



INSU

Prospective
Astronomie
Astrophysique
2025-2030



**Sous la coordination de Martin Giard —
Directeur Adjoint Scientifique du domaine
Astronomie-Astrophysique de l'INSU, de
Jean-Philippe Berger et de Benoit Famaey —
Présidents 2019-2024 et 2024-2029 de
la Commission spécialisée Astronomie-
Astrophysique de l'INSU.**

Coordination éditoriale
Julie Amblard.

Comité de pilotage de la prospective
Jean-Philippe Berger, Sylvain Bontemps, Alain
Blanchard, Anne Decourchelle, Benoit Famaey,
Chiara Ferrari, Martin Giard, Aurélie Guilbert
Lepoutre, Vanessa Hill, Pierre Kervella, Agnès Lèbre,
François Leblanc, Laurence Lavergne, Aurélie
Marchaudon, Frédérique Motte, Denis Mourard,
Claire Moutou, Mamadou N'Diaye, Karine Perraut,
Philippe Stee, Laurence Tresse, Olivia Venot,
Susanna Vergani.

Animation des ateliers et rédaction de la synthèse
Clément Baruteau, Jean-Philippe Berger, Sylvain
Bontemps, Maïca Clavel, Benoit Famaey, Martin
Giard, Aurélie Guilbert-Lepoutre, Barbara Guiot,
Tristan Guillot, Vanessa Hill, Pierre Kervella, Franck
Le Petit, Laurence Lavergne, Nadège Meunier,
Frédérique Motte, Claire Moutou, Mamadou N'Diaye,
Myriam Rodrigues, Sophie Rousset, Christian Surace,
Laurence Tresse

Groupes de travail

Inclusion, Diversité, Égalité : Aurélie Guilbert-
Lepoutre (coordinatrice), Clémence Agrapart,
Patrick de Laverny, Antoine Gusdorf, Helgi Rafn
Hróðmarsson, Isabelle Jégouzo, Sophie Masson,
Thibaut Paumard, Ludovic Petitdemange, Tania
Regimbau, Olivia Venot.

Transition carbone et écologique : Sylvain
Bontemps (coordonateur), Sylvie Cabrit, Mickael
Coriat, Zelia Dionnet, Patrick Hennebelle, Florence
Laurent, Aurélie Marchaudon, Ana Palacios,
Alexandre Santerne, Jenny Sorce accompagnés
par Antoine Hardy.

**Télescopes et Territoires, Astronomie
participative** : Claire Moutou (coordinatrice),
Sylvain Bouley, Chiara Ferrari, Éric Lagadec, David
Le Mignant, Milan Maksimovic, Julien Milli, Pasquier
Noterdaeme, Frédéric Pitout, Damya Souami.

Thématiques et Interdisciplinarité : Frédérique
Motte (coordinatrice), Benoit Famaey, Nadège
Meunier, Nabila Aghanim, Donia Baklouti, Frédéric
Bournaud, Laurent Cambresy, Sandrine Codis,
Karine Issautier, Laurent Lamy, Jeremy Leconte,
Laurent Mirioni, Mamadou N'Diaye, Micaela Oertel,
Ana Palacios, Alejandra Recio-Blanco, Fabrice Roy,
Renaud Savalle, Gilles Theureau, Luigi Tibaldo,
Laurence Tresse, Frédéric Vincent, Guillaume
Aulanier, Kévin Belkacem, Ludovic Biennier, Isabelle
Boisse, Samuel Boissier, Patrick Charlot, Élodie
Choquet, Thierry Fouchet, Maud Langlois, Benoit
Lavraud, François Lévrier, Benjamin Magnelli, Frantz

Martinache, David Maurin, Pierre-Olivier Petrucci,
Matthieu Tristram, Philip Tuckey, Valentine Wakelam,
John Carter, Matthieu Kretzschmar, Joao Marques,
Antoine Petiteau, François Petrelis, Cyril Szopa,
Susanna Vergani.

R & D pour l'astronomie du futur : Mamadou
N'Diaye (coordonateur), Gaëlle Coussot, Bruno Cugny,
Bess Fang, Olivier Gasnault, Olivier Godet, Damien
Gratadour, Pierre Henri, Elsa Huby, Lucie Leboulleux,
François Leblanc, Benoit Neichel, Marc Sauvage,
Fabien Stalport, Éric Thiebaut, Jeanne Treuttel.

**Astronomie et Astrophysique à l'interface
INSU - IN2P3 - INP** : Martin Giard, Vincent
Poireau, Bertrand Georgeot (coordonateurs), Matteo
Barsuglia, Fabienne Casoli, Marco Cirelli, Johan
Cohen-Tanugi, Benoit Famaey, Sophie Henrot-
Versillé, Michel Koenig, Pasquale Serpico, Susanna
Vergani.

Moyens sol de l'astronomie : Jean-Philippe Berger
(coordonateur), Dominique Aubert, Mathieu Bertin,
Odile Cœur-Joly, Thierry Contini, Laurent Jocou,
Astrid Lamberts, Anaëlle Maury (coordinatrices et
coordonateurs de sous-groupes), Susanna Vergani
(déléguee scientifique).

Bruno Albertazzi, Sarah Antier, Caroline Bot,
Baptiste Cecconi, Jean-Charles Cuillandre, Pierre
Cristofari, Catherine Dougados, Marian Douspis,
Bernard Gelly, Diego Gotz, Marc Huertas-Company,
Laurène Jouve, Maud Le Jeune, Franck Le Petit,
Geoffroy Lesur, Jérôme Lodewyck, Sophie Masson,
Sophie Maurogordato, Cherry Ng, Jennifer Noble,
Jérôme Pety, Étienne Pointecouteau, Johan Richard,
Philippe Salomé, Alexandre Santerne, Christian
Surace, Véronique Vuitton.

Enseignement et Astronomie : Pierre Kervella
(coordonateur), Frédéric Daigne, Zahia Djouadi,
Thierry Fouchet, Jean-François Gonzalez, David
Mary, Estelle Moraux, Olga Suarez, Natalie Webb,
Andreas Zech.

**Ressources humaines, financières et
Valorisation** : Laurence Tresse (coordinatrice),
Sandrine Couturier, Arnaud Landragin, Laurence
Lavergne, Soizick Lesteven, Sébastien Maret, Sophie
Rousset.

**Organisation nationale, Articulation Europe
et international** : Vanessa Hill (coordinatrice),
Maryvonne Gerin, Damien Gratadour, Nadège
Lagarde, Maud Langlois, Benoit Lavraud, Agnès
Lèbre, David Maurin, Denis Mourard, Marc Ollivier,
Karine Perraut, Éric Slezak, Arthur Vigan.

Éditorial de conclusion : Nicolas Arnaud,
Directeur de l'INSU

Photo de couverture : Vue webcam du site
de construction de l'ELT. © ESO

Conception et réalisation : Luciole, Paris

Octobre 2025

Impression : IFSEM



Sommaire

Résumé	7
1. Introduction	11
2. Suivi des recommandations de 2019	12
3. Inclusion, Diversité, Égalité	14
4. Transition carbone et écologique	17
5. Télescopes et Territoires, Astronomie participative	21
6. Thématiques et Interdisciplinarité	24
7. Astronomie et Astrophysique à l'interface INSU - IN2P3 - INP	32
8. Moyens sol de l'astronomie	35
9. R & D pour l'astronomie du futur	42
10. Enseignement et Astronomie	46
11. Ressources humaines, financières et Valorisation	50
12. Organisation nationale, Articulation Europe et International	55
13. Éditorial de conclusion du directeur de l'INSU	61
Sigles et acronymes	62



Nébuleuses planétaires (étoiles évoluées) HFG1 et Abell 6. Image de Jean-Charles Cuillandre (CEA/CFHT) & Giovanni Anselmi. © Canada-France-Hawaii Telescope

Résumé

L'exercice de prospective Astronomie-Astrophysique (AA) 2025-2030 démontre une nouvelle fois que l'astronomie française s'illustre au plus haut niveau de la compétition internationale, grâce à une communauté qui cherche des réponses aux grandes questions sur l'origine et le devenir de l'Univers et ses objets, tout en inventant et en développant, avec un tissu industriel à la pointe de l'innovation, les instruments nécessaires à cette quête. Pour la prochaine décennie, l'astronomie française va bénéficier d'une place de choix dans son écosystème européen par comparaison à l'astronomie nord-américaine, que ce soit par la mise en service de trois grands observatoires sol complètement inédits bénéficiant d'une forte contribution nationale, CTA, SKA et ELT¹, ou par le lancement de missions spatiales de l'ESA sans équivalent, PLATO, Ariel, puis LISA. Une partie de notre succès réside certainement dans la capacité du continent européen depuis 60 ans, avec l'ESO et l'ESA mais aussi grâce à la coordination Astronet, à assurer une planification de la mise en œuvre de nos feuilles de route qui repose sur un large support des communautés utilisatrices.

Cette prospective a été marquée par une prise de conscience collective exceptionnelle de la crise environnementale et de l'urgence à participer de façon exemplaire à la réduction de notre empreinte carbone à tous les niveaux : au niveau des laboratoires et des projets par la mise en place de mesures contraignantes et de bilans carbone systématiques, et au niveau des grandes infrastructures de recherche (voir le chapitre 5). Au-delà de ces considérations liées à la crise environnementale, la communauté a bien pris conscience du changement également nécessaire dans notre relation aux populations des zones qui hébergent les observatoires. C'est donc à une astronomie à la fois plus largement inclusive et respectueuse de l'environnement que la communauté souhaite œuvrer, à l'instar de ce que fait déjà l'organisation SKAO avec les populations locales en Australie et en Afrique du Sud, ainsi que l'ESO avec une production d'énergie décarbonée au Chili (voir le chapitre 4). Ainsi, sans doute pour

la première fois, des contraintes autres que les priorités scientifiques ou l'accès aux ressources financières et humaines ont été discutées en profondeur et prises en compte pour définir notre trajectoire collective.

Suite aux travaux préparatoires au colloque de prospective et aux ateliers qui s'y sont tenus, cinq défis scientifiques majeurs pour le domaine AA sur les prochaines années ont été identifiés (voir le chapitre 6). Ils sont à la fois thématiques (trois défis) et méthodologiques (deux défis) et s'intitulent :

- « **Couplages** »
- « **Évolution** »
- « **Frontières de la physique** »
- « **Instrumentation & Observation** »
- « **Numérique** ».

Le *continuum* thématique observé au sein de la communauté Astronomie-Astrophysique est l'une de ses caractéristiques principales et l'une de ses grandes forces. Les trois défis thématiques « **Couplages** », « **Évolution** » et « **Frontières de la physique** », qui constituent les grandes priorités de la discipline pour les cinq ans à venir, illustrent bien cette continuité puisque l'avancée des connaissances sur un objet astrophysique nécessite le plus souvent des contraintes sur un ou plusieurs autres. Les atouts à préserver pour mener à bien ces défis incluent une forte structuration nationale (et internationale) de la communauté (voir le chapitre 12), des ressources humaines appropriées (voir le chapitre 11) et un soutien à des observatoires riches et souvent transverses (voir le tableau 6.1 dans le chapitre 6). Ces observatoires sont impulsés par une R & D de pointe et requièrent une gestion et une valorisation des données efficaces, ainsi que le développement de codes de calcul intensif HPC (voir les chapitres 6, 8 et 9) ; ces trois derniers éléments forment le cœur de nos défis méthodologiques « **Instrumentation & Observation** », et « **Numérique** ». Il est crucial de conforter notre structuration nationale, qui est un des éléments de notre compétitivité au niveau international

1. Une liste complète des acronymes est fournie en annexe de ce document.



La galaxie Messier 74. Combinaison des données infrarouges du JWST avec celles d'Hubble et de télescopes au sol.
© ESA/Webb, NASA & CSA, J. Lee and the PHANGS-JWST Team, J. Schmidt

et de notre résilience face à une situation de ressources limitées, ainsi que de soutenir nos efforts de développement instrumental, de R & D, de gestion des grands volumes de données, notamment avec l'intelligence artificielle, et de codes numériques de pointe à l'ère de l'exascale. Les défis de la communauté Astronomie-Astrophysique ne pourront donc être atteints qu'avec des ressources humaines maintenues.

Notre domaine de recherche est éminemment pluridisciplinaire, et si tous les autres instituts du CNRS présentent des synergies avec le domaine Astronomie-Astrophysique de l'INSU, cet exercice de prospective a mis en lumière la nécessité d'une meilleure organisation et d'une plus grande perméabilité de l'interface avec la physique (INP) ainsi qu'avec la physique nucléaire et des particules (IN2P3). Cela devra se faire

(voir le chapitre 7) notamment par la mise en place d'un bureau de coordination au niveau des DAS de domaine concernés au sein des trois instituts (Astrophysique, Physique théorique, Astroparticules), par l'ouverture de recrutements chercheurs croisés entre les instituts, et par une plus grande perméabilité des outils de chaque institut aux autres instituts (Master-Projets, groupements de recherche et programmes nationaux, observatoires des sciences de l'univers et services nationaux d'observation, etc.).

En ce qui concerne les moyens globaux de l'astronomie française, ceux-ci sont concentrés pour la plus grande part dans les ressources humaines au sein des unités (environ 200 M€/an pour 2 682 personnels tous statuts confondus) et dans les contributions de la France aux grandes infrastructures de recherche et aux

missions spatiales du domaine (environ 205 M€/an). La part restante, 11 %, concerne pour partie le fonctionnement des unités (environ 29 M€/an) et pour partie leurs ressources contractuelles (CNES, ERC, Horizon Europe, ANR, etc. : environ 45 M€/an). La part des grandes infrastructures (OSI, IR* et IR : ESO, ALMA, SKA, CTA, EGO/Virgo, IRAM, TCFH, LOFAR/Nenufar, CDS, Paradise), des moyens nationaux (TBL, ORN, OHP et THEMIS), ainsi que des missions spatiales est donc majeure. Les performances des moyens sol ont été évaluées dans le détail lors de cet exercice (voir le chapitre 8), l'évaluation des missions spatiales faisant l'objet du Séminaire de prospective scientifique du CNES 2024. Notre communauté dispose ainsi d'un accès à des moyens d'observation complémentaires au meilleur niveau mondial pour les cinq prochaines années. Le tableau 6.1 montre comment chacun de ces moyens contribue aux trois grands défis thématiques affichés par cet exercice. Concernant les ressources humaines, les effectifs des chercheuses et chercheurs titulaires et assimilés, toutes tutelles confondues, sont stables depuis 2021, ceux des doctorants ont nettement augmenté (+60 % sur les 15 dernières années), alors que ceux des personnels d'appui à la recherche (PAR) dans les unités sont en décroissance régulière d'environ 1 % à 2 % par an depuis 15 ans. Il résulte de ce dernier point de fortes tensions dans le développement des grands projets d'instrumentation et des moyens insuffisants pour leur exploitation scientifique. La communauté AA demande aux tutelles des unités d'assurer le maintien des personnels PAR nécessaires pour encadrer les grands projets d'astronomie dans lesquels la France est engagée, et pour préparer l'astronomie du futur.

Dans ce contexte, et compte tenu de la haute priorité qui doit être donnée aux nouveaux grands instruments qui nous offriront avant cinq ans l'accès à une panoplie exceptionnelle d'outils d'observation multi-longueurs d'onde et multi-messagers, ELT, VLT-2030, CTA, SKA au sol, ainsi que les missions spatiales programmées (voir les conclusions du Séminaire de prospective scientifique du CNES), nous ne recommandons pas la construction de nouvelles infrastructures sol dans la prochaine période (2025-2030). Cependant, la communauté devra se saisir, dès ce quinquennat, de l'opportunité qu'offre l'initiative « *Expanding Horizons* » de l'ESO et participer activement à la prospective des possibles futures infrastructures astronomiques qui permettront les prochains grands sauts dans nos connaissances. Une deuxième très haute priorité doit être centrée sur le traitement, la curation et l'archivage de nos données, pour nous préparer à franchir les « murs » de données qui s'annoncent. La

mise en place du nœud français des centres régionaux des données de SKA (FR SKA-SRC) en sera un élément-clé qui, avec le CDS et les CDOS actuels, aura vocation sur le long terme à évoluer vers une IR* nationale en réseau dédiée aux données de l'astronomie.

En ce qui concerne les moyens dans les unités et la mise en œuvre des projets, compte tenu de la prévalence des ressources obtenues sur contrats et de l'insuffisance des moyens récurrents procurés par les tutelles (RH, fonctionnement, investissement), les unités devront, quand ce n'est déjà fait, mettre en place une gouvernance qui mutualise une partie des ressources contractuelles au profit de leur collectif, y compris l'emploi de CDD/CDI de projet ou de mission. Les unités doivent en outre avoir une gestion anticipée du plan de charge des personnels d'appui à la recherche, au niveau des projets et des services, et mettre en œuvre une gestion prévisionnelle des emplois et compétences s'appuyant sur une analyse précise de la démographie de ces personnels et de l'évolution des besoins scientifiques à venir, en sus du fait que les unités doivent aussi bien évidemment gérer de nombreuses urgences, avec des départs de personnels-clés qui arrivent régulièrement sans pouvoir être anticipés.

L'engouement pour notre discipline est toujours aussi vif, comme en témoigne l'augmentation du nombre de stages et de thèses dans nos laboratoires. Cet engouement nous confère un avantage certain pour transmettre au grand public les valeurs et bienfaits de la méthode scientifique. Ceci doit passer par des actions accrues de formation des enseignants (diplôme d'université ou autre) qui sont notre principal relais, ainsi que par toute forme de communication et de transmission des savoirs, y compris des actions de science participative dont le grand public est de plus en plus friand compte tenu de l'engouement pour les réseaux sociaux numériques. C'est aussi au niveau des formations que nous devons intervenir pour parvenir à des recrutements non genrés et parfaitement inclusifs de toutes les spécificités, marquages socioculturels dans la société.

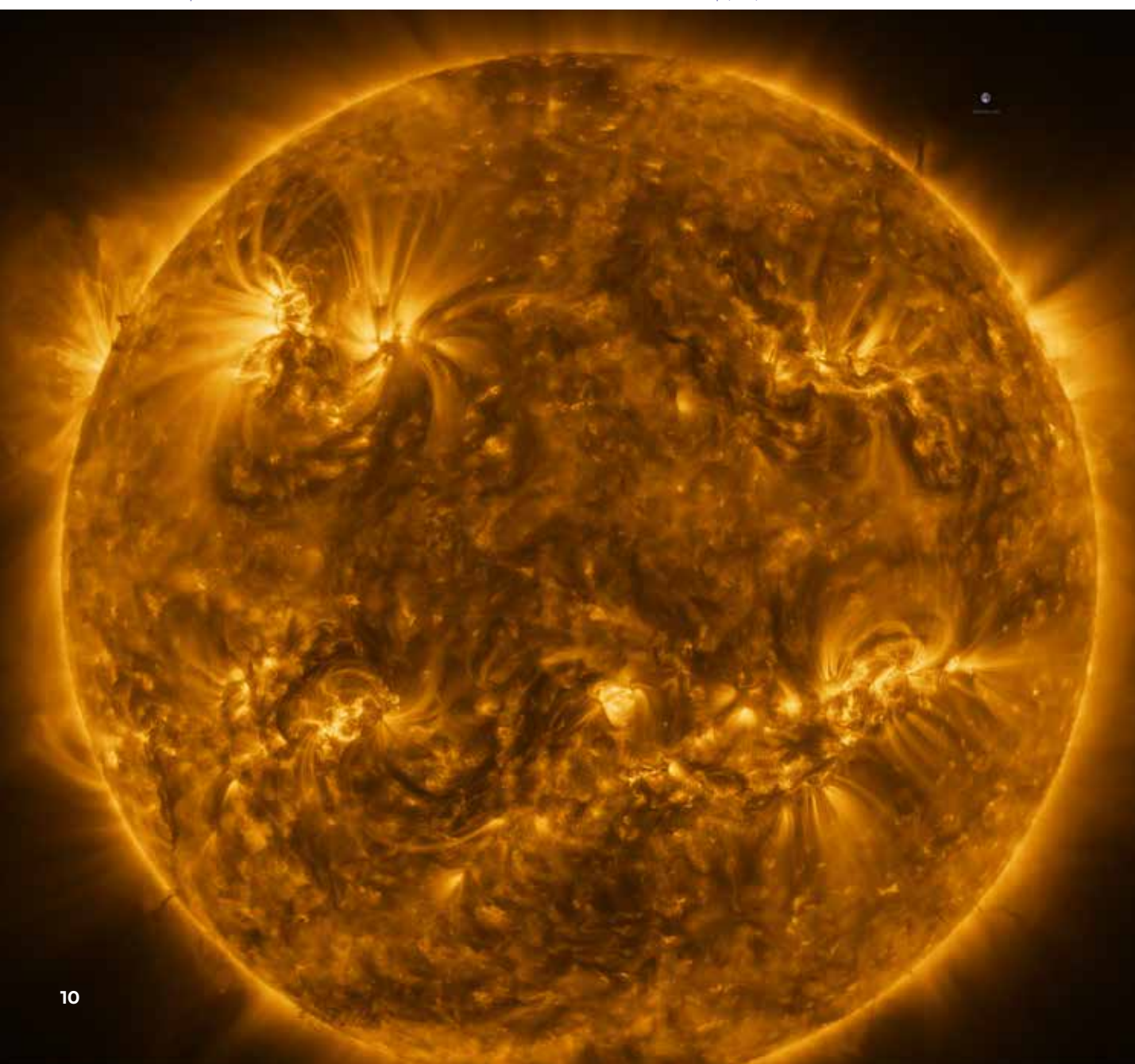
En termes d'organisation, les dispositifs spécifiques à l'INSU (programmes nationaux et services d'observation) sont vus comme des outils majeurs. Au-delà d'un suivi de la réforme des programmes nationaux, le Comité Exoplanètes Transverse doit devenir une action thématique (AT), partagée entre le PN ASTRO et le PN Planétologie. En ce qui concerne les SNO, un chantier prioritaire doit être mené par la CS AA pour clarifier le périmètre de chaque ANO, diminuer la granularité des services labellisés et renforcer la gouvernance de ces SNO qui deviendraient donc plus pérennes.

La responsabilité de la mise en œuvre des SNO relève des OSU et Grands Établissements, qui ont vocation à coordonner les UMR de l'INSU sur chaque site universitaire, sur le principe de subsidiarité. De grandes disparités existent entre les sites. Elles justifient la méthodologie des schémas stratégiques mise en œuvre par l'INSU, et dans laquelle les unités AA de l'INSU doivent s'impliquer.

Avec des infrastructures lourdes développées dans le cadre d'accords internationaux (ESO, ESA, SKAO, et CTAO) l'astronomie est, de fait, l'un des outils de la diplomatie française. Elle occupe aussi une bonne place dans un paysage européen qui évolue rapidement, tant par les pratiques de la recherche promues et encadrées par des labels (HRS4R, FAIR, *open science*), que par

la place de plus en plus importante des appels d'offres à visées sociétales. Il est important de renforcer encore la diffusion des appels d'offres européens, notamment les moins connus (l'activité de veille peut s'appuyer sur les expertises pointues présentes dans les laboratoires); les cellules mutualisées et les IPE sont pertinentes pour continuer à développer le support pour le montage de tels projets. Au-delà de l'Europe, l'Astronomie-Astrophysique est très active pour mettre en œuvre les dispositifs de collaborations internationales du CNRS, et notamment les *International Research Labs* (IRL), au Chili et aux Canaries. Une nouvelle IRL pourrait être envisagée à Baltimore (US) autour des contributions des équipes françaises au projet d'observatoire spatial *Habitable Worlds Observatory* (HWO).

Le Soleil vu par Solar Orbiter. © ESA & NASA/Solar Orbiter/EUI team/Traitement des données : E. Kraaikamp (ROB)



1. Introduction

L'exercice de prospective Astronomie-Astrophysique de l'INSU est un moment de réflexion collective majeure des communautés scientifiques impliquées dans le domaine. Il en résulte un affichage des priorités thématiques nationales dans le domaine pour la période 2025-2030, une mise en priorité des moyens, ainsi que la stratégie du positionnement national dans les contextes européen et international.

Cette prospective a été placée sous la responsabilité de la Commission spécialisée du domaine AA (CS AA) de l'INSU qui a mis en place un comité de pilotage dédié. Des liens étroits ont été instaurés avec la préparation du séminaire de prospective scientifique du CNES, qui s'est déroulé sur la même période, afin d'assurer la cohérence des deux prospectives. Les groupes de travail mis en place, au nombre de dix, ont mobilisé une grande partie de la communauté AA (dans leur constitution et par leurs enquêtes) pendant 18 mois sur 2023 et 2024. Le séminaire de prospective a rassemblé environ 160 personnes à Autrans du 23 au 27 septembre 2024. Les personnes participantes ont pu prendre connaissance des travaux des groupes de travail et des actualités du domaine, et prendre part à des discussions en ateliers autour de questions préparées par le comité de pilotage. Ce rapport exécutif a été rédigé ensuite conjointement par le comité de pilotage et les animateurs des ateliers.

Le caractère éminemment collectif de cet exercice de prospective confère une forte légitimité à ce rapport pour la construction des dossiers de financement, la prise de décision et le pilotage des moyens de l'astronomie française. Ces conclusions, ainsi que l'ensemble des documents produits pendant l'exercice de prospective², sont destinés à tous les acteurs de l'astronomie française : les personnels de la recherche, les directions des unités, et l'ensemble des décideurs et évaluateurs en responsabilité au MESR, à l'ANR, au Hcéres, dans les organismes tels que le CNRS, le CNES, le CEA, l'ONERA ou l'Inria, dans les universités et grandes écoles, et dans les grands établissements d'astronomie.



L'équipe de rédaction de la synthèse au Pic du Midi. © S. Bontemps

Le résumé exécutif de la prospective présenté ci-après est divisé, outre cette brève introduction, en 11 chapitres. Le premier (chapitre 2) fait un bilan du suivi des recommandations de la prospective de 2019, et les dix suivants couvrent les thématiques abordées par les différents groupes de travail, enrichies par les retours des Ateliers du colloque de prospective de septembre 2024. Le chapitre 3 est consacré aux thématiques de l'inclusion, de la diversité et de l'égalité, soulignant que des progrès significatifs sont possibles grâce à des mesures structurelles ambitieuses et à un engagement soutenu de tous les acteurs. Le chapitre 4 met en avant le fait que la réduction des émissions de gaz à effet de serre est un point crucial, nécessitant des mesures concrètes, plusieurs pistes étant proposées. Le chapitre 5 met en lumière le fait que l'intégration des communautés locales et la promotion de l'astronomie participative sont essentielles pour une recherche inclusive et respectueuse. Le chapitre 6 porte quant à lui sur les grandes priorités thématiques et méthodologiques du domaine pour les cinq années à venir, en lien avec les moyens sol et espace de la discipline, complétées par une réflexion dans le chapitre 7 sur les interfaces avec l'INP et l'IN2P3. Le chapitre 8 porte plus spécifiquement sur les recommandations portant sur les moyens sol de l'astronomie, complétées dans le chapitre 9 par des réflexions sur le soutien à apporter à la recherche et développement (R & D) instrumentale pour maintenir la compétitivité française dans les technologies-clés pour l'astronomie. Le chapitre 10 se penche sur la question de l'enseignement de l'astronomie, avec la mise en lumière d'efforts encore nécessaires pour améliorer la parité et diversifier les profils des étudiants. Les ressources humaines et financières du domaine sont abordées dans le chapitre 11, tandis que le chapitre 12 porte enfin sur l'organisation nationale et l'articulation avec l'Europe et l'International, essentielles pour maintenir la compétitivité et l'impact de la recherche française dans le domaine AA.

2. Disponibles sur un site dédié avec accès Janus, qui sera accessible depuis l'adresse <https://programmes.insu.cnrs.fr/astro/csaa/>

2. Suivi des recommandations de 2019

Une discipline en évolution

La dernière prospective, datant de 2019, avait recommandé plusieurs évolutions scientifiques et méthodologiques importantes, nécessitant une attention ou un effort particulier de notre communauté.

La première concernait *l'astronomie des phénomènes transitoires* en lien avec l'astronomie multi-messagers. Dans ce domaine, il faut noter le démarrage du projet européen ACME coordonné par le CNRS pour développer des services d'observations coordonnées à partir des infrastructures existantes. Le satellite d'alertes franco-chinois SVOM et son télescope franco-mexicain de suivi sol, Colibri, ont été lancés/achevés et mis en service avec succès en 2024. Les deux missions spatiales Flagship de l'ESA, LISA pour la détection des ondes gravitationnelles, et Athena pour l'astronomie X, ont été pour l'une adoptée (LISA) et pour l'autre consolidée (NewAthena) afin d'être lancées dans la prochaine décennie ou au-delà. L'observatoire d'ondes gravitationnelles EGO-Virgo est maintenant totalement intégré avec les interféromètres américains (LIGO) et participe à la localisation de plusieurs dizaines d'événements chaque année, ouvrant la voie aux premières études statistiques d'une population de trous noirs. Au-delà des projets, ce périmètre thématique est devenu structurant pour plusieurs équipes, des collaborations, ainsi qu'une nouvelle UMR parisienne, le *Laboratoire d'étude de l'Univers et des phénomènes extrêmes* (LUX).

La deuxième recommandation concernait *l'exoplanétologie et l'exobiologie*. L'action transverse « exoplanètes » a été créée et est un succès : elle conduira à la création de l'action thématique « Exosystèmes », transverse entre les programmes nationaux de planétologie (PNP) ainsi que d'astronomie et d'astrophysique (PN ASTRO), tel que recommandé ci-après. Cette action transverse a permis de commencer à structurer cette thématique au sein des programmes nationaux AA. L'INSU a aussi créé le GDR PILSE qui réunit des scientifiques dans les domaines de l'astrophysique, de l'astrochimie et de l'astrobiologie. Finalement, et ce n'est pas le moindre des faits notables, le PEPR *Origins* a été financé dans le cadre de France 2030.

La troisième recommandation d'évolution concernait *le numérique* avec une montée en gamme nécessaire en science des données et une poursuite des efforts engagés en calcul



Séminaire de prospective à Autrans.

haute performance. Le code RAMSES a ainsi bénéficié d'une des premières labellisations dans le cadre de la nouvelle ANO « codes communautaires ». Le PEPR *NumPEX* a également été sélectionné. Ce dernier inclut une forte participation de la communauté AA pour transférer les grands codes de simulation numérique sur les machines *exascale*. Plusieurs recrutements de chercheurs interdisciplinaires *science des données & astrophysique* ont bénéficié au domaine de l'astrophysique grâce à l'ouverture de la CID 55 au CNRS, et deux recrutements fléchés croisés ont été réalisés entre l'INS2I et l'INSU.

Les priorités moyens

La construction de l'ELT, consolidée au niveau français par le financement de l'Equipex + F_CELT, est très avancée et tous les instruments de première lumière, priorités de la dernière prospective, ont franchi plusieurs jalons (MICADO, MORFEO, METIS, HARMONI). Le financement de MOSAIC, seul instrument à responsabilité française, est à consolider. La première phase d'ANDES, spectromètre haute résolution, a été initiée. Fort de son statut d'ERIC, CTA dispose maintenant d'un statut juridique pérenne. Les laboratoires français continuent à contribuer aux trois types de télescopes avec le soutien principal de l'Italie, de l'Allemagne, de l'Espagne, de l'IAC (site nord) et de l'ESO (site sud).

La France a rejoint le SKA Observatory (SKAO) et la ratification définitive par le Parlement est la prochaine étape. La communauté française a engagé une réflexion sur la création d'un SKA *Regional Center* (SRC) pour traiter les données françaises. Le TCFH, malgré une charge de la maintenance croissante, reste très productif. L'association de SPIROU et ESPaDOs au sein

du projet Wenaokeao ouvre de nouvelles opportunités de grands relevés communautaires, notamment pour le suivi sol des missions spatiales dédiées aux exoplanètes (PLATO, Ariel).

Le VLT est résolument engagé dans son programme VLT 2030 qui a commencé par l'intégration de l'infrastructure Gravity + du VLTI sur site en 2024. BlueMuse et Saxo + (ex-« *Sphere upgrade* ») ont avancé vers leur phase de lancement. L'interféromètre NOEMA de l'Institut de radio-astronomie millimétrique (IRAM), situé sur le plateau de Bure dans les Alpes françaises, a atteint sa pleine sensibilité en 2022 avec la mise en service de sa 12^e antenne.

Depuis 2019, la France a aussi participé activement à plusieurs missions spatiales majeures, illustrant la dynamique de la communauté spatiale française et la concertation systématique entre les différents organismes impliqués. On notera entre autres CHEOPS (décembre 2019) dédié à la caractérisation des exoplanètes ; Solar Orbiter (février 2020) conçu pour l'étude du Soleil ; Bepi Colombo (octobre 2018), une mission jointe ESA-JAXA vers Mercure ; JUICE (avril 2023) destiné à l'exploration des lunes glacées de Jupiter ; Mars 2020 - Perseverance (juillet 2020), un rover avec une participation française ; InSight (mai 2018), atterrisseur martien avec des instruments CNES ; JWST (décembre 2021) le nouveau télescope spatial multi-thématiques avec une forte contribution CNES-CEA et de laboratoires INSU à l'instrument MIRI ; Euclid (juillet 2023) consacré à l'étude de la cosmologie, des grandes structures, de l'énergie noire et de la matière noire ; SVOM (juin 2024), mission jointe CNSA-CNES étudiant les sursauts gamma. Par ailleurs, des missions telles que LISA, PLATO, Ariel et EnVision ont été acceptées et sont en cours de développement, avec une participation française significative.

Il faut noter que toutes ces réalisations se sont faites en dépit d'un contexte où les effectifs des personnels permanents en appui aux projets (IT et BIATSS) dans les unités de recherche ont continué à diminuer régulièrement, alors que les ressources contractuelles externes étaient en augmentation. De ce fait, le nombre des personnels contractuels (CDD ou CDI) a été en augmentation, impliquant une forte évolution du modèle RH des unités.

Astronomie et société

Le précédent exercice de prospective actait la prise de conscience forte du déséquilibre hommes/femmes dans la discipline ainsi que d'une culture genrée, source de violences et de souffrances au travail. Suite aux recommandations sur ce sujet, le réseau des correspondants égalité a été constitué à titre expérimental dans les laboratoires de la discipline. Le réseau travaille activement à la sensibilisation et la formation des personnels des unités aux biais de genre et violences sexistes et sexuelles. Un retour d'expérience extrêmement positif a amené l'INSU à décider de généraliser ce réseau à toutes ses unités.

Par ailleurs, en 2019 la question de la part à prendre par notre communauté dans la résolution de la crise écologique et climatique était en émergence. Dans l'intervalle de temps entre les deux prospectives ce sujet a littéralement « explosé » au sein du monde académique, avec une participation très forte de la communauté AA dans toutes les initiatives visant à évaluer et réduire l'impact de nos activités. Aujourd'hui le CNRS lui-même s'est saisi de cette question, et l'INSU est naturellement de par ses sujets d'études à l'avant-garde de cette démarche institutionnelle.

Séminaire de prospective à Autrans.



3. Inclusion, Diversité, Égalité

Les travaux du groupe et leur discussion lors des ateliers soulignent que des progrès significatifs sont possibles grâce à des mesures structurelles ambitieuses et à un engagement soutenu de tous les acteurs pour l’inclusion, la diversité et l’égalité. La communauté AA peut ainsi devenir un modèle d’égalité et d’inclusion en sciences. Pour cela, il est crucial de transformer les pratiques et mentalités, de renforcer les structures d’accompagnement et d’intégrer la diversité comme un pilier fondamental des politiques académiques. La réalisation de ces objectifs nécessitera une collaboration étroite entre les acteurs institutionnels, les personnels académiques et les partenaires éducatifs.

Appréciation de la politique d’inclusion des personnes en situation de handicap

Malgré des progrès notables depuis la mise en place de contrats doctoraux spécifiques et le recrutement par voie contractuelle de chercheuses et de chercheurs ainsi que de personnels IT, l’inclusion des personnes en situation de handicap reste insuffisante.

Recommandation :

Créer une offre de contrats postdoctoraux spécifiques à ces personnels pour permettre une continuité dans l’inclusion au sein du monde de la recherche.

Une fois recrutées, les personnes en situation de handicap rencontrent des barrières administratives qui freinent leur intégration, et les conduisent à une perte de temps considérable et dommageable.

Recommandations :

- Simplifier les procédures administratives
- Former les personnels encadrants et accompagnants aux difficultés et besoins des personnes en situation de handicap.
- Inclure des compensations explicites de l’impact du handicap dans les critères d’évaluation pour garantir une équité de traitement lors des concours, promotions, et toute autre demande compétitive.
- Apporter une réflexion sur le recrutement des directrices et directeurs de recherche, et la promotion des personnels IT, pour compenser les retards de carrière.

Appréciation de la politique de parité pour la représentation des femmes

Bien que cette politique ait permis des progrès, les femmes restent largement sous-représentées dans notre communauté (de l’ordre de 25 %). En définitive, la marge d’amélioration se heurte au vivier limité de candidates, encore très largement influencé par les stéréotypes de genre qui guident les choix d’orientation au lycée (d’autant plus depuis la réforme de 2019).

Recommandations :

- Développer et valoriser les initiatives visant à sensibiliser les jeunes filles aux sciences, à déconstruire ces stéréotypes.
- Valoriser les actions de médiation des femmes scientifiques.
- Maintenir une sensibilisation accrue de chacune et de chacun, ainsi que la formation des jurys aux biais cognitifs et stéréotypes de genre pour garantir un traitement équitable de chaque collègue.

Ces recommandations doivent être portées au-delà du domaine AA et être généralisées à l’ensemble de l’INSU et du CNRS.

Persistance des inégalités, discrimination, violences sexistes et sexuelles

La prévention des discriminations doit devenir un chantier prioritaire. L’enquête montre que seulement 42 % des personnes ayant répondu n’ont jamais subi de forme de discrimination. Par ailleurs, 80 % des femmes déclarent avoir été victimes de comportements sexistes. Les violences sexistes et sexuelles concernent également les hommes et les personnes LGBTQ +. Ces discriminations et violences ont un impact significatif sur la santé mentale et les performances au travail. De plus, la sous-représentation de minorités, incluant la communauté LGBTQ + mène à des inégalités déjà perceptibles qu’il ne faut pas accentuer.

Recommandations :

- Rendre obligatoires les formations sur ces sujets, de façon répétée au cours de la carrière dès l’intégration, et de façon adaptée à la fonction.
- Renforcer la responsabilité des institutions en mettant en place des procédures claires, des personnes référentes formées et des mécanismes de signalement accessibles et efficaces.
- Pérenniser et élargir le champ d’action du réseau de correspondantes et correspondants INSU/AA.

- Renforcer la lutte contre les discriminations par des campagnes de sensibilisation intensifiées, des séminaires et des outils de communication visuelle.

Ces recommandations doivent être portées au-delà du domaine AA et être généralisées à l’ensemble de l’INSU et du CNRS.

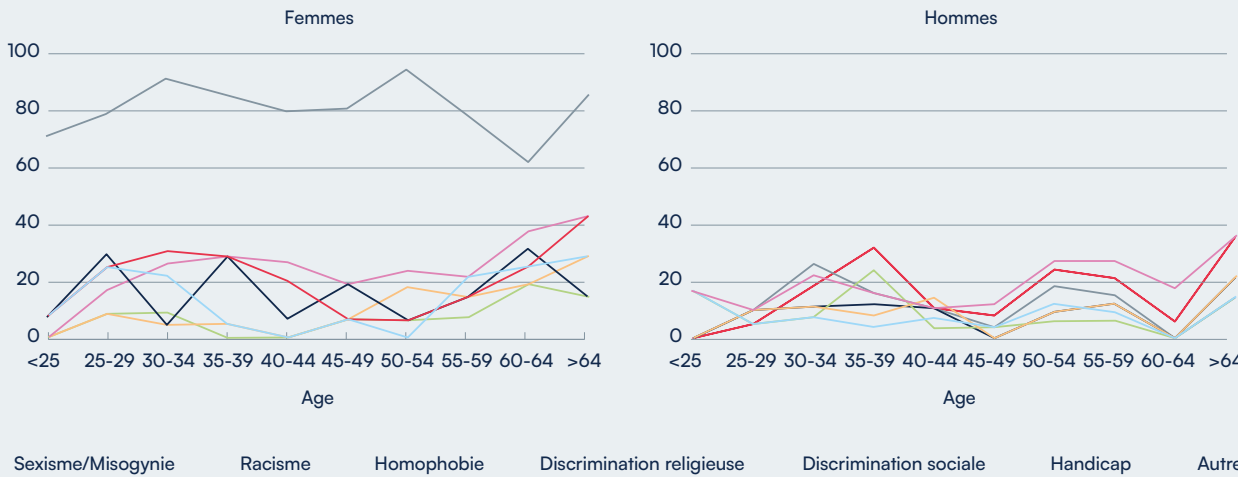
Vers une plus grande diversité de la communauté Astronomie et Astrophysique

La communauté AA comporte une faible représentation de personnes issues de milieux socio-économiques défavorisés ou issues de l’immigration, une faible représentation des minorités ethniques, ou de parcours académiques atypiques.

Recommandations :

- Mettre en place des initiatives ciblées pour augmenter la diversité telles que des bourses, des passerelles éducatives et des programmes de mentorat pour les étudiantes et étudiants issus de milieux défavorisés.
- Attribuer prioritairement des stages d’observation scientifique aux élèves des zones d’éducation prioritaires.
- Encourager et valoriser les actions de médiation de la part des personnes issues de ces minorités.

FIGURE 3.1 : Proportion de personnes ayant répondu se déclarant victimes d’une forme de discrimination dans leur environnement professionnel, en fonction de l’âge et du genre (femmes et hommes).



Soutien à la parentalité et aux aidants familiaux

La parentalité et les responsabilités d'aidants familiaux peuvent être des freins importants à l'évolution de carrière. Les interruptions de travail, les responsabilités familiales et leurs contraintes limitant les déplacements ou la prise de responsabilités professionnelles, **en particulier pour les femmes**, impactent les trajectoires académiques. Les mères signalent une marginalisation implicite lors des processus de promotion. Par ailleurs, les aidants familiaux représentent 10 % de la population ayant répondu à l'enquête, or la prise de ce type de responsabilités est appelée à s'amplifier à l'avenir.

Recommandation :

- Inclure des compensations explicites de l'impact des responsabilités parentales et d'aidant dans les critères d'évaluation.

Valorisation de la médiation scientifique

L'importance d'une médiation scientifique renforcée est mise en avant pour atteindre les publics éloignés et minoritaires, afin d'améliorer la diversité de la communauté AA.

Recommandations :

- Mettre en place des plateformes dédiées, combinées à des initiatives spécifiques pour les zones rurales et les élèves en difficulté sociale, tout comme les publics empêchés (hôpitaux, handicap par exemple).
- Faire bénéficier les médiatrices et médiateurs de formations spécifiques adaptées à ces publics.
- Valoriser de façon institutionnelle ces activités de médiation scientifique par l'intégration de ces actions dans les tableaux de service des enseignants-chercheurs et enseignantes-chercheuses, avec des crédits horaires ou des RTT attribués par exemple.
- Reconnaître officiellement l'implication des étudiants et des étudiantes dans ces initiatives pour renforcer leur impact.
- Mettre en place une coordination avec les rectorats et une diffusion accrue des initiatives existantes dans les établissements scolaires pour maximiser leur portée.

4. Transition carbone et écologique

Contexte

Le dérèglement climatique, d'origine anthropique incontestable, menace nos sociétés. Selon les rapports du GIEC, la solution consiste à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), dès aujourd'hui, de 7 % par an, trajectoire inscrite dans la loi française et européenne (Stratégie nationale bas carbone, Pacte vert pour l'Europe). De plus, le comité d'éthique du CNRS souligne que « la prise en compte des impacts environnementaux de la recherche doit être considérée comme relevant de l'éthique de la recherche » (rapport du COMETS de décembre 2022). Cette transition est donc une obligation légale, morale et éthique.

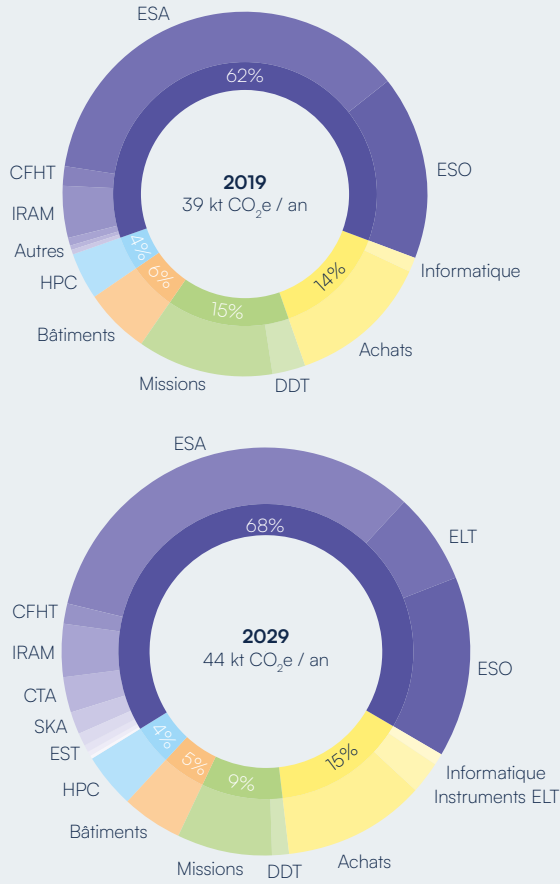
État des lieux

Les projections climatiques prévoient un réchauffement de 2° C avant 2050, entraînant des changements brutaux auxquels nos sociétés ne sont pas prêtes (Rapport GIEC AR6 WG2). Face à cette crise, la capacité à mener de la recherche de pointe sera impactée. Assurer notre résilience nécessite de participer à la transition et d'anticiper ces changements. Nos nombreux échanges avec les DU, les responsables de PN et AS, les présidentes de Sections CNRS et CNAP ainsi que le personnel de laboratoires, montrent que la communauté AA est consciente des enjeux et attend des directives claires et ambitieuses.

La quantification des émissions de GES est essentielle pour piloter la transition. Les sources d'émissions de l'astronomie incluent (1) les grandes infrastructures de recherche et missions spatiales, (2) les achats (dont l'informatique) dans les laboratoires dominés par les développements instrumentaux, (3) les déplacements professionnels, (4) les autres postes dans les laboratoires (consommation d'énergies, de fluides frigorigènes, salles blanches, plateformes de test), et (5) le calcul haute performance. Les grandes infrastructures de recherche, au sol et dans l'espace, génèrent 24 kt CO₂eq/an (dont deux tiers sont issus de l'activité spatiale et un tiers des observatoires au sol), d'après la méthode de Knödlseider et al. (2022) et en pondérant par les contributions françaises (20 % pour l'ESA, 15 % pour l'ESO, 45 % pour le TCFH). Les émissions internes des laboratoires sont estimées à 14 kt CO₂eq/an, d'après les bilans GES 2018 ou 2019 de 12 UMRs, via l'outil GES 1pt5. Le calcul intensif basé sur le niveau d'utilisation du cluster Jean-Zay représente 1,5 kt CO₂eq/an selon Ecolnfo. Au total, les émissions sont de 39 kt CO₂eq/an, du fait du poids de l'instrumentation représentant plus de 60 % de ce bilan.

Avec les nouveaux engagements pour les instruments ELT, CTA et SKA les émissions de GES de la communauté devraient augmenter de 5 kt CO₂eq/an d'ici 2029. En espérant une réduction des émissions de GES des laboratoires, le bilan se porterait à 42 kt CO₂eq/an, soit une hausse de 8 %. Cela reste bien au-dessus de l'objectif de réduction de -55 % fixé par les engagements nationaux et internationaux. Même avec une réduction très ambitieuse de 50 % de l'impact des infrastructures par écoconception et décarbonation, la réduction globale ne serait que de 30 %.

FIGURE 4.1 : Estimation des bilans de GES de la communauté AA en France en 2019 et projetés pour 2029. HPC = calcul haute performance. DDT = déplacements domicile-travail.



Mesurer les bilans GES et ACV

Il est impératif d'évaluer convenablement les impacts environnementaux de toutes nos activités par les bilans GES et les analyses de cycle de vie (ACV) des infrastructures de recherche, missions spatiales et instruments. Cette quantification ne doit pas retarder l'action, car l'urgence est sans appel.

Réduire les émissions de GES des laboratoires

Un tiers des émissions de GES des laboratoires peuvent être réduit sans impact majeur sur l'activité de recherche. Limiter les déplacements aériens, privilégier les missions longues et multi-objectifs, favoriser les réunions à distance et améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments avec des rénovations et l'utilisation de panneaux solaires (pour les activités très énergivores, comme les salles blanches) sont des leviers-clés.

Recommandations :

- Déployer les outils d'évaluation des bilans de GES des activités et d'ACV de tous les projets instrumentaux.
- Transmettre aux DU, de la part des directions respectives du CNRS et de l'INSU, des consignes claires et chiffrées.
- Inclure des contraintes environnementales dans la politique des marchés (achats).
- Nommer un ou une déléguée scientifique INSU-AA « transition écologique » qui siège à la CS AA.
- Poursuivre et organiser la formation et la sensibilisation de tous les personnels aux questions environnementales.
- Recruter des experts de la transition écologique pour accompagner les mesures et suivis.

Numérique

Bien que l'impact des usages numériques soit actuellement modeste, cela pourrait croître avec l'IA. Ces technologies améliorent l'efficacité tout en pouvant générer un effet rebond considérable. La communauté AA doit être soutenue dans l'écoconception de ses codes numériques, conformément aux recommandations du GDS EcoInfo.

Écoconception et décarbonation des IR

Réduire l'impact écologique dominant des infrastructures de recherche passe par une écoconception généralisée et ambitieuse, et la décarbonation des mix énergétiques qui alimentent les observatoires.

L'écoconception impliquera un coût financier important et un allongement des temps de développement qu'il convient d'accepter et d'intégrer à nos choix programmatiques.

Les infrastructures de recherche sont consommatrices en énergie électrique, et sont donc sensibles aux mix énergétiques des pays hébergeurs. L'amélioration rapide de ces mix est incertaine (Chili, Afrique du Sud, Australie). Il convient de développer des systèmes à basse consommation même au prix de R & D coûteuses et longues.

Faire des choix scientifiques forts et assumés

Réduire l'empreinte carbone des infrastructures de recherche est difficile tant ces infrastructures sont centrales à notre activité. L'écoconception et la décarbonation de ces infrastructures ne suffiront pas pour atteindre les objectifs. Une révision profonde de notre pratique, notamment de notre relation avec l'instrumentation et l'exploitation scientifique associée, s'avère ainsi indispensable. Il faut se donner les moyens de ralentir le rythme de développement des moyens d'observation. L'éco-conception entraînant une inflation des coûts et des temps de développement, il est aussi nécessaire d'être plus sélectif pour pouvoir financer des projets plus coûteux.

Il faut éviter toute duplication instrumentale en renforçant les collaborations entre laboratoires, pays et agences. Il convient de faire des choix plus forts fondés sur une prospective scientifique sélective et contraignante. Il convient aussi de renforcer la notion d'efficacité scientifique en s'assurant d'un retour scientifique à la hauteur des investissements financiers, humains et environnementaux.

Recommandations :

- Réaliser et soutenir une prospective scientifique plus sélective qui favorise les grands sauts scientifiques.
- Renforcer la CS AA pour suivre et arbitrer cette prospective plus sélective et contraignante.
- Éviter les doublons d'instruments et de simulations numériques.

- Renforcer l'écoconception en la finançant et en la systématisant pour tous les nouveaux instruments.
- Reconnaître et développer (formation) les compétences en éc-conception.
- Ne plus soutenir d'instruments si la communauté n'a pas les RH pour les développer ou pour les exploiter scientifiquement.

Moins de nouveaux instruments et plus d'exploitation

Notre communauté manque de RH pour développer les nombreux projets instrumentaux et pour exploiter scientifiquement les instruments qu'elle conçoit. Pour rétablir l'équilibre, le ralentissement du rythme de développement instrumental doit être compensé par une augmentation des RH d'appui à la recherche et pour l'exploitation scientifique (notamment des moyens déjà engagés dans le tableau 6.1 du chapitre 6).

Il est enfin crucial de repenser notre conception de l'excellence pour dépasser les critères trop productivistes et carbonés comme le nombre de publications et la participation à des événements scientifiques. Une recherche de qualité visant les réelles percées scientifiques doit s'appuyer sur une exploitation approfondie des données, en y dédiant suffisamment de temps et de moyens humains.

Recommandations :

- Réaffecter les budgets du développement instrumental vers des RH pour faire de la R & D et pour l'exploitation scientifique.
- Orienter un soutien de base renforcé vers l'exploitation scientifique des infrastructures de recherche soutenues par l'INSU-AA.
- Reconnaître dans le suivi de carrière ainsi que le recrutement des ITA et des chercheurs les activités d'écoconception et de R & D, et/ou visant plus généralement à réduire l'impact environnemental de nos activités.
- Dépasser les critères quantitatifs productivistes et carbonés en faveur de critères de qualité et de créativité.

Diffuser, influencer, impacter au-delà de l'INSU-AA

En renforçant ses choix stratégiques, la communauté française pourrait redouter de perdre son poids international, mais une réorientation des moyens permettrait de développer des expertises en écoconception et de mieux exploiter les infrastructures existantes, consolidant ainsi les leaderships scientifiques et techniques. Il est essentiel d'influencer les organismes internationaux pour qu'ils adoptent des plans de réduction de leur empreinte.

Les scientifiques du domaine AA ont aussi un rôle à jouer en sensibilisant le public aux enjeux environnementaux, en soulignant des messages comme : « Il n'y a pas de planète B » et « L'espace n'est pas viable pour l'être humain ». Une exemplarité accrue est nécessaire pour maintenir l'attractivité de la profession auprès des jeunes diplômés.

Recommandation :

Demander aux grands organismes internationaux d'accélérer la décarbonation de leurs activités.

Miser sur l'humain et le collectif pour s'adapter aux changements

Notre communauté doit évoluer : elle s'implique dans toujours plus d'instruments dans un contexte de ressources humaines et techniques en diminution constante et de tâches bureaucratiques de plus en plus nombreuses. Il en résulte des insuffisances pour l'exploitation scientifique. Un changement est urgent pour accroître la profondeur, l'impact de notre retour scientifique et la résilience face aux changements environnementaux. Il faut replacer l'humain au cœur de la recherche, en réduisant la compétition entre communautés, en favorisant la collaboration, et en augmentant le temps et le personnel disponibles pour la réflexion de fond, essentielle aux découvertes majeures. Une mission sociétale claire nous rendra plus aptes à affronter les défis futurs.

Conclusion

Il est urgent de réduire l'impact environnemental de nos activités en mobilisant tous les leviers pour atteindre la trajectoire de -7 % par an. Au-delà d'une réduction d'émission de GES via l'activité des laboratoires et l'écoconception, des changements structurels forts reliés aux prospectives scientifiques, au pilotage et à la réaffectation de budget sont vitaux pour allier productivité et frugalité. La communauté en est consciente et est prête à ces changements si les directives sont claires, justes et équitables.

Ces évolutions doivent être menées fermement tout en renforçant une adhésion à nos missions et vocations de scientifiques au service de la connaissance et pour le bien de la société. La transition écologique est une opportunité pour redonner du sens à nos métiers en nous recentrant sur les grandes questions scientifiques avec des moyens réels disponibles pour exploiter ces extraordinaires infrastructures de recherche que nous pourrions continuer à développer à un rythme plus raisonnable.

Le site de panneaux solaires à l'Observatoire de La Silla de l'ESO. © ESO



5. Télescopes et Territoires, Astronomie participative

La communauté AA s'est toujours appuyée sur des implantations d'infrastructures de recherche en France et dans le monde entier, avec des critères alliant les qualités du site (position, altitude, climat, atmosphère) et son accessibilité (infrastructures, géopolitique), et continue largement à le faire, que ce soit dans le cas de petits observatoires ou de grandes infrastructures. Les conditions sociales de ces implantations n'ont pas toujours été exemplaires, dans le sens où la population locale n'a pas toujours été associée au bon niveau dans les prises de décision, en particulier concernant les impacts socio-économiques, culturels ou environnementaux. Il en résulte des difficultés sur plusieurs sites, allant jusqu'au rejet de l'astronomie par une partie des populations concernées. Il y a des risques à ne pas prendre en compte ces perspectives, et il y a des opportunités à saisir pour interroger nos pratiques et les rendre plus inclusives, plus transparentes et/ou plus modernes.

L'astronomie est une science qui suscite l'émerveillement et l'adhésion d'une majorité de la population. Il est donc pertinent de l'utiliser massivement pour amener les populations à la méthode scientifique contre la production d'ignorance. Il est également important que les pratiques professionnelles de l'astronomie soient intègres et exemplaires à tous les niveaux, afin de ne pas compromettre l'engouement général. Les observatoires doivent cohabiter avec des populations parfois citadines, généralement plutôt rurales, dont les identités sociales et culturelles peuvent être très différentes de celles des employés des observatoires. Les relations peuvent néanmoins être bonnes si elles reposent sur la confiance, l'écoute mutuelle, et la construction en commun. Il est urgent d'interroger puis de réformer nos pratiques dans le monde de la recherche AA.

Acceptation des infrastructures par les territoires humains

Les relations entre les observatoires et les territoires sont le plus souvent constructives — c'est le cas en particulier avec la plupart des observatoires en France métropolitaine — et alors un partenariat se met en place avec le voisinage. Les témoignages de succès font part de retombées positives sur l'emploi local, une source de rayonnement (touristique ou éducatif), la mise en lumière de la culture locale, la pluridisciplinarité affichée des recherches exercées sur place, un grand dynamisme dans les actions de médiation, une participation à la protection locale de l'environnement, et la vitalité de la recherche locale. Quand des difficultés apparaissent, elles sont de différents types : contamination lumineuse ou restriction de radiofréquences, préférence pour l'emploi distant, considération de menaces sur l'environnement, intérêts locaux divergents, ou divergences religieuses ou culturelles.

Il conviendrait pour la communauté AA française de définir pour elle-même l'ensemble des valeurs et la façon d'évaluer leur mise en place dans le cadre de projets d'implantation d'infrastructures de recherche. Les problèmes rencontrés sont de nature très différente selon les sites ; les politiques mises en place pour chaque site devront donc être adaptées à chaque contexte, en suivant des lignes de conduite et des valeurs communes, dont le respect, la confiance, la réciprocité et l'intégrité sont la base. Afin de garantir l'acceptabilité des observatoires, il faut donc une coconstruction avec la population locale, dès les premières réflexions, comme détaillé ci-après.



FIGURE 5.1 : (Gauche) Événement grand public au Pic du Midi (image libre de droits du journal Sud-Ouest). (Droite) Manifestations anti-TMT au pied de l'observatoire du Mauna Kea (image libre de droits du *Herald Tribune*).

Recommandations :

- Contribuer à l'éducation et à la médiation scientifiques locales, inclure la culture locale dans les pratiques professionnelles ou favoriser son développement, maintenir une communication continue pour assurer une appropriation locale.
- Impliquer les populations locales dans la gouvernance et ouvrir les infrastructures à des usages mixtes pour renforcer l'adhésion.
- Favoriser la formation et l'emploi locaux, assurer le transfert technologique et le développement technologique local.
- Contribuer à la durabilité et au respect environnemental du site à un niveau exemplaire.
- Une application évidente et immédiate de ces concepts peut être mise à l'œuvre à l'observatoire du Mauna Kea, avec le soutien très fort de la communauté AA française.

Il est également proposé de :

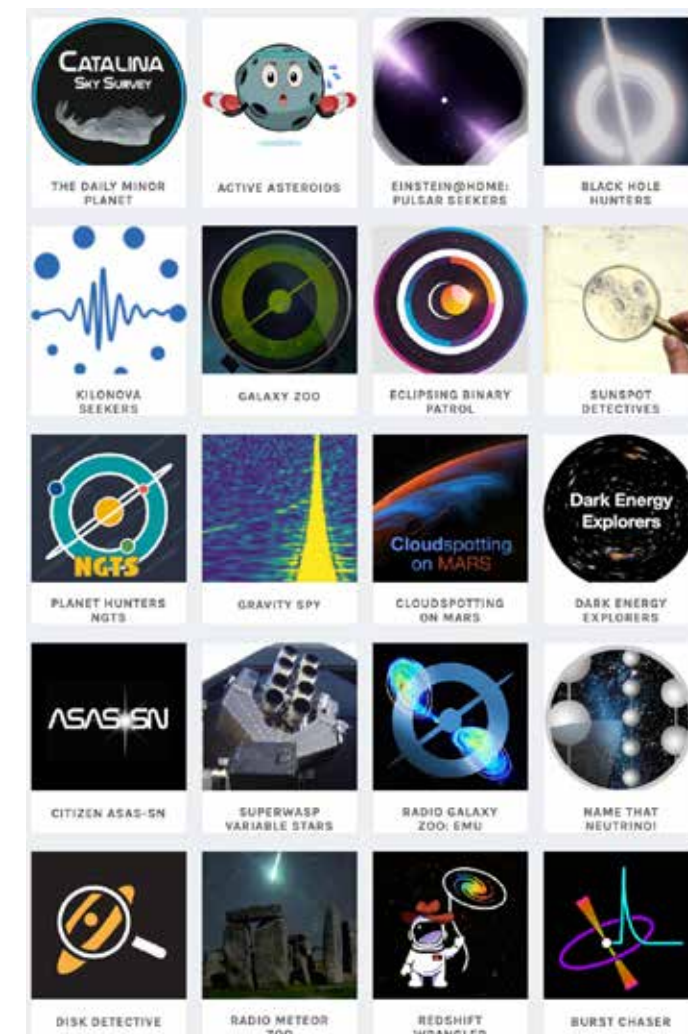
- Mettre en place des actions de sensibilisation des utilisateurs et assurer l'évaluation des impacts sociétaux dans les demandes de financement.
- Inclure des enseignements de sciences humaines dans les masters scientifiques, par exemple pour faire évoluer le vocabulaire associé et ouvrir les consciences.
- Garder sur ces questions une réflexion active et pluridisciplinaire avec des chercheurs en sciences humaines et sociales, éventuellement en lien avec la transition environnementale avec laquelle les points de convergence sont multiples.

Astronomie participative, la science par et pour les citoyens

Les sciences participatives (SP) peuvent être un trait d'union entre le grand public et le monde de la recherche, même quand il concerne un public déjà conquis ou captif. Encourager les sciences participatives, c'est à la fois augmenter la part bas carbone de nos recherches et avoir une implication directe de la société en sensibilisant le public aux méthodes de la recherche.

Les programmes d'astronomie participative sont de plusieurs types : i) des observations réalisables par un assez grand nombre d'astronomes amateurs (même débutants) qui permettent de fournir des observations utiles pour les astronomes professionnels (télescopes numériques automatisés ou recherche de météorites), ii) des programmes d'analyse participative de données en ligne accessibles à tous, et iii) des projets de collaboration entre professionnels et amateurs éclairés (matériel sophistiqué et coûteux et publics ayant des connaissances techniques solides). Les projets de taille moyenne (10-100 personnes) sont majoritaires. Les résultats des projets sont utilisés pour la recherche, l'enseignement et la médiation. Malgré l'émerveillement qu'elle suscite, l'astronomie reste une science fondamentale dont les effets sur la société ne peuvent pas être directs comme en médecine ou en écologie. Les difficultés techniques pour la plupart des projets SP en AA rendent donc notre discipline moins abordable que d'autres et demandent aussi un plus gros investissement des chercheurs qui lancent de tels projets. En 10 ans, le paysage des associations professionnels-amateurs a beaucoup évolué, avec une multiplication des projets et une meilleure communication grâce à la plateforme Gemini, des sessions SF2A annuelles et des colloques dédiés. Des premiers programmes grand public portés en France ont débuté, ce qui montre une tendance très positive avec déjà un fort succès à pérenniser.

FIGURE 5.2 : Exemples de projets sur une plateforme en astronomie participatives (site public Zooniverse, 2024)



Les besoins en moyens humains et en formation apparaissent comme des freins majeurs, avec en particulier un fort besoin d'animation pour rendre les programmes accessibles et visibles, en particulier auprès des jeunes. Ces programmes requièrent des médiateurs compétents dans le domaine de l'animation, qui peuvent suivre les projets régulièrement et faire vivre les réseaux sociaux, animer des rencontres et débats, proposer les outils appropriés pour fidéliser le public.

À moyen terme, cela peut aussi permettre d'augmenter l'attractivité des métiers de recherche en renforçant la mission élargie du personnel des laboratoires, avec des impacts et des échanges plus directs sur la société.

Des sujets connexes comme l'impact de la pollution lumineuse, l'utilisation des radiofréquences, la multiplication des satellites artificiels et le maintien du patrimoine des observatoires relient l'astronomie et la société. Chacun de ces

sujets peut être utilisé, et doit l'être, pour améliorer notre apport sociétal. Les sites historiques d'astronomie dans les villes, en particulier, sont des lieux emblématiques où il est utile de développer une offre de médiation scientifique pour relier les aspects culturels et scientifiques au service d'un public large.

Recommandations :

- Créer un service « Science et Société » valorisé pour inciter la participation des chercheurs au développement et à la pérennisation des projets de science participative ainsi que des décharges d'enseignement et recrutement de personnel dédié pour les gros projets.
- Inciter la communauté à initier des formations récurrentes auprès des amateurs ou à y participer : écoles thématiques ou webinaires de formation sur les outils d'analyse de données en astronomie.
- Soutenir auprès des universités ce type de formations pour élargir la base des chercheurs qui y participent.
- Valoriser ces initiatives en renforçant les propositions de structuration et les soutiens financiers à long terme (INSU, ANR, IAU et autres sources régionales). Les besoins recouvrent des formations, des déplacements, du matériel et des prestations.
- Développer des plateformes en sciences participatives pour augmenter la visibilité des réseaux pro-amateurs et le partage d'informations avec le grand public.
- Mettre en lumière les projets participatifs AA auprès des instances de financement, par exemple en favorisant la présence d'astronomes dans les comités de revue de ces projets.
- Appuyer le soutien des associations AA qui structurent des initiatives de science participative.
- Mobiliser des animateurs et des influenceurs sur les réseaux sociaux.
- Accompagner les prises de décision au niveau des équipements lumineux ou 4G au voisinage des sites d'observation, ou plus généralement pour préserver le ciel étoilé.

6. Thématiques et Interdisciplinarité

La recherche en astrophysique couvre un vaste intervalle d'ordres de grandeur d'échelles temporelles et spatiales (près de 40, allant de la taille de l'Univers observable jusqu'à l'échelle subatomique). Elle concerne l'étude des processus physiques et chimiques, nombreux et variés, qui sont abordés par des méthodologies complémentaires (observations sol et spatiales ainsi que l'exploration in situ, s'appuyant sur des développements instrumentaux de pointe, analyse de données, expérimentation en laboratoire, modélisation, théorie et simulation), combinées pour construire un socle commun de compréhension de l'Univers et de ses composants. La Figure 6.1 illustre la diversité de nos objets

d'étude ainsi que leurs interconnexions, menant souvent à l'étude de systèmes constitués de plusieurs objets astrophysiques en interaction.

L'astrophysique est une science fondamentale qui a un fort impact sociétal et économique (innovation technologique, emplois dans l'industrie spatiale, culture scientifique du grand public, éducation, lien avec les régions, etc.). Elle fournit des éphémérides, des standards de **météorologie**, mais aussi des **suivis de géocroiseurs** ainsi que des **prévisions de météorologie de l'Espace**, qui doivent rester des priorités pour les années à venir. En outre, les interfaces avec des domaines variés tels que la chimie, la

Aurores boréales à Strasbourg le 10/10/2024. © P.-A. Duc



Image mosaïque de l'astéroïde Bennu composée de 12 images PolyCam collectées par la sonde spatiale OSIRIS-REx à une distance de 24 km. © NASA/Goddard/University of Arizona

physique des fluides et des plasmas, les géosciences, la physique nucléaire et des particules, la physique théorique, les mathématiques et sciences des données ou encore les sciences de la Terre, voire la biologie, sont importantes pour le domaine INSU-AA qui noue des liens au sein de l'INSU, ainsi qu'avec d'autres instituts du CNRS comme l'IN2P3, l'INP, l'INS2I, l'INC ou l'INSIS. Le positionnement croisé des personnels de recherche dans plusieurs instituts, la gestion commune de projets (observationnels, numériques ou financiers) et de structures institutionnelles (PN/AT, CS AA, PEPR, GDR, etc.) assurent un dialogue permanent entre les communautés et le décroisement nécessaire à la résolution des grandes questions de la discipline.

Lors de la Prospective, trois défis thématiques majeurs, ainsi que deux défis méthodologiques, ont été identifiés et sont détaillés ci-dessous. Ils représentent **les priorités thématiques et méthodologiques** de la communauté Astrophysique pour répondre aux grandes questions de la décennie à venir. Le tableau 6.1 indique, pour chacun des défis thématiques (« Couplages », « Évolution » et « Frontières de la Physique »), les principaux moyens (observations sol et spatiales, exploration in situ), souvent transverses, mis en œuvre, programmés et dont le développement est soutenu par la communauté INSU-AA. Les deux défis méthodologiques concernent précisément les observations et le développement de l'instrumentation de pointe qui les sous-tend, ainsi que les méthodes numériques innovantes.

Défi 1 - Couplages :

Couplages des systèmes astrophysiques à toutes les échelles d'espace et de temps, cycles de la matière

Les interactions complexes entre systèmes astrophysiques impliquent une grande variété de processus physiques et chimiques, de couplages, d'échelles spatiales, d'états de la matière, et de phénomènes dynamiques et transitoires qu'il faut comprendre et modéliser. L'objectif est de comprendre les mécanismes à l'œuvre à chaque échelle, à la fois en tant que tels et en lien avec les autres échelles, de sorte que chaque objet d'étude est à la fois étudié en soi mais aussi en tant qu'élément essentiel à la compréhension des autres. Du fait de ce couplage omniprésent d'échelles spatiales et de durée, aucune classe d'objets ou de processus ne peut être complètement comprise en ignorant ses nombreuses interconnexions avec d'autres. À titre d'exemple, la compréhension du milieu interstellaire et de la poussière est indispensable à la fois à une meilleure compréhension de la formation stellaire et planétaire mais aussi de l'évolution des galaxies, ces dernières étant importantes à comprendre en tant qu'objets pour pouvoir les utiliser comme traceurs cosmologiques. Les grandes questions liées à ce défi de compréhension des couplages à toutes les échelles concernent ainsi par exemple les liens entre toile cosmique, galaxies et populations d'objets compacts (dont la co-evolution entre un trou noir supermassif, sa galaxie hôte et le milieu intergalactique), les lois et mécanismes d'échelle entre trous



Vue par le robot Perserverance (Mars 2020) de la butte de Kodiak sur Mars, vestige supposé d'un delta. Le sommet du plateau a une largeur de 130 m et s'élève à 77 m au-dessus du fond du cratère, et les ensembles de roches sédimentaires exposés ici ont une épaisseur de 10 m. © Bell III et al. (2022). Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International

noirs stellaires et trous noirs supermassifs, ou l'impact des rayons cosmiques sur le milieu interstellaire. Elles couvrent aussi l'impact des processus (magnéto-) hydrodynamiques sur l'évolution des étoiles, du milieu interstellaire et des galaxies ou encore la compréhension fine des processus d'accrétion-éjection, présents à toutes les échelles des étoiles aux galaxies, et de turbulence et accélération de particules dans les plasmas astrophysiques. En outre, la compréhension des couplages entre les éruptions et le vent solaire, puis avec les magnétosphères et ionosphères terrestres et planétaires, est centrale pour la météorologie de l'espace. L'étude des planètes géantes de notre système solaire met l'accent sur les couplages gravitationnels, magnétiques, radiatifs et de matière entre les différentes parties de ces systèmes planètes - satellites - anneaux - magnétosphères.

Défi 2 - Évolution :

Évolution des systèmes astrophysiques : des origines aux stades ultimes, jusqu'aux traces de vie

La compréhension du cycle de vie des systèmes astrophysiques — l'Univers, les galaxies dont la Voie lactée, les étoiles dont le Soleil, le système solaire, les exoplanètes — constitue un défi majeur de la discipline qui couvre la compréhension de leur formation, de leur évolution et de leur destruction. Sont incluses dans ce défi les grandes questions sur l'évolution des galaxies, la sortie des âges sombres en cosmologie, la compréhension de l'ère de ré-ionisation et la formation de la poussière. Ce défi porte également sur l'évolution des étoiles

depuis leur formation (notamment la fonction de masse initiale et son origine) jusqu'à leurs stades ultimes (décrits dans le défi « *Frontières de la Physique* »). Il couvre aussi la compréhension fine de la structure et de l'évolution des étoiles (turbulence, champ magnétique et dynamo, ondes de tous types et leurs interactions non linéaires qui sont omniprésentes dans les intérieurs stellaires) et notamment du Soleil. Ce défi concerne également la formation et l'évolution des systèmes (exo-) planétaires depuis les disques circumstellaires et protoplanétaires jusqu'à la formation des planètes, ainsi que la caractérisation des atmosphères planétaires et des interactions étoile-planètes, incluant le rôle des vents stellaires. L'exploration du système solaire et de ses petits corps permet de remonter à sa formation, ainsi que d'aborder des questions sur l'origine de la vie et la problématique de l'habitabilité. Ces questions bénéficient de l'étude des molécules organiques complexes dans les régions de formation stellaire jusqu'à l'étude physicochimique de matière astéroïdale, cométaire, ou d'autres objets glacés tels les transneptuniens. En détail, l'objectif est de comprendre ce qui relève de l'héritage interstellaire, ce qui relève de processus se produisant très tôt dans le disque protoplanétaire (c'est-à-dire avant la formation des planétésimaux) et ce qui relève de processus secondaires (altération aqueuse, métamorphisme, chocs, altérations de surface, etc.). Les planètes telluriques, avec la Terre comme étalon, sont par ailleurs des cibles privilégiées notamment pour la datation des processus tels que le volcanisme, le cycle de l'eau, ou les dynamos.

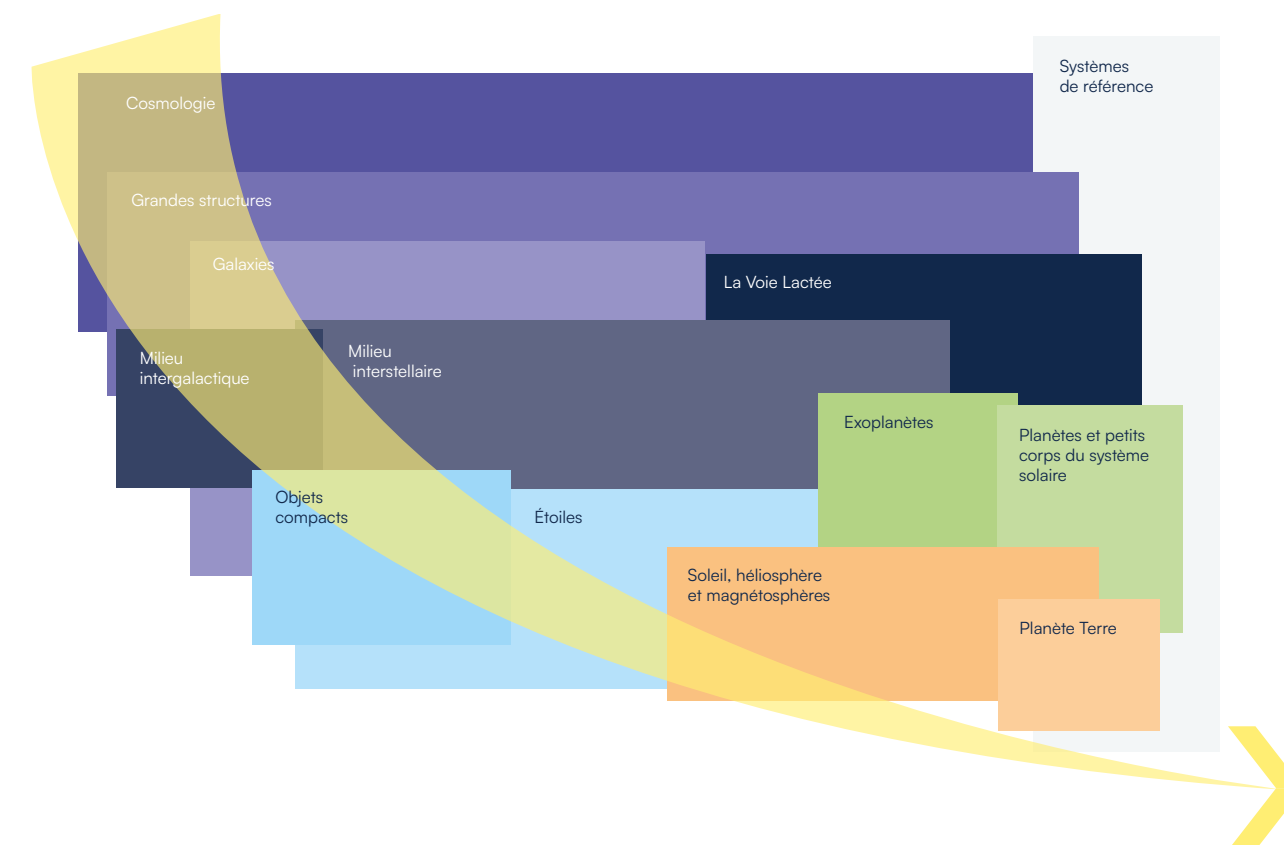
Défi 3 - Frontières de la physique :

L'Univers et ses composants comme laboratoires pour repousser les frontières de la physique

L'Univers et ses composants permettent de sonder des environnements extrêmes dont les conditions (énergie, température, pression, densité, etc.) sont difficilement ou pas du tout accessibles en laboratoire, et permettent ainsi d'explorer et tester nos modèles aux limites de la physique connue. Ceci peut concerner la physique des très hautes énergies dans et autour des objets compacts tels que les trous noirs et étoiles à neutrons (tests de la relativité générale en champ fort, équation d'état de la matière dans les étoiles à neutrons), dans les plasmas magnétisés très faiblement collisionnels (dissipation d'énergie et chauffage dans la couronne et le vent solaire, reconnexion magnétique), et en cosmologie singulièrement dans l'Univers primordial (tests des modèles d'inflation, gravité quantique, voir aussi le chapitre 7). En cosmologie, l'étude des modèles d'inflation via les modes B de polarisation du CMB nécessite la maîtrise

des effets systématiques et la compréhension fine des avant-plans galactiques (à l'interface avec la physique du milieu interstellaire, voir le défi « Couplages »). La matière noire et l'énergie noire représentent quant à elles de grandes inconnues de notre modèle cosmologique (voir aussi le chapitre 7) : comprendre leur nature est un objectif majeur des grands relevés spectro-photométriques de galaxies couplés avec les expériences CMB, et aussi de relevés stellaires en spectroscopie et astrométrie, via la dynamique galactique. En parallèle, l'astronomie des ondes gravitationnelles et plus généralement l'astronomie multi-messagers (voir défi « Instrumentation & Observations ») permet de comprendre la physique des sources transitoires, telles que les étapes finales de l'évolution stellaire (les supernovæ, les sursauts radio rapides ou les sursauts gamma) ou la coalescence de trous noirs binaires supermassifs. Ces dernières années, la chronométrie des pulsars a également permis des tests de précision du principe d'équivalence, tandis que des mesures de l'astrométrie au centre galactique et plusieurs expériences dans l'espace ont fourni (ou fourniront) d'autres tests de grande précision de la relativité générale (voir le tableau 6.1).

FIGURE 6.1 : Couplage d'échelles temporelles et spatiales entre objets d'étude en astrophysique, par le biais de divers processus physicochimiques. Les couleurs illustrent la diversité des objets, dont la taille décroît le long de la flèche.



Défi 4 - Instrumentation & Observations :

Instrumentation de pointe pour sonder l'Univers : exploiter et (ré-) ouvrir des fenêtres observationnelles, du laboratoire aux observatoires

L'Astrophysique est une science qui s'appuie par essence sur des développements instrumentaux de pointe, sur des plateformes expérimentales, des missions d'exploration in situ et des observatoires au sol ou spatiaux, couvrant toute l'étendue du spectre électromagnétique et s'étendant à d'autres messagers comme les rayons cosmiques, les neutrinos ou les ondes gravitationnelles. Ces observations et le développement des instruments qui les fournissent sont nécessaires pour lever des verrous scientifiques critiques. Cette instrumentation innovante met en œuvre une approche visant à optimiser toute la chaîne d'acquisition des signaux astrophysiques ou de nouveaux modes d'observation. Parmi les forces reconnues de la communauté Astrophysique, notons le développement de concepts innovants et R & D, notamment pour l'imagerie à haut contraste, l'interférométrie, les détecteurs IR-mm, les mesures *in situ*, les analyses d'échantillons, la détection d'ondes gravitationnelles, etc. (voir le chapitre 9). Parmi les enjeux émergents, tout ce qui relève de l'étude du ciel transitoire nécessite la mise en place de méthodes efficaces de suivi d'alerte avec une forte synergie entre divers observatoires.

La communauté Astrophysique française s'implique sur les missions spatiales de l'ESA *Cosmic Vision*, incluant des responsabilités (Plship) de missions ou d'instruments, en s'appuyant sur le CNES. Par ailleurs, elle participe activement à des collaborations internationales sur des projets spatiaux avec la NASA, la JAXA ou la CNSA. En sus, la communauté française est fortement engagée sur les instruments au sol de l'ESO et d'autres infrastructures de recherche internationales (IR*) dans lesquels l'INSU ou d'autres instituts du CNRS sont engagés. Enfin, des expériences de laboratoire innovantes jouent un rôle critique dans l'interprétation de nombreuses observations du milieu interstellaire et en planétologie, par exemple, via la mise au point de simulations expérimentales reproduisant différents environnements astrophysiques ou produisant des matériaux analogues aux observations.

Défi 5 - Numérique :

Méthodes numériques innovantes pour étudier l'Univers : données massives, du calcul haute performance à l'intelligence artificielle

L'évolution de la thématique Astrophysique est caractérisée par une augmentation constante des volumes de données observationnelles,



La fusée Ariane 5 décolle à Kourou avec le télescope James Webb à bord. © ESA

complexes et multidimensionnelles (croisant des informations spatiales, de vitesse, spectrales, de polarisation, etc.), mais aussi par le besoin croissant en modélisation numérique et simulations directes de plus en plus détaillées, multi-échelles, de complexité physique croissante. Par exemple, SKAO produira à terme 300 pétaoctets par an et les nouveaux calculateurs (comme la machine exascale européenne Alice Recoque) auront une puissance de calcul supérieure à 10^{18} flops. Notons également les lourds efforts de notre communauté pour développer les codes et plateformes HPC qui sont nécessaires pour produire des simulations numériques de pointe, avec par exemple les codes RAMSES, IDEFIX, ou encore PHARE et Dyablo en cours de développement, qui bénéficieront à de nombreuses autres disciplines du CNRS à l'ère de l'exascale. Cette évolution implique de nombreux défis à l'interface entre sciences de l'information et des données : diffusion des données via des infrastructures interopérables (Observatoires virtuels), traitement de données massives, calcul intensif, transposabilité des codes sur de nouvelles architectures, sobriété numérique (voir le chapitre 8). La gestion et l'interprétation de ces grands volumes de données impliquent le recours massif aux outils d'IA. Outre les développements en IA qui concernent l'inférence, la classification, la reconnaissance de formes ou la régression symbolique, les grands jeux de données en astrophysique sont aussi des bancs d'essai idéaux pour développer de nouveaux types de modèles de fondation multimodaux. Ce défi majeur nécessitera,

pour assurer la préservation et la valorisation des données, le renforcement des synergies, notamment au travers des Services nationaux d'observation (SNO), entre observatoires partageant des méthodes communes. Afin de préparer l'exploitation optimale des observatoires en fonctionnement et des archives de données générées, la question de l'optimisation de l'ensemble des ressources numériques pour un impact environnemental maîtrisé représente un défi à part entière (voir le chapitre 4).

Conclusion & Recommandations :

Le continuum thématique observé au sein de la communauté Astrophysique est une de ses grandes forces. Les trois défis thématiques « Couplages », « Évolution » et « Frontières de la Physique » constituent les grandes priorités de la discipline pour les cinq ans à venir et illustrent bien cette continuité, puisque l'avancée des connaissances sur un objet astrophysique nécessite le plus souvent des contraintes sur un ou plusieurs autres (Figure 6.1). Les atouts à préserver, ainsi que les besoins cruciaux pour mener à bien ces défis, incluent la forte

structuration nationale (et internationale) de la communauté (voir chapitre 12), des ressources humaines appropriées (voir le chapitre 11) et le soutien à des observatoires riches, souvent transverses (voir le tableau 6.1), qui sont impulsés par une R & D de pointe et demandent une gestion et une valorisation des données efficaces, ainsi que le développement de codes de calcul intensif haute performance (HPC).

Les principales recommandations sont donc :

- Conforter notre structuration nationale, qui est un des éléments de notre compétitivité au niveau international et de notre résilience face à une situation de ressources de plus en plus limitées.
- Soutenir nos efforts de développement instrumental et de R & D (défi « Instrumentation & Observations » et chapitre 9),
- Renforcer notre capacité de gestion des grands volumes de données, notamment avec l'IA, et de codes numériques haute performance (défi « Numérique »).

Simulation d'une galaxie riche en gaz avec le code RAMSES. © Florent Renaud

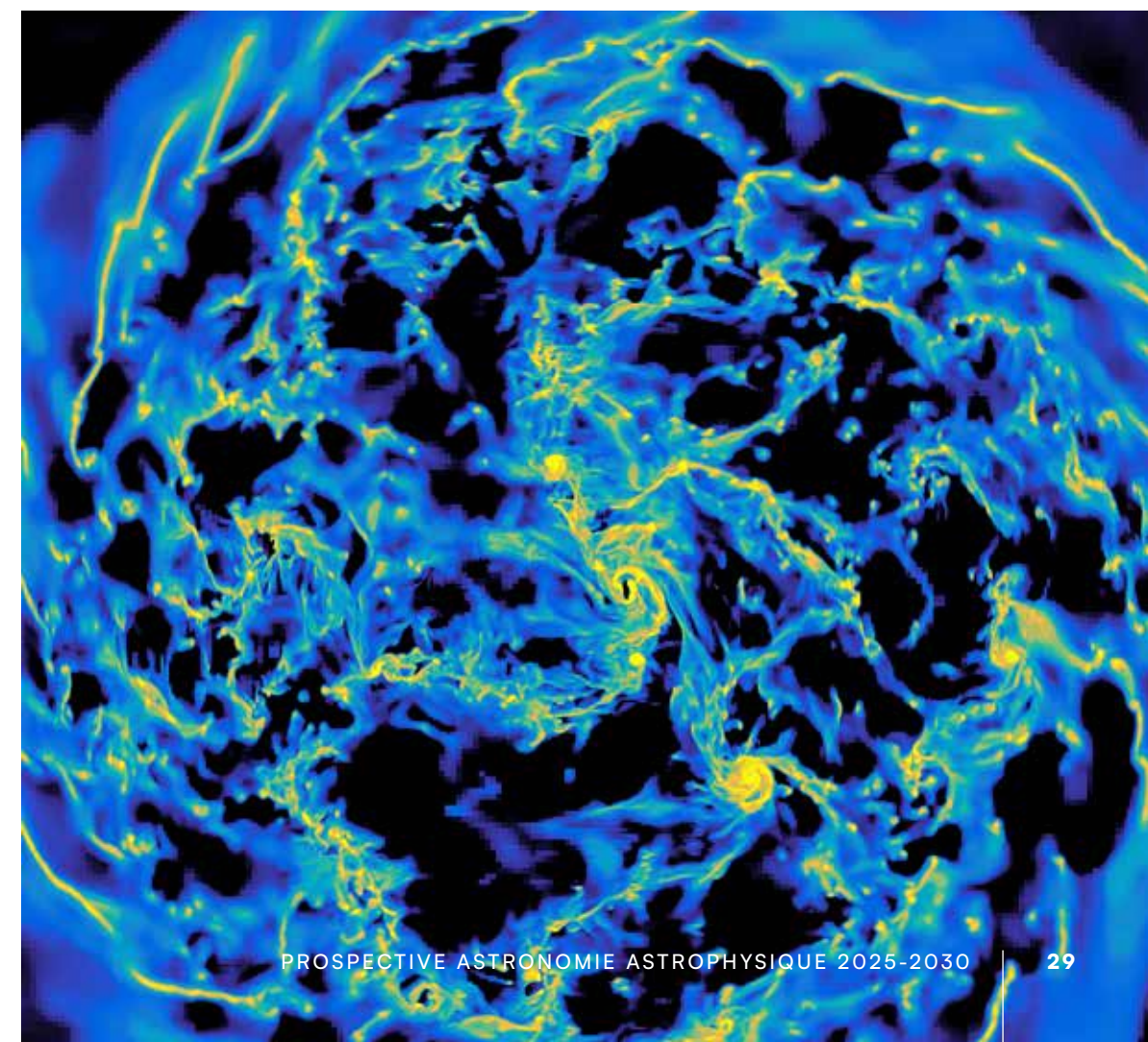


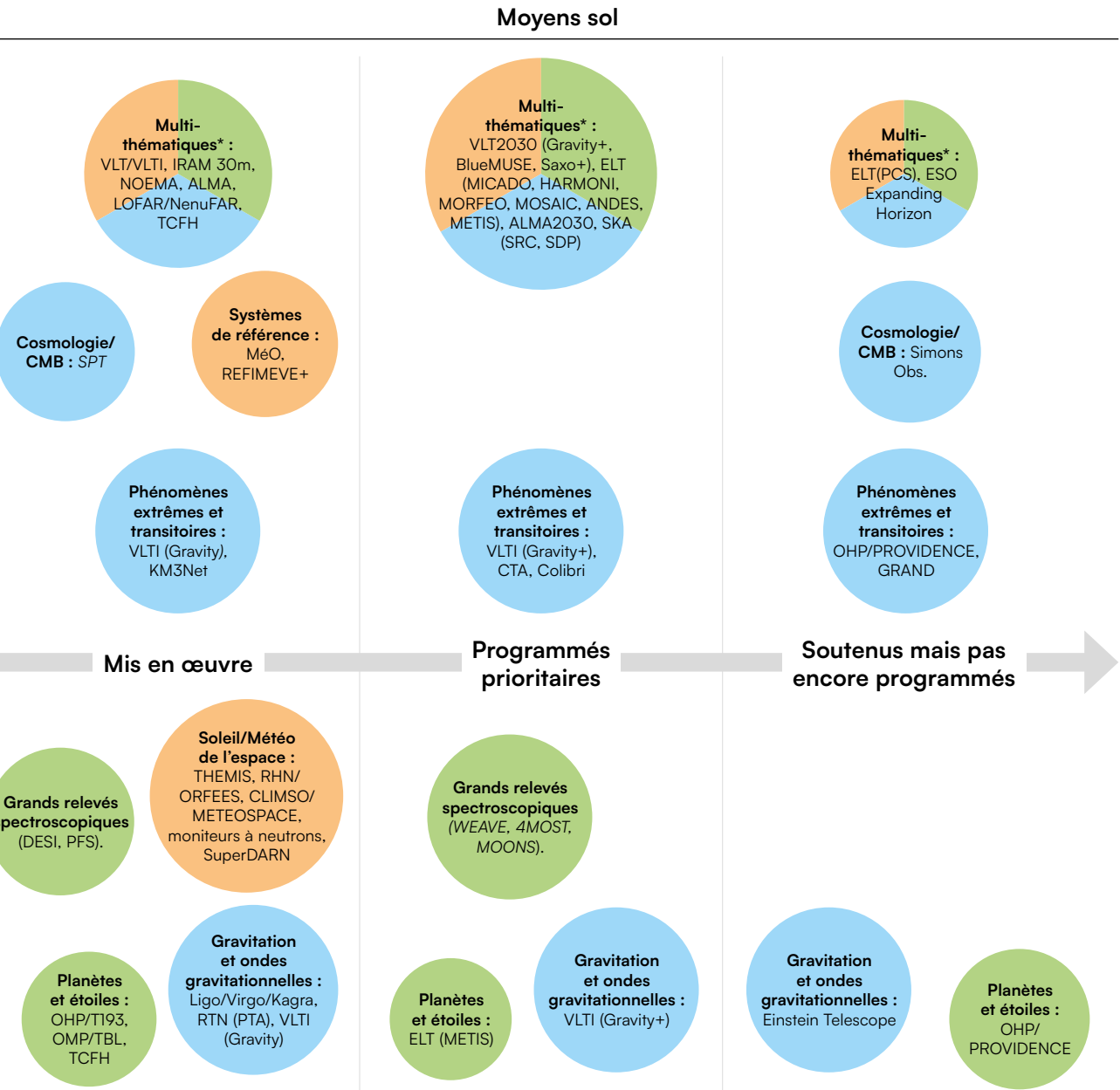
TABLEAU 6.1 : Missions/Instruments mis en œuvre ; missions/instruments programmés et prioritaires ; missions et instruments fortement soutenus mais pas (encore) programmés.

- Défi 1

Couplages. Couplages des systèmes astrophysiques à toutes les échelles d'espace et de temps, cycles de la matière
- Défi 2

Évolution. Évolution des systèmes astrophysiques : des origines aux stades ultimes, jusqu'aux traces de vie
- Défi 3

Frontières de la physique. L'Univers et ses composants comme laboratoires pour repousser les frontières de la physique



7. Astronomie et Astrophysique à l'interface INSU - IN2P3 - INP

Comme présenté dans le chapitre 6, **l'astrophysique est intrinsèquement inter-, voire transdisciplinaire**, et elle s'exerce notamment aux interfaces de nombreux instituts du CNRS. Au vu de l'évolution de la recherche dans les domaines de la **Cosmologie** et de **l'Univers violent** ainsi que du riche contexte programmatique associé, il est pertinent de considérer plus spécifiquement dans ce chapitre les recherches qui sont menées à l'intersection de l'INSU, de l'INP et de l'IN2P3. Notons qu'il existe également des interfaces sur l'astrophysique de laboratoire concernant les trois instituts en question, mais elles ne sont pas discutées ici. Ce chapitre fournit des pistes afin de **stimuler cette recherche aux interfaces, sans entraves institutionnelles**. Il souligne notamment la connectivité et la complémentarité entre les lignes de recherche suivies au sein des trois instituts.

Thématiques

Pour ce qui est de la cosmologie, deux grands axes thématiques d'intérêt commun se dégagent : **« Sonder l'Univers primordial »** et **« Élucider le secteur sombre du modèle cosmologique »**. Les enjeux portant sur ces deux axes recouvrent de nombreux thèmes d'intérêt commun à la fois pour la physique théorique, l'astrophysique et la physique des particules. Il en va de même pour un troisième axe qui touche à l'étude des processus physiques dans des conditions extrêmes à travers l'Univers : **« Comprendre l'Univers violent/extrême »**. Les enjeux, les moyens appropriés pour les étudier ainsi que la richesse des synergies entre les recherches menées au sein des trois instituts sont résumés dans le tableau 7.1.

TABLEAU 7.1 : Enjeux, moyens et synergies aux interfaces entre INSU, IN2P3 et INP. Les projets indiqués en italique sont soutenus mais pas encore programmés. Les autres sont déjà mis en œuvre ou programmés.

Sonder l'Univers primordial	Élucider le secteur du sombre du modèle cosmologique	Comprendre l'Univers violent/extrême
Enjeux - Modèles inflationnaires - Trous noirs primordiaux - Non-gaussianités - Gravité quantique, gravité modifiée... Moyens - Observations : radio/mm, modes B de polarisation du CMB (SPT, <i>Simons Obs</i>, <i>LiteBIRD</i>...), distorsions spectrales du CMB (<i>BISOU</i>), fond stochastique d'ondes gravitationnelles (RTN/PTA, <i>LISA</i>, <i>Einstein Telescope</i>) Synergies - Physique des particules théorique (IN2P3-INP) - Simulation de formation des structures (plutôt INSU) - Réseaux de pulsars-CMB sur la physique inflationnaire - Synergie instrumentale - Études QCD sur réseaux pour les transitions de phase (inflation)	Enjeux - Nature de la matière noire - Nature de l'énergie noire - Tensions du modèle de concordance Moyens - Grands relevés : spectro/photo de galaxies sol et espace (Euclid, DESI, Rubin/LSST, 4MOST...), HI (SKA), mm (NIKA2) ou X (XMM, <i>NewAthena</i>), stellaires astrométrie/spectro (Gaia, WEAVE, 4MOST) - Détection directe de matière noire (XENON, DAMIC-M, <i>MIMAC</i>) - Détection indirecte (HESS, CTA, KM3NET,...) Synergies - Simulations hydrodynamiques de formation des structures (plutôt INSU) - Modèles (INP/IN2P3) de matière noire, énergie noire et gravité modifiée - Dynamique galactique (plutôt INSU) - Physique stellaire (INSU) et tensions cosmologiques - Grands relevés (INSU/IN2P3)	Enjeux - Origine du rayonnement cosmique - Mécanismes des phénomènes transitoires énergétiques - Tests de physique fondamentale - Astroparticules... Moyens - Observations multi-longueurs d'onde, multi-messagers : Ondes gravitationnelles (LigoVirgoKagra, <i>Einstein Telescope</i>, <i>LISA</i>), Neutrinos (KM3NET, <i>GRAND</i>), Rayons X (<i>NewAthena</i>) et gamma (Fermi, SVOM, HESS, CTA), etc. Synergies - Études théoriques proches des données dans l'AT PEM, étude et compréhension des sources astrophysiques (INSU) - Approches plus formelles (équation d'état, formes d'onde) (plutôt à l'INP) - Compréhension MIS (milieu de propagation) - Simulations (plutôt INSU mais aussi dans certaines UMR IN2P3) - Physique des plasmas et complémentarité Soleil-Terre - Exploitation des données CMB pour les phénomènes transitoires, etc.

Image du champ profond du satellite Euclid. L'amas près du centre s'appelle J041110.98-481939.3. © ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, traitement d'image par J.-C. Cuillandre (CEA/CFHT), E. Bertin, G. Anselmi. LICENCE STANDARD ESA



Difficultés identifiées

Il existe une bonne entente à chacun des niveaux (scientifiques, équipes projets, laboratoires, etc.) avec une capacité démontrée à travailler ensemble sur les projets communs. Il existe cependant parfois des tensions voire des conflits, pour les raisons suivantes :

- **besoins d'affichages identitaires des laboratoires ou des instituts,**
- **manque d'organisation commune ou de coordination, en particulier au démarrage des projets,**
- **des cultures différentes (par exemple, politique de données et appels à projets)**

- **manque de coordination de certaines actions de communication.**

Plus généralement, la politique scientifique sur ces thématiques, ou les initiatives stratégiques (même au niveau européen), ne sont pas assez coordonnées entre instituts. Certains sujets de recherche, impliquant un nombre significatif de scientifiques répartis de manière inhomogène dans les trois instituts, n'ont pas l'impact international qu'une plus grande coordination leur donnerait. Trop souvent, les efforts sont dupliqués. Les ressources CNRS (RH, financières, etc.) étant allouées avec des quotas par institut, tout « croisement des ressources » à l'interface pour une mise en œuvre commune est rendue

difficile. Ceci engendre, par exemple, des difficultés à embaucher des scientifiques par une section associée à un institut X dans un labo à tutelle principale d’institut Y.

Enfin, si certains outils institutionnels sont accessibles à tous (PN de l’INSU, GDR), d’autres (SNO de l’INSU, Master-Projets de l’IN2P3) ne le sont pas, ce qui entrave la recherche.

Recommandations :

- Faire une prospective commune incluant des feuilles de route (projets, outils), pour des sujets aux interfaces : Cosmologie et Univers violent (notamment CMB, Énergie noire et Matière noire, Ondes gravitationnelles, Ciel transitoire et Multi-Messenger).
- Mettre en place une organisation commune pour l’exploitation et le retour scientifique dès le début de la discussion

d’un nouveau projet. En particulier, la politique d’accès aux données doit être clarifiée en amont. Coordonner les actions de communication sur les projets communs. Assouplir les outils institutionnels existants. À l’INSU, les SNO peuvent déjà être rendus accessibles à des équipes ou des laboratoires des autres instituts, via les OSU. À l’IN2P3, les masters Projets devraient être ouverts à des collaborateurs en dehors de l’Institut.

- Mettre en place un bureau de coordination piloté par les DAS, qui se réunira de façon régulière afin d’orchestrer les actions et stratégies des instituts à leur interface, et de communiquer les éléments aux directions et aux communautés des trois instituts.
- Établir une politique pluriannuelle d’ouverture de postes croisés au CNRS.

8. Moyens sol de l’astronomie

La communauté astronomique française bénéficie d’un accès privilégié à une variété exceptionnelle de moyens au sol qui lui permet d’aborder un spectre large de problématiques d’Astronomie-Astrophysique. Ces opportunités viennent avec des défis qu’il faut savoir relever.

Trois nouveaux grands observatoires

Avec l’*Extremely Large Telescope* (ELT), développé par l’*European Southern Observatory* (ESO), l’astronomie va faire un bond considérable en sensibilité et résolution angulaire dans le domaine optique et infrarouge. Les laboratoires français, grâce à leurs engagements dans METIS, MICADO, MORFEO, HARMONI et MOSAIC seront parmi les premiers à avoir accès à une suite d’instruments sans équivalents couvrant des problématiques depuis le système solaire jusqu’à l’univers lointain. L’instrument ANDES, en phase initiale, intéresse une communauté large mais ne peut bénéficier du même niveau d’engagement technique. Par ailleurs, le projet d’instrument imageur haut-contraste PCS devrait bénéficier de la grande expertise française si l’implication est compatible avec les plans de charge des instruments engagés et des ressources dégagées. Cet impact scientifique large justifie d’avoir placé l’ELT comme priorité majeure de la communauté.

Recommandations :

- Il faudra continuer à soutenir l’engagement sur les instruments de l’ELT en s’assurant en particulier que le financement de MOSAIC, seul instrument à responsabilité française, soit sécurisé. Par ailleurs, une attention particulière devra être portée à la gestion des ressources humaines dont l’implication dans le prochain quinquennat va être critique, et marquée par des agendas d’instruments serrés et des compétences très sollicitées. L’implication dans un instrument comme PCS dépendra du succès de cette gestion.

L’observation depuis le sol des phénomènes à haute énergie va prendre une nouvelle dimension avec l’avènement de CTA qui sera dix fois plus sensible que les observatoires existants. Le statut d’ERIC acquis (infrastructure de recherche, IR*) offre enfin un cadre juridique stable de développement.

Recommandations :

- Il faut soutenir les engagements techniques pour permettre d’atteindre les performances attendues et renforcer l’animation de la communauté en préparation à l’exploitation de l’observatoire CTAO.

L’entrée de la France dans SKA Observatory (SKAO) offre une opportunité exceptionnelle d’accès à l’univers radio basse fréquence. Les défis à relever restent considérables.

Recommandations :

- La consolidation du *Regional Center français* (SKA SRC, centre de traitement de données) tant du point de vue de l’architecture du centre, des ressources nécessaires que de l’implication de la communauté, doit être une priorité majeure.

Il faut mettre à profit cette opportunité pour élaborer une stratégie nationale de gestion de grands volumes de données depuis leur traitement jusqu’à leur stockage et mise en valeur pérenne. Il faudra pour cela savoir choisir les thématiques scientifiques prioritaires sur lesquelles faire porter nos efforts.

Recommandations :

- Le défi représenté par le SRC devra être relevé en le pensant comme précurseur d’une stratégie nationale de gestion des données de l’astronomie.

Une instrumentation de pointe pour nos infrastructures de recherche.

Nos grands télescopes continuent de jouer un rôle central en astronomie/astrophysique. Ceci a été rendu possible grâce à une politique dynamique de jouvence et de développement d’instrumentation de pointe. Cette maturité permet désormais de renforcer, dans la durée, nos grands programmes/relevés d’observations souvent en soutien aux missions spatiales.

L’IRAM a réussi la mise en service de l’interféromètre NOEMA et continue à développer une instrumentation de pointe (par exemple, polarisation) sur l’antenne de 30 m. La communauté française l’exploite activement.

Recommandations :

- Il faut soutenir l'institut dans le développement de la spectroscopie multi-faisceaux au télescope de 30m de l'IRAM et lui donner les moyens de préserver son rôle unique de centre d'expertise et de R & D (voir aussi le chapitre 9).

Par ailleurs, ALMA est l'autre grand réseau mm/submm utilisé par la communauté française. Plusieurs développements pour ALMA 2030 sont en cours et à soutenir.

Grâce au programme VLT 2030, l'Europe continue à pousser les performances de son grand observatoire *Very Large Telescope* (VLT). L'engagement français dans tous les instruments de dernière génération, notamment Gravity + Saxo + et BlueMUSE illustre le spectre large d'intérêts scientifiques et de compétences de nos laboratoires.

Recommandations :

- Les moyens du programme VLT 2030 doivent être accompagnés jusqu'à leur exploitation scientifique.

Le TCFH continue d'avoir une productivité scientifique exceptionnelle et reste compétitif à l'heure des télescopes géants. Malgré le contexte incertain (fin du bail en 2033) il reste un observatoire indispensable grâce à son instrumentation de pointe renforcée à l'avenir par le projet Wenaokeao, et du fait de son accès à l'hémisphère Nord. Il offre à notre communauté un potentiel unique de grands programmes et de grands relevés communautaires, en particulier pour les besoins de l'accompagnement sol des grandes missions spatiales européennes (Euclid, PLATO, Ariel...). Le projet MSE de transformation du TCFH en un télescope spectroscopique fortement multiplexé ne pourra s'envisager que dans un contexte clarifié, et en tenant compte des ambitions voisines du projet européen WST.

Recommandations :

- L'exploitation du TCFH doit être soutenue et son rôle dans l'accompagnement de missions spatiales et de gestion des grands relevés mis en valeur. Il faut l'aider à préparer l'horizon de la fin du bail et le soutenir dans sa politique d'inclusion des populations locales (voir aussi le chapitre 5).

Antennes SKA-Low. © SKAO/Max Alexander. Licence Creative Commons Attribution 3.0 Unported



ELT en construction. © ESO

Moyens sur le sol national : des expertises françaises à soutenir

À Nançay, le statut d'ERIC acquis par LOFAR va permettre la construction d'un instrument basse fréquence totalement rénové (LOFAR 2.0) qui intégrera NenuFAR comme super-station (ou observatoire autonome). Cela consolide le futur de cette infrastructure de recherche française.

Recommandations :

- Il faut continuer à soutenir LOFAR 2.0 au travers du soutien à NenuFAR tout en s'assurant de la mise en valeur de cette expertise française en radio-astronomie basse-fréquence dans les réseaux préparatoires à SKA. LOFAR/NenuFAR et SKA devront être développés de manière cohérente.

Le grand radiotélescope (RTN) restera une pièce maîtresse du dispositif d'études de chronométrie des pulsars jusqu'à l'avènement de SKA, ce qui justifie sa jouvence. La pertinence du radiohéliographe (RHN), et du réseau décimétrique (NDA), devra être évaluée au regard de leur apport scientifique en avance de phase du prochain exercice de prospective.

Les deux télescopes OHP/T193 et OMP/TBL ont toujours un rôle important à jouer dans le domaine de l'étude des exoplanètes, des étoiles et des transitoires. On soulignera l'importance de l'accompagnement des missions spatiales telles que PLATO, Ariel et SVOM. La fédération

des expertises en vélocimétrie radiale et spectro-polarimétrie devrait aider à renforcer le dynamisme de la communauté. Par ailleurs, les opportunités pour l'astrophysique et la recherche instrumentale du projet de télescope PROVIDENCE à l'OHP (ONERA/DGA), en particulier dans le domaine de l'observation des transitoires, doivent être consolidées.

Recommandations :

- Il faut soutenir la dynamique de coordination et de fédération des efforts d'exploitation des instruments du T193 et du TBL.

Moyens au service de la société

La France dispose d'infrastructures remarquables pour établir le temps légal français et les systèmes de référence terrestre au niveau international. Il est essentiel que REFIMEVE+ soit soutenue de manière pérenne en faisant appel en particulier à des initiatives interdisciplinaires (INSU, INSIS, INP). Par ailleurs, le parc d'équipement du Moyen National Temps-Fréquence doit faire l'objet d'une jouvence (horloges, laser-lune).

Recommandations :

- La communauté doit entamer une réflexion sur la maintenance et la pérennisation de ses moyens temps-fréquence.



Racks de calcul de la quatrième extension du supercalculateur Jean Zay. © Cyril Fresillon / IDRIS / CNRS Images

La météorologie de l'espace a pris ces dernières années une importance particulière et la France, au travers de ses instruments, télescopes, services nationaux d'observation et de la structuration OFRAME dispose d'outils qu'il est important de mettre en valeur. Le télescope solaire THEMIS, équipé de son optique adaptative et d'un spectro-imageur, offre de nouvelles opportunités qu'il faudra savoir saisir.

Opportunités aux interfaces

Le projet d'antenne SATFR porté par l'IN2P3 pour le *Simons Observatory* offre une opportunité unique à la communauté de garder un lien avec les données du fond cosmologique diffus (CMB) les plus récentes et de valoriser l'expertise en détecteurs KIDS en attendant la concrétisation de missions spatiales comme LiteBIRD.

Recommandations :

- Il faut que la communauté se rassemble autour du projet SATFR et d'une feuille de route CMB ambitieuse, financièrement réaliste et robuste, fédérant INSU et IN2P3.

L'astronomie multi-messagers est devenue une réalité et l'avènement de télescopes comme le Vera Rubin/LSST va ouvrir une fenêtre extraordinairement riche sur l'univers transitoire. L'exploration du ciel transitoire s'appuie

sur des moyens allant de l'IR* jusqu'aux petits télescopes robotiques. Les grands moyens multi-messagers de détection non photonique sont pilotés par l'IN2P3. Les chercheurs INSU y ont accès via une variété d'accords collaboratifs (voir le chapitre 7). Dans ce contexte, il est essentiel de continuer à soutenir l'animation de la communauté utilisatrice des détecteurs d'ondes gravitationnelles. Cela passe par une vigilance toute particulière sur les développements et mise à niveau de Virgo et une coordination avec l'IN2P3 de la stratégie de soutien à l'Einstein Telescope.

Recommandations :

- L'INSU doit développer une politique coordonnée et pluriannuelle de collaboration et d'exploitation des différentes infrastructures multi-messagers dans le contexte d'une collaboration renforcée avec l'IN2P3 (voir le chapitre 7).
- Il est recommandé de mettre une priorité sur la finalisation de la mise en opération du télescope Colibri afin d'assurer le suivi sol de SVOM et d'autres générateurs d'alertes. Son ouverture à une large communauté est fortement encouragée.

Il s'agira également de prioriser la coordination de la science des alertes en s'appuyant en particulier sur le programme européen ACME.

Un défi numérique : le mur du calcul et de la donnée

L'astrophysique numérique est confrontée aux défis de la gestion et curation de volumes de données croissants ainsi qu'à la montée en puissance du calcul *Exascale* et de l'intelligence artificielle. Faire face nécessite d'acquérir et de maintenir un ensemble de compétences numériques de haut niveau dans un contexte concurrentiel fort avec le privé. Par ailleurs, il est crucial de mettre en place une solution de stockage et de calcul proche des données qui soit pensée dans le cadre de la science ouverte et des principes FAIR. Les mésocentres, l'IR CDS et nos services nationaux d'observation ont un rôle essentiel à jouer en association avec les grands centres de calcul nationaux et européens. Le SKA-SRC, dont la philosophie s'approche de ce type de moyen, peut apparaître comme un éclaircisseur pour une infrastructure dédiée. Par ailleurs, certains SNO de diffusion de données perdent des expertises. Une stratégie nationale, impliquant des arbitrages scientifiques, doit être élaborée pour mettre en place un soutien pérenne en moyens humains de haut niveau en ingénierie de calcul sur les nouvelles architectures, en diffusion de données et en exploitation des masses de données. Des

opportunités comme la pérennisation des ressources humaines du PEPR NumPEX devront être exploitées. Il s'agira aussi de s'appuyer sur les Actions spécifiques « Observatoires virtuels » (ASOV) et Numérique (ASN).

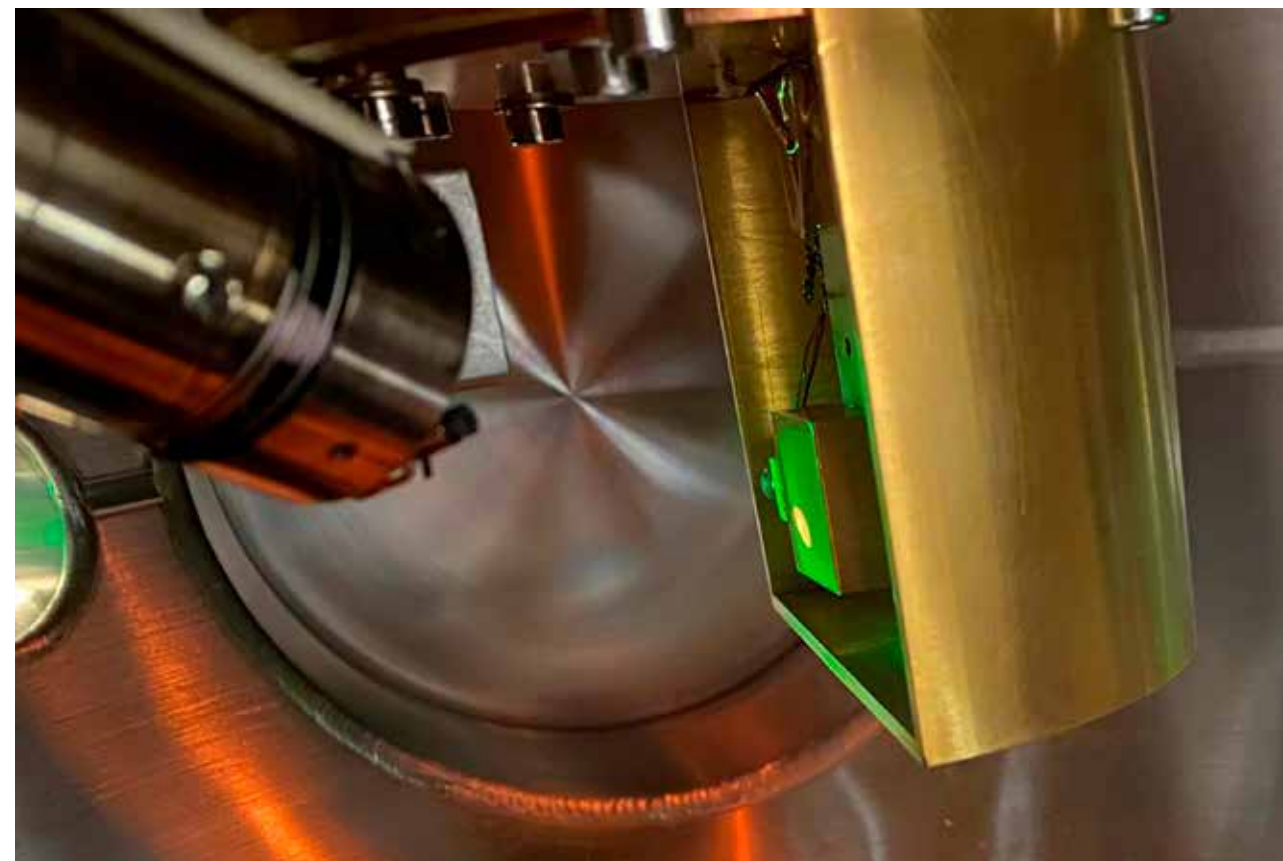
Recommandations :

- Il faut élaborer une stratégie nationale coordonnée de développement de moyens pérennes dédiés à la gestion des données AA ainsi qu'au calcul *Exascale* en accord avec les partenaires. L'IR CDS et la dynamique autour du SKA-SRC française doivent être des points forts de la communauté AA sur lesquels il faudra s'appuyer.

Astrophysique de laboratoire

L'astrophysique de laboratoire est par essence très interdisciplinaire et par conséquent fortement distribuée au sein de laboratoires de différents instituts (INSU, INP, INC, INSIS, IN2P3). Ceci peut parfois réduire sa visibilité alors que les équipes françaises sont parmi les plus à la pointe au niveau international. La communauté doit être soutenue dans son effort de coordination nationale et de définition d'une stratégie

L'expérience CoSpiNu à Sorbonne Université-MONARIS dédiée à la croissance et caractérisation d'analogues de glaces interstellaires et à l'étude de la conversion de spin nucléaire. © D. Toulouse.



de gestion pérenne des outils expérimentaux et numériques.

Recommandations :

- La création d'une structure de type GdR « Astrophysique de laboratoire » est un moyen transverse inter-instituts qui serait complémentaire aux structurations existantes.

Celui-ci aurait pour vocation de dégager des pôles stratégiques pouvant bénéficier de dotations récurrentes aux activités expérimentales des laboratoires et de mettre en évidence les besoins en postes bi-disciplinaires. Il s'agira aussi de renforcer les liens entre les scientifiques, développant les expériences, et les astrophysiciens modélisateurs utilisant les données issues des expériences. Une attention toute particulière devra être portée au soutien des missions spatiales de collecte d'échantillons également soutenues par le CNES. La pérennité du PEPR Origins mérite une attention particulière.

Moyens de plateformes expérimentales

L'infrastructure de recherche Paradise a pour vocation de structurer la mutualisation des outils et infrastructures dédiées au développement d'instrumentation spatiale astronomique. Dans un contexte de développement spatial ambitieux mais de parc vieillissant, il faut aider Paradise à maintenir un potentiel RH compétent et pérenne, contractualiser le soutien financier et développer à l'échelle de l'INSU une structure d'accompagnement au développement de modèles économiques pour ses plateformes. Les laboratoires possèdent par ailleurs d'autres « plateaux techniques » nécessitant de l'équipement de pointe et un personnel compétent qu'il serait avantageux d'intégrer dans une vision globale afin de soutenir le potentiel technique jugé le plus stratégique (banc de caractérisation 50 mK pour détecteurs spatiaux, moyens nationaux temps-fréquence). Pour ce qui concerne les ateliers mécaniques, l'INSU, voire le CNRS, devrait élaborer une stratégie nationale et régionale de mutualisation et de soutien à ces moyens.

Anticiper l'appel « Expanding Horizons » de l'ESO

Plusieurs projets ambitieux de nouvelles infrastructures se positionnent pour répondre à l'appel à idées « Expanding Horizons » de l'ESO : WST (télescope grand champ combinant la spectroscopie multiplexée massivement et la spectroscopie hyperspectrale), AtLAST (télescope sub/millimétrique), et UT5-VLTI (extension du Very Large Telescope Interferometer). Les

laboratoires français doivent anticiper activement l'appel à idées de 2026-2027. La communauté devra être vigilante au réalisme des calendriers et ressources, à l'apport scientifique, et à la cohérence avec sa stratégie de réduction d'impact environnemental.

Le défi de l'exploitation scientifique

Recommandations :

- Il ressort des enquêtes, des analyses des programmes nationaux et des entretiens lors des Ateliers l'expression unanime d'un besoin massif de soutien à l'exploitation des moyens (voir le tableau 6.1 au chapitre 6) que ne satisfont pas les canaux actuels. Une meilleure utilisation des outils INSU (OSUs, SNOs) devrait aider mais il faut pouvoir infléchir la politique des agences de moyens.

Se projeter dans le futur de manière réaliste et responsable.

L'astrophysique française va bénéficier d'une panoplie d'outils d'observation exceptionnelle (ELT, VLT2030, CTA, SKA) qu'il faut concrétiser. Cela conduit à définir les priorités « lourdes » suivantes :

Recommandations :

- Finir l'instrumentation ELT jusqu'à MOSAIC (sécuriser les moyens)
- Finir l'engagement dans VLT 2030
- Finir l'engagement dans CTA
- Concrétiser le SKA-RC et le faire évoluer vers un moyen national d'exploitation de données massives en AA.

Pour accompagner l'exploitation des moyens prioritaires :

Recommandations :

- L'INSU doit développer une stratégie ambitieuse de soutien à l'exploitation scientifique des moyens prioritaires (voir le tableau 6.1 au chapitre 6) et éviter la dispersion des ressources.

Par ailleurs :

Recommandations :

- Les laboratoires INSU-AA ont de grands atouts pour participer aux prospectives des grands observatoires. Il faut cependant s'assurer que les futurs engagements sont compatibles avec les ressources humaines, la capacité d'exploitation scientifique et un impact environnemental maîtrisé.

Ce dernier point concerne notamment l'initiative « Expanding Horizons » de l'ESO qui s'ouvrira lors de ce quinquennat ainsi que la prospective instrumentale de l'ESO (VLT, ELT).

Recommandations :

- L'INSU-AA doit développer une stratégie ambitieuse et coordonnée sur le traitement, la curation et l'archivage de nos données (SNO existant et à venir) et préparer le franchissement des murs de données qui s'annoncent.

- Les investissements réalisés font que nous sommes dans une trajectoire de hausse de l'empreinte en GES. Il faut accompagner la communauté, à l'aide de ressources humaines et d'outils dédiés, dans son effort pour évaluer son impact et définir une stratégie de développement des moyens du futur conformes aux engagements nationaux de réduction, tout en maintenant une ambition scientifique forte.

La CS AA doit renforcer son rôle de conseil scientifique pour le choix, le suivi et le retour d'expérience des projets. Pour cela :

Recommandations :

- La CS AA devrait se doter d'une organisation d'évaluation au fil de l'eau des projets incluant : ambition scientifique, niveau d'engagement de la communauté, ressources nécessaires (jusqu'à la curation de la donnée) ainsi que mesure et arbitrage sur l'impact écologique.

Un des Large-Sized Telescopes (LST) de CTAO. © M. Giard



9. R & D pour l'astronomie du futur

Lancé en 2021, le télescope spatial JWST fournit des images inédites d'exoplanètes à l'aide de coronagraphes à masques interférentiels inventés en France à l'aube des années 2000 pour des applications sol et espace. Le positionnement national sur les missions d'exploration du système solaire est rendu possible grâce à son excellence sur plusieurs filières : SuperCam/ChemCam pour l'examen des roches, la chromatographie pour l'analyse *in situ* d'échantillons extraterrestres, l'instrumentation pour l'observation des environnements planétaires, etc. Ces exemples illustrent le lien étroit entre les réussites astrophysiques actuelles et les avancées technologiques issues de recherches menées en France depuis des décennies. La participation française dans les projets dimensionnants de la discipline est intimement liée à la capacité de la communauté à contribuer avec des technologies-clés pour proposer des modes d'observation inédits. Ce chapitre présente la R & D au travers des filières indispensables, analyse sa structuration nationale et émet des recommandations pour lever les verrous et développer l'astronomie du futur.

Filières d'excellence pour saisir les opportunités

L'étude du cosmos offre un large éventail de thématiques susceptibles d'orienter la R & D dans les laboratoires. En France, les efforts portent sur de multiples sujets pour répondre aux défis astrophysiques de demain. Pour saisir les opportunités, il convient de soutenir et renforcer l'excellence dans les huit filières suivantes (quatre sur des thématiques spécifiques et quatre avec des applications astrophysiques transverses) :

1. Astronomie des phénomènes extrêmes et multi-messagers, incluant l'apport des ondes gravitationnelles via des missions dédiées à l'horizon 2040. Les développements associés incitent à favoriser la R & D visant à pérenniser les compétences en cryogénie dans les laboratoires de l'INSU, en vue de l'*Einstein Telescope*, LISA, NewAthena et LiteBIRD. Il convient de développer une stratégie conjointe (voir aussi le chapitre 7) entre l'INSU, l'IN2P3 et le CEA pour conserver ces compétences. À l'aide du CNES, des CSU français et de l'ESA, la R & D doit permettre de doter le segment spatial à haute énergie d'une instrumentation ad hoc pour la détection conjointe des ondes gravitationnelles et de leurs contreparties électromagnétiques de manière fiable.

2. Domaine Soleil-Terre, Météorologie de l'espace, avec une instrumentation dédiée à la mesure des plasmas spatiaux, la surveillance du Soleil et ses relations avec la Terre et les planètes. La R & D autour de la miniaturisation (capteurs, électronique embarquée, systèmes de déploiement) et des nouveaux algorithmes de traitement embarqués et sol maximisera le retour scientifique des observations via des constellations de satellites et assurera le positionnement national dans les études de phase A spatiales de l'ESA, par exemple *Plasma Observatory* et M-MATISSE.

3. Métrologie Temps-Fréquence, avec ses nombreuses applications : physique fondamentale, spectroscopie, relativité, géodésie, synchronisation et positionnement par satellites. Avec l'essor des horloges optiques et de l'IR REFIMEVE+, la priorité est de soutenir la R & D en génération et en dissémination de références temps-fréquence à haute performance dont la durée de développement est de l'ordre de 10 ans ou plus.

4. Planétologie et Exobiologie, avec des travaux en vue des missions d'exploration du système solaire, telles que MMX, *Dragonfly*, *Mars Sample Return* (MSR) et les missions lunaires. Il convient d'appuyer la R & D sur le développement de systèmes de préparation d'échantillons sur les prélèvements in situ, la mise en place d'environnements contrôlés incluant les outils analytiques pour les retours d'échantillons, la miniaturisation des systèmes spatiaux et l'utilisation de nouveaux matériaux.

5. Détecteurs et Chaînes de détection, avec des évolutions technologiques couvrant l'étude de l'interaction onde-particule, la fabrication de détecteurs et la compréhension fine des systèmes de détection. La R & D à visée programmatique porte sur les réseaux de détecteurs en submillimétrique et polarimétrique et caméra THz multipixel en vue de la mission PRIMA. Elle concerne également l'optimisation liée à la spécialisation et la miniaturisation. Le maintien des capacités de détection et de calibration des détecteurs au sein des laboratoires affermera la recherche sur la physique du détecteur.

6. Haute Résolution angulaire, avec des progrès en optique adaptative, haute dynamique et interférométrie motivés par l'observation des exoplanètes et des applications plus vastes en astrophysique générale, en vue des instruments au sol avec l'extension du VLTI et le projet ELT/PCS, et missions spatiales avec HWO et LIFE. La filière bénéficiera du maintien des moyens

de démonstration et d'accès au ciel dans les laboratoires INSU pour garantir la maturation des concepts et technologies, en vue des programmes dédiés sol et espace où l'ASHRA doit continuer à jouer son rôle d'animateur de prospective.

7. R & D numérique, avec l'exploitation et le développement d'outils transverses (visualisation, fouille massive, intelligence artificielle, *exascale*) pour l'astrophysique, en synergie avec les autres domaines des sciences informatiques. Les développements concernent également les moyens matériels, les algorithmes de traitement en temps réel à haut débit et ceux de contrôle pour une exploitation optimale des instruments et une relaxation des contraintes dans la conception instrumentale, en particulier pour l'ELT et SKA. Il convient notamment de former des étudiants à l'interface entre astronomie et sciences du numérique, et d'accompagner ces profils au CNRS avec des postes interdisciplinaires (par exemple, via la CID55). La mutualisation au niveau national des expertises et des moyens numériques facilitera une réponse efficace aux défis astrophysiques.

8. Technologies optiques et photoniques, avec des innovations en termes de composants, de concepts instrumentaux à faible nombre d'optiques. Des retombées sont notamment attendues pour l'observation de l'univers à faible brillance de surface et le suivi d'événements transitoires. Les spectrographes et

spectropolarimètres font également l'objet de R & D soutenues pour diverses applications astrophysiques, dans les domaines UV, visible et infrarouge, et d'un intérêt croissant dans les rayons X dans la perspective de NewAthena. Le soutien à la R & D tournée vers la miniaturisation et l'utilisation de nouveaux matériaux impulsera l'émergence de solutions innovantes d'observation.

Organisation et moyens de la R & D dans les laboratoires

La R & D est aujourd'hui structurée au sein des laboratoires par axes thématiques, structures extérieures, projets ou équipes dédiées spécifiquement à la R & D, à parts presque égales. Les principales collaborations sont de nature inter-laboratoires ponctuelles sur les grands projets permettant la mise en commun de moyens, d'instruments ou de thèses sur des projets multidisciplinaires. Sur le long terme, elles sont identifiables en Laboratoires communs avec des entreprises, ou avec d'autres agences nationales ou européennes. Les financements sont généralement de type ANR, ERC, PEPR ou FUI pour soutenir la recherche appliquée. La R & D exploratoire est souvent présente et domine parfois les activités programmatiques. La R & D revêt un caractère fondamental pour l'astrophysique car elle se trouve au cœur des prochaines grandes découvertes, comme le démontre la genèse de nombreux résultats récents. Paradoxalement, elle se trouve démunie de moyens (humains, matériels et financiers) au profit de la réalisation des projets programmatiques en cours.

Cet aspect fait encourir un risque certain pour le positionnement futur de la France dans les projets en astronomie, il représente une préoccupation communautaire et requiert une vigilance institutionnelle. Par ailleurs, la représentation des femmes en R & D reste trop modeste dans les unités et requiert une politique volontariste pour inverser cette tendance. Face aux développements effectués à l'extérieur des laboratoires, le maintien et le renforcement des capacités d'expérimentation, de caractérisation de composants et de métrologie des unités apparaissent essentiels pour préserver le savoir-faire et assurer les veilles technologiques en France.

FIGURE 9.1 : Paysage des freins à la R & D ou au démarrage d'une nouvelle R & D, d'après les enquêtes effectuées auprès des personnes porteuses de projets de R & D en 2024. Source : enquête recensement des projets de R & D 2024.



Les laboratoires soulignent un besoin de compétence en IA et fabrication additive (impression 3D) pour répondre aux besoins de la R & D.

Liens avec les principaux partenaires

Grands programmes en astronomie

Les missions (ESA Voyage 2050, LISA, NewAthena, LIFE, HWO, LiteBIRD, PRIMA), les projets au sol (SKA, VLT/VLTi, ELT, *Einstein Telescope*, GRAND, etc.), le réseau REFIMEVE+ et les horloges à réseau optique émergent parmi les grands programmes (voir le tableau 6.1 du chapitre 6) les plus susceptibles d'orienter la R & D dans les laboratoires. La communauté demeure fortement attachée à préserver la R & D amont ou de veille et dissociée d'un programme spécifique, avec par exemple les développements de briques technologiques telles que les détecteurs, les miroirs ou l'optique intégrée. Cette stratégie d'exploration assure une position française avant-gardiste sur les projets de la discipline.

Prospective technologie CNES

Le CNES accompagne le développement d'un certain nombre de technologies jusqu'à leur mise en œuvre dans des bancs expérimentaux par des supports de R & T, des thèses et des phases O/A. Le CNES assure un support prioritaire aux contributions françaises des missions ESA et NASA. Il peut être amené à prendre des maîtrises d'œuvre de petites missions ou contributions. Depuis 2023, le processus de R & T CNES a évolué vers un mécanisme accru de coconstruction entre laboratoires, industriels et experts CNES. Les propositions émanant des laboratoires font globalement l'objet d'une augmentation en qualité et maturité, et simultanément d'une baisse en nombre, révélatrice de la difficulté des équipes à dégager du temps. Les laboratoires sont invités à s'emparer davantage des Projets EXploratoires (PEX), destinés à étudier certains concepts et développer de nouvelles compétences côté CNES.

Relations avec l'industrie

Les partenariats industriels sont fondés sur du codéveloppement, cofinancement ou coencadrement de thèses et du transfert d'expertise ou de technologie. Ils concernent surtout l'accès à des plateformes technologiques ou des contrats de service vers l'entreprise. Des laboratoires mentionnent l'importance de la valorisation et cherchent à accroître les collaborations vers les industriels. Une fraction des perspectives porte sur du transfert vers des thématiques hors astrophysique, du transfert de technologie ou des aspects de commercialisation. La R & D a

FIGURE 9.2 : Paysage des savoir-faire techniques et des technologies critiques à maintenir, exprimés par les laboratoires. Source : enquête organisation de la R & D dans les laboratoires 2024.

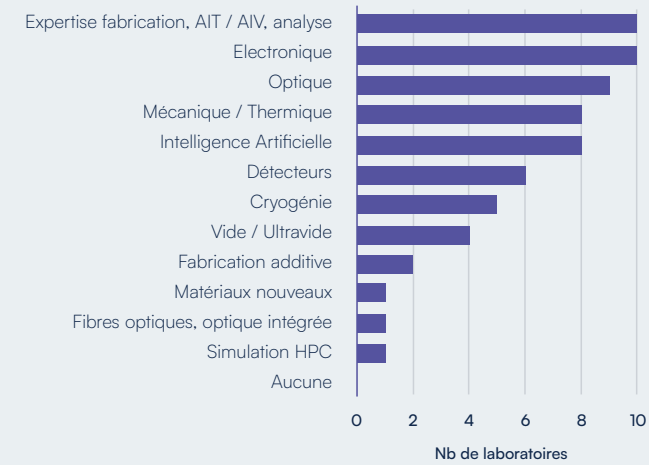
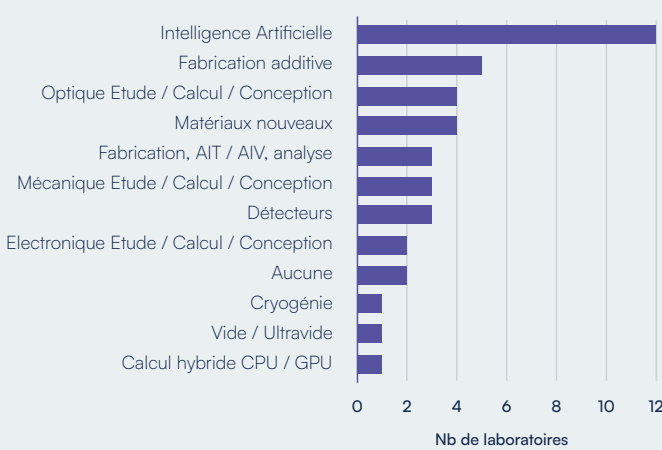
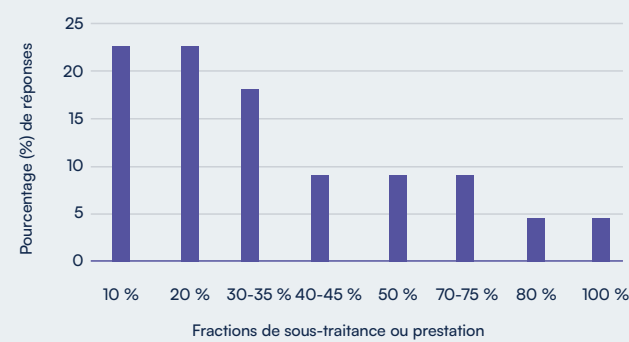


FIGURE 9.3 : Paysage des besoins exprimés en savoir-faire par les laboratoires pour développer la R & D. Source : enquête organisation de la R & D dans les laboratoires 2024.



en majorité recours à de la sous-traitance ou de la prestation externe pour toutes les étapes (conception, réalisation, validation) et sur tous les métiers, témoin de la disparition de la réalisation dans les laboratoires. Un réel risque existe de perte sèche de savoir-faire des unités au profit des industries et de disparition d'expertise en cas d'arrêt ou de manque d'intérêt économique de l'entreprise.

FIGURE 9.4 : Part des projets de R & D ayant recours à de la sous-traitance ou de la prestation externe. Source : Enquête recensement des projets de R & D 2024.



R & D et enjeux environnementaux

Les laboratoires expriment un besoin fort d'avoir des outils communs à l'échelon national et des procédures standardisées pour l'évaluation de l'empreinte environnementale de leurs activités, notamment de R & D, et d'engager les actions pertinentes de réduction. Si les motivations de R & D restent majoritairement tirées par des thématiques astrophysiques, une fraction importante des laboratoires est disposée à développer de la R & D dédiée à la décarbonation des infrastructures de recherche, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la diminution de la pollution sous toutes ses formes, et la frugalité de la consommation en ressources énergétiques et minérales. Les conséquences environnementales du besoin croissant de moyens numériques et matériels seraient significativement réduites avec l'apport de travaux de R & D dédiés à la frugalité.

Conclusion & Recommandations :

Sanctuariser la R & D et soutenir les besoins spécifiques d'interdisciplinarité dans les filières identifiées s'avèrent être des points cruciaux pour préparer le futur et répondre aux enjeux scientifiques et environnementaux. La maîtrise de modes d'observation inédits par la communauté française se fera grâce à des technologies-clés qu'il reste à inventer, développer et tester. Les recommandations suivantes visent à renforcer l'organisation et les moyens de la R & D dans les laboratoires :

- Libérer du temps pour les personnels dans les laboratoires (au moins 20 %) afin de mener de la veille, réaliser des études préliminaires (instaurer une reconnaissance des travaux amont et mieux valoriser les chercheurs et ingénieurs impliqués), construire des projets de R & D éventuellement transverses avec d'autres disciplines et se coordonner avec d'autres organismes de recherche (par exemple : CEA, CNES, ONERA).
- Encourager la CS AA et la CSIIT à renforcer la coopération entre les thématiques de l'INSU dans le domaine de la recherche instrumentale.
- Mettre en place au CNRS des actions incitatives pour remédier à la sous-représentativité des femmes en R & D et des initiatives pour favoriser une plus grande exposition aux filières de formation aux besoins de la R & D.
- Mettre en place au CNRS des actions de formation des personnels et des laboratoires en IA et fabrication additive (impression 3D) afin de soutenir les R & D.
- Valoriser au CNRS la montée en maturité des R & D allant de la preuve de concept au démonstrateur en s'appuyant par exemple sur les outils mis en place par le CNES pour le spatial.
- Renforcer les moyens mi-lourds (expérimentation, caractérisation, métrologie) dans les laboratoires pour répondre aux besoins de la R & D.
- Soutenir et encourager la R & D en lien avec les enjeux environnementaux, former les personnels de la R & D au défi climatique et écologique, au travers d'un soutien financier et d'actions de formation pilotées par l'INSU.



Image du disque autour d'AB Aurigae obtenue avec l'instrument VLT/SPHERE. © ESO / Boccaletti+ (2020)

10. Enseignement et Astronomie

Master

Environ **250 étudiants de master 1 (M1)** et **210 étudiants de master 2 (M2)** (répartis dans 12 formations) suivent des parcours en astrophysique chaque année. Ces effectifs sont stables depuis une dizaine d'années. Ces formations de M2 restent très attractives avec en moyenne 2,4 candidatures pour chaque place, malgré la sélection déjà effectuée à l'entrée en M1 (5 à 12 candidats par place en M1). L'enseignement est assuré majoritairement par les enseignants-chercheurs (30 % de personnels CNAP et 70 % de personnels CNU). En M2, ce corps d'enseignants est complété par des chercheurs CNRS (environ 10 %) et des ingénieurs (environ 15 %). On trouve 30 % de femmes parmi le personnel enseignant, ce qui reflète leur proportion dans la communauté. L'intégration de **stages** dans les parcours de M1 est variable, avec certains parcours sans stage obligatoire et d'autres comprenant des stages de 1,5 à 5 mois. Leur durée est également variée au niveau M2, de 3 à 5 mois (moyenne de 4 mois). Le **serveur de stages de M2** hébergé par la SF2A est un outil important pour les étudiants dans la recherche de leur stage. Il permet une accessibilité homogène pour tous les étudiants à l'ensemble des offres.

Au niveau M2, **40 % des parcours sont enseignés en anglais, 40 % en français et 20 % en format bilingue**. Les étudiants sont en général favorables à un passage des enseignements en anglais, et de plus en plus d'étudiants maîtrisent suffisamment bien cette langue. Des réticences existent du côté des enseignants, certains considérant qu'il est plus difficile de transmettre des concepts complexes en langue anglaise. Le choix de la langue d'enseignement dépend des objectifs de chaque formation. Le taux d'étudiants étrangers dans les parcours francophones est assez faible (10-15 %) et atteint 50 % ou plus dans les parcours en anglais.

Le taux d'obtention du diplôme de master est très bon, de l'ordre de 90 %, plus de la **moitié des étudiants poursuivant ensuite en thèse**. En thèse, 28 % des étudiants restent dans les laboratoires locaux, 19 % ailleurs en France et 10 % à l'étranger. Parmi les autres débouchés, 9 % des diplômés font un deuxième master, 18 % rejoignent l'industrie ou l'enseignement, 4 % font autre chose (césure, voyages...) et la situation de 12 % d'entre eux n'est pas connue.

Les responsables des M1 et M2 interrogés se montrent **significativement plus optimistes** que lors de la prospective précédente (2019) sur l'ensemble des questions posées : niveau (3,4/5) et devenir (4,2/5) des étudiants, financement des masters (3,5/5) et soutien administratif (2,8/5).

FIG. 10.1 : Graphique principal : Nombre d'étudiants inscrits en thèse en AA en 2019-2023. En haut à droite : Évolution du nombre annuel moyen de thèses soutenues en AA.



Doctorat

L'augmentation du **nombre de thèses** soutenues en AA déjà observée lors de la prospective précédente se confirme, avec **137 thèses/an soutenues en 2019-2023, contre 115/an en 2013-2018 et 85/an en 2005-2009 (Fig. 10.1)**. Le poids relatif des ED parisiennes est important en France (55 % des thèses, Fig. 10.2), en particulier l'ED 127. La proportion d'étudiantes en thèse en AA reste faible : 29 % (32 % pour 2013-2018), malgré une certaine prise de conscience de ce déséquilibre depuis quelques années. Cette répartition un tiers/deux tiers est le reflet de la situation en master et en licence. Les financements de thèse supplémentaires proviennent des projets et organismes hors financements ministériels (Fig. 10.2), ces derniers étant restés stables.

La **durée moyenne des thèses en AA** est restée stable malgré la pandémie (37,8 mois contre 38 mois sur la période précédente) et sous la moyenne des autres thématiques. La durée des thèses en France, particulièrement en AA, est plus courte que dans la plupart des autres pays. La possibilité d'une **extension de la durée de tout ou partie des thèses de 3 à 4 ans** devrait donc être étudiée de manière approfondie. La proportion des docteurs en AA de nationalité française est de 64 %, contre 58 % pour toutes les thématiques. Les autres nationalités représentées sont l'Italie et l'Espagne pour l'Europe, ainsi que la Chine et l'Inde.

Le **devenir des docteurs** est assez proche de celui de la période précédente. La plupart travaillent dans la recherche académique (43 % en CDD, 17 % en CDI) ou en CDI dans le privé (27 %). La proportion des docteurs en recherche d'emploi a sensiblement baissé (8 %). Les débouchés se diversifient avec plus de docteurs qui rejoignent le secteur privé et les métiers de l'enseignement. Du fait d'un taux de réponse faible, ces chiffres sont cependant à considérer avec précaution et plutôt comme des limites supérieures.

Autres formations

Formation continue des enseignants : Les candidats au concours de professeurs des écoles sont environ 20 % à avoir une formation initiale dans le domaine scientifique. Environ 400 000 enseignants exercent dans le primaire, et 350 000 dans le second degré. Les besoins en formation continue scientifique pour les enseignants sont donc considérables. L'astronomie, par son attractivité et sa présence dans les programmes scolaires de tous les niveaux, est un vecteur naturel pour cela. Les formations sont de deux types : disciplinaires autour de l'astronomie, et transdisciplinaires sur des contenus de culture scientifique et de société. Le nombre total d'enseignants formés annuellement est d'environ 530.

Parrainages de projets pédagogiques : Les parrainages consistent à **associer un astronome à un professeur** d'école, collège ou lycée portant un projet pédagogique sur le thème de l'astronomie. Ils comportent des échanges entre le chercheur et l'enseignant, souvent une ou plusieurs visites en classe et une sortie scolaire dans un observatoire. Ces actions sont mises en place dans un grand nombre d'établissements. Environ 200 classes sont parrainées chaque année, ce qui représente près de 5 000 élèves.

Diplômes d'université (DU) : Avec environ 250 étudiants chaque année, les DU en astronomie ont une capacité remarquable à **diffuser la méthode scientifique** de manière transverse dans la société. Le profil des étudiants est diversifié : un tiers d'étudiants de licence 1 (L1) à M1 (scientifiques ou non) ou en formation d'ingénieur, avec ou sans attribution d'ECTS, un tiers de personnes en activité professionnelle, et un tiers de personnes retraitées.

Médiation scientifique, accueil de public, communication

Accueil de stagiaires de collège et de lycée

Les **élèves de troisième** doivent réaliser un **stage d'observation d'une semaine** en entreprise pendant l'année scolaire. **Au niveau national, 250 à 300 stagiaires sont accueillis annuellement** dans nos laboratoires, et le nombre de candidatures est en forte augmentation. Depuis 2024, tous les **élèves de seconde** doivent effectuer **deux semaines de stage obligatoires** au mois de juin. Les élèves candidats à un stage sont souvent ceux qui sont déjà motivés par les sciences, avec une proportion importante de garçons. Les initiatives visant à sensibiliser les jeunes filles aux sciences et à valoriser les actions de médiation des femmes scientifiques sont essentielles. Une diversification des profils des élèves accueillis (origine sociale, genre...) est souhaitable, à un **moment-charnière où les élèves choisissent leur parcours** à venir. L'augmentation des candidatures implique un investissement de plus en plus important des personnels pour la sélection des élèves et l'organisation des stages.

Actions individuelles de médiation

Les actions principales menées par les intervenants portent par ordre de fréquence sur des conférences publiques et dans les classes, des communications dans les médias, l'accueil d'élèves et des visites de laboratoire. Deux tiers des personnes indiquent qu'elles n'ont pas rencontré des freins pour mener à bien ces activités, mais un tiers indique des freins (manque de temps ou d'argent pour faire des activités). Les répondants de l'enquête ont estimé avoir touché environ 400 000 personnes annuellement. Ce large public montre l'importance de la médiation pour la diffusion de la culture scientifique.

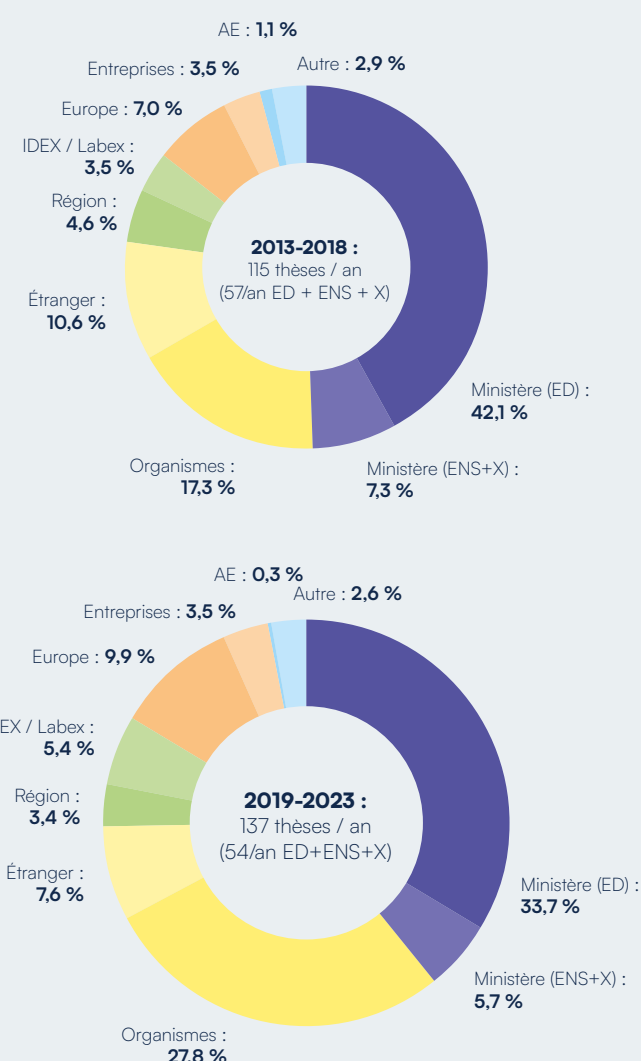
Collège de France et Académie des sciences

Les **cours ouverts à tous** du Collège de France (CdF) se déroulent à Paris et sont facilement accessibles à distance grâce aux vidéos YouTube du CdF (100 k abonnés). L'Académie des sciences ouvre ses portes au public lors de **conférences ouvertes**, et diffuse également des vidéos en ligne à destination du public.

Communication/Médiation institutionnelle

La diffusion de connaissances fait partie des missions statutaires de la plupart des observatoires. La **communication** est un levier stratégique pour développer l'image des laboratoires. Concernant la **médiation scientifique** institutionnelle, peu d'établissements indiquent avoir du personnel dédié. Les actions de médiation réalisées sont bien installées et reconnues sur le territoire (Fête de la science, Journées du patrimoine...).

FIG. 10.2 : Répartition de l'origine des financements de thèse en AA sur la période 2013-2018 (en haut) et 2019-2023 (en bas). La taille des diagrammes est proportionnelle au nombre de thèses par an sur la période considérée.



Recommandations :

Améliorer la place des femmes en AA

- Une augmentation de la représentation des femmes en astrophysique est un objectif à atteindre. Le taux d'étudiantes en master AA est d'environ 30 %. Pour tendre vers la parité, il est recommandé d'augmenter la fraction de filles dès le choix des options scientifiques en lycée. Les actions de formation des enseignants et l'accueil des stagiaires de collège-lycée peuvent être des leviers efficaces pour cela.

Développer l'attractivité des masters

- Le maintien d'une offre de master en français est recommandé pour préserver leur accessibilité aux étudiants français. Les parcours en anglais sont encouragés dans les masters AA, car ils améliorent leur attractivité internationale. Il est recommandé de développer les liens internationaux des établissements et le soutien à l'accueil des étudiants étrangers (bourses, logement, administration).
- Un approfondissement des enseignements en méthodes numériques est souhaité (IA, gestion des données, HPC), en tenant compte des enjeux sociétaux et environnementaux. Une évolution des méthodes d'enseignement et d'évaluation est à prévoir pour tenir compte de l'IA.
- Le serveur de stage de M2 hébergé par la SF2A doit bénéficier d'un soutien pour continuer à fonctionner.

Initier une réflexion sur la durée du doctorat

- La durée des thèses de doctorat est plus courte en France que dans de nombreux pays. Une réflexion devrait être menée sur l'opportunité d'étendre la durée de certaines thèses de 3 à 4 ans, par exemple pour mieux valoriser le parcours des étudiants à l'international et les thèses interdisciplinaires, avec une préférence pour le format « 1+3 ans » (type master thesis).

Favoriser la diffusion de la culture scientifique

- Un développement des actions de formation des enseignants est recommandé. Les projets pédagogiques avec des enseignants ont aujourd'hui une bonne visibilité, et le nombre d'actions menées chaque année est important. L'intégration des diplômes d'université dans le dispositif du compte personnel de formation est encouragée.
- L'accueil de stagiaires de troisième et de seconde est un levier important de promotion des carrières scientifiques, notamment auprès des filles. Financer un support administratif et simplifier le système de convention serait utile. Une centralisation des possibilités de stage de collège-lycée dans toutes les unités du CNRS, par exemple via le site officiel <https://lelevelstage.education.gouv.fr/>, et une coordination avec les rectorats permettrait de diffuser efficacement les annonces. Une homogénéisation des critères de sélection est recommandée pour assurer la diversité des stagiaires (parité, mixité sociale, inclusivité, motivation). Une partie des places en stage d'observation pourrait être prioritairement réservée aux élèves des réseaux d'éducation prioritaires. La reconnaissance institutionnelle des activités liées à l'accueil des stagiaires est essentielle. Elle pourrait se traduire par l'intégration de ces actions dans les tableaux de service ou l'attribution de RTT.
- Les actions de médiation scientifique sont nombreuses et soutenues de manière satisfaisante. Il est cependant souhaité de préciser la place de l'engagement sociétal dans les missions des chercheurs. La valorisation des actions des médiateurs (décharges d'enseignement, jours de récupération...), notamment vis-à-vis des employeurs et des dossiers de carrière, doit être encouragée. Une amélioration de la coordination entre les acteurs institutionnels locaux et les tutelles est souhaitée. Cela pourrait prendre la forme d'un axe transverse du CNRS, et la nomination de référents au niveau approprié (laboratoires, OSU...).

11. Ressources humaines, financières et Valorisation

Méthodologie

Un sondage a été réalisé auprès des 17 directions d'UMR-AA comprenant AIM, CRAL, GEPI, IAP, IAS, IMCCE, IPAG, IRAP, LAB, Lagrange, LAM, LERMA, LESIA, LPC2E, LUTH, ObAS et SYRTE. Les équipes AA dans des UMR pluridisciplinaires n'ont pas été incluses car la part des données AA ne peut pas être facilement extraite. Les informations recueillies concernent la période 2019-2023. Pour éviter de demander des données déjà connues par l'INSU et le CNRS, plusieurs outils et sources d'information ont été utilisés : DIALOG pour les ressources financières, RESEDA pour les ressources humaines, ZENTO pour confirmer certains éléments, l'enquête GPEC de l'INSU en 2023, et les RSU du CNRS. Les directions ont été interrogées sur cinq thèmes : 1) les ressources financières et autofinancements, 2) le personnel, 3) le personnel impliqué dans les grands projets, 4) les métiers, expertises et compétences, 5) la valorisation.

Constats principaux

Les ressources financières

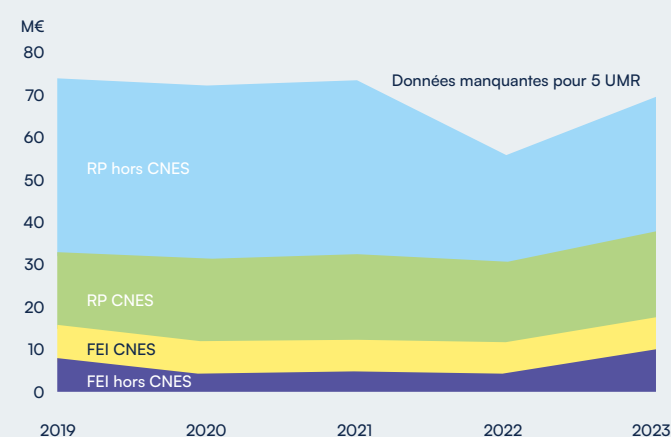
Le volume total est de 72 M€ annuel pour 16 unités⁴, moyenné sur la période 2019-2023. Les ressources sont classées en deux catégories : les crédits attribués directement aux unités (hors masse salariale) pour le fonctionnement, l'équipement, l'infrastructure (FEI) et les ressources propres (RP).

Comme illustré dans la Fig. 11.1, les FEI s'élèvent en moyenne à 15 M€ par an, soit 20 % des ressources au sein des unités. **Les crédits CNRS y sont relativement stables, s'élevant à environ 4,7 M€ par an.** Ils comprennent environ 3,05 M€ en soutien de base aux unités et en financements spécifiques (récurrents ou distribués par la CS AA), 1,5 M€ destinés aux trois infrastructures de recherche (IR) du domaine hébergées dans les unités (instrumentation ESO, CDS et *Paradise*), et seulement 0,15 M€ au travers des AAP (30 % INSU-AA, 70 % DGDS-MITI) mais perçus comme un outil fédérateur

fort et de qualité par les DU. Les FEI du CNRS constituent 58 % (55 % avec infrastructure) des FEI toutes tutelles confondues (CNRS, universités, observatoires, école) et 32 % en incluant d'autres attributions, principalement (90 %) du CNES.

Sur la période, les RP annuelles hors CNES ont diminué de 41 à 32 M€. 20 % environ proviennent de crédits internationaux. Le nombre d'ERC a diminué de moitié, celui des ANR a augmenté d'un facteur 1,4. Celles du CNES sont stables, 19 M€ en moyenne par an, dont 87 % ont été versées principalement dans cinq unités (LESIA 32 %, IRAP 22 %, LPC2E 16 %, IAS 12 %, LAM 6 %). Par ailleurs, une politique de prélèvements supplémentaires, sur les contrats éligibles, à ceux imposés par les tutelles est appliquée dans deux tiers des unités, et contribue favorablement à leur fonctionnement avec une hétérogénéité des usages selon la politique interne des unités.

FIGURE 11.1 : Ressources financières annuelles en M€ pour 16 UMR-AA : FEI hors CNES, FEI CNES, RP CNES, RP hors CNES avec un manque d'information de RP hors CNES CRAL 2022-2023, IMCCE 2021, LESIA 2022, LUTH 2022-2023 et ObAS 2023.



Source : Dialog en y ôtant les RP CNES déclarées pour quelques unités et en ajoutant les RP CNES communiquées directement par les DU. Noter que les RP sont les ouvertures de crédits de l'année et donc pas nécessairement dépensées dans l'année.

FIGURE 11.2 : Effectifs des CH et PAR titulaires (hors émérités, hors CDI) toutes tutelles confondues pour les 17 UMR-AA.
Source : INSU Dialog.

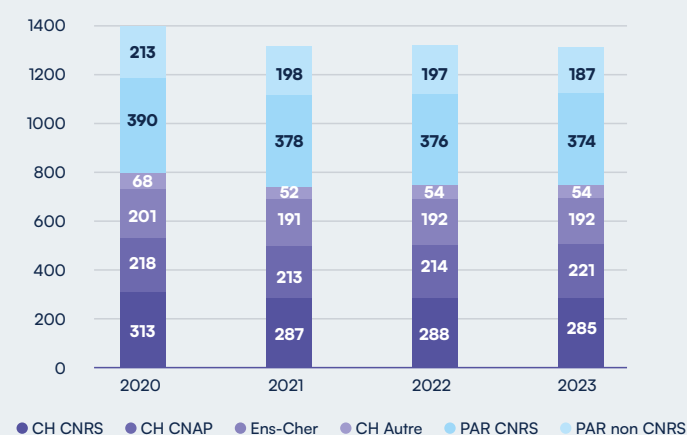
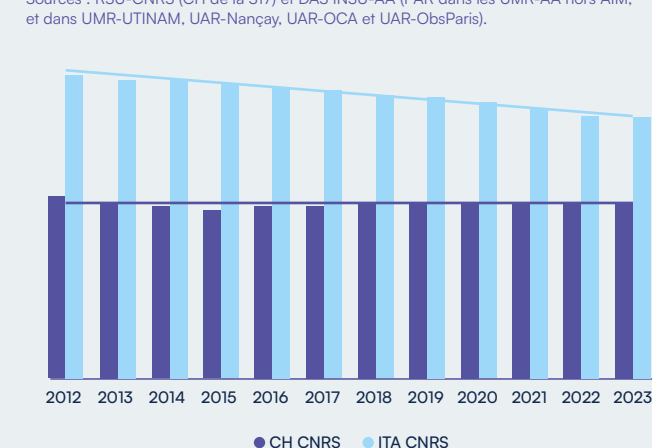


FIGURE 11.3 : Nombre de titulaires au CNRS (hors détachement, hors éméritat) du périmètre AA pour 2012-2023.
Sources : RSU-CNRS (CH de la S17) et DAS INSU-AA (PAR dans les UMR-AA hors AIM, et dans UMR-UTINAM, UAR-Nancay, UAR-OCA et UAR-ObsParis).



Le personnel

Au sein des 17 unités, on observe une baisse de 90 titulaires (hors émérités et CDI) tous employeurs confondus depuis 2020 (cf. Fig. 11.2). Cependant ces trois dernières années il y a une stabilisation des effectifs (1318) avec une légère augmentation du personnel chercheur (CH : +9) et une diminution du personnel d'appui à la recherche (PAR : -15). En 2023, les titulaires du CNRS représentent la moitié de l'effectif total des titulaires (CH : 38 %, PAR : 67 %). Le rapport PAR/CH reste faible, à 0,76 tous employeurs confondus (1,3 pour l'employeur CNRS).

Cette tendance est renforcée sur le périmètre national AA du CNRS (20 UMR et UAR) comme montré sur la Fig. 11.3. **Sur la période 2012-2023 l'effectif des PAR a diminué dramatiquement (-66).** En 2022, le rapport PAR/CH CNRS titulaire est de 1,48 en AA (pour référence : 1,53 à l'INSU, 2,35 à l'IN2P3, 0,85 à l'INP). Les effectifs des permanents du domaine AA constituent environ 29 % (2022) des effectifs de l'INSU, et les pertes subies par l'INSU chez les PAR sont presque intégralement supportées par le domaine AA.

4 Hors AIM par manque d'information.

La pyramide des âges des permanents (CH + PAR) présente un pic à 55-59 ans, très marqué chez les PAR (voir Fig. 11.4). **Les femmes représentent moins d'un quart des effectifs globaux** (CH : 22 %, PAR : 30 %). Depuis 2017, et pas avant, la proportion de femmes recrutées CRCN se maintient à parité à la Section 17 (source RSU).

Dans les 17 unités, **le personnel non permanent représente 40 % des effectifs totaux, leur nombre a augmenté de 18 % (25 % avec les CDI) entre 2020 et 2023**. 51 % ont le statut de doctorant, 23 % de postdoctorant ou CH contractuel et 22 % d'ingénieur technicien en CDD/CLD. Cette augmentation entraîne une charge de travail accrue pour les permanents PAR et CH. Les DU soulignent le dynamisme et la motivation des jeunes non permanents.

Le personnel dans les grands projets

Parmi les 17 unités, 14 se sont déclarées dans des projets instrumentaux qui se développent dans le cadre des agences et observatoires internationaux (CNES/ESA-NASA, ESO, TCFH...) et 14 dans des projets numériques et/ou de données massives, bases de données.

Sur l'ensemble des travaux sur projets instrumentaux, 39 % sont en pré-phase ou phase d'étude et 61 % en phase de production. Quatre unités gèrent plus de 50 % de l'ensemble de ces travaux (IRAP, IAS, LAM, LESIA). **Ces chiffres varient peu annuellement, ils démontrent une très bonne dynamique, et représentent l'ADN en AA avec un leadership français bien établi au niveau international**. Un quart de ces contributions instrumentales ont bénéficié d'un financement de R & D.

Cependant, **les UMR expriment une insatisfaction quant au nombre limité de CH permanents et non permanents impliqués dans le traitement et l'exploitation des données de ces projets instrumentaux**, et dans une moindre mesure pour accompagner les projets numériques. On note que toutes les UMR ont des démarches très actives face à la révolution de l'intelligence artificielle.

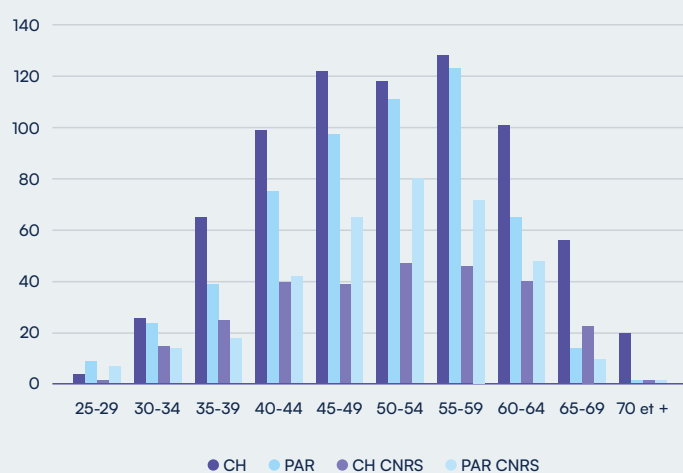
Les métiers, expertises et compétences

De fortes tensions existent en instrumentation (BAP C : mécanique, optique et électronique) et en informatique (BAP E : calcul scientifique, ingénierie logicielle), de même qu'en gestion et pilotage (BAP J).

Pour respecter les engagements sur les projets, à cinq ans il manque environ 40 postes BAP C et 10 BAP E (résultat de l'enquête GPEC dans les unités AA menée par la direction de l'INSU en 2023). La pyramide des âges des BAP C est très critique, puisque

FIGURE 11.4 : Effectifs par tranche d'âge des CH et PAR permanents toutes tutelles confondues et de l'employeur CNRS pour les 17 UMR-AA.

Source : extraction Zento, juin 2024.



57 % des BAP C ont plus de 55 ans. Au vu du taux de recrutement actuel de permanents, la situation aura des conséquences sur la prise en charge et l'exploitation des projets instrumentaux. Il faudra **prévoir d'autres schémas ou dispositifs pour faire appel à des personnels supplémentaires** (CDI mission, CDD, équipes intégrées, prestations...).

Le volume contraint de personnel conduit les UMR à opérer des choix stratégiques pour leur feuille de route avec pour conséquences essentielles : 1/ le recours à davantage de contrats à durée déterminée, 2/ des retards de projet, puis 3/ un engagement *a minima* sur des projets. À noter que seul un quart des unités choisissent de ne s'engager que sur des projets inscrits dans la feuille de route de l'INSU-AA.

Quelles que soient les compétences en BAP C et E, les UMR souhaitent à 70 % qu'elles restent en leur sein. La mutualisation (ou optimisation des ressources humaines dans le cadre de schémas stratégiques dans leur composante OSU) dépend fortement de l'environnement local, et elle est évoquée pour les compétences suivantes recouvrant plusieurs BAP : transition environnementale, montage de projets (ANR, EU...), communication, médiation, patrimoine, stages scolaires, cellule d'accueil des nouveaux arrivants, réseaux et sécurité, support logistique si unités sur un site commun. En maintenant un soutien de proximité avec des PAR sur site, elle peut concerner également les BAP E avec des compétences liées notamment aux moyens locaux de calcul et de partage des données.

Les DU notent que la mutualisation apporte des prises en charge de service bienvenues

et nécessaires, tout en entraînant des difficultés en termes de hiérarchie managériale, de remplacement et de compétences.

Pour affronter les difficultés en BAP C, il s'agit de privilégier tout d'abord le recrutement de permanents, puis la formation, et enfin l'embauche de CDD/CLD. Pour les BAP E il est d'abord demandé l'embauche de CDD/CLD, puis le recrutement de permanents, enfin la formation. **Les difficultés de recrutement dans les BAP C, E et J sont élevées** et sont liées aux salaires non attractifs, aux compétences recherchées (manque d'expertise), au manque de vivier, à la différence entre les compétences attendues et le niveau de recrutement, aux CDD trop courts, la durée des projets spatiaux au-delà des 6 ans, la charge administrative élevée pour des salaires trop bas, et le manque de perspectives en termes d'évolution. Ces BAP sont ainsi en majorité concernées par le taux de rotation de non-permanents.

La moitié des UMR a recours à de l'assistance technique, en mécanique et en AP/AQ/AQI principalement. Les motifs dominants sont, d'une part, une expertise existante mais avec un manque de PAR permanent disponible pouvant prendre en charge cette tâche, d'autre part l'impulsion des agences à recourir à de l'assistance technique, notamment le CNES.

Les unités déclarent être majoritairement satisfaites de l'évolution de carrière des PAR CNRS, en revanche elles le sont assez peu pour celle des PAR non CNRS.

Valorisation

Parmi les 17 unités, sept ont déclaré avoir une personne de contact en valorisation. Il n'y a pas de corrélation avec la taille de l'UMR, ni avec la présence de BAP C ou E, ni d'appartenance à un observatoire/OSU.

Sur la période 2019-2023, 19 brevets et 15 licences d'exploitation (transfert de savoir-faire des équipes vers l'industrie) ont été déposés. Une forte corrélation existe entre la présence d'une personne de contact et le nombre d'actes de valorisation dans les UMR. **La majorité (82 %) estime être bien informée des moyens de valorisation existants**, les 18 % restants n'ont d'ailleurs pas de correspondant.

53 % des UMR estiment être bien épaulées pour établir les dossiers de valorisation, et cela est corrélé avec la réalisation d'actes de valorisation. Huit unités (47 %) voient un intérêt à considérer une consolidation de la valorisation au niveau national dans une équipe référente INSU plutôt que segmentée comme actuellement régionalement : les arguments de proximité s'opposant à ceux de l'expertise thématique scientifique.

Neuf unités sont concernées par les SATT et huit par les start-up ou LabCom. La création de start-up donne lieu à peu de partenariats par la suite, mais contribue pour la majorité des UMR à une amélioration de leur image ou à leur visibilité selon les DU.

Recommandations

Ressources financières

- Assurer la saisie complète des données financières des UMR dans DIALOG, incluant les ressources propres, afin de produire des bilans consolidés des diverses sources de financement, et d'obtenir une visibilité du succès de l'autofinancement de notre domaine AA.
- Préserver le rôle fédérateur et structurant des AAP de la communauté AA dans le contexte de la nouvelle organisation autour d'axes thématiques.

- Encourager les UMR à mettre en place des politiques de prélèvement sur les contrats éligibles.

Ressources humaines

- Poursuivre l'effort récent en AA en faveur d'une meilleure égalité des chances pour les femmes.
- Doter les UMR de personnel BAP J de haut niveau pour minimiser les impacts de la complexité administrative et mieux accompagner les acteurs de la recherche. Simplifier les démarches administratives devenues très chronophages, notamment pour l'accueil des non-permanents et/ou étrangers.
- Maintenir et consolider au niveau des UMR les métiers et expertises liés à l'instrumentation (BAP C) et au numérique (BAP E), ainsi que les métiers autour du traitement des données scientifiques (BAP E, BAP F), en particulier au vu de la pyramide des âges et du non-renouvellement de ces PAR.
- S'assurer dans les UMR, lors de l'engagement dans un projet, de la disponibilité de tous les personnels nécessaires incluant les CDD/CLD (BAP, expertises) sur toute la durée du projet.
- Vérifier que les ressources humaines sont suffisantes sur la durée du projet : c'est ce à quoi doit s'engager l'INSU lors de l'engagement d'une UMR sur les phases de production d'un instrument.
- Renforcer les collaborations avec d'autres instituts mieux dotés en ressources humaines sur certaines expertises (IN2P3, INRIA...).

- *Utiliser dans les UMR le dispositif de CDI mission, ou autres CDI sur ressources propres pour allonger les contrats et obtenir de meilleures rémunérations. Leur mise en place doit être facilitée par les tutelles.*
- *Mener une évaluation des priorités et des possibilités ainsi que du niveau d'engagement dans les projets (spécialement pour les appels à idées et projets des agences) au niveau national et au niveau des UMR.*

Exploitation des données des grands projets (voir le tableau 6.1 au chapitre 6)

- *Accroître les ressources allouées et le temps consacré à l'exploitation compétitive des données. Ainsi, adopter un choix sélectif des projets et soutenir fortement les collaborations dans lesquelles l'accès à l'ensemble des données massives est garanti; dans le cadre de la restructuration des SNO à*

venir, renforcer les activités de production et de distribution à la communauté de données instrumentales et de simulations; valoriser dans les carrières et recrutements les compétences nécessaires voire hybrides d'exploitation de données massives, de techniques de traitement de données complexes, de méthodologies d'automatisation et d'expertise numérique; soutenir les demandes CRCT sur des activités d'exploitation de données.

Valorisation

- *Inciter les UMR à désigner des personnes de contact en valorisation.*
- *Créer une structuration nationale pour accompagner les actions de valorisation auprès des institutions existantes (SATT, LabComs, réseaux d'expertise régionaux...), en s'appuyant sur les dispositifs existant localement.*

12. Organisation nationale, Articulation Europe et International

La recherche astrophysique est par essence internationale. La communauté française, pour être compétitive, a donc besoin d'une forte structuration. La force de l'organisation du domaine AA au sein de l'INSU se fonde donc sur sa mission d'institut national. D'un point de vue organisationnel, le domaine AA s'appuie sur les quatre piliers de l'INSU, à savoir les observatoires (OSU), les programmes nationaux (PN), les infrastructures de recherche (IR) et les travaux de prospective. L'activité de recherche est évaluée et pilotée par une commission spécialisée (CS AA) et se développe dans le cadre d'une articulation en Europe et au niveau international.

Commissions spécialisées (CS) et programmes nationaux (PN)

La commission spécialisée Astronomie-Astrophysique (CS AA) est l'une des quatre commissions spécialisées (CS) de domaine de l'INSU, qui possède aussi une CS transverse⁵. La CS AA a une mission de conseil scientifique auprès de la direction de l'Institut, elle organise les réflexions prospectives, elle évalue les demandes de labellisation et assure le suivi des outils et services communautaires, au premier rang desquels les Services nationaux d'observation (SNO). Elle répartit également les crédits de recherche qui lui sont affectés sur le budget du domaine INSU-AA pour la R & D, la jouvence, la mise à niveau et les engagements sur des équipements ou actions nouvelles qui relèvent de la mise en œuvre de la prospective, notamment dans le domaine des IR et des SNO. Les PN permettent quant à eux l'organisation et la structuration nationale de la recherche de l'INSU par grandes thématiques scientifiques. La réforme mise en place en 2024 à l'INSU a mené à la création du nouveau PN ASTRO, avec une mise en service pour l'appel d'offres 2025. Dans ce contexte, la plupart des PN préablement existants dans notre domaine (sauf le PNP, restant un PN transverse avec le domaine Terre-Solide de l'INSU), sont donc devenus des actions thématiques (AT). Le rôle de la CS AA est renforcé, en particulier en ce qui concerne l'animation (écoles, ateliers de tailles diverses, conférences) et avec deux vice-présidences de

la CS AA concernant le PN ASTRO et les SNO. Chaque AT du PN ASTRO a deux coordinateurs dont l'un fait désormais partie de la CS AA (tout comme le président du PNP). Le PN ASTRO coordonne les AT et prépare l'interface avec le Comité inter-organismes (C2I), transverse à l'ensemble de l'INSU, nouvellement créé. Les actions des AT portent sur les besoins et répondent aux attentes de la communauté en termes de collaborations d'équipes multi-laboratoires et multi-instituts ainsi que d'interdisciplinarité, pour relever les défis scientifiques du domaine INSU-AA. La CS AA, via les coordinateurs d'AT, forme le conseil scientifique du PN ASTRO.

Les AT s'appuient sur des comités d'expertise scientifique (CES) qui doivent :

- a)** Mettre en œuvre la prospective via l'évaluation et l'arbitrage des projets soumis à l'Appel annuel à projets (AAP), qui joue un rôle fondamental pour soutenir des thèmes et instruments émergents, dont certains (rôle d'incubateur, effet de levier) déboucheront sur d'autres AAP plus compétitifs, tels que l'ANR ou l'ERC, même si les montants individuels sont relativement modestes.
- b)** Apporter une expertise forte, de manière ponctuelle et au long cours, auprès de la CS AA sur de nombreux dossiers (notamment un avis sur la labellisation et le suivi des SNO).
- c)** Contribuer à l'exercice de prospective thématique et des moyens, auprès et avec le soutien de leurs communautés.
- d)** Animer et structurer la communauté, via les appels d'offres, mais également de manière directe en étant à l'initiative de certaines activités d'animation et en étant représentés dans divers comités et conseils.

Ainsi, les CES des AT ont le bon niveau d'expertise et de granularité pour identifier les besoins de la communauté, et pour discuter avec les organismes financeurs. Ils sont souvent interdisciplinaires et incluent également des membres d'autres instituts du CNRS (INP, IN2P3, INC, INSIS) ou partenaires (CEA) le cas échéant. Leur fonctionnement très dynamique

5 Les CS de l'INSU sont : CS-Astronomie-Astrophysique, CS-Océan-Atmosphère, CS-Surface et Interface Continentales, CS-Terre-Solide, CS-Instrumentation Innovante Transverse.

et collaboratif, intermédiaire entre le soutien de base des laboratoires et les appels compétitifs plus individuels, cimente sur le long terme les grands axes des prospectives et accompagne la dimension nationale et internationale du domaine INSU-AA.

Au-delà de l'objectif d'homogénéiser les différents domaines de l'INSU, la réforme mise en place en 2024 peut amener plus d'expertise scientifique au niveau de la CS AA, une meilleure répartition des budgets et une évolution des contours scientifiques entre AT en fonction des besoins exprimés.

Recommandations :

- *Suivre et évaluer l'impact de la réforme des PN, en regard des points de vigilance identifiés (contours des Comités d'experts scientifiques, relations CS AA-PN-AT, rôle du C2I, volume des projets).*
- *Mettre en place des discussions entre les directions d'instituts (INSU, IN2P3, INP, INC) pour réfléchir à une meilleure coordination et complémentarité de leurs outils respectifs (PN, AS, GdR, Master-Projets). Voir également Chapitre 7.*
- *Transformer le précédent Comité Exoplanètes Transverse (CET) en AT « Exosystèmes » pour accompagner la maturité de la thématique. Le positionnement de cette AT devra être à cheval entre PN ASTRO et PNP, et inclure les thématiques : disques protoplanétaires, exoplanètes, exocomètes, exolunes.*
- *Faire apparaître les actions spécifiques dans les organigrammes organisationnels de l'INSU-AA, pour refléter leur rôle structurant de la communauté.*
- *Examiner en CS AA l'organisation et la structuration de la recherche en instrumentation en AA et ses possibles interfaces avec d'autres partenaires (internes au CNRS ou externes). L'ASHRA, très structurante pour les recherches en instrumentation autour de la HRA, pourrait ainsi évoluer vers une AT.*
- *Le découpage thématique actuel des AT paraît pertinent. S'il devait être revu, il devrait émaner d'une discussion collégiale entre tous les acteurs.*

Observatoires des sciences de l'Univers (OSU)

L'INSU s'appuie sur 22 OSU et 3 Grands Établissements (OP, IPGP et OCA), qu'il organise depuis 2022 en réseau dans le cadre de sa prospective organisationnelle. Ils permettent

de décliner en région, avec des tutelles partenaires, la stratégie territoriale de l'INSU. Les OSU et les Grands Établissements partenaires ont pour missions principales la coordination des Services nationaux d'observation (SNO), la coordination entre les unités de recherche, la diffusion des connaissances, et dans le cas des Grands Établissements et des OSU composante de leur Université, le portage de formations diplômantes. Ils gèrent l'affectation de personnels CNAP pour des missions de service, d'enseignement et de recherche. Les trois Grands Établissements ainsi que 13 des 25 OSU labellisés par l'INSU sont concernés par le domaine INSU-AA. Les OSU reçoivent des soutiens régionaux variés, avec des projets financés allant de bourses de thèse à des infrastructures. La représentation du domaine AA varie selon les OSU, et tous partagent des missions d'accompagnement de la recherche et de diffusion des données. Les défis incluent la mutualisation des ressources et l'influence sur les politiques d'enseignement, avec des efforts en cours pour améliorer la reconnaissance de l'enseignement des personnels CNAP.

Recommandations :

- *Autour de la proximité stratégique OSU-Universités : les OSU sont des points d'entrée stratégiques, à même d'entraîner leurs Universités de tutelle à des contributions concrètes ; Inviter les directions des OSU concernés dans les Comités Inter Organismes des projets auxquels leurs UMR participent (par exemple projets spatiaux).*
- *Autour du rôle des OSU dans les SNO : Inciter les OSU à se doter des outils de pilotage nécessaires pour s'assurer que les SNO dont ils ont la responsabilité ont les moyens de répondre sur la durée à leurs missions.*
- *Nouvelles attributions des OSU : Jouer un rôle-moteur notamment dans les actions pour le développement durable. Cette nouvelle mission se prête bien à la mutualisation de personnels.*
- *En raison de leur disparité administrative et structurelle, une approche globale unique concernant leur organisation et leur articulation avec les UMR n'est pas souhaitable. L'approche pragmatique au cas par cas permet d'apprécier la politique de site en local : c'est ce que les schémas stratégiques (SS) entreprennent. Dans ce cadre, les OSU attendent un retour des premiers SS pour en mesurer l'impact et optimiser les prochains SS.*

- *Appliquer un principe de subsidiarité entre l'OSU et ses unités pour le pilotage et la conduite des activités qui le nécessitent. Par exemple, les développements instrumentaux ont souvent vocation qu'à être conduits dans les unités d'AA plutôt que d'être mutualisés au sein d'un OSU multi-thématiques.*

Services nationaux d'observation (SNO)

Les SNO de l'INSU-AA apportent un fort soutien à la recherche autour des moyens d'observation et des données, ainsi que des missions régaliennes qui leurs confèrent un rôle sociétal reconnu. Labellisés par l'INSU, ils sont organisés en six actions nationales d'observation (ANO), qui regroupent les services régaliens de métrologie de l'espace et du temps (ANO1) et de surveillance du Soleil et de l'environnement spatial de la Terre (ANO6), l'instrumentation des grands observatoires au sol et spatiaux (ANO2), l'opération de stations d'observation (ANO3), la conduite de grands relevés et des suivis à long terme (ANO4), et centres de traitement, d'archivage et de diffusion des données (ANO5). L'AA émerge également à l'action nationale transverse à plusieurs domaines de l'INSU autour des codes communautaires (ANO-CC). Environ 110 SNO sont labellisés, impliquant une large communauté de personnels CNAP (98 ETP), de chercheurs et d'enseignants-chercheurs ainsi que d'ingénieurs, permanents et non permanents, totalisant 635 ETP. Ces SNO sont un levier fondamental pour le rayonnement de la communauté INSU-AA à l'international.

Plusieurs difficultés subsistent : émiettement des efforts, fragmentation des compétences, difficultés de pilotage (y compris liées à l'outil de base de données des SNO — BdD INSU —), concurrence pour les ressources, flou dans l'articulation entre certaines ANO. Réorganiser ces SNO s'avère crucial pour améliorer leur efficacité et gagner en lisibilité, avec comme lignes directrices le service rendu à l'ensemble des utilisateurs et la préservation des dynamiques existantes. Cette restructuration pragmatique ne peut s'engager à moyens constants, avec pour seul but de gérer la pénurie. La nouvelle CS AA pourra s'appuyer sur le PN ASTRO ainsi que sur le PNP, pour conduire une réflexion transparente et continue sur les besoins scientifiques collectifs.

Recommandations :

- *Faire évoluer l'outil de gestion en ligne (BdD INSU) pour l'adapter au pilotage et au suivi par tous les acteurs ; il devra permettre la consultation individuelle pour l'ensemble des personnels impliqués ; le rôle de validation par les OSU dans l'affectation des moyens doit être conservé.*
- *Engager tous les acteurs dans la réorganisation des SNO. La mise en place devra être progressive, avec des jalons et éléments de progression adaptés à chaque ANO.*
- *Changer la granularité des SNO au sein d'une ANO, pour que ceux-ci recouvrent un périmètre plus large et pérenne, avec comme tâches de service les SNO actuels évoluant dans le temps.*
- *Pour les SNO, généraliser des responsabilités collégiales (par exemple : responsabilités tournantes) au sein des OSU impliqués et mettre en place un conseil scientifique ou comité d'utilisateurs pour faire évoluer les services selon les besoins de la communauté.*
- *Dans le cadre de cette granularité redéfinie et compte tenu des différences sol et espace, réfléchir à mieux articuler les SNO en charge de la construction des instruments et ceux visant à aider la communauté à les exploiter (ANO2/3/4) :*
 - **a.** *Regrouper par filière instrumentale et mettre en avant, quand cela est possible, les infrastructures de recherche (ou missions spatiales). Un grand nombre de projets soutenus par les SNO du domaine INSU-AA sont de nature internationale, sans structures françaises de type IR en miroir. Une lecture au travers de la seule grille des IR serait donc trop réductrice, voire dommageable.*
 - **b.** *Intégrer comme tâche de service les actions de suivi, de soutien aux opérations et d'aide utilisateurs, ainsi que les opérations de grands relevés communautaires ;*
 - **c.** *Éclaircir les activités qui sont des tâches de services et celles qui relèvent de la prise de responsabilité (notamment management scientifique), dans la perspective de mieux asseoir la dimension SNO des contributions instrumentales aux grands projets internationaux.*

- **d.** Inciter les OSU à mener des actions de suivi des SNO (singulièrement de l'ANO2), a minima de leurs ressources/ expertises IT, tout en respectant la subsidiarité quand les SNO sont gérés au niveau UMR.
- **e.** Regrouper par domaine d'étude ou affinité thématique, ou méthodologique, les SNO de diffusion de données (dont ANO5) pour maximiser leur impact, en réaffirmant l'importance du caractère de référence nationale/internationale de leur contenu. Ces regroupements en gros services prendraient progressivement la place des Pôles thématiques nationaux.

Infrastructures de recherche et projets instrumentaux

Le rayonnement de la communauté AA française est lié à la participation à des infrastructures de recherche internationales (OSI, IR*) et à des missions spatiales. Ces infrastructures sont pilotées avec le soutien de l'INSU et du MESR, et avec l'appui de structures nationales facilitant la structuration, notamment pour les questions d'instrumentation (IR-Instrumentation ESO) et de partage des données (CDS). Pour le spatial, la structuration nationale est portée par le CNES et ses feuilles de route ainsi que l'INSU (IR Paradise). Le développement des projets instrumentaux pour les missions spatiales ou pour les infrastructures de recherche s'appuie sur les ressources locales des OSU et des UMR. L'initiative EFISOFT pour les logiciels de contrôle/commande met en réseau les expertises de différents laboratoires pour mutualiser ces efforts pour les instruments de l'ELT. Par ailleurs, la Division technique de l'INSU (DT-INSU) rassemble des experts « métiers » au service de la communauté INSU pour certains projets instrumentaux et de R & D. On constate néanmoins une baisse notable des engagements de la DT dans des projets AA.

Recommandations :

- Examiner l'opportunité de développer des IR en soutien des développements français pour des OSI/IR* (sur le modèle de l'IR Instrumentation ESO), par exemple le SKA Regional Center.
- Favoriser, quand cela est pertinent, une coordination nationale dès les phases précoces de la proposition ainsi que du montage scientifique et technique des projets instrumentaux (voir le chapitre 8). L'INSU, au travers de sa CS AA, a vocation à jouer un rôle fort dans cette coordination, qui permettra de préparer

les missions de grande envergure à fort impact scientifique tout en respectant les contraintes d'impact environnemental de l'instrumentation (voir le chapitre 4).

- Au vu des succès d'EFISOFT, identifier les domaines où ce type de structure inter-laboratoire serait pertinente (par exemple : qualité), et le cas échéant, faire aboutir une réflexion pour généraliser ce type de structure.
- Mettre en place des réunions entre la DT et la CS AA afin d'engager plus efficacement la DT dans les projets INSU-AA.
- Stimuler la soumission de propositions de R & D astronomique en adéquation avec les priorités de la prospective. Cette action devrait être menée conjointement avec une analyse de l'origine du faible nombre de projets de R & D AA sélectionnés par le PNIIT. Il faudrait également mettre en place notamment, avec la DIIRO, de nouveaux mécanismes de financement de projets numériques avec un potentiel transverse au niveau de l'INSU.

Articulation Europe

Le paysage des appels d'offres européens est complexe et diversifié, marqué par une augmentation des actions pour la recherche applicative avec un fort impact sociétal, au détriment des appels blancs dédiés à la recherche fondamentale. En conséquence, le nombre d'appels auxquels la communauté AA française peut répondre est limité, à l'exception de quelques équipes travaillant sur des domaines de niche. Les appels à projets individuels (type ERC) sont mieux identifiés par les laboratoires que ceux qui relèvent des infrastructures ou des réseaux. On constate néanmoins une baisse des candidatures à l'ERC dans le panel PE9 ces dernières années dont les causes ne sont pas identifiées, au-delà d'une possible saturation de la communauté. Il est important de continuer à informer et accompagner les potentiels porteurs d'ERC pour redresser la pente.

Le rôle des cellules Europe et des Services Partenariat-Valorisation (SPV) des tutelles, le CNRS en premier lieu, est essentiel à toutes les étapes des projets, depuis l'analyse de l'appel d'offres, le montage des projets, à leur suivi et à la préparation éventuelle d'un nouveau projet. La mutualisation des efforts entre tutelles est profitable à tous les partenaires, en renforçant l'expertise des personnes en charge de l'accompagnement et en permettant une continuité des échanges tout au long de la vie d'un projet.

Le travail de prospective scientifique mené par l'INSU, et pour le spatial par le CNES, permet d'identifier les thèmes et infrastructures prioritaires (voir le tableau 6.1 au chapitre 6) pour la programmation européenne, qui sont portés par l'action conjointe du CNRS et du ministère chargé de la recherche. Pour la future programmation européenne, une augmentation du nombre d'appels d'offres blancs, le soutien à l'exploitation scientifique des grandes infrastructures sur le mode de l'ANR « ESDIR », ainsi que les aspects de modélisation théorique et numérique sont souhaités.

Les documents prospectifs ESFRI et ceux des réseaux ASTRONET et APPEC, sont bien connus des laboratoires, mais ne semblent pas avoir un rôle direct significatif dans leur stratégie. Le lien se fait indirectement via la programmation des infrastructures de recherche et de leurs instruments. Une meilleure articulation entre les différents exercices de prospective au niveau national, européen, ASTRONET (et APPEC) est souhaitable pour rationaliser les efforts de la communauté scientifique.

L'action des tutelles et des structures est importante pour relayer et expliquer les actions impulsées par la programmation européenne pour les nouvelles pratiques de recherche (construction progressive d'EOSC pour la science ouverte, principes FAIR ou HRS4R), et pour assurer le soutien RH nécessaire à leur mise en œuvre et à leur appropriation.

Recommandations :

- Continuer à mobiliser les équipes pour proposer des projets en réponse aux appels d'offres européens, pour prolonger la bonne insertion de la communauté AA dans l'Europe de la recherche.
- Adapter la veille pour anticipation des prochains appels d'offres européens, au-delà des domaines déjà identifiés par la cellule Europe de l'INSU. Il conviendra de répertorier les expertises de nos laboratoires afin d'alimenter et compléter la veille des cellules Europe. S'appuyer sur des experts scientifiques présents dans les laboratoires sera nécessaire pour faciliter l'identification des appels d'offres susceptibles de mobiliser les laboratoires.

Nébuluse de l'Iris" NGC 7023. Les combinaisons d'atomes comme le carbone et le silicium créent de minuscules particules de poussière dans le milieu interstellaire. De telles petites particules ont la dimension de la longueur d'onde de la lumière visible et diffusent donc la lumière bleue beaucoup plus efficacement que la lumière rouge. Image de Jean-Charles Cuillandre (CEA/CFHT) & Giovanni Anselmi. © Canada-France-Hawaii Telescope



- Renforcer l'accompagnement des tutelles pour le montage des projets européens, notamment pour la préparation des aspects financiers et administratifs, ainsi que les aides à la rédaction, la relecture des projets, ou la mise en réseau des équipes françaises avec des partenaires potentiels.
- Améliorer l'articulation entre les différents exercices de prospective au niveau national, européen, ASTRONET, APPEC, ESA, pour rationaliser les efforts de la communauté.

Articulation internationale

La communauté INSU-AA se saisit des outils CNRS pour mettre en œuvre ses actions internationales : PhD *joint programs*, actions émergentes, projets et réseaux , ainsi que deux *International Research Laboratories* (IRL : LFCA au Chili et FSLAC en Espagne). Les laboratoires et équipes sont bien mobilisés pour répondre aux appels de collaborations internationales du CNRS, ainsi qu'aux divers types d'appels bilatéraux sans une stratégie globale concertée. La mise en œuvre d'un nouvel IRL avec STSci à Baltimore (USA) apparaît très prometteuse, pour accompagner la mobilisation des équipes françaises dans HWO. De manière stratégique, il peut être intéressant de poursuivre les collaborations avec l'Australie qui se rapproche de l'ESO, avec l'Afrique du Sud, notamment dans le cadre de SKAO, avec la Chine qui a un programme ambitieux de construction de télescopes (radio, visible, astroparticules, etc.), ainsi qu'avec les pays du Golfe persique et l'Inde, qui investissent beaucoup dans l'enseignement supérieur et la recherche, notamment spatiale.

Les IRL sont stratégiques pour le CNRS qui y investit des moyens importants. Néanmoins, leur pérennisation souffre de la difficulté de mobiliser des personnels pour les faire vivre, et les freins identifiés, outre les freins personnels qui demeurent les plus prégnants, incluent des freins administratifs pour les personnels non CNRS sur lesquels l'INSU doit pouvoir continuer à agir. La diversité des activités thématiques menées dans les IRL participe de leur attractivité et est à encourager.

Recommandations :

- Augmenter la visibilité des IRL, à la fois dans la communauté, en France, et dans leur écosystème local ;
- Mieux reconnaître le rôle des personnels, et notamment des codirections françaises des IRL pour augmenter l'attractivité de ces structures et les pérenniser.
- Appuyer la mise en œuvre d'un nouvel IRL avec le STSci à Baltimore (USA) pour accompagner le développement de HWO.

13. Éditorial de conclusion du directeur de l'INSU

Un monde en bataille, une planète en surchauffe, des budgets sous contrainte : c'est dans ce contexte que la communauté Astronomie-Astrophysique a réfléchi à ses paradigmes, ses objets d'étude, son impact et ses priorités. Le document de prospective qui en ressort est particulièrement riche et engageant, avec des propositions fortes qui promeuvent une recherche ambitieuse et éclairante, raisonnée et responsable, engagée et ouverte, en écho aux valeurs de l'INSU.

Ambitieuse d'abord car la discipline s'est dotée de moyens exceptionnels qui la placeront dans les cinq prochaines années aux avant-postes de découvertes exceptionnelles, conférant à la France une position de leader. Origines de l'Univers, nouveaux mondes, Univers violent..., tous ces nouveaux savoirs seront révélés notamment grâce aux grandes infrastructures d'observation au sol et dans l'espace qu'il convient d'exploiter au maximum. Tout en restant aux aguets pour préparer le futur, cette prospective privilégie donc l'exploitation scientifique sur une fuite en avant de nouveaux équipements. L'INSU salue ce choix de raison et de responsabilité, tant du point de vue de l'investissement public que de l'éthique environnementale, deux contraintes qui devront guider des choix difficiles mais nécessaires dans les années à venir et que la communauté considère comme indispensables. Par la nature même des outils de sa recherche, l'astronomie porte sans doute une responsabilité particulière à inventer et partager, avec toutes les communautés de recherche, une nouvelle façon de faire de la recherche, participant à réduire son impact environnemental tout en conservant son excellence et les moyens, RH et financiers, pour cela. Éclairante ensuite car l'astronomie, plus encore peut-être que d'autres sciences, vient répondre aux questionnements primordiaux de nos concitoyens, et participe sur son champ à une mobilisation des sciences fondamentales au service de la société.

Riche en talents, la communauté astronomique française sait que la préservation des ressources humaines devra être accompagnée d'une organisation plus résiliente de ses moyens afin notamment d'offrir à tous ses laboratoires des capacités d'exploitation mais aussi d'innovation, en particulier instrumentale et numérique, préparant le futur et contribuant au progrès de toutes les communautés de l'INSU. Elle y est prête et pourra s'appuyer sur les collectifs que

constituent les observatoires des sciences de l'Univers. Cette richesse des talents doit augmenter pour respecter et tirer pleinement parti de la diversité de notre société et se ressourcer ainsi en nouvelles compétences. La communauté de l'Astronomie s'engage fortement pour construire des collectifs de recherche intégrateurs et bienveillants, avec des propositions que l'INSU déploiera au-delà dans toutes ses unités. Cette richesse pourra et devra se renforcer d'une plus grande synergie entre tous les acteurs du domaine pour aller chercher, au service de l'astronomie et de l'astrophysique, les compétences nécessaires à l'IN2P3, à l'INP et au-delà. L'inventaire ébauché par cette prospective des opportunités, des forces et aussi des entraves aux collaborations gagnera à être consolidé et augmenté par un travail de prospective dédié entre ces instituts, et ce sera une priorité de la Direction adjointe en charge du domaine.

L'éducation est un enjeu majeur qui dépasse le cadre de la seule formation à et pour l'astronomie. Par l'attrait naturel de ses objets d'étude, l'astronomie est un puissant vecteur d'exposition de la méthode scientifique, de sa rigueur et de sa puissance, un rempart contre la désinformation partisane des vérités scientifiques.

Enfin, les outils de son attractivité et de sa visibilité devront être soutenus également dans sa lutte pour une plus grande intégration de tous les talents, et pour une meilleure reconnaissance de la contribution de nos collègues féminines.

La communauté française de l'Astronomie et de l'Astrophysique a livré ici un corpus riche et courageux dont l'INSU est fier de se saisir pour préparer sa stratégie dans ce domaine et au-delà, et renforcer la pertinence de son action au service de la recherche en sciences du Système Terre et de l'Univers.

SIGLES ET ACRONYMES

AA : Astronomie & Astrophysique

AAP : Appel annuel à projets

ACES : *Atomic clock ensemble in space*

ACME : *Astrophysics centre for multimessenger studies in Europe*

ALMA : *Atacama large millimeter array*

ANDES : Instrument ELT

ANO : Action nationale d’observation

ANR : Agence nationale de la recherche

APPEC : *Astroparticle Physics European Coordination Committee*

AQ/AP/AQI : Assurance qualité / Assurance produit / Assurance qualité intégration

Ariel : *Atmospheric remote-sensing infrared exoplanet large-survey*

ASHRA : Action spécifique haute résolution angulaire

ASN : Action spécifique numérique

ASOV : Action spécifique observatoire virtuel

ASTRONET : Consortium d’agences de financement européennes et d’organisations de recherche pour l’astronomie

AT : Action thématique

Athena : *Advanced telescope for high energy astrophysics*

AtLAST : *Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope*

BAP : Branche d’activité professionnelle

- **C** : Sciences de l’ingénieur et Instrumentation scientifique
- **E** : Informatique, Statistiques et Calcul scientifique
- **F** : Analyse et Traitement des données scientifiques
- **J** : Gestion et Pilotage

BdD : Base de données

BISOU : *Balloon Interferometer for Spectral Observations of the Universe*

BlueMUSE : Instrument VLT

C2I : Comité Inter Institutions

CDD : Contrat à durée déterminée

CDI : Contrat à durée indéterminée

CDOS : Centre de données, d’observations et de services

CDS : Centre de données astronomiques de Strasbourg

CEA : Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives

CES : Comités d’expertise scientifique

CET : Comité exoplanètes transverse

CH : Personnel chercheur désigné sous diverses formes selon l’employeur (chercheur, chargé de recherche, directeur de recherche, ingénieur-chercheur, enseignant-chercheur, maître de conférence, professeur, astronome-adjoint, astronome...)

CHEOPS : Characterising exoplanets satellite

CID : Commission interdisciplinaire du comité national de la recherche scientifique

CLD : Contrat de longue durée

CLIMSO : Christian Latouche imageur solaire

CNAP : Conseil national des astronomes et physiciens

CNES : Centre national d’études spatiales

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

CNSA : *China National Space Administration*

CNU : Conseil national des Universités

Colibri : *Catching Optical and Infrared Bright Translents*

CoNRS : Comité national de la recherche scientifique

CRCT : Congé pour recherches ou conversions thématiques

CS AA : Commission spécialisée astronomie astrophysique de l’INSU

CSIIT : Commission spécialisée instrumentation innovante transverse

CSU : Centre spatial universitaire

CTA : *Cherenkov Telescope Array*

DAMIC-M : *DARk Matter In CCDs at Modane*

DAS : Direction adjointe scientifique

DESI : Dark Energy Spectroscopic Instrument

DGA : Direction générale de l’Armement

DGDS : Délégation générale déléguée à la science du CNRS

DIAlog : outil ressources financières CNRS

DIIRO : Direction des développements instrumentaux innovants pour la recherche et l’observation

DU : Direction d’unité

DT : Division technique

Dyablo : Code de simulations numériques

ECTS : *European Credit Transfer and Accumulation System*

ED : École doctorale

EFISOFT : *ELT French Instrument Control Software*

EGO-Virgo : *European Gravitational Observatory - Virgo*

ELT : *European Extremely Large Telescope*

EOSC : *European Open Science Cloud*

ERC : *European Research Council*

ERIC : *European Research Infrastructure Consortium*

ESA : Agence spatiale européenne

ESDIR : Exploitation scientifique des données des infrastructures de recherche

ESFRI : *European Strategy Forum on Research Infrastructures*

ESO : Observatoire austral européen

ESPaDOnS : *Echelle Spectropolarimetric Device for the Observation of Stars*

Euclid : Mission spatiale de l’ESA

FAIR : Faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables

FEI : Fonctionnement, équipement, infrastructure

Fermi : mission spatiale NASA

4MOST : spectrographe multi-objets ESO

FUI : Fond Unique Interministériel

Gaia : Mission spatiale astrométrique de l’ESA

GDR : Groupement de recherches

GPEC : Gestion prévisionnelle des emplois et compétences

GRAND : *Giant Neutrino Array for Neutrino Detection*

Gravity + : Instrument VLTI

HARMONI : *Instrument ELT High Angular Resolution Monolithic Optical and Near-infrared Integral Field Spectrograph*

Hcéres : Haut Conseil de l’évaluation de la recherche et de l’enseignement supérieur

HelioSwarm : mission NASA

Hera : mission ESA

HESS : *High Energy Stereoscopic System*

HPC : *High Performance Computing*

HRS4R : *Human Resources Strategy for Researchers*

HST : *Hubble Space Telescope*

HWO : *Habitable Worlds Observatory*

IAC : Instituto de astrofisica de Canarias

IDEFIX : Code de simulations numériques

INSU : Institut national des sciences de l’univers

IN2P3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

INP : Institut national de physique

Inria : Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique

IPE : Ingénieur projets européens

IR : Insfrastucture de recherche bénéficiant du soutien des opérateurs de recherche

IR* : Infrastructure de recherche bénéficiant de soutien spécifique des ministères

IRAM : Institut de radioastronomie millimétrique

IRL : *International Research Laboratory*

JAXA : *Japan Aerospace Exploration Agency*

JUICE : *Jupiter Icy Moons Explorer*

JWST : *James Webb Space Telescope*

LabCom : *Laboratoires communs*

KIDS : *Kinetic Inductance Detectors*

KM3Net : *Cubic Kilometre Neutrino Telescope*

LIFE : *Large Interferometer For Exoplanets*

LIGO : *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*

LISA : *Laser Interferometer Space Antenna*

LiteBIRD : *Lite Satellite for the Studies of B-mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection*

LOFAR : *Low Frequency Array*

LSST : *Large Synoptic Survey Telescope*

M1, M2 : Master 1^{re} année, Master 2^e année

MéO : Service de métrologie optique

MESR : Ministère de l’Enseignement supérieur et de la Recherche

METIS : *Instrument ELT Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph*

MICADO : *Instrument ELT Multi-AO Imaging Camera for Deep Observations*

MICROSCOPE : Micro-satellite à trainée compensée pour l’observation du principe d’équivalence

MIMAC : *Mlcro-tpc MAtrix of Chambers*

MIRI : *Mid Infrared Instrument*

MITI : Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires

M-MATISSE : *Mars Magnetosphere Atmosphere Ionosphere and Space-Weather Science*

MMS : *Magnetospheric Multiscale Mission*

MMX : *Martian Moons Exploration*

MOONS : *spectrographe multi-objets VLT*

MORFEO : *Instrument ELT Multiconjugate Adaptive Optics Relay For ELT Observations*

MOSAIC : *Instrument ELT Multi Object Spectrograph with Adaptive Image Correction*

MSE : *Maunakea Spectroscopic Explorer*

MSR : *Mars Sample-Return*

NASA : *National Aeronautics and Space Administration*

NDA : *Nançay Decametric Array*

NenuFAR : *New Extension in Nançay Upgrading LOFAR*

NewAthena : *New Advanced Telescope for High Energy Astrophysics*

NIKA : *New IRAM KID Array*

NOEMA : *Northern Extended Millimeter Array*

OHP : Observatoire de Haute-Provence

ONERA : Office national d’études et de recherches aérospatiales

ORFEES : Observation radiospectrographique pour Fedome et l’étude des éruptions solaires

OFRAME : Organisation française pour la recherche applicative en météorologie de l’espace

ORN : Observatoire radioastronomique de Nançay

OSI : Organisation scientifique internationale

OSU : Observatoire des sciences de l’Univers

PAR : Personnel d’appui à la recherche désigné sous diverses formes selon l’employeur (ITA, IT, BIATOSS, BIATSS, IATOS, IATOSS...)

PCS : *Planetary Camera and Spectrograph for the ELT*

PEPR : *Programmes et Équipements prioritaires de recherche*

PEPR NumPEx : PEPR pour l’exascale

PEX : Projet EXploratoire du CNES

PFS : *Subaru Prime Focus Spectrograph*

PHARE : Code de simulations numériques

PIA : Programme d’investissements d’avenir

PILSE : Pôle inter-laboratoire de supports expérimentaux pour le développement de missions spatiales

PLATO : *PIAnetary Transits and Oscillations of Stars*

PN : Programme national

PN ASTRO : Programme national d’astrophysique

PNIIT : Programme national instrumentation innovante transverse

PNP : Programme national de planétologie

PRIMA : *Probe far-IR Mission for Astrophysics*

PROVIDENCE : Plateforme de recherche en optique, vecteur d’innovation pour la défense sur la maîtrise et compréhension de l’environnement et la caractérisation des objets dans l’espace

PTA : *Pulsar Timing Array*

RAMSES : Code de simulations numériques

Ramses : mission ESA vers Apophis

R & D : Recherche et Développement

R & T : Recherche et Technologie

REFIMEVE+ : Réseau fibré métrologique à vocation européenne

RESEDA : Recherche et suivi des expérimentations data, base de données RH CNRS

RHN : Radiohéliographe de Nançay

RP : Ressources propres

RSU : Rapports sociaux uniques

RTN : Radiotélescope de Nançay

SATFR : *Small Aperture Telescopes France*

SATT : Sociétés d’accélération du transfert de technologies

Saxo + : Instrument VLT

SDP : *SKA Science Data Processor*

SF2A : Société française d’astronomie et d’astrophysique

SNO : Service national d’observation

SPIRou : Spectropolarimètre infrarouge

SPT : *South Pole Telescope*

STSci : *Space Telescope Science Institute*

SuperDARN : *Super Dual Auroral Radar Network*

SVOM : *Space-based Multi-band Astronomical Variable Objects Monitor*

SKAO : *Square Kilometer Array Observatory*

SRC : *SKA Regional Centres*

FR SKA-SRC : *French SRC*

SP : *Science s participatives*

TBL : Télescope Bernard Lyot

TCFH : Télescope Canada France Hawaïi

THEMIS : Télescope héliographique pour l’étude du magnétisme et des instabilités solaires

UAR : Unité d’appui et de recherche

UMR : Unité mixte de recherche

VLT : *Very Large Telescopes*

VLTi : *Very Large Telescopes Interferometry*

WEAVE : spectrographe multi-objets

Wenaokeao : Instrument TCFH

WST : *Wide Field Spectrograph Telescope*

XENON : expérience de détection directe de matière noire

XMM : *X-ray Multi-mirror Mission*

ZENTO : Zénith des technologies opérationnelles



La galaxie IC 342. Données obtenues à l'aide de la caméra MegaCam. Image de Jean-Charles Cuillandre (CEA/CFHT) & Giovanni Anselmi.
© Canada-France-Hawaii Telescope



**Institut national des sciences
de l'Univers du CNRS**

3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
+33 1 44 96 40 00
www.cnrs.fr | [X](#) | [Bluesky](#)