

# Programme National de Physique Stellaire



Programme National de Physique Stellaire

## Prospective 2019-2023



## TABLE DES MATIÈRES

<b>Prospective 2019-2023</b>	<b>4</b>
5 <sup>e</sup> colloque de prospective du PNPS . . . . .	4
Les nouveaux thèmes prioritaires du PNPS (2019-2023) . . . . .	4
Le nouveau Conseil Scientifique du PNPS (2019-2023) . . . . .	6
Les enjeux de la mandature 2019-2023+ . . . . .	7
Les grandes questions scientifiques . . . . .	7
Les interfaces . . . . .	8
Les infrastructures/expériences de laboratoire . . . . .	11
Les infrastructures numériques . . . . .	11
Les grands projets/instruments à exploiter . . . . .	14
Les grands projets/instruments à préparer . . . . .	17
Les SNO . . . . .	23
Et en guise de conclusion ... . . . .	23

## PROSPECTIVE 2019-2023

### 5<sup>E</sup> COLLOQUE DE PROSPECTIVE DU PNPS

Le PNPS a tenu son 5<sup>e</sup> colloque de prospective du 26 au 28 mars 2018 à Montpellier. Rassemblant plus de 80 participants spécialistes de Physique Stellaire, ce rendez-vous quadriennal fut d'abord l'occasion de dresser - sous la conduite et l'animation des membres du Conseil Scientifique en place - un bilan des activités scientifiques du Programme sur la période 2015-2018. Le programme était organisé autour des 5 thèmes prioritaires, et des 2 thèmes transverses, émergeant de la mandature finissante :

1. Origines : formation stellaire et disques protoplanétaire
2. Champ magnétique et activité stellaires : nature, origine et impact dans tout le diagramme HR; importance pour la recherche et la caractérisation des exoplanètes
3. Structure et évolution stellaires : observations, simulations, théorie, micro- et macrophysique « à la pointe », importance des conditions initiales
4. Environnements et atmosphères, vents, perte de masse : lien/interactions entre l'étoile et son environnement proche
5. Anatomie/imagerie/cartographie des surfaces, intérieurs et environnements proches : zoom observationnel le plus précis possible via l'instrumentation extrême (HRA, spectropolarimétrie, astérosismologie, imagerie directe, ...)
6. Astrophysique de laboratoire : expériences de laboratoire à vocation astrophysique stellaire (jets / chocs, lasers de puissance, ...); expériences numériques (multi-D, Big Data, ...)
7. La binarité : structuration de la perte et des échanges de masse, contraintes supplémentaires sur les modèles de structure interne, caractérisation plus fine des processus fondamentaux

Une 8<sup>e</sup> session était consacrée aux T2M.

Pour chacune des sessions, après une revue-bilan

générale donnée par un membre du CS, des exposés invités, se voulant des revues des résultats PNPS de l'un des aspects du thème, étaient suivis de contributions plus courtes illustrant les résultats complémentaires. Une large plage de temps était ensuite laissée à la discussion générale.

Le programme complet du 5<sup>e</sup> colloque de prospective, avec les *abstracts* et la plupart des fichiers PDF des présentations est disponible en ligne <sup>1</sup>.

En fin de colloque, les nouveaux thèmes prioritaires du programme national ont été définis collectivement. Ces nouveaux thèmes prioritaires, structurants car fédérateurs, serviront de cadre aux travaux du prochain CS (renouvelé au 2/3) dont le mandat s'étendra désormais sur 5 ans (2019-2023).

Le prochain (et 6<sup>e</sup>) colloque de prospective du PNPS devra donc se tenir entre l'automne 2022 et le printemps 2023, le PNPS devant y dresser son bilan et ses éléments de prospective.

### LES NOUVEAUX THÈMES PRIORITAIRES DU PNPS (2019-2023)

Quatre thèmes scientifiques, fédérateurs, et deux thèmes méthodologiques structurants et transverses aux thèmes scientifiques ont été retenus.

Quatre grands thèmes scientifiques :

1. Origines : formation stellaire et disques protoplanétaires
2. Champ magnétique et activité stellaire
3. Évolution/Intérieurs/Atmosphères : transport, oscillations, paramètres fondamentaux, perte de masse, multiplicité
4. Interaction : étoile-planète; étoile-disque; étoile-étoile.s; étoile-environnement (circumstellaire ou galactique)

1. <https://pnps2018.sciencesconf.org/>

Deux thèmes transverses structurants scientifiques est un élargissement du thème (2015-2018) Structure et/ou méthodologiques :

5. Astrophysique de laboratoire : expérience de laboratoire / simulations numériques / big data

6. Synergies de méthodes : focus sur objets prototypiques, benchmarks, ...

Parmi les quatre thèmes scientifiques, on retrouve reconduits à l'identique deux thèmes de la précédente période (2015-2018) :

**1- Origines : formation stellaire et disques protoplanétaires**

**2- Magnétisme : Champ magnétique et activité stellaire.**

Sur ces dernières années, ces deux thèmes ont en effet vu de très nombreux travaux de premier plan se concrétiser, sous tendus par un positionnement extrêmement compétitif de la communauté française sur des instruments en pointe : ALMA et SPHERE, pour le thème Origines; les spectropolarimètres ESPaDOnS, Narval et HARPSpol, pour le thème Magnétisme. La synergie et la complémentarité des observations interprétées à la lumière de simulations multi-D massives, effectuées grâce aux moyens nationaux, ont conduit à des avancées importantes pour ces deux thèmes. Sur la période de référence (2019-2023), ces deux thèmes vont disposer de nouveaux fleurons instrumentaux - proposés/développés par une contribution importante de la communauté française - MATISSE au VLT pour dévoiler les disques protoplanétaires, NOEMA au Pic de Bure pour explorer la formation stellaire, et SPIRou au CFHT, Néo-Narval puis SPIP au TBL, pour révéler le magnétisme de surface des objets froids, rouges et/ou enfouis. Il était donc logique et attendu de prolonger l'action sur ces deux thèmes qui sont aussi particulièrement actifs sur la production et l'exploitation de simulations numériques remarquables car parfaitement complémentaires à la démarche observationnelle. Sur ces thèmes Origines et Magnétisme, une interface active sera maintenue avec le PCMI (formation stellaire), le PNP (exoplanètes et disques de débris), le PNST (connexion Soleil-Etoiles) et l'ASHRA (disques protoplanétaires avec MATISSE, étude de l'activité stellaire par interférométrie, ...).

Le troisième thème scientifique,

**3- Evolution, Intérieur et Atmosphère**

et Evolution. Les travaux sur les atmosphères stellaires (qu'ils portent sur le développement de codes numériquement performants et intégrant les données atomiques et moléculaires les plus récentes, ou sur leur utilisation pour déterminer les paramètres stellaires) se positionnent souvent au contact étroit avec les modèles d'évolution stellaire, pour leur fournir des contraintes fortes par exemple sur les abondances chimiques en surface, le transport convectif, la rotation, la perte de masse ainsi que les conditions aux limites à la photosphère. Il semblait ainsi naturel de regrouper dans un même thème fédérateur centré sur l'objet Etoile toutes les démarches visant à mieux connaître l'objet physique, pour mieux en appréhender son fonctionnement et son évolution. Deux projets phares de la discipline sont au centre de ce thème : PLATO et Gaia (dans sa préparation amont pour PLATO, et son exploitation scientifique pour Gaia) pour lesquels la communauté française est très fortement impliquée, de même qu'une orientation résolue vers l'exploitation scientifique des instruments spectroscopiques de l'E-ELT, notamment de type MOS, pour aborder et servir des études de populations stellaires. Ces relevés fourniront par exemple des paramètres stellaires des géantes dans un grand volume, qui reliés aux rayons et âges issus de l'astérosismologie, permettront d'utiliser les géantes comme nouvelle horloge cosmique et de tracer l'évolution des populations stellaires. Sur ce thème, une interface forte est identifiée avec le PNCG, autour de la structure et de la dynamique galactique et des populations stellaires. De même une interface avec le PNP est identifiée à travers les démarches de caractérisation d'étoiles hôtes d'exoplanètes (notamment dans le cas de la préparation à la mission PLATO). L'étude des phases finales explosives de l'évolution stellaire se situe à l'interface avec le PNHE. Enfin, ce thème se situe à l'interface avec l'ASHRA avec l'apport essentiel de la haute résolution angulaire pour la détermination de certains paramètres stellaires tels que le rayon angulaire.

Le quatrième thème scientifique

**4. Interaction : étoile-planète; étoile-disque; étoile-étoile.s; étoile-environnement (Circumstellaire ou galactique)**

a clairement émergé au cours de la période (2015-2018). A titre d'exemple, les mesures de transits pla-

nétaires de PLATO vont imbriquer les paramètres fondamentaux de l'étoile et de la planète : une connaissance du rayon de l'étoile à 1% est effectivement nécessaire pour déduire le rayon de la planète avec la même précision. 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 (sur les interactions étoile-planète; étoile-disque), avec le PNCG (sur le contexte extragalactique d'études stellaires : formation stellaire dans les différents type de galaxies; premières étoiles; incidence des étoiles sur l'évolution chimique des galaxies), 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.) .

Deux thèmes transverses complètent ce panorama. Davantage axés sur la méthodologie, ils se veulent fortement structurants pour servir des objectifs scientifiques parmi les thèmes mentionnés ci-dessus.

Prolongement de l'action engagée sur la période 2015-2018, le thème transverse

### 5. Astrophysique de laboratoire : expérience de laboratoire / simulations numériques / Big Data

se positionne au contact des besoins de la Physique Stellaire comme réponse expérimentale ou numérique à des études souvent portées par l'observation et la modélisation. Les expériences de laboratoire sont donc au cœur de ce thème et doivent demeurer à vocation astrophysique stellaire (ex. jets/chocs, lasers de puissance, détermination de paramètres nucléaires, atomiques et moléculaires ...). Les expériences numériques (développement de simulations numériques ou de codes multi-D) relèvent aussi de ce thème, dès lors qu'elles visent à produire des outils de référence communautaires. Enfin les activités autour du Big Data, encore discrètes dans le périmètre de la Physique Stellaire, sont à encourager, notamment dans le contexte de projets pourvoyeurs d'énormes quantités de données (ex. Gaia et les grands relevés complémentaires au sol).

Nouveauté sur la période 2019-2023, le thème transverse

### 6. Synergies de méthodes : focus sur objets prototy-

### piques , benchmarks, ...

identifie des démarches observationnelles ou numériques se focalisant sur des objets prototypes (par ex. d'une classe d'étoile, d'un processus...) pour en explorer la Physique. Cette démarche complétant donc résolument l'approche statistique, nécessite la coordination de moyens divers et qui ne sont pas forcément complémentaires en lère perception. Les approches observationnelles multi longueurs d'onde et/ou multi échelles de temps/espace sur des objets prototypes, ou encore la mise en synergie d'approches méthodologiques différentes (ex. astérosismologie/interférométrie; imagerie directe/interférométrie/Doppler; etc.) pour servir un objectif scientifique précis seront au centre de ce thème. Un objet stellaire devient ainsi prototypique lorsqu'il représente fidèlement une classe d'objets et que l'on peut utiliser une ou plusieurs de ces méthodes conjointement pour mieux en saisir sa physique (exemple de  $\delta$  Cep pour les Céphéides, de Bételgeuse pour les supergéantes rouges, etc...). A l'inverse, lorsqu'il s'agit de comparer des méthodes d'analyse (modèle d'atmosphère ou d'évolution par exemple) sur des étoiles de test, on parlera d'étoiles *benchmarks*. De même les approches de type *Benchmark* visant à établir les performances comparées de plusieurs outils numériques pour en faire émerger un qui pourrait s'imposer à la communauté relèvent de ce thème.

## LE NOUVEAU CONSEIL SCIENTIFIQUE DU PNPS (2019-2023)

Le CS du PNPS a été renouvelé au 2/3, accueillant ainsi 10 nouveaux membres et conservant 5 experts du mandat précédent (en rouge dans la présentation du CS ci-dessous) qui quitteront leur fonction en 2020.

Binôme de Direction :

Directrice : Agnès Lèbre (LUPM Montpellier)

Présidente CS : Céline Reylé (UTINAM, Besançon)

Conseil Scientifique :

Clément Baruteau (IRAP, Toulouse)

Kevin Belkacem (LESIA, Paris-Meudon)

Benoît Commerçon (CRAL, Lyon)

Sébastien Deheuvels (IRAP Toulouse)

Franck Delahaye (LERMA, Meudon-Jussieu)

Nicolas Grosso (LAM, Marseille)

**Eric Lagadec** (Lagrange, Nice)

Joao Pedro Marques (IAS, Orsay)

Annaëlle Maury (CEA, Saclay)

Nadège Meunier (IPAG, Grenoble)

**Julien Morin** (LUPM Montpellier)

**Nicolas Nardetto** (Lagrange, Nice)

**Christophe Winisdoerffer** (CRAL Lyon)

Tous les membres du CS ont été proposés, par la directrice (nommée au 1er mars 2018 par l'INSU), à l'INSU (Guy Perrin, DAS A&A, et Bruno Guiderdoni, chargé de mission INSU A&A pour le PNPS) qui a approuvé ces propositions et validé ce CS. Un vote électronique au sein du CS a ensuite permis d'élire Céline Reylé présidente du CS.

Les membres du CS du PNPS sont aussi en charge de représentations/expertises au sein de diverses instances :

C. Baruteau et J. Morin ont été nommés par l'INSU représentants du PNPS au comité des programmes des télescopes nationaux (TAC T2M) ; ils ont aussi intégré, respectivement, les Conseils Scientifiques du 1.93/OHP et du TBL/Pic du Midi.

J.P. Marques est membre du groupe Astro du CNES.

N. Grosso est l'interlocuteur Athena-France pour le CS du PNPS.

F. Delahaye est le représentant du PNPS au COPIL du Pôle de diffusion de données de physique atomique et moléculaire.

N.Nardetto est le représentant du PNPS au CS du Pôle Thématique JMMC.

E. Lagadec, A. Lèbre et C. Reylé sont les représentants PNPS aux comités de suivi des instruments ELT, en charge respectivement de METIS/HARMONI, MOSAIC et MICADO/MAORY.

D'autres responsabilités représentatives ne manqueront pas de venir s'ajouter à cette liste.

## LES ENJEUX DE LA MANDATURE 2019-2023+

### Les grandes questions scientifiques

Le bilan dressé précédemment laisse cependant de nombreuses questions ouvertes (listées ci après, dans une tentative non exhaustive). Elles pourront être cernées à court/moyen/long terme par :

- des contraintes observationnelles issues d'instruments prochainement disponibles ou encore en pro-

jet ;

- de nouvelles prescriptions théoriques robustes et incorporées à des modèles de structure, d'évolution et d'atmosphère stellaire plus sophistiqués ;  
- des simulations numériques, nécessitant elles-aussi des infrastructures de haute qualité, qui sont aujourd'hui des outils de pointe complémentaires et incontournables à la compréhension des phénomènes stellaires appréhendés dans toutes les dimensions de leur complexité et de leur environnement.

#### Sur la formation stellaire :

- Quelle est l'origine de la fonction de masse initiale des étoiles? Est-elle universelle?

- Comment évolue la chimie des phases précoces?

- Quelle est la multiplicité des étoiles jeunes?

- Dans les processus d'accrétion/éjection, comment s'évacue le moment angulaire? Comment la matière est-elle accrétée?

- Comment se forment les planètes? Quand et où (par ex. dans les disques protoplanétaires) se forment des systèmes multiples?

#### Sur le magnétisme stellaire :

- Quelle est l'origine (et l'évolution) du magnétisme de différentes classes d'étoiles (ex. « Vega-like », étoiles froides évoluées, ...)

- Quel est l'impact du champ magnétique sur l'évolution stellaire? Sur les oscillations stellaires?

- Quels sont les paramètres clés des interactions étoiles/disques/planètes?

- Quels éclairages peut-on attendre de la communauté géophysique?

#### Sur l'objet étoile (évolution/intérieur/atmosphère) :

- Quel est l'impact de la stratification chimique sur le profil de l'opacité et quelles sont les conséquences sur les propriétés sismiques des étoiles dans le diagramme HR?

- Quels sont les effets de la rotation et du champ magnétique sur les intérieurs stellaires et leurs évolution? Cette question est particulièrement importante pour le traitement des interfaces entre régions convectives et radiatives.

- Dans quelle(s) direction(s) améliorer les traitements de processus complexes (convection, mélange, rotation, transport de moment angulaire, champ magnétique etc. ...) tels qu'utilisés dans les codes 1D d'évolution stellaire? Comment y intégrer les contraintes

apportées par les modèles multi-dimensionnels?

### Sur l'environnement stellaire proche :

- Comment se forment et évoluent les grains dans les enveloppes circumstellaires?
- Comment mieux contraindre et donc mieux comprendre les processus de pertes de masse?
- Quelles sont les pistes de développement pour les modèles gaz/poussière?

L'approche de ces questions devra donc servir et bénéficier de l'exploitation optimale des infrastructures d'observation et de calcul placées au service de la communauté stellaire, et dans beaucoup de cas, elle se fera aussi en synergie avec les autres structures (PN/AS) de l'INSU (dans un travail actif aux interfaces).

## Les interfaces

Par ses actions d'animation, de formation et son accompagnement de projets structurants, le PNPS a l'ambition de faire vivre les disciplines à l'interface de plusieurs structures (PN/AS de l'INSU) ou même d'instituts du CNRS.

- **PCMI** : La formation stellaire et les environnements circumstellaires (disques protoplanétaires des objets jeunes ou enveloppes froides des étoiles évoluées) constituent les thématiques au cœur de l'interface PNPS/PCMI. La formation stellaire (vue par PCMI/PNPS) recouvre en effet toutes les phases depuis le milieu interstellaire jusqu'à la fin de l'accrétion et l'arrivée de l'objet sur la séquence principale, permettant d'appréhender les conditions initiales de l'évolution stellaire et de la formation planétaire (interface ainsi élargie au PNP). Abondées par de nombreuses contraintes observationnelles obtenues avec les instruments phares tels que ALMA, NOEMA, IRAM 30m ou SPHERE@VLT, ces thématiques à l'interface s'orientent aussi désormais vers la production (pour ces mêmes instruments) d'observations synthétiques à potentiel prédictif.

Sur le mandat débutant, le PNPS veillera à maintenir le bon fonctionnement de cette interface particulièrement productive, et de renforcer la présence française sur l'instrument

de l'IRAM NOEMA (phase 1 à 10 antennes, puis phase 2, à 12 antennes) avec des larges programmes aussi visibles que ceux actuellement positionnés sur ALMA.

- **PNP** : Avec la formation des systèmes stellaires et planétaires et les disques proto-planétaires, **les exoplanètes** sont au cœur de l'interface PNPS/PNP. Le nouveau thème prioritaire du PNPS "Interaction" (étoile-disque, étoile-planète.s) veut donner encore plus d'étoffe et de visibilité à l'exoplanétologie, abordée du côté de la Physique Stellaire.

L'exploitation d'instruments sol-espace sur la recherche d'exoplanètes et la caractérisation des étoiles hôtes est une démarche centrale aux activités PNPS, et les moyens disponibles sont pluriels. L'exploitation du spectrographe SOPHIE au T1.93m de l'OHP se poursuit assidument, menée par le Consortium Exoplanètes SOPHIE. SPHERE sur le VLT délivre depuis plus d'un an ses spectaculaires images de disques protoplanétaires et ses premières détections d'exoplanètes. Et le *Large Program SPIRou Legacy Survey* du consortium de l'instrument SPIRou, spectropolarimètre IR nouvellement offert au CFHT, vient de démarrer à l'automne 2018, avec comme l'un de ses objectifs principaux, la recherche et la caractérisation d'exo-Terres orbitant autour d'étoiles de faible masse, avec bien sûr une attention accrue pour les planètes en zone habitable.

La communauté est par ailleurs déjà très impliquée et bien organisée (sous l'égide du CNES) dans la préparation de la mission spatiale PLATO. Elle se positionne aussi sur TESS (dans la continuité de Kepler) et sur CHEOPS, et se prépare à l'exploitation du JWST.

Lors du Forum de prospective du PNPS, la communauté a exprimé le souhait de conserver la thématique des exoplanètes dans le giron des PNs existants, PNPS et PNP, principalement, et aussi PNST et PCMI. En outre, elle demande une place plus visible dans ces PNs (notamment à l'interface PNPS/PNP) et surtout davantage d'actions d'animation et de formation en direction des jeunes chercheurs en exoplanétologie (doctorants et post-doc),



afin de forger un sentiment communautaire durable et de structurer de façon visible - sous l'égide des PN de l'INSU - la communauté française en exoplanétologie, discipline internationalement très compétitive. Une telle action PNPS/PNP, programmée sur une (ou deux) journée(s) est dorénavant et déjà envisagée sur 2019. En cas de succès et si elle répond aux attentes évoquées, ce type d'action a vocation à devenir récurrente sur les années de ce mandat débutant.

- **PNCG** : Les études de formation d'étoiles dans les galaxies et de l'évolution des populations stellaires font intervenir directement les propriétés physiques des étoiles; l'étude de l'évolution chimique des galaxies nécessite une connaissance approfondie des mécanismes de production des éléments chimiques. Ces interfaces avec le PNCG sont en fort essor autour de l'exploitation des données du satellite Gaia et des relevés spectroscopiques complémentaires, ainsi qu'autour des nouvelles possibilités d'études de populations stellaires galactiques ouvertes par l'astérosismologie des étoiles géantes qui constituent de véritables horloges cosmiques (missions CoRoT, Kepler, et bientôt PLATO).

Les grands relevés photométriques au sol (LSST, CFIS/Luau, Euclid) permettront, eux, de tracer la matière noire, les résidus d'épisodes d'accrétion, de comprendre à travers les étoiles primitives la formation stellaire au moment de la réionisation, de fournir des cartes de métallicité à grande échelle.

Les luminosités absolues de Gaia permettent d'affiner les mesures de distances des chandelles cosmiques (Céphéides, SNe) et ainsi de donner une meilleure représentation de l'Univers lointain.

L'interface du PNPS avec le PNCG restera donc très active dans le contexte (i) de l'exploitation de Gaia et des grands relevés (la publication du DR3 et du *Final Release* de Gaia devrait intervenir dans le courant de ce nouveau mandat, si étendu jusqu'à 2025), et (ii) de la préparation et de la mise en service des instruments de 1ère lumière de l'ELT qui étendront les études stellaires aux galaxies proches.

- **PNST** : La compréhension du Soleil comme étoile de référence pour la physique stellaire alimente une interface PNPS/PNST qui s'est étoffée sur le dernier mandat par des activités d'animation (ex. les rencontres thématiques "SunStars : Connexions en Physique Solaire et Stellaire", soutenues par la formation du CNRS, le PNPS et le PNST, organisées en Mai 2018) et par des partages de méthodologies solaires-stellaires au profit de l'astérosismologie, du magnétisme stellaire (dynamos), des interactions étoile-planète et même de l'exploration des surfaces stellaires (via l'exploitation de la polarisation linéaire).

Les connexions solaires-stellaires doivent donc être soutenues pour que la compréhension des phénomènes physiques à l'œuvre dans l'intérieur et l'atmosphère stellaire, de surcroît sur une séquence évolutive, puisse progresser sur les plans théoriques et observationnels de façon nourrie entre nos deux communautés. Alors qu'encore récemment seul le Soleil offrait la possibilité d'accéder à une cartographie magnétique à sa surface, la disponibilité d'instruments performants tels les spectropolarimètres modernes (ESPaDoNS@CFHT et Narval@TBL) ou ALMA permettent aujourd'hui d'accéder à de telles informations pour des étoiles sur une plus large gamme de masse et d'âge, et d'interroger sur l'origine et l'impact du magnétisme stellaire à travers le diagramme H.R. Le PNPS veillera donc à poursuivre les efforts engagés pour alimenter cette interface active pour une exploitation optimale d'instruments sol-espace (y compris la préparation scientifique à PLATO).

- **PNHE** : Avec les premières détections d'ondes gravitationnelles, on peut s'attendre à ce que l'interface PNPS/PNHE s'étoffe. Alors que les colonnes d'accrétion sur les naines blanches magnétiques (produisant des chocs à leur surface) cousines de celles observées sur les objets stellaires jeunes, et l'impact des binaires X massives sur la formation stellaire étaient essentiellement au cœur de cette interface, les stades ultimes que sont les étoiles à neutrons,

les progéniteurs de Supernova et les sursauts  $\gamma$  devraient venir renforcer les échanges entre les deux PNPs, et cela notamment, avec l'arrivée de futurs instruments tels que SVOM, ATHENA, CTA et SKA. Surtout dans le contexte de l'exploitation de VIRGO-LIGO, les études des coalescences d'étoiles à neutrons, en lien avec l'évolution d'étoiles binaires massives, devraient être renforcées, et le PNPS sera vigilant à faire vivre cette interface jugée actuellement encore un peu trop effacée.

- **PNGRAM** : Dernier venu dans le pavage INSU de la discipline en Programmes Nationaux, le PNGRAM a été créé en 2016 (par transformation de l'AS GRAM existante) pour coordonner et développer des actions concernant la physique fondamentale dans l'espace, la métrologie de l'espace temps, les systèmes de référence, la mécanique céleste et spatiale. De fait les liens PNPS/PNGRAM sont encore tenus (pour ne pas dire inexistantes). Le PNPS restera donc vigilant quant à l'émergence d'éventuels ponts entre les deux communautés, mais les points de convergence ne sont toutefois pas encore identifiés ni coté PNPS ni coté PNGRAM.
- **ASHRA** : Une interaction évidente existe entre le PNPS et l'ASHRA : le PNPS est pourvoyeur de grandes questions scientifiques à résoudre à court, moyen ou plus long terme, et l'ASHRA est pourvoyeur de solutions technologiques innovantes (par ex. en haute résolution angulaire - HRA, en optique adaptative - OA, en coronographie) permettant d'apporter à court, moyen ou plus long terme, de meilleures contraintes observationnelles aux recherches engagées. Une discussion continue et nourrie doit donc avoir lieu entre les deux structures pour optimiser le développement instrumental et logiciel associé (dont le traitement d'images) et/ou l'orienter dans certaines directions, renforcer les approches multi longueur d'onde et/ou multi-techniques, définir les procédures d'observations et d'analyse de données (par ex. échelles de temps, mode service, centres de type JMMC, SPHERE-DC,...). En retour il est logiquement attendu une exploitation optimale des investissements pour et par les stellaires, par exemple en imagerie HRA, thématique essentielle pour l'étude des systèmes extrasolaires.
- **ASOV** : La physique stellaire est à la fois utilisatrice et productrice de bases de données qui doivent s'intégrer et être interoperables dans le cadre de l'Observatoire Virtuel, qu'elles soient observationnelles (avec les relevés de plus en plus grands et de plus en plus riches en type de données, y compris des spectres) ou théoriques (opacités moléculaires, grilles de modèles d'évolution stellaires, d'atmosphère, etc., spectres synthétiques, etc.). Tous les Centres d'Expertise Régionaux de l'INSU intègrent une ou plusieurs de ces bases de données d'intérêt pour la physique stellaire. Le PNPS restera donc un interlocuteur actif et attentif pour l'ASOV.
- **INP** : La physique stellaire aujourd'hui nécessite la compréhension de phénomènes physiques complexes (par exemple l'interaction entre les plasmas stellaires ou circumstellaires et le champ magnétique, les chocs radiatifs...). De plus les besoins en données de plus en plus précises de physique fondamentale (atomiques, moléculaires, réactions nucléaires...) s'intensifient avec l'avènement des nouveaux instruments sols/spatiaux d'observation. L'astrophysique de laboratoire s'évertue à construire les passerelles entre les expériences, indispensables à la détermination de ces paramètres ou processus cruciaux, et l'astrophysique en général et la physique stellaire en particulier. Depuis des années des collaborations entre les laboratoires de l'INP et l'INSU se sont mises en

place afin de répondre à ces nouveaux défis. Ces collaborations ont été et seront fortement soutenues par le PNPS.

## Les infrastructures/expériences de laboratoire

Observations - Théories - Expériences forment le triptyque indissociable de l'astrophysique en général et de la physique stellaire en particulier. La compréhension des observations comme la modélisation des étoiles et phénomènes associés, quelle que soit la phase d'évolution (proto, séquence principale, évoluée ou SN) ou la partie physique (atmosphère, intérieur, disque ...) de l'étoile, repose sur un ensemble de données de physique fondamentale atomique et moléculaire ainsi que sur la compréhension de phénomènes complexes comme par exemple l'interaction du plasma et du champ magnétique. Les expériences de laboratoire couplées aux simulations/modélisations numériques sont indispensables pour déterminer les valeurs de grandes quantités de données atomiques et moléculaires (probabilités de transition, longueurs d'ondes de raies, coefficients d'absorption et opacités) et déterminer leurs incertitudes. En effet aujourd'hui les grandes divergences récemment mises en évidence entre les mesures de la SANDIA (Bailey 2015) sur l'opacité du Fer d'un côté et tous les calculs théoriques de l'autre, constitue un point dur dans la détermination de la composition de notre Soleil. Ces expériences sont tout aussi cruciales pour la compréhension de l'interaction complexe entre les plasmas, la lumière et le champ magnétique donnant naissance aux phénomènes tels que les jets, les chocs d'accrétion, la reconnection magnétique, etc. Cette activité fait aujourd'hui partie intégrante du paysage de la recherche en Astrophysique et doit se développer pour répondre au défi d'observations astronomiques toujours plus nombreuses et plus précises. Cette recherche s'appuie sur des instruments de différentes natures et différentes classes. Ces instruments, par exemple le spectromètre de 10m de l'Observatoire de Paris, les lasers de classe kJ (i.e. LULI et GEKKO) sont **indispensables** au dé-

veloppement des diagnostics et des plateformes des nouvelles expériences mais aussi à la formation des étudiants. Les lasers de plusieurs dizaines de kJ (i.e. ORION et OMEGA) sont **nécessaires** pour accéder à des régimes de plus haute densité d'énergie et constituent des étapes indispensables pour l'accès à la dernière classe de lasers, les MJ. Ces derniers lasers MJ tels que XFEL, LMJ et APOLLON sont eux **nécessaires** pour accéder à une nouvelle physique (i.e. plasmas relativistes, "radiation dominated plasmas", etc). Cependant il est absolument indispensable de maintenir et développer un savoir et un savoir faire ainsi qu'une activité **académique** dans le domaine des puissances pulsées (Z-pinch) afin de conforter des approches critiques et de permettre une plus grande flexibilité et diversité dans les expériences. Cette orientation se révèle indispensable en France dans la compétition toujours croissante avec les USA, le Royaume Uni et la Chine.

## Les infrastructures numériques

- **Les simulations numériques : une démarche transverse, à l'interface de plusieurs thématiques/communautés :**

Les simulations numériques constituent le 3<sup>e</sup> pilier de la démarche scientifique, aux côtés de la théorie et de l'observation. Elles permettent aujourd'hui d'appréhender des processus physiques complexes affectant les objets stellaires et leur environnement, en atteignant des précisions comparables aux meilleures observables disponibles. La physique stellaire a besoin de codes ouverts. A titre d'exemple, citons les simulations de plasmas magnétisés (codes PIC), ou les codes de transferts radiatifs magnéto-hydrodynamiques (RMHD) essentiels pour comprendre la formation stellaire.

Sur les thèmes prioritaires du PNPS, la communauté stellaire s'appuie sur une forte expertise dans les simulations numériques, qui comprend le développement, le maintien et la mise à disposition de codes de simulations numériques de pointe, dont le champ d'application s'étend au-delà des thèmes du PNPS. En

effet, comme vu dans le chapitre Origines de la partie Bilan de ce document, les développements numériques récents, par exemple les modèles multi-dimensionnels intégrant des processus physiques majeurs tels que la magnétohydrodynamique non-idéale, le transfert de rayonnement ou la dynamique du mélange gaz-solides ont des applications communes au PCMI, au PNP (ex. les disques protoplanétaires) mais aussi PNHE (physique des plasmas). Citons par exemple les codes RAMSES, PLUTO, FARGO ou PHANTOM, dont une partie du développement a été initiée dans la communauté stellaire. Les modèles numériques pour l'étude de fluides magnétisés en rotation trouvent des applications pour l'étude des dynamos stellaires et (exo-)planétaires (interfaces avec le PNP et le PNST), ainsi que pour des études de comparaison avec des expériences de dynamos (interfaces avec l'INP). Citons par exemple les codes MAGIC, PARODY, XSHELLS et ASH. Enfin, les calculs *ab initio* et de dynamique moléculaire pour les intérieurs stellaires et planétaires sont également utilisés au PNP et au PCMI (par exemple les codes ABINIT ou VASP). Au-delà de la communauté française, tous ces outils ont un rayonnement international et sont utilisés sur les centres de calcul haute performance (HPC) du GENCI et de PRACE.

Sur le prochain mandat, le PNPS souhaite encourager les initiatives de développement de codes communautaires destinés au calcul haute performance (HPC), et dont les champs d'application s'étendent au-delà de la physique stellaire. Comme mentionné ci-dessus, ces codes sont bien souvent utilisés par une communauté plus large que celle des PN seuls. Le besoin de structuration inter-PN, voire inter-Institut, apparaît comme indispensable sur le prochain mandat.

- **Les infrastructures numériques**

Les simulations numériques s'appuient aujourd'hui sur des infrastructures de haute performance, de fonctionnement régional (Mésocentres, Tier-2), national (GENCI, Tier-1) ou même européen (PRACE, Tier-0). Ces évolutions néces-

sitent de constantes adaptations (sur les méthodes, sur les métiers, sur les besoins, ...) qui s'intensifieront encore avec le passage à l'exascale. (le milliard de milliards d'instructions par seconde). Les cinq prochaines années devront répondre à la nécessité urgente d'adapter les codes pour rester compétitif face à cette rupture technologique. Ces évolutions doivent donc s'accompagner de formation, mais aussi d'une meilleure structuration en mode projet et d'une reconnaissance du travail de développement et de maintien de codes communautaires pour le HPC. En effet les grandes simulations numériques s'apparentent désormais à des campagnes d'observation, avec une phase de développement exclusif, des demandes d'heures de calculs sur les moyens (inter-)nationaux, la préparation et le lancement des programmes, le post-traitement, la valorisation et la diffusion des résultats. Dans ce cadre il est important de noter le rôle crucial des "ITA numériques" (de type IR/IE spécialisés dans le HPC) dont on a un besoin vital avec la rupture hardware/software en cours. Les moyens locaux de calculs (Tier-2 et 3) ont aussi un rôle majeur dans la développement et la préparation de modèles numériques lourds. La pérennité des moyens humains et matériels des infrastructures de type Tier-2 et 3 est aujourd'hui remise en cause faute de moyens de financement dédiés.

Enfin, la communauté de l'astrophysique numérique a engagé une action de structuration sur le dernier mandat grâce aux financements des PN (école et conférence AstroSim, atelier lors des journées SF2A 2016). Le succès de ces opérations montre le besoin d'organisation de la communauté pour le HPC que ce soit pour la formation des jeunes chercheurs ou pour la préparation à l'exascale. Dans ce cadre, le CS soutiendra les propositions de création d'une Action Spécifique avec pour mission d'organiser la communauté de l'astrophysique numérique autour du HPC.

	<b>Indispensables</b>	<b>Nécessaires</b>	<b>Souhaitables</b>
<b>Projets spatiaux en exploitation</b>	GAIA	TESS	XMM
<b>Projets spatiaux en préparation</b>	PLATO JWST	ATHENA	ARIEL EUCLID CHEOPS
<b>Projets spatiaux futurs</b>	SPICA	LUVOIR/CETUS	
<b>Projets sols existants</b>	VLT ALMA VLTl NOEMA CFHT	CHARA/VEGA T2M IRAM 30m HARPS/HARPS-N/GIARPS	APEX
<b>Projets sols futurs</b>	T2M Suivi sol GAIA CHARA/SPICA	ELT Exploitation du VLT et de ses instruments à l'ère de l'ELT	MSE
<b>Moyens laboratoire existants</b>	LASER kJoules	LASER plusieurs kJoules LASER MJoules	
<b>Moyens laboratoire futurs</b>	Maintien des installations kJoules		Puissances pulsées (Z-pinch)

## Les grands projets/instruments à exploiter

La communauté stellaire est déjà bien mobilisée sur plusieurs instruments (sol), et nombre des résultats présentés dans le bilan précédemment dressé proviennent de leur exploitation scientifique. En 2018-2019, de nouveaux instruments arrivent dans le panorama, augmentant l'effort de la communauté pour optimiser le retour de l'engagement des équipes et des laboratoires sur leur conception amont (ex. GRAVITY@VLTI, MATISSE@VLTI, SPIRou@CFHT, NIKA2@30mIRAM, ...), et ainsi positionner la France - dans certains secteurs scientifiques - au tout premier plan (ex. surfaces stellaires, disques protoplanétaires, magnétisme stellaire, ...). Une priorisation de ces instruments est présentée dans le tableau ci-dessus.

**Les instruments de deuxième génération du VLTI, GRAVITY & MATISSE :** Sur les 7 ans à venir la feuille de route du VLTI préconise l'exploitation et l'optimisation des instruments en place. GRAVITY, depuis plus d'un an et MATISSE, nouvellement offert à la communauté seront donc les instruments phares du VLTI sur tout le prochain mandat du PNPS, pour résoudre les surfaces stellaires, explorer les parties les plus internes des disques protoplanétaires, et pour révéler la complexité des environnements stellaires. Ces observations auront par incidence des impacts forts sur d'autres secteurs de la physique stellaire. Par exemple de meilleures déterminations des paramètres fondamentaux pourront être obtenues s'avérant nécessaires au raffinement des modèles stellaires, aux traitements des données de l'astérosismologie, ou à l'établissement plus précis/robuste de l'échelle des distances dans l'univers (rôle des céphéides). De même, une meilleure connaissance de processus de surface ou proches de la surface, tels que la convection, la rotation, la perte de masse, pourra être obtenue, démarche elle aussi indispensable aux efforts de modélisation de la structure, de l'évolution ou de l'atmosphère stellaire. De plus, l'exploitation de MATISSE par exemple sur les disques protoplanétaires pourra se faire en synergie avec l'imagerie de pointe offerte par SPHERE et/ou en complémentarité avec le potentiel de

ALMA.

Le PNPS accompagnera bien évidemment l'exploitation scientifique de GRAVITY et de MATISSE sur leurs applications stellaires et exoplanétaires, encourageant ainsi un retour optimal sur l'investissement des équipes françaises impliquées dans le volet instrumental amont.

**Les infrastructures de l'IRAM, le 30m et l'interféromètre NOEMA :** La communauté stellaire française est très visible et très bien organisée sur ALMA, étant porteuse ou contributrice de plusieurs *Large Programs*. Elle est cependant plus discrète sur les infrastructures de l'IRAM, ou alors juste différemment organisée (plutôt en programmes PI et moins en *Large Programs* assurant plus de visibilité). Pourtant de nouveaux développements intéressants ont vu le jour sur les infrastructures de l'IRAM, que ce soit sur le télescope de 30m de Pico Veleta (Espagne), avec le très bon démarrage de son nouvel instrument NIKA2-pol, ou bien sur l'interféromètre du Pic de Bure, avec la finalisation de la phase 1 (à 10 antennes de 15 mètres) du projet NOEMA (NOthern Extended Millimeter Array) et son engagement dans la phase 2 (ajout de 2 antennes).

Sur le segment de la formation des étoiles, l'arrivée de nouveaux instruments en radioastronomie millimétrique permettant de mesurer la topologie voire l'intensité du champ magnétique dans les filaments, les coeurs protostellaires, les disques et les flots (avec la capacité polarimétrique complète de ALMA, ou l'instrument NIKA2-Pol), va sans nul doute révolutionner notre compréhension de la formation stellaire et des disques protoplanétaires. Notamment, des études de polarisation à l'échelle des *ridges* avec la nouvelle caméra NIKA2-pol au 30 m de l'IRAM et à l'échelle des coeurs individuels avec ALMA sont nécessaires pour mieux prédire l'importance du champ magnétique et son couplage avec l'effondrement. Elles pourront être complétées par des études à plus grande échelle menées dans le futur avec les instruments SAFARI et B-Bop de l'observatoire

spatial SPICA (voir ci dessous, le projet SPICA de l'ESA).

Le PNPS sera vigilant à renforcer la présence française, de manière visible, sur NOEMA qui se positionne comme le pendant Nord de ALMA. NOEMA sondera ainsi l'Univers froid (autour de -250 degrés Celsius) et dévoilera des objets impossibles à observer avec des instruments optiques, car cachés par des nuages de poussière interstellaires. L'étude de la formation stellaire pourra être menée dans notre Galaxie mais aussi dans des galaxies formées juste après le Big Bang, soulignant ainsi l'impact de l'environnement sur les processus.

Le PNPS s'engage déjà avec l'IRAM et aux côtés d'autres PN (PCMI, PNCG, PNP) dans l'organisation d'une journée d'information de la communauté (début 2019) sur les nouveaux développements instrumentaux de l'IRAM et sur leurs potentiels et leurs perspectives d'application. Les axes de la formation stellaire et des environnements circumstellaires des étoiles évoluées seront notamment développés pour le PNPS.

**Les spectropolarimètres SPIRou au CFHT et Neo-Narval puis SPIP au TBL :** La spectropolarimétrie est depuis près de 15ans un moyen observationnel précieux à la communauté PNPS. Avec les instruments ESPaDoNs@CFHT et Narval@TBL, les études de magnétisme à la surface d'étoiles, à travers tout le diagramme HR, ont connu un essor spectaculaire, via l'exploitation de la polarisation circulaire (traçant l'effet Zeeman). Ces études commencent aujourd'hui à être renforcées par l'exploitation de la polarisation linéaire permettant de remonter à des inhomogénéités en surface (voir la partie Bilan de ce document). Avec les nouveaux instruments, SPIRou@CFHT (disponible fin 2018) puis à moyen terme sa copie SPIP@TBL (à l'horizon 2021), c'est à présent le proche IR qui devient accessible à l'observation (et la détection de l'effet Zeeman en est alors ainsi facilitée!). Cette nouvelle fenêtre permettra à la communauté française d'encore mieux se positionner sur l'étude des objets enfouis (T Tauris) ou

froids (naines M) avec deux fils conducteurs majeurs : le rôle du champ magnétique dans la formation stellaire et la recherche d'exoplanètes autour d'étoiles de faible masse. Cette nouvelle génération d'instruments (à très forte contribution instrumentale française) sera bientôt complétée à court terme par (i) CRIRES+ au VLT qui proposera dès 2019 une nouvelle option spectropolarimétrique (proche IR) dans l'hémisphère sud, et (ii) par Neo-Narval au TBL, qui proposera fin 2019 une stabilisation en vitesse radiale ( $< 3\text{m/s}$ ) de l'actuel instrument Narval, pour étudier les liens entre magnétisme et activité stellaire autour d'étoiles hôtes d'exoplanètes. A plus long terme se dessine aussi le projet d'un spectropolarimètre spatial (voir ci dessous, le projet LUVOIR de la NASA) qui mobilise déjà des ressources sur de la R&D amont (spectropolarimétrie spatiale et UV) en lien avec le CNES.

Le PNPS réaffirme son soutien fort à tous ces instruments de spectropolarimétrie qui ont permis en une douzaine d'année de positionner la communauté française au 1er plan mondial du magnétisme stellaire et de ses techniques instrumentales et logicielles. Il insiste pour disposer d'une course d'exploitation suffisamment longue de ces fleurons instrumentaux, et notamment SPIRou@CFHT (concurrenté par le projet MSE), pour permettre l'exploitation optimale de projets observationnels nécessitant le (très) long terme (parfois plus de 10 ans!) que seuls des télescopes de la classe 4m et 2m peuvent aujourd'hui offrir.

**Les T2M nationaux :** Le PNPS réaffirme son fort soutien aux T2M nationaux : Télescope Bernard Lyot (TBL) au Pic du Midi et Télescope de 1.93m à l'Observatoire de Haute Provence. Leur instrumentation actuellement en place, Narval au TBL et SOPHIE à l'OHP, offrent de véritables niches scientifiques sur le magnétisme stellaire et sur l'exoplanétologie, respectivement, ce qui positionne les équipes françaises au 1er plan de l'exploitation de ces sujets internationalement dynamiques et fortement concurrentiels. Les évolutions instrumentales attendues à court terme sur les T2M na-

tionaux, Neo-Narval (up-grade de Narval en stabilité), puis SPIP (spectropolarimètre opérant dans le proche Infra-rouge) au TBL, et SOPHIE-Red (extension du domaine spectral de SOPHIE vers le rouge + fort gain en sensibilité et en magnitude) à l'OHP contribueront encore, sur au moins la prochaine décennie, à maintenir une pôle position française sur la scène observationnelle internationale du magnétisme stellaire et des exoplanètes. Le contexte des missions spatiales en cours ou en projet à court/moyen terme, TESS (NASA), JWST (NASA), PLATO (ESA), renforce la nécessité - pour la confirmation des détections des exoplanètes et pour leur caractérisation - d'instruments stables en Vr et d'accès facile pour la communauté française. Et ce sont exactement les réponses que proposent les up-grades engagés sur Narval@TBL et sur SOPHIE@OHP. Notamment, la préparation amont puis l'exploitation de la mission PLATO (ESA, horizon 2026) et son nécessaire suivi sol, devraient alimenter le cahier des charges des instruments Neo-Narval et SOPHIE-Red. La définition de la contribution des T2M nationaux au suivi sol de PLATO devra être précisée (et démarrée) au cours de ce nouveau mandat, et le PNPS sera vigilant à positionner les T2M nationaux et leur instrumentation sur cet effort observationnel conséquent. L'ouverture de SPIRou (SPectropolarimètre Infra-Rouge) à la communauté CFH fin 2018 est aussi un excellent atout pour la communauté française engagée sur les études de magnétisme stellaire des étoiles jeunes et des étoiles froides. Cet instrument offrira aussi de belles opportunités d'études exoplanétaires (caractérisation des objets via les interactions avec leur étoile hôte) en complément des détections réalisées. SPIP, la copie de SPIRou, annoncée au TBL à l'horizon 2021 permettra alors aux équipes françaises de renforcer - par un accès facilité à l'instrument - ce type d'études, aussi à travers des programmes coordonnés CFHT-TBL. Et notons enfin - toujours en raison de la facilité d'accès aux T2M nationaux - l'existence de programmes de physique stellaire coordonnés entre TBL et OHP, piste d'exploitation qui se renforcera assurément avec

les up-grades instrumentaux en cours, Neo-Narval et SOPHIE-Red.

Même à l'heure de la préparation de l'ELT, les T2M nationaux sont donc de véritables atouts pour la communauté PNPS, et même au-delà pour l'astrophysique française, en raison de leur instrumentation dédiée, facile d'accès et d'usage, à vocation formatrice (cf. les nombreux stages observationnels des Master français et parfois étrangers qui se déroulent à l'OHP et aussi parfois au Pic du Midi, les formations doctorales adossées à l'exploitation de Narval, ...), à rayonnement régional et culturel (cf. les nombreuses opérations médiatiques sur les sites, notamment au Pic du Midi), à rayonnement international (par l'insertion de ces télescopes et instruments dans le réseau OPTICON, et par la diffusion de résultats scientifiques de qualité). Enfin la proximité géographique entre les sites opérationnels des T2M et leurs équipes techniques et support (sur Tarbes pour le TBL, sur site et sur Marseille pour l'OHP) offre aux T2M nationaux un rôle de banc d'essai technologique : vers la meilleure stabilité en Vr de l'hémisphère Nord pour SOPHIE à l'OHP; vers la possibilité d'exploiter ensemble Neo-Narval et SPIP avec une adaptation instrumentale inédite et qui pourrait s'avérer une 1ère mondiale en exploitation spectropolarimétrique.

**Les données du satellite Gaia, et les grands relevés associés :** Les catalogues successifs de Gaia vont apporter des données de plus en plus précises et riches, ajoutant notamment aux données astrométriques (distances et vitesses transverses), les vitesses radiales et abondances pour les étoiles les plus brillantes. Les suivis au sol spectroscopiques (4MOST, WEAVE, MOONS, DESI, MSE) compléteront également Gaia pour la mesure des vitesses et des abondances des étoiles moins brillantes. Combinés avec Gaia, les relevés au sol fourniront alors des distances photométriques/spectroscopiques pour les étoiles lointaines et décupleront ainsi le volume dans lequel l'astrométrie Gaia pourra être convertie en vitesses transverses de précision. Ils permettront d'étudier la chimie et la dynamique des populations stellaires de la



Voie Lactée mais aussi des galaxies lointaines. Ils donneront des paramètres stellaires des géantes dans un grand volume, qui reliés aux rayons et âges issus de l'astérosismologie (Corot, Kepler, K2, PLATO), permettront d'utiliser les géantes comme nouvelle horloge cosmique et de tracer l'évolution des populations stellaires.

**Thématique de l'étude de l'émission en rayons X des étoiles :** les missions actuelles XMM-Newton (ESA) et Chandra (NASA) qui ont été lancées en 1999 devraient pouvoir rester opérationnelles jusqu'en 2028, ce qui permettra de poursuivre, par exemple, dans les objets stellaires jeunes (c.-à-d., les étoiles pré-séquence principales et les protoétoiles) les études sur l'activité coronale, l'accrétion magnétosphérique (chocs à la base des colonnes d'accrétion à la surface de l'étoile), et l'éjection, où plus généralement les relevés en rayons X d'objets stellaires jeunes dans les régions de formations d'étoiles.

D'ici 2023, l'instrument eROSITA (MPE, Allemagne) à bord du satellite Russe *Spectrum-Roentgen-Gamma* (SRG) qui sera lancé en avril 2019 aura effectué en quatre ans un relevé complet du ciel en rayons X dans la bande d'énergie de 0.3 à 7 keV, couvrant presque celle de XMM-Newton et Chandra. Ce relevé rendu public en fin de mission sera 30 fois plus sensible que celui obtenu au début des années 1990 par ROSAT limité à la bande d'énergie de 0.1 à 2.4 keV. Il permettra donc, en outre, d'obtenir pour les objets stellaires jeunes, grâce à leur émission coronale plus élevée que celle des étoiles de la séquence principale (critère de sélection indépendant de la présence ou non de matière autour de l'étoile), un recensement plus complet et moins affecté par l'extinction. Les objets identifiés comme les plus intéressants pourront encore bénéficier de suivis avec XMM-Newton.

Ces études, bien qu'ayant la particularité de nécessiter des moyens d'observations en rayons X, relèvent des thématiques prioritaires **Origines**, **Champ magnétique et activité stellaire**, et **Interaction** du PNPS. L'accès à ces observations en rayons X, où le facteur de pression est toujours très élevé, doit continuer à être soutenu

pour permettre de maintenir et de développer l'expertise de la communauté française stellaire sur ces moyens d'observations en vue de la préparation de la mission ATHENA.

## Les grands projets/instruments à préparer

Sur les années du mandat 2019-2023+, il convient de mobiliser continuellement, davantage ou même fortement, selon les cas, la communauté PNPS sur la préparation des grands instruments de demain. Ces projets mobilisent en effet de conséquents moyens humains et financiers de l'INSU (et de ses partenaires) qui attend en retour un positionnement compétitif sur la préparation amont (instrumentale, logicielle ou scientifique) et sur l'exploitation scientifique dès la mise à disposition. La priorisation de ces moyens du futur est présentée dans le tableau positionné précédemment.

**L'E-ELT :** La construction de l'E-ELT est désormais lancée sur le Cerro Armazones, dans son design à 5 miroirs complets et à 6 étoiles guides laser. Sa 1<sup>ère</sup> lumière est attendue pour 2024, soit dans 6 ans (la durée d'une thèse et d'un post-doc!). Ainsi, les étudiants que nous formons aujourd'hui conduiront leur carrière scientifique dans l'ère de l'ELT et de ses instruments (de 1<sup>ère</sup> lumière puis de générations successives), comme nous-mêmes avons été imprégnés de l'ère du VLT! Quatre instruments de 1<sup>ère</sup> lumière (HARMONI, MICADO, METIS et MAORY) arriveront progressivement sur l'ELT de 2025 à 2027, suivis de MOSAIC (2029), et probablement ensuite de HIRES et EPICS. Il convient dès à présent de structurer la communauté française (et pas seulement stellaire) sur des objectifs précis, pour lui permettre d'exploiter ces instruments qui seront alors très compétitifs sur une échelle internationale. Alors que pour l'INSU le PNPS est le PN qui paraît seul concerné par TOUS les instruments ELT, la communauté stellaire réunie à son dernier forum de prospective a été paradoxalement plutôt effacée quant à ses attentes de l'ELT.

Seul l'instrument HIRES, spectrographe à haute résolution (avec une option polarimétrique en-

visagée) a suscité quelque intérêt marqué, alors que cet instrument se présente plutôt comme un instrument de 2ème génération de l'ELT. Pourtant les applications stellaires sont en effet nombreuses et diverses ne serait ce qu'avec les instruments de 1ère lumière de l'ELT :

- **HARMONI** (spectrographe généraliste de l'ELT) permettra l'étude de nouvelles régions de formation stellaire (inaccessibles aux instruments actuels) et l'étude des populations stellaires dans les galaxies proches.
- **MICADO** (spectro-caméra imageur de l'ELT) offrira la possibilité d'étudier la formation d'étoiles dans les galaxies proches, de faire de l'astrométrie sur des amas globulaires et des galaxies naines, d'étudier des populations stellaires dans des galaxies géantes elliptiques (amas Virgo). Comme HARMONI, il sera un contributeur important à la caractérisation des exoplanètes (en responsabilité Française), notamment quand il sera associé à **MAORY** (le module d'Optique Adaptative de l'ELT), par exemple pour l'étude des jeunes disques protoplanétaires.
- **METIS** (spectro-imageur IR de l'ELT) permettra aussi la caractérisation (physico-chimique) des exoplanètes, l'étude des disques protoplanétaires, des propriétés des naines brunes (notamment la population dite des ultra-froides), la formation d'étoiles massives, et l'étude des environnements d'étoiles évoluées.
- A plus long terme (horizon 2029), **MO-SAIC** (spectro multi-objet de l'ELT) se profile comme l'instrument dédié aux grands échantillons stellaires, pour permettre par exemple l'analyse détaillée des populations stellaires des galaxies proches, et l'étude chimique des étoiles super géantes rouges lointaines.
- Enfin **HIRES** (spectrographe haute résolution de l'ELT), clairement attendu par la communauté stellaire à l'horizon 2028, apportera une contribution (complémentaire à HARMONI et à METIS) sur les exoplanètes de type terrestre, et servira aussi

des objectifs stellaires comme l'évolution des étoiles et des galaxies, les premières étoiles, les étoiles géantes et sous-géantes du Halo et des galaxies naines proches (de par de multiples applications sur les atmosphères stellaires).

Plusieurs équipes dans des laboratoires avec une forte composante instrumentale sont déjà engagées dans la préparation des instruments ELT et elles se positionnent donc au mieux pour leur exploitation scientifique. Il appartient pourtant au PNPS sur son mandat débutant de faire adhérer encore plus largement la communauté stellaire, et plus particulièrement la jeune génération, sur le potentiel offert par cette palette d'instruments de haute performance. Des actions seront engagées dans ce sens (atelier SF2A, EES, journée d'information,...) pour amener la communauté stellaire à se structurer de façon pérenne et visible en larges collaborations positionnées sur des objectifs scientifiques précis prochainement atteignables avec l'ELT. Les besoins en Ressources Humaines ne devront évidemment pas s'arrêter au *commissionning* et il faut dès à présent préparer la jeune génération (Masters, doctorants et post-docs) à l'exploitation des données ELT, pour maximiser l'investissement français sur ces instruments.

**SPICA@CHARA** : La communauté stellaire française a clairement émis le souhait de pousser le développement de l'interférométrie visible, pour plus de résolution angulaire et plus de contraste sur les phénomènes physiques (cf. *white book* de P. Stee et al.). Elle souhaite disposer à court ou moyen terme, dans le contexte de l'exploitation des données GAIA et de la préparation PLATO d'une telle instrumentation sur CHARA (projet SPICA) et/ou sur le VLTI (projet VLT-iVis). Alors que la feuille de route de l'ESO sur le VLTI ne semble pas privilégier d'emblée un nouvel instrument (en tous cas pas avant 2020, date prévue pour que la communauté réunie en conférence puisse éventuellement commencer à travailler sur une hypothèse d'instrument VLTI de 3ème génération), l'option d'un nouvel instrument, SPICA

(Stellar Parameters and Images with a Cophased Array) accessible à la communauté française sur l'interféromètre américain CHARA semble une piste très sérieuse.

Dans la lignée des expériences et des collaborations actives existantes entre CHARA et les équipes françaises (acquises notamment sur la conception et l'exploitation de l'instrument VEGA@CHARA), un prototype d'instrument visible (FRIEND) a été développé (sur Nice) préfigurant le projet plus ambitieux que se veut être SPICA. L'objectif scientifique principal de SPICA sera en effet de mesurer le diamètre angulaire d'un très grand échantillon d'étoiles (près d'un millier!) avec une précision de 1%, et d'imager plusieurs centaines d'étoiles. Cet objectif servira directement à la préparation amont puis à l'exploitation scientifique de PLATO, sur les étoiles hôtes d'exoplanètes et sur les étoiles astéro-sismiques, illustrant ainsi une forte synergie entre l'interférométrie, l'astérosismologie et l'exo-planétologie. D'autres programmes plus ciblés en physique stellaire pourront bien sûr être conduits sur SPICA@CHARA étendant alors au visible beaucoup d'études menées jusqu'alors en interférométrie proche IR.

Le PNPS sera particulièrement attentif à l'émergence d'un tel instrument, souhait de la communauté et vecteur de structuration de plusieurs équipes françaises (au delà des seuls aspects instrumentaux). SPICA incarne aussi le potentiel de développement instrumental dont la France est capable, voire *leader* sur le segment de l'interférométrie optique, et mérite de fait la plus grande attention.

**JWST** : Grâce à sa haute résolution angulaire et sa grande sensibilité, l'observatoire spatial de la NASA JWST (lancement prévu en mars 2021) apportera une contribution attendue sur la caractérisation des exoplanètes, parfois en synergie avec des instruments sol tels que ALMA et E-ELT. Mais il permettra aussi prochainement de mesurer de façon directe l'IMF des amas d'étoiles massives de notre Galaxie, renforçant ainsi les études actuelles à partir

des étoiles massives détectées dans les amas "mini-starburst" des régions plus lointaines. A l'horizon 2025, l'exploitation du JWST pourra donc se concevoir en synergie avec l'ELT qui permettra également de sonder les régions les plus denses situées à des distances allant jusqu'aux nuages de Magellan. Ainsi pourra être testée l'idée selon laquelle l'IMF est universelle et sa forme canonique, mesurée dans notre environnement proche, potentiellement généralisable à tous les environnements de l'Univers.

**PLATO** : Sur les pas de CoRoT et Kepler, le projet PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of Stars) a été sélectionné comme mission M3 dans le cadre du programme "Cosmic Vision" de l'ESA (lancement prévu fin 2026). Son objectif principal est la recherche et la caractérisation d'exoplanètes ainsi que l'étude des intérieurs stellaires par analyse sismique. PLATO observera un très vaste échantillon d'étoiles brillantes en photométrie ultra-haute précision et permettra ainsi d'étudier en détail l'évolution des systèmes exoplanétaires en relation avec celle de leurs étoiles centrales.

PLATO observera un échantillon prioritaire de plus de 20 000 étoiles brillantes naines froides (magnitude entre 8 et 11, type spectral F, G, K, sur la séquence principale). Au-delà de cet échantillon prioritaire, PLATO observera également plusieurs milliers d'étoiles très brillantes (magnitude entre 4 et 8). Enfin, PLATO observera un échantillon de plus de 250 000 étoiles de la séquence principale (magnitude comprise entre 9 et 13). Comparativement aux missions CoRoT et Kepler, le progrès de PLATO réside dans sa focalisation sur des étoiles brillantes, permettant une caractérisation complète des exoplanètes et de leurs étoiles-hôtes. Il s'agit d'un extraordinaire bond quantitatif et qualitatif pour lequel la communauté doit se préparer.

La communauté française est actuellement fortement impliquée à la fois dans la préparation de l'instrument et dans le segment sol. Ainsi, les laboratoires français ont des responsabilités de haut niveau dans le consortium PLATO. Il conviendra donc de faire fructifier

cette position privilégiée afin de préparer au mieux la communauté à l'exploitation des données et ainsi optimiser le retour scientifique par les équipes françaises.

Une des spécificités de la mission PLATO repose sur la synergie entre les observations depuis l'espace et depuis le sol. En effet, pour un sous-ensemble de cibles d'intérêt jugé prioritaire, un suivi avec les instruments au sol permettra à la fois la confirmation de la présence d'une planète mais également une caractérisation très précise de l'étoile hôte (température effective, composition chimique, etc...). Cet aspect suivi sol de la mission PLATO demande également un travail préparatoire important. La communauté française, en lien avec le consortium PLATO, devra veiller à s'impliquer plus activement dans ce volet. Cette activité devrait par exemple largement impliquer les T2M nationaux et leur nouvelle instrumentation, Neo-Narval, puis SPIP, au TBL, et l'*upgrade* de SOPHIE au T1.93m de l'OHP.

**EUCLID (ESA) :** A l'horizon 2022, Euclid permettra de sonder en profondeur les populations stellaires de la Voie Lactée. Les observations dans l'IR proche fourniront une vue très détaillée des régions les plus obscurcies de la Voie Lactée, permettant de contraindre les structures complexes (bras spiraux, barres, noyau) et leurs populations stellaires. La profondeur d'Euclid, alliée au domaine spectral proche IR, donnera par ailleurs des informations essentielles sur les étoiles de petite masse et les naines brunes (composantes stellaires majoritaires de la Galaxie), en particulier bien au-delà du voisinage solaire. Euclid révélera ces astres de très petite masse dans les populations anciennes de la Voie Lactée (disque épais, halo), offrant un large échantillon de naines brunes couvrant une large plage de métallicité. Il permettra ainsi d'en apprendre davantage sur l'histoire de la formation sub-stellaire aux premiers temps de la Galaxie.

**ATHENA (ESA/JAXA) :** *The Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics* (ATHENA), sélectionné par l'ESA comme la 2ème grande mission de son programme *Cosmic Vision 2015-*

*2025*, est dédié à l'astrophysique de l'univers chaud et énergétique. ATHENA est actuellement en Phase A, son lancement est prévu en 2030/2031. ATHENA sera un grand observatoire en rayons X avec un miroir (en incidence rasante) offrant une grande surface collectrice de 1.4 m<sup>2</sup> à 1 keV avec une bonne qualité d'image (50% des photons d'une source ponctuelle dans un diamètre de 5'') sur un grand champ de vue. À bord se trouveront deux instruments : le microcalorimètre X-IFU (PI D. Barret, IRAP) qui permettra d'obtenir de la spectroscopie fine (résolution spectrale de 2.5 eV jusqu'à 7 keV) dans la bande d'énergie de 0.2-12 keV sur un champ de vue de 5' avec une taille de pixels inférieure à 5'' ; et le Wide Field Imager (WFI) qui fournira des images de 40' × 40' avec une résolution spectrale de 134 eV à 7 keV.

Plusieurs thématiques de physique stellaire sont incluses dans la science observatoire de ATHENA. Les Objectifs Scientifiques Observatoires avec X-IFU sont par exemple : sonder la dynamique et la structure (porosité) du vent des étoiles massives ; sonder la dynamique de l'accrétion magnétosphérique dans les étoiles jeunes de petites masses (en particulier grâce aux diagnostics de plasma permettant de déterminer la température, la densité,...) et étudier sa contribution au chauffage de la photosphère et de la couronne stellaire ; déterminer l'activité magnétique et la dynamo non-standard des naines ultra-froides (types spectraux M7 et plus tardifs, incluant les étoiles de très petites masses et les naines brunes) jeunes et âgées. WFI permettra de faire des relevés en rayons X plus rapides et plus profonds d'objets stellaires jeunes dans les régions de formation stellaire, et de caractériser spectralement en rayons X l'origine de cette émission (couronnes actives, chocs d'accrétion, d'éjection).

En outre, ATHENA sera un observatoire spatial très à même de servir des applications scientifiques à l'interface PNPS/PNHE (par exemple sur les étoiles à neutrons, les GRB, ...) et pouvant opérer en synergie avec ALMA, ELT, JWST,... Après l'adoption des performances définitives de la mission ATHENA, le PNPS (en coordination avec PNHE) devra sensibiliser et mobili-

ser la communauté stellaire française d'observateurs et modélisateurs à la préparation et à l'analyse d'observations stellaires avec ATHENA en soutenant par exemple des ateliers et des écoles. Cela sera nécessaire pour fédérer et développer l'implication de la communauté française sur de grands programmes observatoires stellaires compétitifs au niveau international lors du premier appel d'offre d'observations ATHENA à l'horizon 2030.

**SPICA (ESA M5) :** SPICA est l'une des 3 missions présélectionnées par l'ESA pour son programme *Cosmic Vision* (M5), pour une décision finale qui sera prise fin 2021. Le projet SPICA, mené en partenariat avec la JAXA, est un télescope spatial infrarouge de grande taille (diamètre 2,5 m) entièrement refroidi à une température de seulement quelques degrés au dessus du zéro absolu. Le domaine infrarouge lointain (complémentaire au potentiel d'ALMA, du futur JWST et des instruments de l'E-ELT) ouvre une fenêtre unique sur l'Univers froid et l'origine des galaxies, des étoiles et des planètes. De plus SPICA offrira une sensibilité absolument inédite en imagerie, spectroscopie et polarimétrie (jusqu'à un facteur 100 par rapport à l'Observatoire Spatial Herschel-HSO), permettant de révolutionner notre compréhension de la formation des étoiles et des planètes.

Dans l'Univers proche SPICA fournira une vue unique sur les processus qui gouvernent la formation des étoiles et des systèmes planétaires en alliant la puissance de la spectrométrie à celle de la polarimétrie au plus profond des régions denses de poussière et de gaz. La polarimétrie de l'émission des poussières dans les nuages interstellaires proches permettra de caractériser pour la première fois la morphologie et la force du champ magnétique aux échelles critiques du déclenchement de l'effondrement du gaz en étoiles et planètes au sein des filaments moléculaires. La spectroscopie infrarouge (des ions, atomes, molécules, grains de poussière et particules de glace) permettra non seulement de caractériser les conditions physiques dans et autour des disques protoplanétaires, mais aussi de

tracer en leur sein la ligne critique qui sépare la vapeur d'eau de la glace.

A bord de SPICA, se trouveront SMI, un imageur-spectromètre du domaine infrarouge moyen (12 à 35 micromètres), B-BOP (ex POL), un imageur polarimétrique qui sera révolutionnaire pour mesurer la topologie et l'intensité des champs magnétiques dans les filaments, les coeurs protostellaires, les disques et les flots, et SAFARI un spectromètre ultra-sensible (2 ordres de grandeur meilleur que HSO ou SOFIA) qui sera sans rival entre 30 et 230 microns pour permettre l'étude poussée des chocs à l'origine de la formation des filaments, et estimer leur effet sur la formation des coeurs, sur la masse et sur d'autres caractéristiques des étoiles.

La communauté stellaire française manifeste déjà un vif intérêt pour le projet SPICA (comme en témoigne l'audience très stellaire de la journée SPICA du 4 octobre 2018). La préparation amont des instruments SAFARI et B-BOP implique déjà plusieurs collègues (du CEA, de Bordeaux, ...). La communauté française pressent que B-BOP sera un acteur majeur des avancées sur la caractérisation du champ magnétique dans les objets typiques de la formation stellaire et elle se pose en *leader* sur la proposition d'étude des mécanismes de refroidissement (*turbulence dissipation*) et la formation des filaments, enrichissant de fait les interfaces du PNPS avec PCMI et PNCG. Le PNPS accompagnera la communauté pour un positionnement et une structuration efficaces sur ce projet ambitieux.

**LUVOIR (NASA) :** Le Large UV/Optical/Infrared Surveyor (LUVOIR), est un projet d'observatoire astronomique spatial de la NASA. Se profilant à l'horizon 2035, ce projet est l'une des 4 propositions actuellement étudiées par la NASA (avec HabEx, Origins et LYNX, cf. Decadal Survey de la NASA).

LUVOIR est un projet de télescope spatial d'envergure (avec un miroir primaire de 8 à 12 m de diamètre), multi-longueurs d'ondes (de l'UV au proche IR), pour servir des objectifs scienti-

fiques concernant une très large communauté (stellaire bien sûr, mais aussi cosmologique et galactique, milieu IS, système solaire et exoplanètes, ... ) :

- identifier la lumière primordiale dans l'univers jeune, faire de l'archéologie des galaxies jeunes et trouver les premiers trous noirs ;
- résoudre les régions de formation stellaire à l'échelle du parsec dans des galaxies distantes jusqu'à 10-25 Mpc, cartographier la matière noire dans l'univers proche et isoler les sources d'ondes gravitationnelles ;
- détecter des biomarqueurs sur des exoTerres, analyser la structure et la composition d'exoplanètes, et imager des disques circumstellaires pour contraindre la formation exo-planétaire
- cartographier l'atmosphère des planètes externes du système solaire et la surface de leur satellites à une échelle sans précédent de 50 km et résoudre les objets de la ceinture de Kuiper à 200km.

La perspective d'un observatoire spatial permettant un accès à l'UV (dans la lignée d'IUE, du HST ou de FUSE) est en effet séduisante d'autant que LUVOIR pourrait aussi fonctionner en synergie avec HIRES@E-ELT et bénéficier d'un module polarimétrique, POLLUX (POLarimètre en Lumière Uv eXtrême) dans la lignée des propositions UVMag et Arago (portées par C. Neiner, du LESIA). La communauté PNPS commence à manifester un certain intérêt pour LUVOIR, avec la création du consortium POLLUX, regroupant LAM, LESIA, IRAP, AIM et des partenaires étrangers (Leuven, Leicester, Gratz, ...). Le potentiel scientifique stellaire de LUVOIR (avec sa chaîne instrumentale LUMOS, ECLIPS, HDI et POLLUX) est très vaste :

- dans le cas des étoiles chaudes, la possibilité de repérer dans l'UV (beaucoup plus facilement que dans le visible) des étoiles très massives ( $+ 100 M_{\odot}$ ), d'observer les étoiles massives des galaxies satellites (SMC/LMC), de mesurer pour la 1ère fois des champs magnétiques sur des objets extra-galactiques, d'étudier l'effet des paramètres environnementaux (sur leur perte de masse, leur vent, ...) avec une conséquence essentielle sur l'évolution stellaire, sur

le feedback stellaire sur la galaxie étudiée et sur l'universalité de l'IMF.

- l'étude précise de la multiplicité stellaire, à l'échelle de deux étoiles magnétiques proches (et massives), de suivre le transfert de masse, de moment cinétique, ..., de mettre en évidence des magnétosphères en lien direct avec la surface stellaire.
- dans le cas des étoiles froides, l'étude de l'interaction étoile-disque et des phénomènes d'accrétion-éjection (détection du choc d'accrétion et de la chromosphère facilitée dans l'UV).
- dans le cas des exoplanètes, et aussi en synergie avec PLATO et l'E-ELT (MICADO et METIS, puis HIRES), la possibilité de détecter et caractériser des superTerre et des miniNeptune, de définir la fréquence de ces exoplanètes dans la zone habitable.

Le PNPS suivra avec attention et accompagnera le positionnement de la communauté française sur LUVOIR et les actions de R&D amont déjà engagées ou programmées, notamment en lien avec le CNES (ex. polarimétrie spatiale dans l'UV/Visible, et le projet CETUS, mission Probe pré-sélectionnée par la NASA).

**SKA :** Le "Square Kilometre Array" (SKA) est un projet de radiotélescope géant, de surface collectrice équivalente de un kilomètre carré, constitué de plusieurs réseaux interférométriques opérant dans les longueurs d'onde métriques et centimétriques. La France, membre fondateur de SKA, est désormais membre du SKA Organisation (SKAO) et en 2018, SKA est devenu "TGIR en projet", sur la feuille de route nationale des Infrastructures de Recherche du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. SKA est donc en enjeu important pour la communauté française. Cependant la communauté stellaire nationale est aujourd'hui très peu mobilisée sur ce projet. Preuves en sont (i) l'absence complète de mention à SKA lors du dernier forum de prospective du PNPS, et (ii) l'étroite place des applications et contributions stellaires dans le livre blanc de SKA (reflet direct de l'investissement de seule-

ment une 1/2 douzaine de physiciens stellaires à la rédaction de ce *it white book*). Pourtant là encore, la jeune génération pourrait être très concernée et dès maintenant à considérer un avenir "à l'ère de SKA", avec des applications prometteuses sur le magnétisme et la structure des régions de formation stellaire, la caractérisation des objets jeunes ou YSOs (à l'interface avec PCMI), l'astrométrie de précision, complémentaire à GAIA sur des sources enfouies (à l'interface avec PNCG) ou dans le Kpc central de la Galaxie (à l'interface aussi avec PCMI), à la détection d'étoiles masers et la cinématique des étoiles évoluées (de la séquence AGB/Post-AGB/nébuleuses planétaires), l'activité stellaire (à l'interface avec PNST), les exoplanètes et l'interaction étoile-planète (à l'interface avec PNP), les naines froides et ultrafroides, etc. . . .

Les applications potentielles stellaires sont donc plurielles, et même si elles semblent souvent s'inscrire à l'interface d'autres PN (PMCI, PNP, PNHE, PNST, PNCG), il semble important d'essayer de les (re)placer aussi au cœur du PNPS. Sensibiliser, mobiliser et structurer la communauté stellaire française sur les enjeux de SKA est l'un des chantiers délicats du mandat débutant, au risque que la science stellaire de SKA soit pilotée et faite par d'autres communautés internationales.

## Les SNO

Pour préparer en amont ces grands projets et pour exploiter ces instruments, la communauté stellaire peut s'appuyer sur plusieurs Services Nationaux d'Observations (SNO) de l'INSU (secteur Astronomie-Astrophysique), regroupés au sein des Actions Nationale d'Observation (ANO) N°2 à 5. Des physicien.ne.s stellaires membres du CNAP sont et peuvent être affecté.e.s sur ces SNO (pour effectuer leur service d'observation communautaire statutaire), et la physique stellaire est actuellement concernée par les SNO suivants :

- **AA-ANO2 : Instrumentation des grands observatoires au sol et spatiaux :**  
Instrumentation sol : CHARA; SPIRou;

VISTA/4MOST; VLT/MOONS; VLTI/GRAVITY-NAOMI; VLTI /MATISSE; WHT/WEAVE; E-ELT/HARMONI; E-ELT/MICADO; E-ELT/MOSAIC; SKA (11 SNO)

Instrumentation spatiale : Athena/X-IFU; PLATO (2 SNO)

- **AA-ANO3 : Stations d'observation :** ALMA Regional Center; CFHT; IRAM; Observatoires Chili; RTN; TBL; T193m/OHP (7 SNO)
- **AA-ANO4 : Grands relevés, sondages profonds et suivi à long terme :** GAIA; GAIA ESO Survey; CHEOPS; Grands relevés spectraux avec WEAVE; Monitoring pulsars radio (5 SNO)
- **AA-ANO5 : Centres de traitement, d'archivage et de diffusion de données :** CASIS; PolarBase; POLLUX; XMM-Newton/SSC; Modèle Galaxie de Besançon; CDS; Encyclopédie Exoplanètes; VAMDC; SPHERE DATA Center; MOIO - méthodes/outils interféro optiques (10 SNO)

auxquels se rajoutent des contributions aux démarches fédératrices des Centres d'Expertises Régionaux (CER) et des Pôles Thématiques Nationaux (surtout JMMC, et Pôle de Diffusion des données atomiques et moléculaires). Une réflexion pourrait être menée par, entre autres, le PNPS sur l'intérêt de la mise en place de nouveaux pôles. En particulier, des réflexions sont en cours concernant la création et la définition des contours d'un Pôle de Spectroscopie Stellaire (ou pas seulement stellaire), ce qui semble opportun dans le contexte des grands relevés spectroscopiques en cours et à venir, dans lesquels la communauté stellaire française est fortement impliquée.

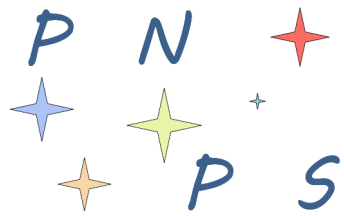
## ET EN GUISE DE CONCLUSION ...

Bon travail à la communauté stellaire française et au Conseil Scientifique du PNPS pour les 5 (?) prochaines années!

Le Conseil Scientifique et la direction du PNPS seront toujours à votre écoute, et à vos côtés dans tous vos projets stellaires.







*Programme National de Physique Stellaire*

# **PROGRAMME NATIONAL DE PHYSIQUE STELLAIRE**

2018

---