020, A&A, 643, L13

Dessart L., Hillier D. J., 2022, A&A, 660, L9

Dessart L., Jacobson-Galán W. V., 2023, A&A, 677, A105

Dessart L., et al., 2021, A&A, 651, A19

Dhouib H., et al., 2022, A&A, 661, A133

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

Drevon J., et al., 2024, MNRAS, 527, L88

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 É., 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

Filippov E. D., et al., 2019, Matter and Radiation at Extremes, 4, 064402

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

Foschino S., Berné O., Joblin C., 2019, A&A, 632, A84

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

Garcia A. J. L., Gonzalez J.-F., 2020, MNRAS, 493, 1788

García Hernández A., et al., 2009, A&A, 506, 79

García Muñoz A., 2023, A&A, 672, A77

García F., et al., 2021, A&A, 649, A114

García R. A., et al., 2023, A&A, 679, L12

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

Gillet A., García Muñoz A., Strugarek A., 2023, A&A, 680, A33

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

Grosso N., et al., 2020, A&A, 638, L4

Grunhut J. H., et al., 2017, MNRAS, 465, 2432

Guarguaglini M., et al., 2021, Nature Communications, 12, 840

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

Hernandez J. A., et al., 2023, Nature Physics, 19, 1280

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

Hu J., et al., 2020, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 500, 1466

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 F., 2022, A&A, 657, A7

Khiar B., et al., 2019, Phys. Rev. Lett., 123, 205001

Kiuchi K., et al., 2023, Phys. Rev. Lett., 131, 011401

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., 2019, A&A, 632, A28

Kravchenko K., et al., 2021, A&A, 650, L17

Krygier A., et al., 2022, Phys. Rev. B, 105, L220102

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, Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 534, Protostars and Planets VII. 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

Lignières F., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2311.13296

Lisle I., 1992, Master's thesis, University of British Columbia, doi:http://dx.doi.org/10.14288/1.0079820, https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/831/items/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

Martin A. J., et al., 2018, MNRAS, 475, 1521

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., Chantereau 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, aceepted 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

Meunier N., et al., 2024, A&A, 684, A106

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

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

Neiner C., et al., 2020, A&A, 644, A9

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

Oksala M. E., et al., 2021, in MOBSTER-1 virtual conference : Stellar Variability as a Probe of Magnetic Fields in Massive Stars. p. 47, doi:10.5281/zenodo.5563009

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., Sampoorna M., Peymirat C., 2023, A&A, 671, A93

Palla M., et al., 2022, A&A, 663, A125

Palle E., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2311.17075

Pantolmos G., Zanni C., Bouvier J., 2020, A&A, 643, A129

Pascucci I., et al., 2023, in Inutsuka S., et al., eds, Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 534, Protostars and Planets VII. 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

Raynaud R., et al., 2020, Science Advances, 6, eaay2732

Raynaud R., Cerdá-Durán P., Guilet J., 2022, MNRAS, 509, 3410

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., 2022, MNRAS, 514, 1741

Roederer I. U., et al., 2023, arXiv e-prints, p. arXiv:2311.16320

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

Santos A. R. G., et al., 2021, ApJS, 255, 17

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

Shultz M. E., et al., 2021, MNRAS, 504, 3203

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., 2023, in Bigot L., et al., eds, Star-Planet Interactions. p. 1

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., 2019, 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

Xu G., et al., 2022, The Astrophysical Journal, 937, 48

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 S., et al., 2021, A&A, 646, A25

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