

PROSPECTIVE 2024-2028

ORGANISATION DU COLLOQUE DE PROSPECTIVE

Le 5^{ème} 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 (futurs AT)?
- Les périmètres des Programmes Nationaux (actuels) sont-ils suffisamment 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 PN (ou futurs AT) vous paraissent être le bon niveau pour mener ces actions?

LES GRANDES ÉVOLUTIONS THÉMATIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES

Comprendre les processus physiques et chimiques qui contrôlent la structure et l'évolution des étoiles, depuis les stades les plus précoces jusqu'au stades ultimes, est bien évidemment 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 des étoiles?
- 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'accroître autour de deux questions liées à la transformation de la matière et aux disques circumstellaires lors des phases de la formation stellaire, thématique importante et fortement représentée dans la communauté s'intéressant à la formation stellaire et planétaire.

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

Aux échelles et stages 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 techniques 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 apportant 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 cœur des étoiles évoluées par l'astérosismologie, avec des perspectives intéressantes 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 Taylor-Spruit et d'étudier les instabilités de type MRI (Magneto-Rotational Instability). Le développement des simulations numériques étudiant les interactions entre champ magnétique et rotation bénéficieront de contraintes observationnelles 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 interactions 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 spectroscopiques (par ex. 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 stablement stratifiées 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 observationnel. Sur ce dernier aspect, la prochaine période verra l'émergence de la mise en synergies de techniques (photométrie de haute précision, spectroscopie, interférométrie et astrométrie) 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'histoire dynamique et chimique des étoiles de notre galaxie.

- *Etoiles très massives et super-massives.*

Les étoiles très massives présentent 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 gravitationnelles, 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 \approx 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 contraintes 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 progéniteurs 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'Alfvén, 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 stellaires sera sans aucun doute fondamentale avec en particulier la nécessité d'apporter une vision globale. En effet, il s'agit de déterminer comment ces mécanismes dépendent 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

En terme de méthodologie, nous n'en avons pas identifié de vraiment nouvelles¹, mais plutôt des évolutions avec la volonté affichée par la communauté 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 cependant identifié des évolutions majeures dans les années à venir sur les approches BigData et IA d'une part, et concernant les codes de simulations numériques lourdes d'autre part.

BigData et IA

Lors du bilan effectué 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

1. Lors de l'enquête 2022, la plupart des personnes qui ont répondu à la question sur l'évolution méthodologique ne prévoit 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.

quantités de données issues des prochaines générations 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 sera à faire pour que la communauté PNPS puissent bénéficier à plein de ces évolutions et des opportunités 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 techniques 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*, initiée 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'ANOC.

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 réflexion 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 1) pour d'une part 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 2.

Par la suite, nous détaillons les raisons qui ont amenés aux priorités présentées dans le tableau 2 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 actuelle-

ment 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 opportunité avec les projets PRIMA et FIRSST qui sont en compétition. PRIMA (The PRobe for-Infrared Mission for Astrophysics) est un télescope 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 m, et des capacités polarimétriques dans 4 filtres à large bande de 80 à 235 m (PRIMAger). FIRSST est un spectromètre polyvalent offrant des modes de haute résolution (R 130 et jusqu'à 4400) de 24 à 235 m. 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 m) et d'un récepteur hétérodyne à grande longueur d'onde (~ 200 -600 m). 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

TABLE 1 – Moyens en exploitation ou en construction prioritaires pour le PNPS.

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

TABLE 2 – Moyens non-acquis prioritaires pour le PNPS.

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

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 $30\mu\text{m}$ 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'observations 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 spec-

troscopiques (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 aurons 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.

Spectropolarimétrie

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 champs magnétique mais également dans une certaine mesure 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 & SPIP@TBL dans l'infrarouge 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 à la fois la pérennité de la filière, deux axes se dégagent :

- *pérenniser l'exploitation de l'existant et préparer l'avenir* : il convient d'avoir accès à des instru-

ments sur des télescopes de la classe des 2-4 m afin de pouvoir 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 apparaît 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 inégalée 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 réfléchiée 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 bien d'autres sujets. C'est l'objectif de l'instrument POLLUX (dont le leadership est français) sur la mission flagship NASA Habitable World Observatory (HWO). Il s'agit d'un instrument permettant la spectroscopie de sources ponctuelles à haute résolution spectrale ($R \approx 120\,000$) 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 MIDEX/NASA Polstar centré sur les magnétosphères des étoiles massives et leurs envi-

ronnements. 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, Céphéides, 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 pro-

cessus 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 première et deuxième génération présente un intérêt en général très ciblé, par exemple METIS sur les disques 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 haute 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 non seulement 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 à haute contraste. De mêmes, l'interférométrie permet de cartographier les surfaces stellaires des objets évo-

lués (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 un rôle 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'étude de leur habitabilité ainsi que la recherche de bio-marqueurs, mais il pourra permettre de traiter des cas scientifiques intéressants 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 proto-planétaires 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 milliers d'euros par expérience), auquel il faut ajouter les coûts 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 un demi-million d'euros par 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 CS-AA 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 expériences pourrait également se 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'atmosphères : Les modèles d'atmosphères sont un passage obligé pour décrypter les informations que nous collectons dans les spectres stellaires. Ces modèles font appel à un grand nombre de processus physiques variés (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. 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 sûrement d'abord renforcer la formation initiale au niveau master. Il faut aussi noter que des travaux existent dans d'autres pays, soutenues par des ERCs, sur le développement et l'amélioration des modèles d'atmosphères. 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 a été constatée et à fortement nuit à la visibilité de la communauté. Face à ce constat, le CS du PNPS a 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 cher-

cheurs 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 laboratoire². Il conviendra donc

de valoriser et amplifier cette dynamique.

Pérenniser 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 ESPA-DONS, SPIRou, Narval (et Neo-Narval). Néanmoins, les instruments dans l'hémisphère nord (sur les télescopes TBL et CFHT) pourraient néanmoins se retrouver en difficulté de part l'incertitude sur l'avenir du CFHT à l'horizon d'une dizaine d'année mais également la difficulté de faire du suivi long terme 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 constituerait 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 instrumental, 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 et va continuer à s'investir dans la

2. <https://sites.google.com/view/extremelaboratoryastrophysics/workshop>

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 liée 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 apparaît 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 attentifs 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 expertises autour de la radio cm. Cette communauté s'est très fortement réduite et a 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 labélisation 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 pourrait initier le PNPS en coordination avec les autres PN concernées.

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 prospective 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, associé 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.

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 a 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 Instituts (C2I) 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 C2I) 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 C2I restent relativement haut niveau. De plus, il ne faut pas oublier que des thématiques peuvent être non-prioritaires et non-émergentes mais pour autant fondamentales car structurantes

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 CS-AA). Après un passage en revue des actions d'animations du PNPS ces dernières années, il est apparu de façon unanime que le PN-AA ou la CS-AA 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 autres sources de perte de temps.

Interfaces

De manière générale, les interfaces avec pratiquement tous les PNs actuels sont actives. Dans le cadre de la restructuration des PNs en ATs, ces 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-messenger 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 apparaître 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 : il sera difficile de le faire perdurer dans le cadre de la réorganisation qui introduit déjà une couche supplémentaire. 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 et nuirait à la visibilité de la communauté physique stellaire. Elle ne permettrait pas non plus de constituer un conseil scientifique représentatif 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 avec la thématique systèmes exoplanétaires. 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 reposant 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 protoplanétaires, 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 entre le PNPS, et PNP et le PCMI, ce qui est complexe. La communauté PNPS souhaite cependant que l'étude des disques reste une thématique de son périmètre, 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 apparaître le PEPR sur le même plan que le PN-AA 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 PN-AA et PNP étant apparues encore mal définies. Enfin la communauté s'est interrogée 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 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 attachée 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. Réciproque-

ment, 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.

PROCHAINE MANDATURE

A compléter...

BIBLIOGRAPHIE

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

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

Version préliminaire