



PROSPECTIVE

ASTRONOMIE ASTROPHYSIQUE 2020-2025
SYNTHÈSES ET RÉSUMÉS EXÉCUTIFS

Bilan et Prospective 2020-2025 de la Commission spécialisée Astronomie Astrophysique de l'Institut national des sciences de l'Univers

SYNTHÈSE DES ATELIERS DU COLLOQUE DE LA PRESQU'ÎLE DE GIENS DES 14-18 OCTOBRE 2019 ET DES GROUPES DE TRAVAIL PRÉPARATOIRES

Sous la coordination de Stéphane Charlot, président de la CSAA, et Guy Perrin, directeur adjoint scientifique du domaine INSU Astronomie-Astrophysique.

En complément à ce rapport, le site

<https://extra.core-cloud.net/collaborations/ProspectiveAA2019/SitePages/Accueil.aspx>

permet d'accéder :

- à la liste des membres des huit groupes de travail qui ont participé à la rédaction des rapports ;
- à l'intégralité des documents des groupes de travail ;
- à la liste des questions examinées par les 4 ateliers de la prospective ;
- à la liste des participants au séminaire de prospective ;
- à la composition des ateliers ;
- aux présentations du séminaire de prospective.

Coordination éditoriale

Marie Perez

Impression

CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

Conception / Maquette

CBA Design / Page B

Décembre 2020

Photo de couverture : impression d'artiste de la surface de Pluton (image retouchée). Crédit : ESO / L. Calçada

SOMMAIRE

Introduction et résumé exécutif	4
Bilan depuis la prospective de 2014	8
Synthèse des ateliers	12
Thématiques et organisation scientifique	13
Moyens	15
Ressources humaines	18
Rôle de l'INSU/AA	20
Synthèse et conclusions	22
Synthèse des recommandations	26
Groupe A : Thématiques	27
Groupe B : Moyens	30
Groupe C : Articulations Europe/national/local	35
Groupe D : Astronomie spatiale	39
Groupe E : R&D pour les moyens du futur	37
Groupe F : Interfaces interdisciplinaires	42
Groupe G : Ressources de la discipline	45
Groupe H : Formation et impact sociétal de l'astronomie	47
Liste des acronymes	49

INTRODUCTION et résumé exécutif

STÉPHANE CHARLOT
ET GUY PERRIN



Participants à la Prospective AA en 2019

© Nam Phan Van Song

La prospective INSU pour le domaine Astronomie-Astrophysique est un moment très important pour la discipline. Elle permet à la fois de faire un état des lieux du domaine et de se projeter dans l'avenir. La prospective est organisée depuis plusieurs exercices tous les cinq ans. C'est un rythme nécessaire compte tenu de la rapidité de l'évolution du paysage scientifique et du contexte français. L'exercice est l'occasion de définir les grandes priorités thématiques et de moyens ainsi que de conduire des réflexions stratégiques sur le positionnement de l'astronomie française dans le paysage global de la recherche et des infrastructures nationales, européennes, internationales mais aussi par rapport aux différents contextes institutionnels. Le document de synthèse de la prospective est à destination de la commu-

nauté astronomique française et de ses partenaires internationaux, des organismes comme le CNRS, le CNES, le CEA, l'ONERA ou l'Inria, des établissements publics d'astronomie, des universités, du MESRI et de l'ANR.

Ce document de synthèse est le fruit du travail collectif de toute la communauté astronomique INSU et de ses partenaires en 2018 et 2019. Il a été coordonné par un comité de pilotage mis en place par l'INSU réunissant les présidents de sections de la discipline, le président de la CSAA, les chargés de mission ainsi que le DAS AA de l'INSU, puis les responsables des huit groupes de travail créés par ce comité. Le comité de pilotage s'est appuyé sur la CSAA pour la validation des mandats des groupes et la discussion de leurs travaux.

Ce caractère collectif confère au rapport de synthèse une légitimité forte pour la construction des dossiers de financement, la définition des priorités et facilite le pilotage des actions. Ce rapport est le résultat du séminaire de prospective auquel 160 personnes ont participé sur la Presqu'île de Giens du 14 au 18 octobre 2019. Les discussions du séminaire ont été alimentées par les travaux préliminaires des groupes de travail, qui ont consulté la communauté astronomique au sens large (partenaires institutionnels, partenaires au sein des programmes nationaux) pour émettre des recommandations. Une synthèse de chacun des groupes figure dans ce rapport (pages 26 à 48). Ces recommandations ont été discutées par quatre ateliers dont les coordinateurs, avec le comité de pilotage, ont élaboré une synthèse finale en quatre parties (pages 12 à 21).

La prospective INSU/AA 2019 s'est déroulée selon un calendrier proche de celui du séminaire de prospective scientifique du CNES co-organisé avec l'INSU, et des points d'étape communs ont été organisés, les prospectives se nourrissant l'une de l'autre au cours de leur élaboration. La prospective INSU/AA a précédé et alimenté la prospective transverse INSU dont le séminaire de restitution a eu lieu les 5 et 6 novembre 2020.

Les orientations du rapport de synthèse portent sur les objectifs de la recherche astronomique des équipes, sur les moyens matériels et intellectuels nécessaires pour satisfaire ces ambitions, sur les moyens humains qui leur sont indispensables, sur l'organisation de la discipline, sur les services d'observation, sur la formation et sur la place de l'astronomie dans la société. Les besoins de recherche dans les thématiques identifiées en France ont été réaffirmés. L'astronomie est un domaine aux nombreuses connexions disciplinaires, et la nécessité d'une vision large pluri- et inter-disciplinaire ressort nettement des travaux du séminaire. Des évolutions sont nécessaires pour être plus présents sur l'astronomie des phénomènes transitoires en lien avec l'astronomie multi-messager. Une meilleure structuration est indispensable pour renforcer notre présence au meilleur niveau mondial en exoplanétologie et en exobiologie, ce qui passe par une coordination transverse des programmes nationaux concernés pour l'exoplanétologie, et dans un cadre interdisciplinaire au-delà de l'INSU pour l'exobiologie. Concernant les méthodologies, un tournant est à prendre en sciences numériques avec une montée en gamme nécessaire en science des données et une poursuite des efforts engagés en calcul haute performance, avec prise en compte des convergences potentielles. Ce tournant nécessite de nouveaux profils de chercheurs et d'ingénieurs, des interactions renforcées de la communauté astronomique avec la communauté numérique et l'intégration aux services d'observation au-delà de l'existant, à l'instar de ce qui est fait pour l'instrumentation.

Concernant les infrastructures de recherche, les grandes priorités des deux prospectives précédentes ont été réaffirmées. La participation à l'instrumentation de l'Extremely Large Telescope de l'ESO reste la priorité forte de la discipline tout en soulignant la nécessité d'une instrumentation pour le VLT au meilleur niveau mondial. La communauté astronomique française a clairement identifié la nécessité de rester présente au Mauna Kea, où nous sommes partenaires du CFHT, avec une transition potentielle CFHT/MSE qui devra être gérée le moment venu avec le souci d'exploiter les instruments existants. Dans le domaine des hautes énergies, la participation à CTA est acquise et la communauté astronomique identifie sans ambiguïté les ondes gravitationnelles parmi les messagers indispensables, pour lesquelles l'évolution de Virgo en Advanced Virgo + doit être menée. Dans le domaine des grandes longueurs d'onde (IRAM et ALMA), l'astronomie millimétrique est indispensable à la communauté, et la participation à SKA pour la radio-astronomie entre 0,35 et 15,3 GHz est une priorité forte. En complément à ces moyens sol qui figurent sur la feuille de route des infrastructures du MESRI ou qui y sont candidates, le rôle des observatoires nationaux pour certaines spécialités a été souligné. L'astronomie spatiale est également une composante essentielle du domaine, pour laquelle le partenariat avec le CNES est fondamental et doit être renforcé, notamment pour le montage, la conduite des projets et le travail des équipes. Le domaine spatial est en évolution, et le *New Space*¹ représente une opportunité potentielle à laquelle l'INSU, le CNES et les autres partenaires doivent travailler de concert, le rôle du CNES en tant qu'agence spatiale nationale devant rester central. L'importance des activités d'astrophysique de laboratoire en soutien aux grands projets sol et espace a été réitérée.

La question des ressources humaines dans les laboratoires est plus que jamais critique. Les laboratoires INSU/AA ont perdu en moyenne près de 5 postes d'ITA par an au CNRS sur les 10 dernières années, soit près de 10% des effectifs au total depuis 2009. Le contingent chercheurs et enseignants-chercheurs s'est globalement maintenu depuis 2014 après une décade importante d'environ 10% entre 2009 et 2014. À moins d'une révision à la baisse des ambitions du domaine, cette tendance doit être jugulée. La communauté astronomique française s'est adaptée au mode de financement sur projet avec une performance excellente à l'ERC (6 en moyenne par an), mais pâtit des faibles rendements du programme blanc de l'ANR. Malgré ses performances à l'Europe et bien que très active pour les recherches de financements dans les sites, en régions ou au niveau national, la communauté astronomique ne parvient pas à compenser la perte de postes statutaires par de l'emploi sur contrats, avec une situation critique qui se profile à un horizon de 5 ans au plus. Les réflexions conduites dans le cadre de la prospective montrent l'importance de

1- On désigne par *New space* l'accès à une instrumentation spatiale de faible coût, qui s'est démocratisée, à l'instar des plateformes nanosat.



Exposés et groupes de travail lors de la prospective AA en 2019

Crédit: Nam Phan Van Song

l'emploi ITA au regard des missions à accomplir et la nécessité a minima d'une stabilisation de l'existant.

Le domaine astronomique souffre d'un déficit de femmes avec 23% d'astrophysiciennes, à l'instar d'autres disciplines des sciences dures. Ce déficit s'accroît au fil des études et jusqu'aux portes du recrutement. À moins d'une politique paritaire dure, des actions sont à conduire en amont des recrutements au fil du parcours de formation pour inverser cette tendance. L'astronomie dispose d'un pouvoir d'attraction sur les jeunes, au niveau de leur formation ou comme objectif professionnel. Ce pouvoir d'attraction existe également au sein des entreprises qui travaillent sur les grands projets de l'astronomie et pour lesquelles la discipline est source de valeur et de montée en gamme technologique. Le

retour sur investissement est largement positif pour l'État et pour les entreprises, grâce à une tradition forte de co-développement entre laboratoires du domaine et secteur industriel, qui est un vecteur essentiel de valorisation des développements à visée de recherche fondamentale. De la formation à la valorisation en passant par les services régaliens qu'elle rend et la dissémination des connaissances auprès du public, l'impact sociétal de l'astronomie en France est fort. Les astronomes sont également conscients de leur rôle et de ce qu'ils peuvent apporter à la société française dans son évolution et pour faire face aux défis de demain : par exemple, promouvoir la démarche scientifique, aller vers une astronomie plus sobre énergétiquement et participer au développement de technologies plus efficaces pour lutter contre le changement climatique.

BILAN

depuis la
prospective
de 2014

GUY PERRIN

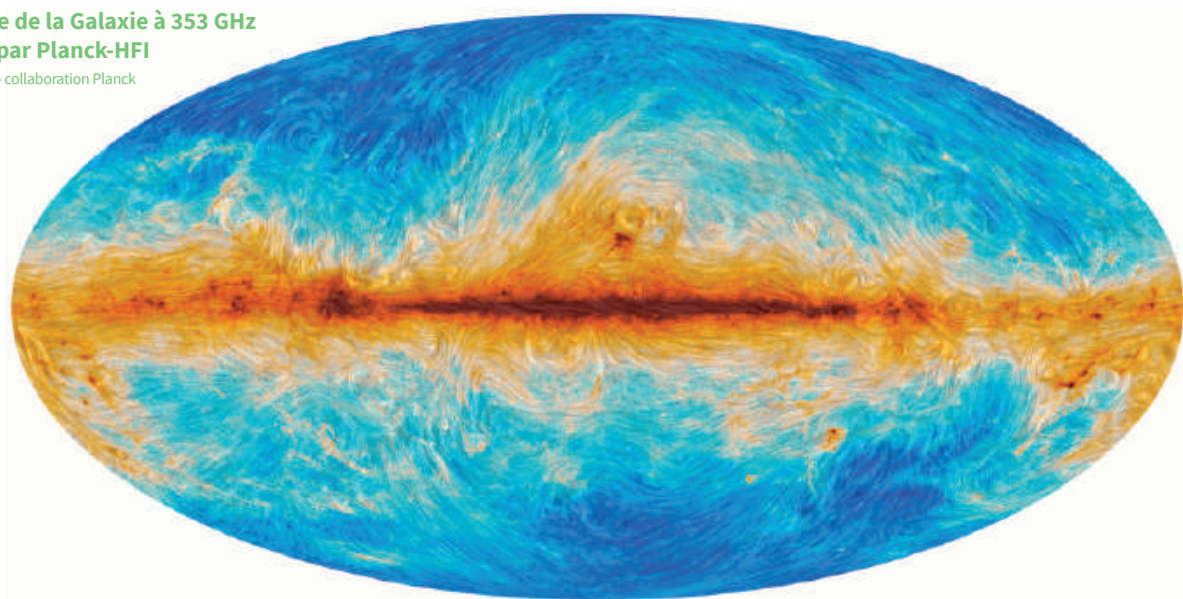
La prospective de 2014 avait abouti à l'identification de priorités dans différents champs et de défis dont on peut dresser un bilan cinq ans plus tard. Pour l'essentiel, les priorités les plus élevées ont été suivies et mises en œuvre. Elles ont donné le La pour la période inter-prospectives et sont un socle important de la prospective 2019. Les priorités thématiques et d'infrastructures sont en cohérence avec les priorités européennes d'Astronet¹ de 2008 et 2014 que la France a contribué à élaborer et avec celles du CNES de 2014.

Concernant l'éco-système de la recherche française, la période a vu la poursuite des réformes engagées dans le cadre de la loi relative aux Libertés et Responsabilités des Universités en 2007 avec la montée en puissance des sites dont certains sont devenus des acteurs prépondérants de la recherche. La communauté astronomique a dû et a su conjuguer les avantages des financements locaux importants qui sont une nouveauté avec la nécessité de conserver une ligne collective nationale indispensable pour une activité qui repose sur des infrastructures et des équipes inter-laboratoires, que ce soit au sein de l'INSU ou avec d'autres par-

tenaires au CNRS ou dans d'autres organismes. La nécessité d'une coordination nationale avait été réaffirmée en 2014 et l'INSU a depuis renforcé son équipe de direction avec des Directrices adjointes scientifiques chargées des IR/TGIR et des OSU/politiques de site. La perte de ressources internes du CNRS consécutive à la création de l'ANR en 2005 puis à la crise économique de 2008 n'a cependant pu être compensée et la communauté doit déployer des efforts importants pour obtenir les ressources nécessaires à ses projets auprès de financeurs locaux, nationaux ou européens. La fragilisation des laboratoires du fait de la baisse des ressources humaines s'est poursuivie. Le nombre de chercheurs et enseignants-chercheurs de la discipline s'est globalement maintenu mais le nombre d'ITA au CNRS a continué sa lente érosion de près de 5 postes par an sur les 10 dernières années. La précédente prospective avait tiré la sonnette d'alarme, ces pertes n'étant pas compensées par les ressources sur projets et posant des difficultés sur le long terme. La communauté astronomique française compte sur la Loi de Programmation de la Recherche pour lui apporter dès 2021 les ressources qui lui font défaut. Un autre défi

Carte de la Galaxie à 353 GHz vue par Planck-HFI

© ESA – collaboration Planck



1- Astronet est un consortium regroupant des organismes, des agences, des grands observatoires, des représentants de la communauté astronomique en Europe dont le but est de favoriser les collaborations et le développement d'une feuille de route commune.

identifié en 2014, celui de la parité dans les recrutements de chercheurs et d'enseignants-chercheurs, a connu une évolution favorable avec des taux de recrutement féminins de 40% et de 46% au CNRS et au CNAP. En amont des recrutements, l'évolution du paysage de l'enseignement supérieur et de la recherche avec la mise de l'accent sur des politiques de site fortes aurait pu porter préjudice aux formations d'astronomie mais celles-ci ont réussi à passer ce cap et l'on a vu éclore des masters entre différents sites permettant la conservation de masses critiques d'étudiants.

La structuration de la communauté s'est poursuivie selon les lignes définies en 2014 avec la création du Programme National Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie (PN GRAM) jusqu'à l'action spécifique. Le pavage de la discipline n'est pas encore totalement achevé et c'était un enjeu de la prospective 2019 que de poursuivre cette structuration. Ayant atteint leurs objectifs ou devant évoluer dans leur mode d'action, les actions spécifiques ALMA/NOEMA et Gaia ont été arrêtées, Gaia étant devenue un service d'observation, ALMA et NOEMA étant déjà structurés sous cette forme. Dans l'objectif de meilleure structuration et de meilleure visibilité des services d'observation, des Pôles Thématiques Nationaux et des Centres d'Expertise Régionaux regroupant les services ANO5 ont été créés. Le regroupement de services nationaux par grands instruments ou par missions a par ailleurs été amorcé.

Le domaine du numérique étant en évolution massive et rapide, toutes les difficultés identifiées en 2014 n'ont pu être résolues. La crise du Tier-3, c'est-à-dire de l'analyse des calculs HPC au niveau des laboratoires, a pu trouver des solutions localement mais le défi des données et du calcul avec le futur passage à l'exascale a continué de croître. Plus que jamais les questions des profils de chercheurs et d'ingénieurs, de la structuration de la communauté et de l'accès aux ressources de calcul et de stockage sont posées.

L'Observatoire Virtuel donne une longueur d'avance aux astronomes sur les problématiques de science ouverte et de gestion des données mais un effort important est nécessaire pour ne pas perdre cet avantage et être débordé par l'évolution des méthodes et des moyens hors de notre champ disciplinaire.

La période a vu de très importants succès de l'exploration et de l'observation spatiales pour la communauté astronomique française. Tout d'abord, notons le succès des missions ESA au premier rang desquelles Gaia et Rosetta aux très fortes participations et responsabilités françaises. Bien que les observations Planck étaient déjà achevées en 2014, la moisson de résultats s'est poursuivie jusqu'en 2020. Bepi-Colombo, mission du programme Horizon 2000+ construite avec la JAXA, a été lancée en 2018 pour explorer Mercure. Pour les missions en coopération avec la NASA, citons les magnifiques succès de ChemCam sur le rover Curiosity de la mission Mars Science Laboratory et de l'exploration de Pluton avec Dawn. La mission Solar Orbiter du programme Cosmic Vision de l'ESA (M1) a été lancée avec succès et a commencé à produire ses premiers résultats dont certains avec des instruments français. La mission Euclid (M2), dont la France dirige le consortium, a vu ses instruments livrés à l'été 2020 en vue du lancement de 2021 et la mission PLATO (M3) a été adoptée en 2017. La petite mission Cheops (S1) pour la détection d'exoplanètes par transits a également été lancée avec succès. La suite du programme Cosmic Vision a bien avancé, en cohérence avec les intérêts français puisque la mission Athena a été sélectionnée (L2) avec la responsabilité française majeure de l'instrument X-IFU. LISA (L3) a également été retenue avec un intérêt fort partagé avec les

Vue d'artiste de la sonde Rosetta de l'ESA à l'approche de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko

© ESA / ATG medialab / Rosetta / Navcam





Site du Very large telescope (VLT), à l'observatoire Paranal, dans le désert d'Atacama au Chili

© Eric LE ROUX / ESO / Université Claude Bernard Lyon 1 / CNRS Photothèque

équipes IN2P3 et INP. La mission JUICE (L1) sera elle lancée en 2022. Enfin, ARIEL, pour la spectroscopie des exoplanètes en transit a été sélectionnée comme mission M4 avec une importante participation française. Trois projets sont en compétition pour la mission M5 avec des intérêts français forts (Envision, Theseus et SPICA²).

Au sol, la feuille de route des plus grandes priorités a été respectée. Première de toutes les priorités, la participation française à l'instrumentation ELT a beaucoup progressé. Pour les instruments de phase 1, la France joue un rôle majeur sur l'instrument de première lumière HARMONI avec un rôle de PI adjoint, elle est Co-I des instruments MICADO, METIS et MAORY. Tous ces instruments sont en phase B, la première lumière technique de l'ELT étant prévue pour fin 2025 dans le calendrier actuel. Pour les instruments de phase 2, la France est PI de l'instrument MOSAIC conformément à la P0 émise en 2014 et participe scientifiquement à l'instrument HIRES. Toujours à l'ESO, sur le VLT, l'instrument Gravity a obtenu des résultats majeurs dans différentes thématiques et l'instrument MATISSE est récemment entré en opération. Les instruments de relevés MOONS pour le VLT et 4MOST pour VISTA sont en bonne voie avec des premières lumières prévues en 2021 et 2022.

Pour les autres très grandes infrastructures de recherche, NOEMA dispose de 10 antennes opérationnelles sur 12 depuis 2018, la 11^e étant en voie d'achèvement et la construction de la 12^e ayant débuté pour une livraison prévue en 2021. CTA a été labellisé TGIR en 2018 et SKA a intégré la feuille de route des TGIR du MESRI en 2018 en tant que projet, la France, représentée par le CNRS, rejoignant alors la structure SKA Organisation en tant que membre spécial la même année. Les autres plus hautes priorités identifiées WEAVE et MSE ont également bien avancé. La première lumière de WEAVE est prévue pour 2021 et un bureau projet

a été mis en place au CFHT pour conduire l'étude de MSE dont la phase A a été achevée en 2018. À noter la première lumière de l'instrument SPIRou en 2019 et d'excellentes performances déjà atteintes.

Concernant les priorités d'ordre moins élevé, le projet d'observatoire millimétrique CCAT a été abandonné par les partenaires américains, le projet de télescope solaire EST a intégré la liste ESFRI en 2016, la France contribuant à cette dynamique *via* le télescope THEMIS dont elle a racheté l'intégralité des parts en 2018, l'observatoire radio basse fréquence NenuFAR a été inauguré en 2019 à Nançay, et les discussions restent d'actualité entre IN2P3 et INSU pour l'accès d'équipes INSU au Vera Rubin Observatory.

En complément aux moyens d'exploration, d'observation et numériques, le défi de l'astronomie de laboratoire reste posé. Son financement ne s'appuie pas sur une structure identifiée spécifique. Les équipes concernées ont cependant su obtenir des financements européens, de l'ANR ou des financements locaux pour leurs expériences. S'agissant d'activités très inter-disciplinaires, la question des ressources humaines sur le long terme demeure ouverte.

En point d'orgue de ce bilan, plusieurs récompenses prestigieuses sont venues couronner ces dernières années l'excellence des résultats scientifiques obtenus. Citons, parmi d'autres, le prix Tycho Brahé de l'EAS, le prix Gruber de cosmologie attribué trois fois, le prix Shaw, huit prix Jeunes Talents France l'Oréal-Unesco Pour les Femmes et la Science, le Breakthrough prize pour la détection des ondes gravitationnelles, également couronnée par l'attribution d'une double médaille d'or du CNRS pour deux membres actuel ou passé de laboratoires INSU et, à nouveau, la médaille d'or du CNRS en 2020.

2- La mission SPICA a depuis été abandonnée par l'ESA et la JAXA en novembre 2020.

SYNTHÈSE des ateliers

Thématiques et organisation scientifique

HERVÉ DOLE ET ALICE LE GALL

La communauté INSU/AA se prépare à de nouveaux défis thématiques et technologiques : ralentir la perte de vitesse de certaines thématiques pourtant clés, organiser celles qui émergent (exoplanètes, exobiologie), renforcer son implication dans le *multi-messenger* et les *transitoires* et se former aux nouveaux moyens numériques. Elle réaffirme le rôle majeur des Programmes Nationaux (PN) dans l'animation scientifique et préconise des outils de structuration dans certains cas.

La communauté AA se félicite de la bonne organisation et articulation entre PN. Elle réaffirme que leur vocation est d'animer des communautés thématiques quand celle des Actions Spécifiques (AS) est d'animer des communautés méthodologiques.

Néanmoins, la question de la mise en place de commissions thématiques internes (animées par une partie du CS) se pose pour le PNCG du fait de la diversité des thématiques abordées par le programme et de ses communautés. La solution à mettre en place est à trouver par le PNCG en interaction avec les tutelles. Face à l'étiollement de certaines thématiques (notamment la physique atomique et moléculaire), du fait de leur petit effectif chercheurs, un bilan pourrait être entrepris par les programmes nationaux avec la définition d'actions qui pourraient aller jusqu'à des coloriages. Dans les universités, des solutions pourraient être trouvées aux interfaces en mettant en évidence les aspects innovants de ces recherches pour les rendre visibles et attractives et convaincre pour des recrutements bi-sections.

En parallèle, de nouvelles thématiques émergent. En particulier, un consensus se dégage sur le besoin de visibilité et de structuration des communautés *exoplanètes* et *exobiologie* - ce dernier thème ne relevant pas seulement de l'INSU. Pour les exoplanètes, cela devra passer par des ponts entre les programmes nationaux concernés (PNP, PNPS, PCMI et PNST). La forme de ces ponts reste à définir (par exemple un groupe de réflexion ou une commission transverse). Pour l'exobiologie, à laquelle pourrait être préféré l'intitulé *origines et recherche de la vie*, un thème qui va bien au-delà des contours de l'INSU, trois actions ont déjà été lancées (un défi de la prospective transverse INSU, un défi transdisciplinaire de la MITI (Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires) du CNRS et la construction de l'EAI (European Astrobiology Institute). Il apparaît nécessaire de créer une structure interdisciplinaire pérenne au CNRS dont l'INSU a vocation à devenir leader.

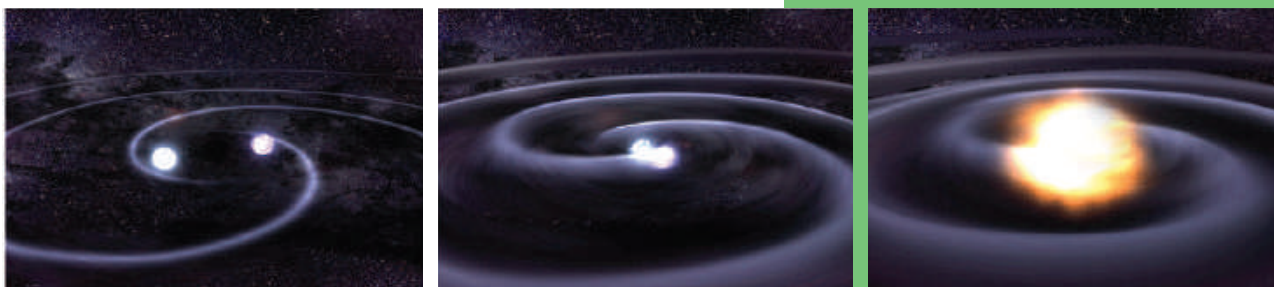
La communauté AA doit aussi faire face à de nouveaux défis, en particulier, elle doit se renforcer face aux défis du numérique (calcul haute performance (HPC), analyse des



Le rover Curiosity sur Mars en 2016

© NASA/JPL-CALTECH/MSSS

données haute performance (HPDA) et intersections). Elle manifeste son besoin de se structurer autour d'une feuille de route INSU et de former des jeunes aux compétences dont elle aura très bientôt besoin. Il ressort aussi la nécessité de mettre en avant des profils transverses sur ces thèmes. Dans la pratique, il y a consensus en faveur d'une action spécifique *numérique* avec une gouvernance qui veille à l'équilibre entre les communautés HPC et HPDA. L'action spécifique devra aider à lever les verrous technologiques et méthodologiques propres à chacune de ces communautés. À propos de la labellisation des codes communautaires, le résultat de la réflexion est nuancé et soumis à conditions : a) les programmes nationaux doivent être consultés pour recenser les codes et estimer leur utilisation communautaire ; et b) la CSAA doit émettre un cahier des charges précis où sont définis notamment la notion de service et les critères de sélection des codes.



Vue d'artiste de la phase de fusion d'un système binaire, formé de deux étoiles à neutrons, émettant des ondes gravitationnelles

© C / T. Strohmayer

Dans un autre domaine en revanche, il n'est pas apparu nécessaire de mettre en place une action spécifique pour préparer l'exploitation de l'ELT ; cela relève de l'action des programmes nationaux et de l'ASHRA.

Concernant la nouvelle fenêtre ouverte par la détection des ondes gravitationnelles, la communauté souhaite s'impliquer beaucoup plus, notamment en allant bien au-delà du « simple » suivi multi-messager, puisque l'enjeu scientifique est majeur (par exemple physique de l'évolution stellaire, physique des objets compacts, galaxies hôtes, cosmologie) et au cœur des thématiques INSU/AA. La communauté note en outre l'existence de besoins, comme la poursuite nécessaire de l'appropriation de ce nouveau sujet, l'urgence de se structurer en particulier au niveau instrumental et du traitement des données, de l'analyse des signaux et de la mise à disposition des données. Enfin nous notons la nécessité de renforcer les collaborations sol (Virgo) et espace, ainsi que la formation.

La stratégie quant au suivi des transitoires part du constat que la communauté française est bien placée sur les générateurs d'alertes. Le besoin exprimé concerne la structuration et les moyens de traiter ces alertes, notamment : comment réagir aux alertes, obtenir les données, les traiter et les organiser, ainsi que comment construire ou s'insérer dans les réseaux de suivi ? La communauté a une grande marge de progression quant à l'accès aux télescopes pour suivi photométrique et spectroscopique. Parmi les pistes évoquées se trouvent la création d'un service national d'observation pour le suivi des alertes, transverse aux instruments, ou des discussions avec les grands observatoires (par exemple ESO, Vera Rubin Telescope) et consortia pour une inclusion des lanceurs d'alerte afin de garantir un accès aux télescopes via ces consortia.

Moyens

AUORE BACMANN ET KEVIN BELKACEM

L'exercice de prospective est l'occasion de définir les grandes priorités scientifiques. L'adéquation avec les moyens et les modes d'organisation a donc été au centre des discussions des ateliers. Le résultat de ces discussions, les choix et priorités pour l'avenir sont présentés ici.

L'AVENIR DU CFHT

La préservation de l'accès au site du CFHT au Mauna Kea est apparue stratégique. Le projet MSE, qui est une des priorités de la communauté PNCG, permettra à moyen et long terme la conduite de grands relevés spectroscopiques pour l'étude des populations stellaires et la cosmologie (suivi de sources Gaia, Euclid, Rubin/LSST, Roman/WFIRST, etc.). À plus court terme, il est important de garantir l'exploitation des grands programmes en cours avec les instruments MegaCam et SPIRou et d'assurer un suivi sol des sources des missions spatiales ARIEL, PLATO (2032-2033) et TESS (2028) par les spectro-polarimètres SPIRou et ESPaDOnS. Une transition tardive vers MSE en 2032-2033 est préférable pour la conduite de ces programmes. Si le début de la construction de MSE (dont le calendrier est encore incertain) devait avoir lieu avant cette date, cela imposerait de trouver une solution alternative pour le suivi au sol des missions exoplanétaires, qui sont une priorité de la communauté française.



LES PRIORITÉS POUR LES MOYENS SOL DU FUTUR

Les priorités sur les moyens du futur qui figurent dans le rapport du groupe B ont été validées par l'ensemble des participants aux ateliers. Une attention particulière doit être portée au fait que le développement de l'instrumentation VLT ne provoque pas de retard sur l'instrumentation ELT. Il conviendra de s'assurer de la faisabilité des projets en termes de ressources et de plan de charge des laboratoires. La position de HIREs en priorité P1 ne doit cependant pas cacher l'intérêt fort qu'aurait une participation à cet instrument. Un autre point de vigilance concerne le besoin de garantir l'accès des équipes INSU au Vera Rubin Observatory. Dans ce contexte, l'INSU doit continuer de travailler avec l'IN2P3 pour définir les modalités d'accès.

LA GESTION DES GRANDS PROJETS SOL

L'amélioration de la gestion et du déroulement des grands projets sol apparaît nécessaire. Pour cela, il serait souhaitable que l'INSU joue un rôle plus important sur les projets dès le début. La mise en place d'une revue de moyens en amont, qui pourrait prendre la forme d'un Comité Inter-Organisation (CIO) de montage, permettrait d'avoir une vision d'ensemble des capacités et ressources des laboratoires et de pouvoir intervenir suffisamment tôt le cas échéant si les moyens prévus n'étaient pas adéquats. La question de la préservation des compétences techniques est également cruciale. Au niveau des laboratoires, le recours à des CDI de missions, lorsque possible, serait une réponse possible au besoin. La mise en réseau des expertises, comme dans le cadre d'EFISOFT¹, peut également être envisagée. Néanmoins, il convient d'attendre le retour d'expérience sur EFISOFT avant de généraliser ce type d'action.

1- ELT French Instrument control SOFTWARE team, réseau de spécialistes de logiciels de contrôle-commande pour instruments de l'ELT.

Dentelles du Cygne, vue en vraies couleurs obtenue à partir des données capturées par MegaCam, l'imageur digital mosaïque du télescope Canada-France-Hawaï

© Jean-Charles CUILLENDRE / CFHT / AIM / CEA Saclay / Obs. de Paris / CNRS Photothèque

LA R&D DANS LES LABORATOIRES INSU

La R&D est une source d'opportunités scientifiques dans les laboratoires INSU. Afin de s'assurer du maintien de ce type de recherche sur le long terme et de la disponibilité des ressources humaines dans un contexte programmatique chargé, le niveau d'implication des équipes dans les grands projets ne devrait idéalement pas dépasser 80%. Une équipe spécialisée dans la R&D, comme il en existe dans certains laboratoires, peut être une solution mais ce modèle n'est pas forcément généralisable. Il est important que la CSAA consacre une partie de son financement à ce type d'activité. Par ailleurs, les projets de R&D doivent bénéficier d'un suivi similaire à celui des grands projets (reporting, jalons, etc...). Le recours aux services partenariat valorisation (SPV) du CNRS doit également être encouragé: il ressort que ces services demeurent encore mal connus malgré l'aide qu'ils peuvent apporter pour les montages de projets

incluant des industriels. Pour ces derniers, une implication en amont dans les projets R&D est souhaitable. Au-delà des projets de R&D, les expériences d'astrophysique de laboratoire doivent également être appréhendées sur un temps long. Elles souffrent néanmoins d'une absence de financement sur le long terme alors qu'il faudrait pouvoir assurer les coûts de fonctionnement de façon récurrente pour pérenniser ces équipements.

Vue d'artiste du Square Kilometre Array regroupant le site d'Afrique du Sud (à gauche) et le site d'Australie (à droite)

© SKA Organisation



LES OBSERVATOIRES NATIONAUX COMME SOUTIEN AUX MISSIONS SPATIALES

Le soutien aux missions spatiales exoplanètes est la priorité pour l'exploitation scientifique du télescope de 1,93 m de l'OHP et du télescope Bernard Lyot du Pic du Midi. Le réseau de pulsar «European Pulsar Timing Array» est prioritaire pour le NRT. Ces priorités, telles qu'énoncées par le groupe B, font l'unanimité. Il est toutefois important que l'exploitation de ces infrastructures ne soit pas réduite aux thématiques exoplanètes et pulsars. En effet, elles doivent garder une certaine flexibilité afin de rester ouvertes à d'autres thématiques scientifiques et en particulier à des thématiques émergentes qu'il est difficile d'anticiper.

LA POLITIQUE DU *NEWSPACE* DE L'INSU

Le secteur du spatial connaît aujourd'hui une mutation profonde avec la montée en puissance du *Newspace*. L'INSU doit donc définir une politique en la matière et plus particulièrement en ce qui concerne le développement des nouvelles plateformes (nanosats, cubesats). Cette politique a vocation à être mise en œuvre aux côtés du CNES. La collaboration INSU-CNES doit être le levier pour répondre au besoin de montée en qualité et en fiabilité de ces nouvelles plateformes.

Les campus spatiaux universitaires sont également des partenaires pour l'INSU qui devra être néanmoins attentif à plusieurs points : l'INSU ne devra s'impliquer dans une telle collaboration qu'à la condition qu'il y ait des objectifs scientifiques solides et/ou que le projet soit l'occasion d'une montée en maturité technologique. D'autre part, l'INSU devra veiller à ce que la pression sur les ressources des laboratoires reste mesurée.

LA GESTION EN AMONT DES PROJETS SPATIAUX

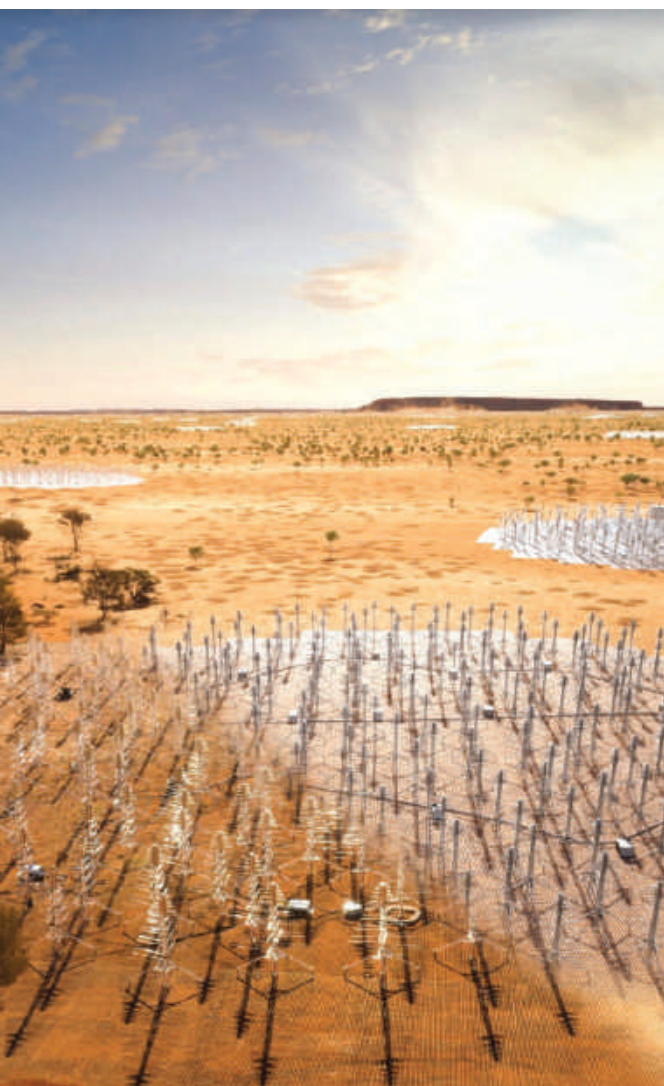
Les Comités Inter-Organismes de montage apparaissent comme un outil de gestion qui doit être systématisé. Il est important de souligner que ces CIO de montage devront également impliquer tous les acteurs et en particulier les universités au travers des OSU qui constituent le relais naturel des universités pour l'INSU.

Un dialogue efficace avec le CNES est indispensable et passe nécessairement par une coordination en amont, assurée par l'INSU, avec les directeurs des laboratoires spatiaux afin d'avoir une vision claire des plans de charge et des ressources disponibles. Il sera en particulier important de travailler à l'homogénéisation de l'analyse des moyens (référentiels communs, outils de cartographie des RH, etc.).

LES ÉQUIPES INTÉGRÉES INSU-CNES

Au-delà des CIO de montage, les équipes intégrées expérimentées pour la préparation de missions spatiales constituent un outil pertinent pour la collaboration INSU-CNES. Le recours à ces équipes doit néanmoins être analysé au cas par cas. Pour être pleinement fonctionnelles, les tâches et rôles respectifs des membres devront être définis finement. De plus, les potentiels surcoûts sur de longues périodes liés à l'éloignement géographique devront être pris en compte. Enfin, il faudra veiller aux différences de cultures professionnelles entre personnels INSU et CNES et les prendre en compte lors de la mise en place de ces équipes.

Pour le suivi des projets, la désignation d'un correspondant unique pour chaque laboratoire spatial de l'INSU apparaît utile. Cela permettrait une analyse des besoins au plus près des projets et des personnels.



Ressources humaines

MARC FERRARI ET OLIVIA VENOT

Chercheurs et enseignants-chercheurs, personnels support et étudiants sont au cœur de la recherche scientifique. Les ateliers ont abordé des questions clés pour l'ensemble de ces personnels telles que l'interdisciplinarité, les recrutements, la place croissante du numérique, l'offre de Masters nationale, la reconnaissance des activités de diffusion et valorisation, ainsi que l'élimination des biais de genre tout au long des carrières.

Les grands relevés occupent une part croissante de l'astronomie et requièrent des moyens importants en ressources humaines et budgétaires. Le travail des chercheurs impliqués dans ces grands consortia est difficile à évaluer. Pour améliorer cette situation, la politique de signature des papiers issus de ces consortia pourrait être modifiée, en explicitant le rôle de chaque membre. Concernant la rédaction des dossiers de recrutement, les contacts qu'ont les jeunes chercheurs dans les équipes d'accueil devraient jouer un rôle central d'accompagnement. Les sections de recrutement pourraient se rapprocher des responsables des grandes collaborations pour connaître l'implication réelle des candidats. Idem pour l'évaluation des chercheurs impliqués dans ces consortia. Dans le cas des enseignants chercheurs (EC), une attention particulière doit être portée sur le fait que leur plan de charge peut être trop important, enchaînant nuits d'observations et journées d'enseignement. Finalement, sur les moyens humains octroyés, la communauté ressent une inégalité entre grands relevés sol et missions spatiales.

Le recrutement des chercheurs se fait parfois via des coloriages thématiques. La communauté approuve ces recrutements mais souhaite limiter leur nombre (un par an). Le choix de ces coloriages doit être effectué avec vigilance, en regardant les besoins et les viviers de candidats.

Concernant l'interdisciplinarité, il semble préférable d'investir dans des profils hybrides au sein de nos unités, plutôt que de recruter des chercheurs d'une autre thématique. L'isolement de tels profils est un risque auquel il faut être vigilant, mais qui peut être réduit en formant des équipes interdisciplinaires d'une taille qui ne soit pas sous-critique. Une autre voie possible serait d'augmenter le nombre d'EC en Section 34 du CNU en misant sur des profils interdisciplinaires. Une attention vraiment particulière devra être portée sur la progression de tels profils qui risque d'être difficile. La création d'une Commission Inter-Disciplinaire fait vraiment débat car jugée trop rigide. Si une CID devait être

créée, la priorité se fait ressentir en Science des Données, domaine qui nécessite, par ailleurs, des ingénieurs en calcul numérique et traitement de données.

Notre communauté est consciente qu'un fort déséquilibre hommes-femmes subsiste au niveau des candidatures et des promotions et se sent très concernée par ce problème. Un groupe de réflexion devrait être mis en place pour traiter de cette problématique. Plusieurs pistes pour tenter d'attirer plus de femmes dans le milieu de la recherche existent : investir le plus tôt possible dans les études (dès le collège) pour montrer qu'être une femme et faire de la recherche sont compatibles ; mettre plus en avant les femmes dans les médias ; avancer l'âge de recrutement afin qu'il n'y ait plus un choix à faire entre vie privée et vie professionnelle. Chacun de nous ayant, y compris les femmes, des biais conscients ou non, il est souhaitable que tous (tous genres, statuts et niveaux) suivent des formations pour s'y sensibiliser. Cette solution est préférée à celle de quotas pouvant nuire à la légitimité du recrutement d'une femme. On remarque également que le faible nombre de femmes en poste engendre parfois une sur-sollicitation des femmes pour intégrer des comités. Une attention particulière doit être maintenue à ce sujet.

Pour les métiers support, la place croissante du numérique et de la science des données est particulièrement difficile à prendre en compte avec la diminution des effectifs. Le renforcement indispensable de la BAP E (Informatique, statistiques et calcul scientifique) ne peut se faire au détriment des autres métiers au cœur de notre discipline (BAP C : Science de l'Ingénieur, Instrumentation scientifique ; BAP J : Gestion et Pilotage). L'évolution des deux profils *Systèmes d'information* et *Traitement des données scientifiques* de la BAP F (Culture, Production et diffusion des savoirs, Communication), le recours à l'Assistance Technique pour certaines activités, ou la mutualisation de ces métiers au sein des OSU, sont des pistes évoquées. Concernant la BAP E, l'attractivité des centres de données, notamment le niveau de salaire trop bas par rapport au secteur privé, est un sujet d'inquiétude. L'INSU devrait explorer des solutions pour changer cet état de fait.

Les financements de thèse non attribués par les écoles doctorales (ED) (CNES, Europe, Régions, CIFRE...) représentent 50% des contrats doctoraux et la question de leur impact sur la recherche se pose. Ceux-ci sont une plus-value s'il existe un socle de bourses ED assurant l'orientation AA des recherches des laboratoires. Ils offrent de réelles opportunités mais, pour certains, leur mise en place via des cofinance-

ments, est jugée complexe. Une réflexion au niveau de l'INSU afin d'éviter le recours aux $\frac{1}{2}$ bourses serait nécessaire. L'insertion professionnelle des doctorants se faisant essentiellement hors du monde académique, ils doivent être sensibilisés à l'ensemble des opportunités de carrière. Des actions coordonnées avec les ED sont souhaitables (bilan de compétences, module professionnalisant, valorisation de leur expertise hors secteur académique). Les directrices et directeurs de thèse devront aussi être sensibilisés à ce sujet. L'offre de Master en astrophysique est perçue comme déséquilibrée en nombre d'étudiants entre Paris et les régions. L'ouverture de Masters mutualisés entre deux universités (p.ex. : Claude Bernard Lyon 1 et Montpellier) est trop récente pour évaluer sa pertinence ou sa viabilité à long terme mais apparaît cependant complexe. Pour augmenter le nombre d'étudiants, le passage à l'anglais n'étant pas *a priori* une difficulté, l'internationalisation des Masters via les universités Européennes semble plus adaptée, tout en étant vigilant aux attendus de celles-ci (grands défis, etc.). Les nouvelles Écoles Universitaires de Recherche (EUR)¹, avec des masters et doctorats adossés à des laboratoires de recherche, semblent porter une orientation très méthodologique des Masters, perçue comme un risque pour notre discipline. La communauté doit donc être proactive et proposer de nouveaux enseignements, avec des modules professionnalisants, en lien avec les écoles d'ingénieurs. Les activités de médiation scientifique font partie intégrante de notre discipline et leur reconnaissance est importante pour les personnels impliqués. Ces activités ne peuvent se faire au détriment des autres fonctions des C/EC, mais devraient figurer de manière explicite, à titre facultatif, dans l'évaluation de carrière des personnels support. La revalorisation de ces activités, intégrant les nouveaux médias et harmonisée entre les Universités et le CNAP, apparaît nécessaire. La formation des personnels intéressés doit aussi être encouragée.

1- Le contexte des EUR a beaucoup évolué entre 2019 et 2020. Elles n'existent pas dans nos disciplines, même si des programmes locaux (écoles graduées, graduate schools) portent une ambition similaire. Cependant, la recommandation de la prospective demeure toujours d'actualité.

Rôle de l'INSU/AA

AURÉLIE GUILBERT-LEPOUTRE ET MATHIEU LANGER

L'INSU a pour rôle fondamental de coordonner les recherches en sciences de la Terre et de l'Univers. C'est à ce titre qu'il construit la stratégie nationale avec ses partenaires au moyen des perspectives de domaines et s'appuie, pour son action, sur les programmes nationaux et les observatoires des sciences de l'Univers. Les exercices de prospective sont l'occasion d'échanger sur le rôle de l'INSU dans l'éco-système français et international.

Le taux de succès des projets AA présentés à L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) doit être amélioré. À cette fin, il est recommandé de travailler sur plusieurs aspects qui permettraient *in fine* de meilleures performances. Il est demandé à l'ANR une transparence équivalente à celle du Conseil Européen de la Recherche (ERC) concernant ses critères d'évaluation, la constitution de ses comités d'évaluation (qui devraient être connus *a posteriori*), ou encore leur fonctionnement, aboutissant à un retour sur les candidatures qui permette leur amélioration. Vu le faible taux de succès de manière générale, une simplification des demandes est souhaitée, notamment de leur partie administrative. Par ailleurs, il est essentiel d'augmenter la part relative du financement des programmes blancs. Enfin, il pourrait être envisagé de créer des lobbys inter-organismes pour défendre les besoins des disciplines fondamentales à l'ANR et auprès des ministères.

En ce qui concerne les performances des projets de l'INSU/AA aux appels d'offre de l'ERC, il est clair que l'existence d'un dispositif d'aide au CNRS pour le montage administratif des dossiers de candidature est appréciable. Il est cependant jugé insuffisant en tant que tel, car des besoins de conseils stratégiques et de relecture neutre et extérieure au moment du montage sont identifiés auxquels le dispositif actuel ne permet pas de répondre. En ce qui concerne les appels d'offre européens, la communauté AA a par ailleurs exprimé le besoin crucial de s'organiser, via le CNRS et ses Instituts, pour porter d'une voix au niveau de l'Europe ses spécificités. Il est sous-entendu ici un besoin de lobbying au niveau européen, en coordination avec les Cellules Europe des universités et autres établissements, en amont de l'écriture et de la publication, notamment, des appels à projets. Le bureau du CNRS à Bruxelles pourrait dans ce cadre être un outil précieux.

Le CNRS et ses Instituts ont une politique nationale qui doit ensuite être déclinée au niveau local. L'astronomie se structure de plus autour de grands projets à divers niveaux allant du local à l'international. Enfin, le Programme d'Investis-

sements d'Avenir (PIA) a décliné à l'échelon local des dispositifs qui ont contribué à complexifier le paysage institutionnel. Afin d'améliorer la communication entre les divers échelons de ce paysage multi-couches, l'INSU devrait mieux utiliser le relais que sont les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU). Les OSU sont en effet le bon niveau pour décliner la politique nationale de l'INSU et du CNRS, en toute connaissance des forces et stratégies locales. Le relais des Directeurs Scientifiques référents¹ n'est pas perçu comme efficace.

La communauté AA souhaite une éducation plus systématique à la démarche scientifique en général, et milite pour une formation systématique (ou soutenue) en astrophysique dès la licence - souhait qu'elle exprime en toute connaissance des modifications à venir de l'enseignement. Par ailleurs, elle estime qu'il revient à l'INSU de jouer son rôle fondamental en communiquant auprès du ministère et du public l'impact sociétal et économique des activités AA. Enfin, la communauté est très sensible à l'empreinte environnementale de ses activités, et souhaite vivement faire remonter auprès du CNRS sa volonté de voir aboutir les considérations suivantes : 1- se doter d'outils pour évaluer quantitativement l'impact des activités, afin d'identifier les leviers qui permettront d'établir un plan d'action concret avant de se heurter à l'horizon 2050 ; 2- la communauté a un besoin concret de faire adopter des pratiques environnementales vertueuses de l'échelon local à l'échelon international.

L'intérêt (financier, stratégique, et de consolidation des relations avec l'industrie) des activités de valorisation est reconnu par l'ensemble de la communauté. Une vraie culture de valorisation n'est cependant que fragilement ancrée au sein de l'INSU/AA. Son développement est donc souhaitable. Pour promouvoir de telles activités, il est important que l'INSU instaure en interne une communication efficace pour faire connaître les actions de valorisation qui ont été couronnées de succès. Il faut néanmoins s'assurer que les activités de valorisation ne soient pas menées au détriment des priorités scientifiques des laboratoires et de l'Institut, et qu'elles tirent bénéfice d'un accompagnement par le service partenariat et valorisation du CNRS.

¹- Les Directeurs scientifiques référents sont des directeurs d'instituts qui représentent le CNRS pour les sites.



Télescope Bernard Lyot (TBL) à l'Observatoire du Pic du Midi, Pyrénées françaises

© Cyril FRESILLON / OMP - Observatoire du Pic du midi / CNRS Photothèque

Les réseaux d'experts dotés d'une capacité d'intervention pour constituer des équipes intégrées entre laboratoires et faire croître les expertises paraissent des initiatives intéressantes. L'ensemble de la communauté s'accorde cependant pour attendre le retour sur l'expérience EFISOFT (ELT French Instrument SOFTWARE team), mise en place pour des compétences et un cadre très spécifiques, avant d'en proposer la généralisation ou l'adaptation à d'autres domaines, potentiellement nombreux. Les situations délicates, concernant notamment les carrières (évaluation, reconnaissance), susceptibles d'émerger lors de l'établissement de tels réseaux constituent un point de vigilance essentiel à exercer.

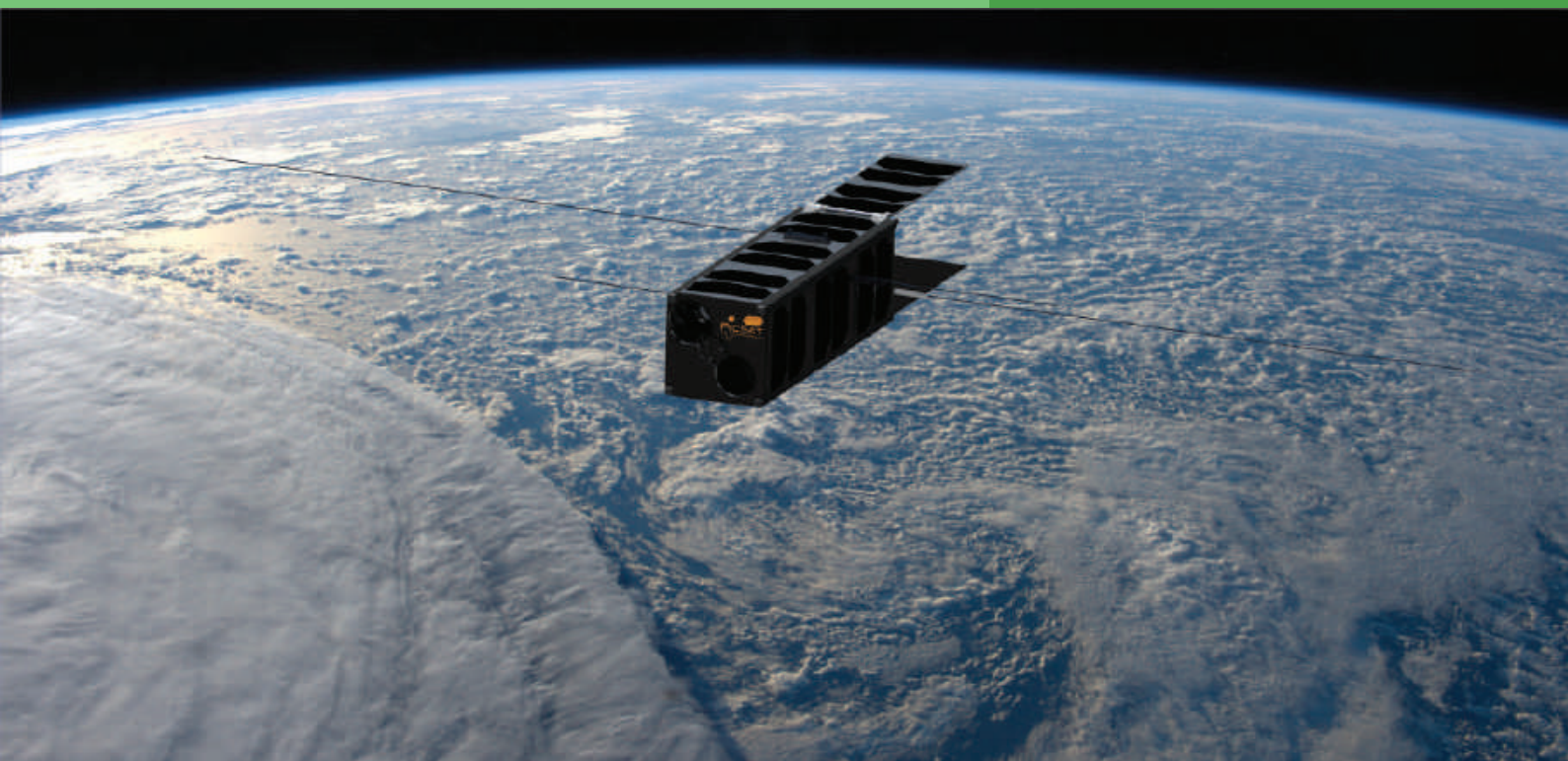
Un arbitrage entre postes de chercheurs et postes d'ITA permettant d'en stabiliser le nombre, en forte diminution depuis 10 ans, pourrait être demandé. La communauté n'a pas souhaité apporter de réponse collective à cette question, la considérant comme mal posée.

Certains équipements et dispositifs pertinents pour la communauté AA ne relèvent pas directement de la responsabilité de l'INSU mais sont du périmètre d'autres Instituts du CNRS. Il est alors pertinent de se demander si l'INSU doit venir soutenir ces Instituts pour assurer la pérennité des structures et le maintien de l'expertise associée dans les unités non AA. Dans le contexte déjà difficile pour le financement

des (TG)IR propres à l'INSU, proposer une approche unique, applicable à toutes les installations, n'est pas souhaitable. Une veille au cas par cas, des installations ainsi que des communautés concernées, est nécessaire, par exemple en s'appuyant sur les OSU. Il est cependant essentiel que l'INSU vienne en appui aux (TG)IR non-INSU lorsque les évolutions prévues pour ces derniers menacent leur utilisation au service de l'astronomie. Il est donc nécessaire que l'INSU participe, sous le regard éclairé de la CSAA, au soutien de tels équipements, à leur accompagnement, ainsi qu'à leur gouvernance et leurs comités d'utilisateurs. Il est également proposé d'instituer un ou une chargée de mission « Astrophysique de Laboratoire ».

SYNTHÈSE et conclusions

JACQUES LASKAR
ET GUY PERRIN



Vue d'artiste du nanosatellite PicSat en orbite autour de la Terre

© Lesia / Observatoire de Paris - PSL / T. Pesquet ESA / NASA

Le colloque de prospective 2019 a été une nouvelle fois l'occasion de montrer l'attachement de la communauté astronomique française, qui a su se mobiliser tout au long de l'année pour sa préparation, à cet exercice. C'est la marque du besoin d'orientations collectives pour le domaine. Cette prospective n'a pas échappé à la règle et a abordé tous les aspects de l'activité en France en lien avec nos partenariats internationaux. Ce document a déjà été l'occasion de souligner les formidables succès de ces cinq dernières années. Nous mettons ici en exergue, à l'occasion de ces conclusions, les éléments saillants du séminaire et de son année de préparation.

Un sentiment a été largement partagé, celui de la complexité du système de recherche et de la multiplicité des sources de financement, 15% des financements des unités venant des tutelles et 85% d'appels à projets. Les astronomes sont très performants à l'ERC mais les laboratoires d'astronomie font les frais de la faiblesse du programme blanc de l'ANR. Il faut militer en faveur de son augmentation pour que les financements additionnels annoncés dans le cadre de la LPR puissent bénéficier au domaine. Sans cela, l'astronomie pâtira de façon dramatique de la fin des investissements PIA sans voir pour autant les dotations des tutelles augmenter. Pour l'avenir, la décroissance de la diversité thématique des sujets de thèse avec comme effet pervers potentiel de privilégier les sujets à la mode, est un impact négatif du financement de la recherche sur projet s'il s'amplifie sans possibilité de politiques collectives. Le suivi national des docteurs par la SF2A enclenché par cette prospective sera un outil

utile pour évaluer cet effet et ses conséquences car, si l'astronomie française dispose d'un très bon flux d'étudiants, elle doit être aussi performante pour les thématiques qui ont le vent en poupe que pour la préparation de l'avenir. La parité est également un sujet pour l'avenir. La proportion de femmes astronomes reste encore trop faible (23%). Les sections de recrutement ont fait un effort ces dernières années et ont tendu vers la parité. Mais il est nécessaire d'augmenter le nombre de candidatures féminines sur le long terme. Pour ce faire et pour aussi assurer une équité des carrières, la mise en avant des femmes doit être encouragée, que ce soit pour des postes de direction ou pour des promotions ou pour leur visibilité au sein de la communauté et à l'extérieur. Il faudra rester attentif aux effets pervers d'une telle démarche qui peut engendrer une sollicitation excessive des femmes astronomes.

La complexité du système de recherche se traduit par un surcroît de travail important qui pèse sur le travail de recherche. Ce surcroît de travail est accru par la baisse concomitante des ressources IT au CNRS avec une perte de 1% par an pour le domaine ces 10 dernières années qui doit s'arrêter sous peine de mettre le domaine en danger dans son périmètre actuel. La combinaison de cette baisse avec

l'augmentation de la complexité et de la taille des projets conduit à envisager des équipes intégrées entre laboratoires et entre organismes. Des expériences dans ce sens existent déjà, comme le GIS PARADISE pour les plateformes spatiales ou la structure EFISOFT pour le contrôle-commande pour l'instrumentation ELT, et pourraient faire école. Pour les projets spatiaux, la nécessité d'équipes intégrées avec le CNES et le besoin d'une meilleure coordination CNES-CNRS-universités/établissements émerge des deux perspectives CNES et INSU/AA pour faire face à la diversité et aux nombres de projets d'excellence auxquels la France participe. Cela concerne également la gestion des moyens sol nécessaires au spatial, l'exploitation et la curation des données. Le *New Space* (nano-satellites, cubesats) doit être exploré lorsque scientifiquement pertinent, aux côtés du CNES. C'est un des domaines où la montée en puissance des sites a un effet centrifuge pour l'astronomie. Les rôles nationaux de l'INSU pour les grands projets et du CNES dans le cas du spatial doivent rester incontournables.

Les priorités pour les moyens sol sont un enjeu traditionnel fort des perspectives INSU, les priorités spatiales étant définies lors des perspectives CNES qui sont co-organisées avec l'INSU. L'ELT a été réaffirmé comme première priorité tout en restant investis dans l'instrumentation VLT dont les projets en maturation BlueMUSE, SPHERE Upgrades et Gravity+ sont des opportunités à saisir. La nécessité de la participation de la France à SKA a été clairement affirmée. L'avenir du CFHT a été une question d'importance pour cette perspective. Un fort intérêt a été manifesté pour le site hawaïen avec un schéma de transition CFHT-MSE qui permette la pleine exploitation de SPIRou-ESPaDOnS en soutien aux missions spatiales exoplanètes prioritaires ou, dans le cas d'une transition plus précoce vers MSE, avec un portage de l'instrument pour assurer le suivi sol de ces missions. Le soutien à Advanced Virgo+ pour l'astronomie gravitationnelle fait partie des premières priorités. Les discussions avec l'IN2P3 doivent se poursuivre pour l'accès au Vera Rubin Observatory et l'INSU doit par ailleurs se coordonner avec l'INP et l'IN2P3 pour participer à CMB-S4. En complément, la nécessité des moyens nationaux Nançay/NRT, Pic du Midi/TBL et OHP/T193 est clairement établie.

La communauté astronomique a une très forte tradition de développements R&D pour lever des verrous technologiques ou faire émerger des ruptures pour le sol et le spatial. Une R&D spécifique aux nano-satellites doit être entreprise pour les intégrer au corpus de missions scientifiques lorsque pertinent. La R&D, qu'elle soit instrumentale ou numérique, doit être reconnue au même titre qu'une activité de recherche scientifique. Les programmes de R&D sont coûteux et la même exigence de structuration des projets que celle des programmes instrumentaux doit leur être appliquée. Les coûts élevés doivent inciter les tutelles à se concerter en amont pour dégager des masses critiques, assurer une cohérence avec les projets et disposer des ressources nécessaires. Enfin, les ressources disponibles hors ou voisines du champ académique doivent être recherchées et les équipes de recherche doivent y être aidées par les établissements et organismes.



Le domaine AA est très pluri- et inter-disciplinaire par nature et cette caractéristique en est une des richesses. De nouveaux défis nécessitent une approche inter-disciplinaire au premier rang desquels celui des sciences des données pour lequel des collaborations sont nécessaires mais également des embauches prioritaires au moyen de coloriations ou avec la création d'une Commission Inter-Disciplinaire. Un effort en amont est incontournable pour constituer un vivier d'astronomes spécialistes, mais aussi en aval avec une structuration pour organiser et définir l'action nationale, interagir avec les centres de calcul nationaux pour le passage à l'exascale de concert avec les investissements nécessaires. Une action spécifique commune équilibrée pour le calcul haute performance et la science des données devra être mise en place. La nécessité de l'inter-disciplinarité a été rappelée au cours de l'exercice mais les difficultés en ont bien été soulignées une nouvelle fois et malgré les efforts pour la favoriser, des solutions nouvelles sont requises pour la formation et l'accueil des chercheurs aux interfaces, par exemple, permettre l'appartenance à deux UMR pour les profils interdisciplinaires.

Une des forces de la communauté astronomique française est sa capacité à communiquer sur ses résultats auprès du grand public et auprès des scolaires. Cela concerne aussi bien les chercheurs que les personnels techniques. Cette



**Les 11 antennes du radiotélescope
de l'observatoire NOEMA**

© IRAM

activité est reconnue pour les enseignants-chercheurs CNAP et CNU, elle l'est beaucoup moins pour les chercheurs CNRS ou pour les personnels support et un effort est à faire pour ces catégories de personnels. La communauté attend de l'INSU qu'il joue un rôle national également en matière de diffusion des connaissances en s'appuyant sur le réseau des OSU pour structurer des actions, mutualiser des efforts et partager des outils. Lors des ateliers du colloque de prospective, il est aussi apparu qu'une large partie de la communauté astronomique française est très sensible à l'impact environnemental de ses recherches.

L'identification des thématiques scientifiques dans lesquelles s'investir prioritairement est un des objectifs forts de la prospective. Ce travail a été fait par les programmes nationaux dont le rôle pour la structuration et l'organisation des communautés a bien été rappelé. Le pavage actuel des thématiques laissait apparaître un manque avec l'exoplanétologie qui est à cheval sur plusieurs programmes nationaux mais sans structuration. La conclusion est d'organiser l'exoplanétologie au moyen d'une structuration trans-programmes. L'organisation de l'exobiologie doit déborder le cadre de l'INSU parce que c'est une discipline très inter-dis-

ciplinaire dont l'INSU est le pilote légitime. Dans la continuité de sa participation à l'European Astrobiology Institute comme chef de file, l'INSU doit coordonner une action au niveau du CNRS en association avec les actions des sites en France. Il est enfin nécessaire de structurer le PNCG pour tenir compte de la diversité des sujets en lien avec les différents instituts (INP, IN2P3 et INSU). Les programmes nationaux existants ont été confirmés dans leurs périmètres.

L'exercice de prospective 2019 a encore une fois été d'une grande richesse et précieux pour dessiner les contours du domaine pour les 5 à 15 prochaines années. Il donne une légitimité forte aux orientations et aux souhaits de la communauté pour préparer son avenir et conserver son rang au meilleur niveau mondial.

SYNTHÈSE

des
recommandations

Groupe A • Thématiques

BENOÎT MOSSER

Le document du groupe «Thématiques» résulte des analyses de prospective des sept programmes nationaux (PN) de la discipline, établies en lien avec la Section 17 du Comité National. Comme pour les précédentes prospectives, les PN ont été invités dans un premier temps à structurer leurs réflexions selon un canevas prédéfini: Évolutions marquantes, Faits saillants, Grandes questions, Évolutions thématiques, Interdisciplinarité et Interfaces, Forces et faiblesses, Moyens et priorités, Recommandations. Ces éléments sont principalement développés dans le document complémentaire accessible en ligne.

L'ASTROPHYSIQUE AUJOURD'HUI ET DEMAIN

Bien des exemples peuvent illustrer les succès récents de l'astrophysique.

Un champ de vue élargi

De tout temps, l'astrophysique ouvre de nouvelles voies pour explorer l'Univers, tant par l'élargissement du spectre observé que par les mesures in situ. L'observation des ondes gravitationnelles ouvre une ère féconde des observations multi-messagères. La détection des contreparties

électromagnétiques à un signal en ondes gravitationnelles a ainsi permis de sonder la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons.

Un Univers qui se structure et s'agrandit

Avec *Gaia* et son catalogue (DR2), la position de 1,7 milliard d'étoiles et les vitesses de 7 millions d'entre elles sont connues. Cette avancée est représentative du poids des observations à très grande échelle, avec des performances sans rapport avec l'état antérieur et la nécessité d'un traitement massif des données.

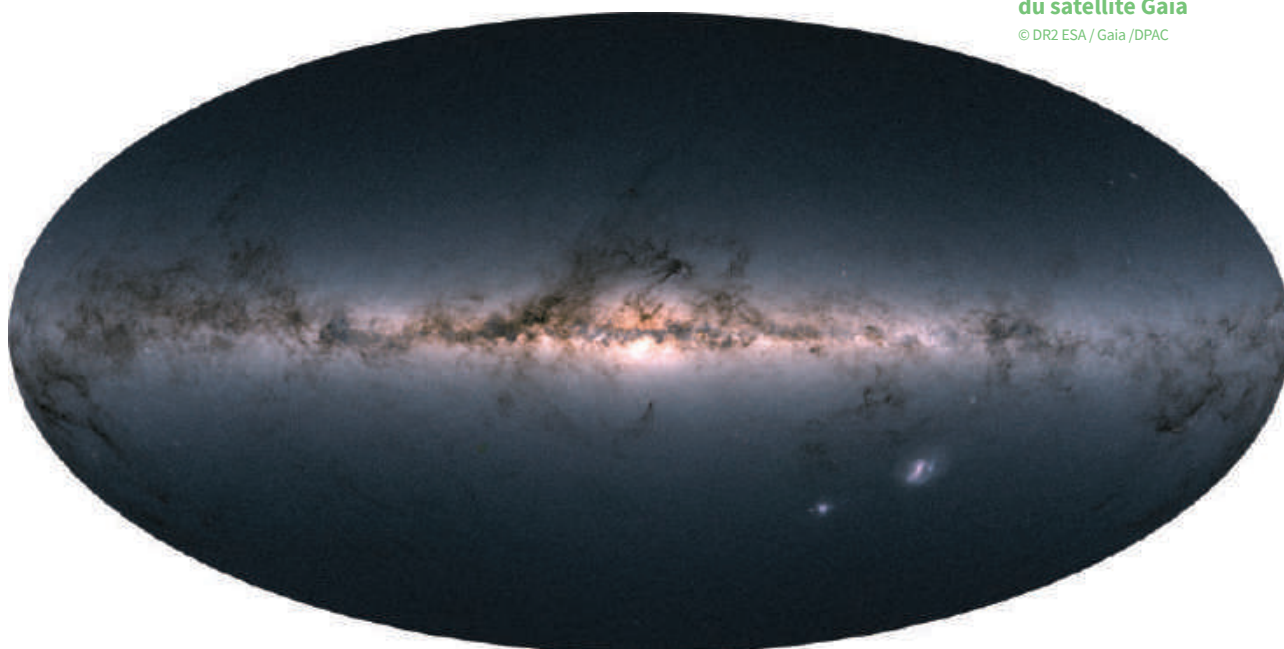
Une discipline qui innove et qui rayonne

De nombreux résultats de la mission Planck illustrent le poids des grandes collaborations, de l'innovation technologiques et de l'interdisciplinarité de notre discipline. Les propriétés polarimétriques des poussières vues par Planck apportent de nouvelles contraintes sur le milieu interstellaire et leur étude apparaît essentielle pour bien contraindre les mesures des modes B du fond cosmologique.

À un horizon de quinze ans, ce sont les projets lancés ou en gestation aujourd'hui qui ouvriront de nouvelles fenêtres

**Carte du ciel construite
à partir des données
du satellite Gaia**

© DR2 ESA / Gaia / DPAC



sur l'Univers. L'ELT apportera des contraintes extraordinairement précises en termes de résolution angulaire. CTA ouvrira une nouvelle fenêtre sur les très hautes énergies et la communauté française jouera un rôle de premier plan dans l'étude de phénomènes violents, tels que les sursauts gamma, grâce à la mission SVOM. SKA révolutionnera notre connaissance de l'univers radio. Euclid mesurera la distribution de matière noire sur le ciel par effet de lentille. L'univers gravitationnel sera dévoilé avec les observations multi-messagers et la mission LISA. Athena étudiera la physique des grandes structures, des trous noirs supermassifs et des résidus de supernovae. Avec PLATO, les âges des étoiles et des systèmes planétaires seront contraints à mieux que 10%... La caractérisation des atmosphères exoplanétaires sera devenue un enjeu essentiel des prochaines années grâce à de nombreux instruments sol et espace. Les missions Parker Solar Probe et Solar Orbiter seront au cœur des études des mécanismes de génération et d'accélération du vent solaire.

STRUCTURATION DES THÉMATIQUES ET ORGANISATION DE LA DISCIPLINE

Le rôle des programmes nationaux est crucial pour notre discipline: ils structurent et animent des communautés autour de thématiques données; ils permettent l'incubation de projets. Les programmes couvrent l'ensemble des thématiques astrophysiques, avec un dialogue riche aux interfaces astrophysiques et interdisciplinaires au-delà du champ de l'astrophysique, en lien avec les autres instituts du CNRS. C'est avec des moyens limités que les programmes jouent ce rôle de structuration des communautés. Réparti sur les projets importants de la communauté, ce budget fédère les actions de chaque discipline. Pour interagir avec les communautés, les PN doivent continuer d'accueillir les différents projets de ces communautés et les encourager. Ils promeuvent ainsi l'innovation et irriguent les projets à petite échelle de notre discipline structurée par les grands projets.

ÉVOLUTIONS THÉMATIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES

Les évolutions rapportées par les PN dévoilent les vecteurs les plus féconds d'évolution thématique. La cartographie de la géométrie de l'Univers, l'accès généralisé à la distance des objets de la Galaxie, les observations multi-longueurs d'onde et multi-messagers, l'analyse des retours d'échantillons, la caractérisation des exoplanètes, les conditions d'émergence de la complexité moléculaire jusqu'à la vie... vont, entre autres, structurer la discipline dans la décennie à venir. Ces évolutions thématiques vont s'appuyer sur la production et l'exploitation massive de données et l'obtention de simulations multi-échelles spatiales et temporelles. Les évolutions thématiques s'accompagnent donc de pro-

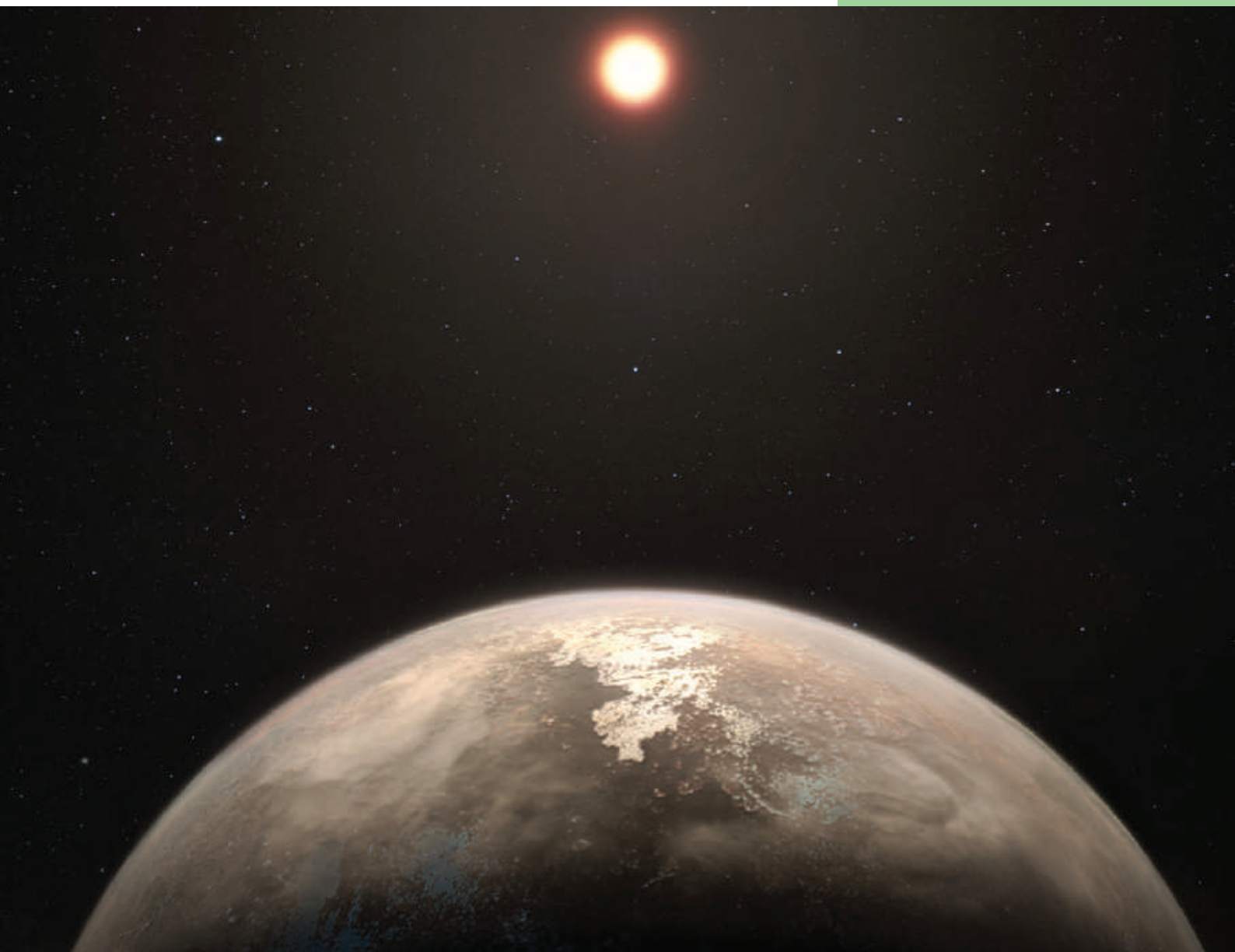
fondes évolutions méthodologiques et requièrent des expertises nouvelles de la part des équipes. Elles entraînent également des évolutions dans les interactions de la discipline, illustrées par exemple par la thématique des observations multi-messagers qui amplifie les interactions de notre discipline avec la physique des ondes gravitationnelles également traitée par l'INP et l'IN2P3.

EXOBILOGIE

Une réflexion propre à l'exobiologie faisait partie de la lettre de cadrage du groupe. Cette discipline regroupe les questions fondamentales sur l'émergence, l'évolution de la vie et sa distribution sur Terre et ailleurs dans l'Univers. Depuis 1995, la découverte de milliers d'exoplanètes a imposé un nouveau paradigme: celui d'un ciel rempli de planètes susceptibles, pour certaines, d'avoir de l'eau liquide à leur surface. Cette révolution de l'astronomie élargit l'horizon de la recherche de la vie dans l'Univers au-delà de l'exploration martienne en cours et de la découverte d'océans à l'intérieur de certaines lunes glacées des planètes géantes. Il est recommandé que l'INSU joue un rôle moteur dans la structuration de l'exobiologie via la création d'une structure inter-instituts pour prendre en compte tous les aspects concernés et accompagner les initiatives locales.

INTERDISCIPLINARITÉ ET INTERFACES

L'examen des relations entre PN et des PN avec les autres instituts du CNRS montre l'importance des interfaces et de l'interdisciplinarité pour l'astrophysique. Pour gérer les interfaces entre PN, ces derniers ont identifié les domaines concernés et proposé différents types de gestion, principalement selon trois modes: 1) un PN gère et organise les échanges thématiques en son sein; 2) deux ou plusieurs PN définissent une thématique commune co-organisée et co-gérée; 3) un domaine à l'interface acquiert une importance telle qu'il s'émancipe des PN dont il est issu et prend son autonomie. Ces scénarios permettent une continuité de gestion tout en assurant une taille optimum à chaque PN. Les interactions interdisciplinaires qui, par définition, nécessitent un dialogue avec les autres instituts du CNRS, sont motivées par différents leviers. L'astrophysique a régulièrement besoin des recherches de pointe portées par les autres disciplines. En retour elle propose des champs d'application inédits à d'autres thématiques. Les priorités scientifiques de chaque discipline évoluant, il est important de montrer à quel point les échanges inter-communautés à égalité sont féconds pour chaque partie et leur permettent de progresser par ce qu'apporte l'autre domaine. L'interdisciplinarité nécessite, pour les nombreux programmes interdisciplinaires qui sortent du cadre de l'INSU, de mettre en place et/ou de maintenir un bon niveau d'échange et de dialogue inter-instituts.



Les interfaces entre instituts n'ont pas le même niveau de maturité. Par exemple, de nombreux champs disciplinaires à l'interface entre INSU et IN2P3 (matière noire, énergie noire, ondes gravitationnelles, astronomie multimessagère, cosmologie) montrent des interactions tellement intriquées qu'il est nécessaire, dans un premier temps, de remettre à plat les rôles de chaque institut afin ensuite de formaliser plus efficacement les interactions entre instituts et permettre à chacun de jouer sa partition et d'agir ensemble vis-à-vis des partenaires internationaux.

La recherche astrophysique des années à venir continuera à s'appuyer sur le rôle structurant des programmes. La réalisation des projets, ambitieux et à grande échelle, va aussi entraîner la montée croissante d'interdisciplinarité avec de nouveaux partenaires de l'INSMI, de l'INS2I, et de l'INSIS.

Groupe B • Moyens

STÉPHANE CHARLOT

La recherche astrophysique en France s'appuie sur des infrastructures nationales et internationales comptant des stations d'observation au sol dans un vaste domaine de longueurs d'onde et opérant en synergie avec les missions spatiales, des plateformes instrumentales, des moyens d'astrophysique de laboratoire et des moyens de calcul et de traitement, archivage et diffusion des données.

INSTRUMENTATION SOL ET COMPLÉMENTARITÉ SOL-ESPACE

Instrumentation sol millimétrique et radio

Après l'entrée de SKA en tant que projet sur la feuille de route des TGIR en 2018, la priorité est à présent qu'il y soit inscrit pleinement avec un financement à la clé.

Les moyens humains et matériels nécessaires à l'exploitation scientifique des télescopes de l'IRAM doivent être évalués par l'INSU, et le budget de l'antenne 12 consolidé. Par ailleurs, il convient de soutenir l'exploitation scientifique de NenuFAR, son intégration dans le télescope international LOFAR2.0 et l'archivage pérenne de ses données; l'opération du NRT doit être pérennisée pour 15 ans, avec un plan de jouvence.

Il faudra aussi un réengagement de l'ESO dans APEX pour garantir un retour sur investissement des instruments sub-mm ArTéMIS/ArINCA et CONCERTO.

Enfin, une collaboration entre l'INSU, l'IN2P3 et l'INP sera nécessaire pour impliquer la communauté française dans le développement des sites CMB américains de phase S4, sur la base de ses savoir-faire en technologie des détecteurs et en traitement des données.

Instrumentation sol optique

La priorité est d'assurer le financement de l'instrumentation ELT et de consolider le PI-ship français de MOSAIC, tout en continuant de développer des instruments VLT/I complémentaires. Pour ne pas compromettre ces priorités phares de la communauté, la CSAA de l'INSU devrait pouvoir octroyer un budget annuel de l'ordre de 1 M€ à l'IR Instrumentation ESO. L'accord cadre INSU/ONERA reste un outil essentiel aux développements des optiques adaptatives des instruments.

La continuité de l'exploitation du site du CFHT à long terme est une autre forte priorité, qui présente un intérêt stratégique majeur en permettant de maintenir un accès français

à un grand télescope hors ESO. Le projet MSE de nouveau télescope de 11 m pour ce site permettra le suivi spectroscopique des missions spatiales Gaia et Euclid, mais l'actuel instrument SPIRou gardera un intérêt scientifique majeur jusque vers 2030, notamment pour le suivi de la mission PLATO. La transition vers MSE au sein du TGIR CFHT devra concilier ces intérêts. L'accès aux données du Vera Rubin Observatory, auquel contribue l'IN2P3, est également d'intérêt majeur pour la communauté INSU et doit être sécurisé. Les besoins en suivi spectroscopique sol pour la mission Gaia et les missions spatiales de détection d'exoplanètes (TESS, CHEOPS, PLATO, ARIEL) justifient le maintien en opération des stations d'observation nationales (OHP et TBL) à l'horizon 2030.

La métrologie Temps-Fréquence est un domaine d'expertise française. Le développement de l'Observatoire Fondamental de Géodésie de Tahiti est à instruire, tandis que la pérennisation du réseau fibré REFIVEME+ permettra de maintenir les performances des moyens nationaux au meilleur niveau mondial.

Instrumentation sol hautes énergies et astronomie multi-messagers

La communauté des hautes énergies doit consolider ses efforts sur les logiciels d'analyse de CTA et renforcer l'animation scientifique autour de ce projet phare.

Il est également important que se poursuive l'organisation d'une véritable communauté à l'interface INSU/IN2P3 autour des questions astrophysiques ouvertes par l'émergence de l'astronomie gravitationnelle; les mises à jour instrumentales planifiées pour *Advanced Virgo* doivent être soutenues.

Enfin, la France doit relever le défi du suivi multi-longueurs d'onde et multi-messagers des phénomènes transitoires, le nombre d'alertes devant augmenter massivement dans les années à venir. Plusieurs communautés (CTA, SVOM, VRO, précurseurs SKA, Virgo, KM3NeT, etc.) doivent ainsi développer des moyens communs de recherche et suivi de contreparties, et en particulier prendre position pour le suivi spectroscopique, car la communauté internationale s'oriente vers des instruments dédiés (ESO/SOXs, La Palma/NTE).

Complémentarité sol-espace

En sus du suivi sol des missions «exoplanètes» et des contreparties de phénomènes transitoires (cf. ci-dessus), les données photométriques et spectroscopiques indis-

pensables à la détermination et la calibration des *redshifts* photométriques de la mission spatiale Euclid doivent être sécurisées en toute première priorité. Cela nécessitera l'achèvement du relevé photométrique CFIS au CFHT, ainsi qu'un accès aux données du Vera Rubin Observatory.

La communauté française doit par ailleurs rester fortement mobilisée dans la préparation des missions ATHENA et LISA, qui seront lancées après 2030.

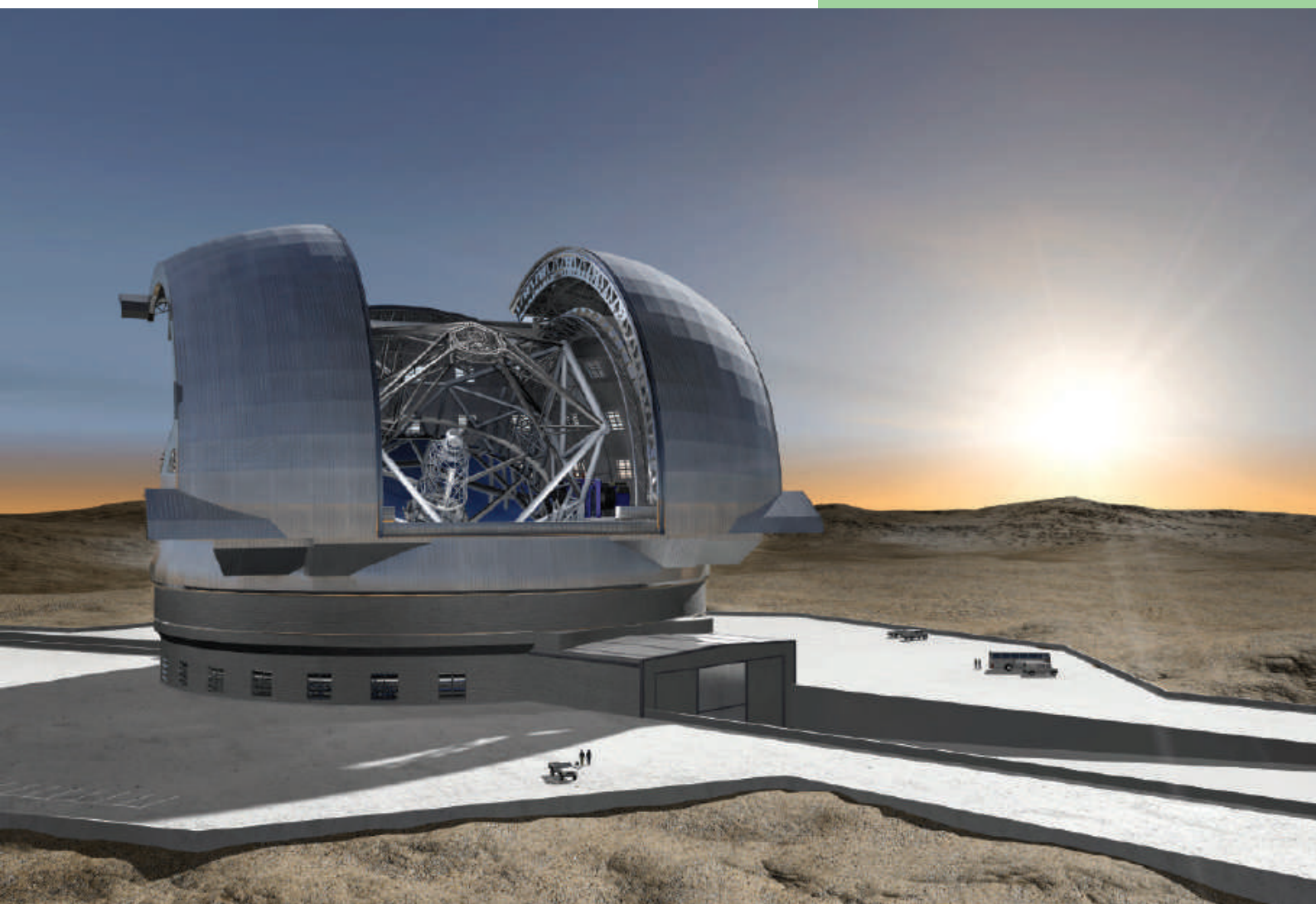
Enfin, il est important de maintenir les moyens sol (radio-télescopes, spectrographes, coronographes, radars hautes fréquences, etc.) en complément des missions « Soleil, héliosphère, magnétosphères », dont Solar Orbiter et TARA-NIS, pour permettre l'exploitation de ces missions.

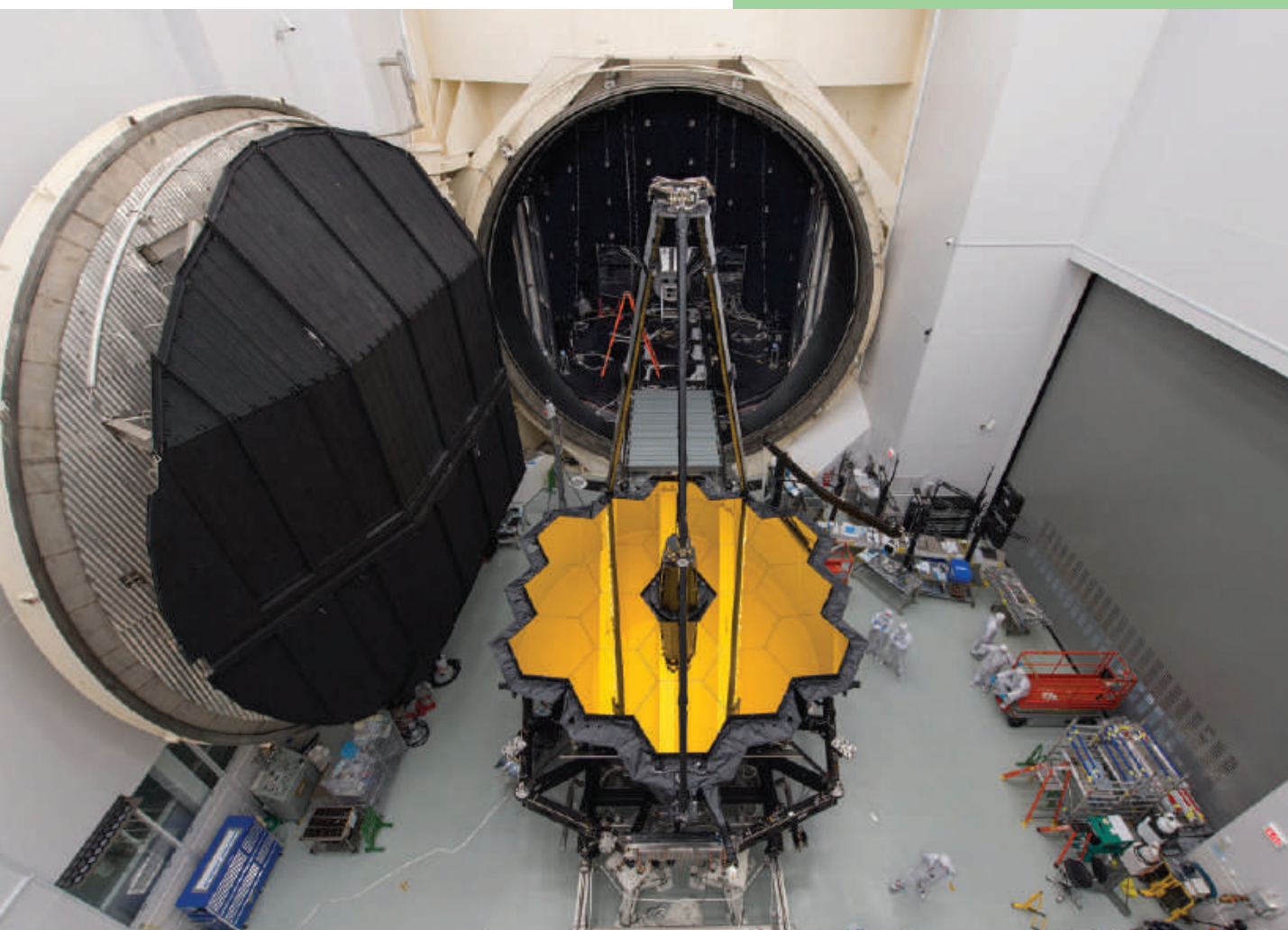
Moyens d'astrophysique de laboratoire

L'astrophysique de laboratoire à l'INSU est fortement ancrée dans les activités d'observation et de modélisation en planétologie et astronomie, ainsi que dans le service et la mise à disposition de données expérimentales. Il faut préserver ces compétences et aider les équipes de taille sous-critique. Les activités en appui à la préparation et l'exploitation des observations de grands projets doivent être soutenues, et le fonctionnement et la jouvence des équipements assurés. En profondeur, l'accompagnement de la discipline nécessite une réflexion impliquant les programmes nationaux et prenant en compte les interfaces entre différents Instituts

Vue d'artiste de l'Extremely Large Telescope (ELT)

© ESO / H. Zodet





**Le James Webb Space Telescope (JWST)
en phase de test**

© NASA / Desiree Stover

(notamment l'INP pour l'accès aux TGIR de la physique, l'INC etc.) et l'évolution des grandes infrastructures comme les sources de lumière et d'ions et les lasers intenses.

Moyens de plateformes instrumentales

Le GIS PARADISE, qui regroupe l'essentiel des plateformes instrumentales INSU/AA, constitue un modèle à suivre. Les laboratoires possédant déjà d'autres plateformes doivent mieux faire connaître leurs équipements au sein de la communauté, tandis que les laboratoires possédant des équipements « plateformeables » devraient analyser la possibilité de rendre ceux-ci accessibles selon leur état, la nécessité de jouvence et les besoins en ressources humaines.

Une priorité est la constitution de plateformes autour des moyens d'atelier mécanique, afin de sécuriser la transmission des savoir-faire, tout en assurant la solidité des parcs machines. Il est proposé de créer des pôles INSU de fabrication au niveau national et régional en étroite coordination avec les OSU.

Moyens numériques

Une action spécifique pour les simulations numériques aiderait la communauté concernée à se structurer et réfléchir à une stratégie de développement de codes de nouvelle génération. En parallèle, un groupe *ad hoc* de la CSAA devrait engager une réflexion autour des solutions matérielles, humaines et logicielles communes au traitement des données à l'ère du *Big Data*.

D'autres évolutions souhaitables sont la labellisation de codes communautaires en tant que services d'observation et la mise en place de solutions de traitement des données propres au domaine AA ou mutualisées (par exemple avec l'IN2P3).

Enfin, l'activité des pôles thématiques nationaux devrait être ré-examinée par la CSAA.

TABEAU 1 : SYNTHÈSE DES PRIORITÉS SUR LES MOYENS NON ENGAGÉS D'INSTRUMENTATION SOL, ARRANGÉS EN CATÉGORIES **P0 (INDISPENSABLES), **P1** (NÉCESSAIRES) ET **P2** (SOUHAITABLES).**

Priorité	Justification	Thématiques cibles	Missions spatiales engagées en synergie avec le moyen sol
INSTRUMENTATION ELT			
P0	1 ^{re} priorité de la communauté. Instruments d'intérêt: HARMONI (engagé, INSU Co-PI) MICADO (engagé, INSU Co-I) MAORY (engagé, INSU Co-I) METIS (engagé, CEA Co-I) MOSAIC (P0 : INSU PI) HIRES (P1 : INSU Co-I, à renforcer) PCS (à mûrir)	Planètes, système solaire, exoplanètes, disques protoplanétaires, systèmes stellaires denses, physique stellaire, cycle de la matière, variations des constantes fondamentales, accélération de l'Univers, populations stellaires, formation et évolution des galaxies, milieu intergalactique, réionisation	PLATO, CHEOPS, TESS, ARIEL, JWST, Euclid, WFIRST, Athena, SVOM
INFRASTRUCTURES DE TYPE TGIR			
P0: SKA	Apport d'un saut technologique (sensibilité, champ de vue instantané, multiplexage, etc.) permettant des avancées considérables sur un ensemble de thématiques très variées et d'intérêt majeur pour la communauté.	Aube cosmique, réionisation, évolution des galaxies et grandes structures, milieu interstellaire, disques protoplanétaires, formation stellaire, champs magnétiques, objets compacts, ciel transitoire, physique fondamentale, ondes gravitationnelles <i>via</i> les pulsars	JWST, Euclid, LISA, SVOM, Athena
P0: Maintien de l'accès au site du CFHT à long terme	L'accès à un grand télescope hors ESO sur le meilleur site au Nord est une priorité stratégique majeure, via une prolongation de l'exploitation du CFHT et de ses instruments ou une évolution potentielle vers MSE.	Archéologie galactique, populations stellaires, évolution des galaxies, cosmologie	Gaia, Euclid, WFIRST, Athena, PLATO, CHEOPS, TESS, ARIEL
P1: EST	Un engagement plus en adéquation avec la taille de la communauté concernée doit être envisagé.	Physique solaire	Parker Solar Probe, Solar Orbiter
PARTICIPATION À DES INFRASTRUCTURES MULTILATÉRALES			
P0: CMB-S4	La communauté française ayant acquis un savoir-faire en technologie des détecteurs et en traitement des données Planck doit participer au développement des sites CMB américaines de phase S4.	Détection des modes B de polarisation du CMB, tests des modèles d'inflation, distribution de la matière noire, étude des avant-plans.	LiteBIRD

NOUVELLE INSTRUMENTATION SUR INFRASTRUCTURES EXISTANTES			
P0 : VLT/I	Les projets BlueMUSE, SPHERE Upgrades et GRAVITY+ pourront valoriser le savoir-faire français dans le cadre des prochains appels d'offres de l'ESO.	Chevelures de comète, exoplanètes, disques circumstellaires, trou noir Sgr A*, populations stellaires, cycle de la matière, milieu circumgalactique, galaxies à faible brillance de surface, accrétion de gaz froid, formation stellaire dans les galaxies distantes, réionisation	PLATO, CHEOPS, TESS, ARIEL, JWST, Euclid, WFIRST, Athena
	VLT/MAVIS (P1 : faible implication française, sur l'optique adaptative ; ressources humaines en tension avec l'instrumentation ELT)		
P0 : upgrades Virgo	Deux phases d' <i>upgrade</i> permettront à (<i>Advanced</i>) Virgo de rester compétitif jusque vers 2025.	Ondes gravitationnelles : binaires étoiles à neutrons et trous noirs stellaires, cosmologie, physique fondamentale	LISA, SVOM, Athena
PROJETS À PLUS LONG TERME DONT IL FAUT SOUTENIR LA PRÉPARATION			
P1 : Einstein Telescope	Projet complémentaire de LISA, très intéressant mais pas encore mûr. Le design est à consolider, en particulier pour ce qui concerne la localisation des sources.	Ondes gravitationnelles : étoiles à neutrons, trous noirs stellaires et de masse intermédiaire, supernovæ gravitationnelles, cosmologie, physique fondamentale	LISA, SVOM, Athena
P2 : GRAND	La phase R&D en cours, à soutenir, devra démontrer les performances de la technique de radiodétection. Le projet phare de la communauté française des neutrinos est KM3NeT, principalement porté par l'IN2P3 avec une très faible participation de l'INSU.	Neutrinos de très haute énergie : accélérateurs cosmiques, neutrinos cosmogéniques	SVOM, Athena

Groupe C • *Articulations Europe/national/local*

ANNE-MARIE LAGRANGE

LE RÔLE STRUCTURANT DE L'INSU ET DU CNRS

L'astrophysique est très structurée au niveau national. L'INSU joue un rôle fondamental dans l'organisation de la discipline, dans l'exercice de prospective dont ses grandes priorités découlent, dans l'apport et la coordination des moyens financiers et humains de la recherche, en particulier des développements instrumentaux sol ou espace ou logiciels qui occupent une place importante et apportent une forte visibilité nationale et internationale. En Europe, l'INSU a joué un rôle important dans la mise en place d'Astronet et l'exercice de prospective européen des années 2000. Il est essentiel que l'INSU reste moteur dans le processus de mise à jour de la prospective européenne.

DES FINANCEMENTS EN ÉVOLUTION ET MULTIPLES

Le financement de la recherche a significativement changé au cours des dernières années, tant par sa nature (projets limités dans le temps, portés par des chercheurs plutôt que via le soutien de base récurrent) que par la diversification des sources de financement, aux niveaux national et européen. Pas moins de 18 sources ont été identifiées, et en moyenne, les dotations récurrentes représentent 15% du budget des unités. Ces évolutions ont un impact direct sur les activités et outils de recherche, à l'exception des TGIR qui sont financées dans un autre cadre.

On constate aujourd'hui une grande hétérogénéité dans le financement local (universités, villes, régions, Programme d'investissements d'avenir). L'apparition des IdEx et ComUE a mené à un changement de paradigme en renforçant le rôle des universités dans le financement des projets de

recherche. Beaucoup d'unités ont ainsi bénéficié de financements LabEx, IdEx, EquipEx. La perte de souveraineté - pourtant prévue - des LabEx, plongés désormais dans les IdEx peut conduire à leur disparition. La fin prévue des EquipEx est également un sujet de préoccupation.

Les ANR sont des financements appréciés, donnant des moyens pour des percées scientifiques importantes et maintenir un excellent niveau dans la compétition internationale. Elles sont cependant trop peu nombreuses. Il est crucial de jouer sur deux leviers : (i) renforcer significativement le budget de l'ANR et la part du programme blanc ; (ii) augmenter le nombre de demandes soumises pour créer un cercle vertueux bénéficiant à tous.

Les porteurs de projets de taille inférieure à celle des ANR doivent faire appel à des financements multiples (nationaux et locaux), ce qui est peu efficace et lourd alors que les montants concernés sont faibles. Un accompagnement national (INSU, CNRS) à un niveau de financement intermédiaire entre ceux des programmes nationaux et des ANR est souhaitable. Il est par ailleurs souvent difficile de démarrer des programmes longs. Des financements pluriannuels avec jalons seraient souhaitables.

Les programmes européens (H2020, ITN, ERC) représentent aujourd'hui une manne financière permettant de développer des projets ambitieux de recherche en astrophysique. Même s'ils ne concernent qu'un nombre limité de chercheurs et peuvent parfois être compliqués à gérer par les laboratoires, les ERC sont une source incontournable et importante de financement et de visibilité. Davantage de demandes doivent être déposées, et le CNRS/INSU et les autres tutelles devraient renforcer leurs actions en matière d'information, en particulier sur les appels d'offre, d'accompagnement (préparation des dossiers et entretiens), voire de lobbying.



Des outils de collaborations internationales existent pour certains pays. Les soutiens vont cependant rarement au-delà de financements de missions, à quelques exceptions près (chaires de chercheurs invités). Afin de développer l'ouverture vers l'international, le CNRS devrait aider davantage les arrivants internationaux et développer des bourses de thèses partagées.

Les UMR en capacité de fournir des prestations externes ne trouvent pas toujours le cadre contractuel adapté pour gérer au mieux les personnels nécessaires. Une solution proposée est que les tutelles universitaires engagent un ou des CDI auto-financés par les prestations, créant ainsi un mécanisme vertueux profitable au monde socio-économique, valorisant les investissements et créateur d'emplois qualifiés. De tels CDI seraient de plus en position idéale pour être recrutés à terme sur des emplois statutaires.

UNE MEILLEURE ARTICULATION DES DIFFÉRENTES ÉCHELLES DE FINANCEMENTS

Les unités disposent d'outils d'échanges avec les tutelles sur les besoins financiers et humains : demandes Dialog, Dialogue objectifs/ressources (DOR). Dialog est perçu comme chronophage et peu utile *in fine* du fait des faibles possibilités de financement et des difficultés de recrutements. Le DOR est perçu comme indispensable et devrait être plus fréquent (tous les deux ans). Il devrait également se traduire par des engagements pluriannuels fermes de la part des tutelles.

Beaucoup de grands projets et de réalisations instrumentales s'inscrivent dans un cadre européen ou international et l'INSU est la plupart du temps indispensable à leur montage et leur suivi. Il faudrait rendre réellement opérationnels les contrats de site signés entre le CNRS et les universités, avec un engagement clair et quantifié (budget, ressources humaines) des tutelles pour garantir la convergence et cohérence des actions au service des priorités de la communauté. Une implication directe du Directeur adjoint scientifique Astronomie-Astrophysique de l'INSU est très souhaitable dans ce processus.

Le CNRS/INSU doit aussi assurer une meilleure diffusion des priorités de la communauté au niveau des universités via les OSU. Ce qui est parfois perçu comme un manque de vision globale des universités de l'éco-système astronomie astrophysique, de ses priorités nationales, de ses (grandes) infrastructures de recherche peut, sinon, conduire à des incohérences entre priorités nationales et choix locaux, à une dispersion contre-productive des moyens et à des situations compliquées à gérer sur le terrain.

L'ANR doit être mieux informée des priorités de la discipline pour orienter de façon cohérente ses propres appels d'offre et définir ses critères d'évaluation. À ce titre, il serait souhaitable que l'ANR ait connaissance des synthèses des prospective astronomie et astrophysique, astroparticules

et CNES. La Commission Spécialisée Astronomie-Astrophysique de l'INSU pourrait certainement jouer un rôle utile dans ce processus (participation au jury). L'INSU pourrait aussi proposer un nombre limité de fléchages correspondant aux priorités de la communauté. La communauté pourrait ainsi s'organiser pour répondre efficacement à ces fléchages.

Groupe D • *Astronomie spatiale*

NABILA AGHANIM

Comprendre les processus astrophysiques nécessite une approche observationnelle globale. De par leurs spécificités, les observations depuis l'espace revêtent un rôle essentiel. En effet, l'espace permet d'accéder à des domaines de longueur d'onde inaccessibles ou difficilement accessibles comme l'Infrarouge ou encore les hautes énergies (ultra-violet, X ou gamma). Il procure un environnement propice pour les observations requérant une très grande stabilité sur de longues périodes. Les instruments embarqués permettent des mesures en microgravité nécessaires pour tester la théorie de la gravité, mais aussi pour mesurer in situ des environnements tels que les plasmas spatiaux ou les objets planétaires. Grâce à leurs spécificités, les observations spatiales contribuent à répondre à des questions fondamentales sur l'origine et l'évolution de l'Univers et des objets astrophysiques, cibler des objets, échelles, époques ou traceurs de l'apparition de la complexité et la diversité dans l'Univers, tester les lois et processus physiques qui régissent l'Univers.

L'importance des observations spatiales implique qu'une majorité des laboratoires INSU/AA ont des activités spatiales financées par le CNES. Elles diffèrent selon que les laboratoires utilisent des données spatiales ou qu'ils disposent de compétences instrumentales ou logicielles pour produire ces données. La communauté française se caractérise, ainsi, par une très forte implication dans des missions de premier plan de l'ESA, du CNES ou en bilatéral avec la NASA, la JAXA, la Chine. Il conviendra de veiller à ce que le CNES et le CNRS assurent le soutien nécessaire pour consolider les participations aux missions engagées et optimiser l'exploitation scientifique. La recherche de moyens complémentaires par la communauté est déjà une réalité. Elle devra être accompagnée via la participation du CNRS à la définition des appels d'offres nationaux et européens.

Le NewSpace constitue une mutation importante du paysage du spatial. Pour notre communauté, il se traduit par l'apparition de nouvelles offres de lanceurs et de petites plateformes peu coûteuses (~2 M€ en coût externe), telles que les cubesats (définis en nombre d'unités avec $1U=10\text{cm}^3$). La possibilité offerte par les cubesats de répondre aux besoins observationnels (par exemple mesures *in situ*, continuité temporelle, etc.) est une nouvelle opportunité qui devra être discutée au CNES, avec l'INSU/AA, selon les mêmes critères que les missions d'opportunité. Les réductions de coût du NewSpace n'ayant pas encore démontré leur intérêt d'un point de vue du retour scientifique,

le groupe recommande que la communauté soit vigilante quant à la multiplication des projets cubesat. Le NewSpace se traduit aussi par la création de Centres Spatiaux Universitaires. Le groupe recommande la mise en place d'une structure légère de coordination de ces Centres impliquant les universités, l'INSU/AA et le CNES.

Les projets spatiaux, de par leur taille et complexité, nécessitent une collaboration étroite et un réel partenariat entre le CNRS, le CNES et le CEA ainsi que les universités. Le renforcement des relations entre les laboratoires et le CNES, mais aussi entre laboratoires, à toutes les étapes des projets apparaît comme l'une des principales clés pour optimiser la conduite des missions spatiales. Dans ce cadre, le groupe propose quelques pistes :

- En amont des sélections dans les étapes préparant la communauté à son implication dans les missions spatiales, la R&T est cruciale. Le groupe recommande de définir des axes R&T stratégiques en vue d'actions à mener pour augmenter la maturité technique et identifier les opportunités de synergies avec les démonstrations sur des moyens sols. Une concertation renforcée des développements pour les moyens sol et espace est souhaitable.
- L'étape de montage de projet (Phases 0/A) est cruciale pour s'assurer que les forces et les compétences sont rassemblées et définir la répartition des rôles ainsi que les responsabilités des différents acteurs (celle-ci peut évoluer lors des Phase B, puis C/D). Le groupe recommande vivement la mise en place de Comités de montage rassemblant les directeurs d'unités, le CNRS, le CNES, le CEA et les universités. Ce Comité devra aborder la définition du périmètre complet de la mission en y incluant les moyens d'accompagnement sol (moyens de calculs et traitement de données, accès aux télescopes sol, expériences relevant de l'astrophysique de laboratoire). Le comité de montage permettrait d'anticiper sur les moyens, notamment humains, à mettre en place et définir les modes de communication et de décision en cas de désaccord.
- Les missions spatiales labellisées dans l'ANO2, Action Nationale d'Observation « Instrumentation », occupent une part importante des activités de service de la communauté. L'organisation en nombreux instruments indépendants, pour les missions dans le domaine Soleil-Héliosphère-Magnétosphère et la Planétologie, nuit à la lisibilité de l'ANO2. Le groupe recommande de réfléchir à généraliser l'organisation par mission plutôt que par instrument. Le cas échéant, les Services de missions spatiales devront considérer les activités liées aux observations de suivi sol complémentaires cruciales (qui conditionnent la réalisation



Vue d'artiste de la sonde Hayabusa-2 de la JAXA à l'approche de l'astéroïde Ryugu

© Akihiro Ikeshita

tion des objectifs scientifiques principaux), afin d'assurer une coordination optimale entre les télescopes spatiaux et sol.

- La préparation des segments sol des missions spatiales devrait être initiée et discutée entre les partenaires peu après la labellisation des Services ANO2, en début de Phase B, avec une réflexion sur leur possible basculement après lancement en ANO4 (« Grands Relevés ») ou ANO5 (« Traitement et diffusion des données »). L'augmentation des ressources nécessaires pour l'exploitation des données implique des financements complémentaires. Nous recommandons que CNES et CNRS mènent des actions pour la définition des contours des appels d'offre de l'ANR et de l'Union Européenne.

La prospective parallèle du CNES et de l'INSU/AA a permis de réaffirmer que la coordination entre les différents acteurs, dès les premières phases de montage et durant toutes les étapes jusqu'à l'exploitation scientifique, est un maître-mot du succès des missions. La fédération des efforts, notamment les moyens lourds, des laboratoires est l'une des clés du succès. À titre d'exemple, l'organisation en réseau des moyens de tests et d'intégration des laboratoires « spatiaux » instrumentaux, GIS PARADISE, est à saluer et à renforcer. Une réflexion est à mener sur les synergies possibles entre les moyens pour l'analyse des retours d'échantillons astéroïdaux et ceux pour l'analyse cosmo-géochimique des

autres thématiques de l'INSU. La coordination continue entre INSU/AA et CNES assurera la reconnaissance mutuelle des compétences et permettra de construire un partenariat encore plus fort. Elle s'accompagne de la nécessaire mise en place d'outils de gestion pour que l'INSU facilite sa gestion de l'engagement de la communauté dans les projets spatiaux et mette en valeur ses contributions.

Groupe E • *R&D pour les moyens du futur*

JEAN-PHILIPPE BERGER

UNE R&D AU SERVICE DE L'ASTRONOMIE

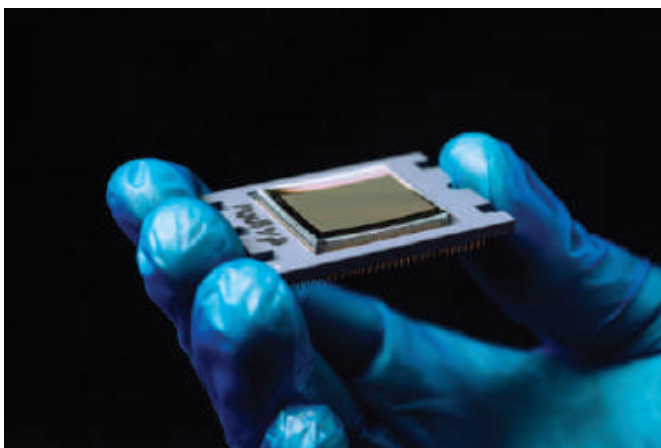
L'astronomie en France a toujours su combiner objectifs scientifiques ambitieux et recherche instrumentale dynamique et innovante. Les programmes de recherche et développement (R&D) de nos laboratoires contribuent à des instrumentations multi-messagers ayant peu d'équivalentes dans le monde.

R&D ET GRANDES INFRASTRUCTURES

Le succès scientifique de nos grandes infrastructures repose sur le développement d'instrumentations de rupture. Une réflexion permanente sur l'évolution des technologies instrumentales et de la donnée doit être maintenue pendant toute la vie du projet. L'IRAM et ALMA ont des programmes d'augmentation de bande passante des récepteurs et des corrélateurs ainsi que de développement de nouvelles caméras hétérodynes à nombre de pixels accrus. CTA est en phase finale de conception et requiert peu de développements importants. Néanmoins le temps long de la R&D suppose de commencer à réfléchir aux futures technologies de caméras à pixellisation plus fine. L'instrumentation de l'ELT doit faire l'objet de développements massifs dans les domaines de l'optique adaptative, des miroirs déformables, des algorithmes de contrôle et de traitement de données. Les nombreuses inconnues entourant la performance du télescope ajoutent une complexité supplémentaire à la conception des instruments. Ceci doit pousser la communauté à savoir équilibrer les efforts au présent et la recherche instrumentale en lien avec les futures générations d'instruments. Enfin, SKA pose des défis pratiques considérables. La maison SKA France coordonne la contribution scientifique, technique et industrielle. Les expertises françaises offrent de nombreuses portes d'entrées sur les aspects infrastructure, détection, transport, stockage et gestion de la donnée. On notera en particulier la nécessité de repenser la numérisation et le filtrage de la donnée. La contribution active de l'observatoire de Nançay aux validations est un atout unique à préserver.

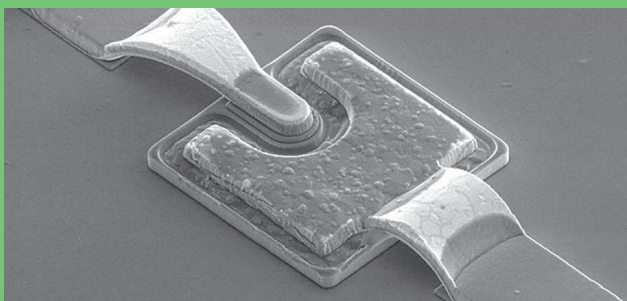
FILIÈRES D'EXCELLENCE ET OPPORTUNITÉS

Les laboratoires AA ont acquis un fort savoir-faire dans le développement de chaînes de détection couvrant tout le spectre électromagnétique au sol comme dans l'espace. On notera en particulier les enjeux forts des mesures du CMB. Il est crucial d'en développer une vision large couvrant capteur, cryogénie, électronique de lecture faible bruit, numérisation au plus proche voire le pré-traitement *in situ*. Il faut maintenir le savoir-faire dans les circuits spécialisés, cryogénie sub-K, détection hétérodyne, les capteurs grands formats ainsi que les détecteurs « intelligents » capables de résolution spectrale ou de mesure de polarisation. La miniaturisation des chaînes de mesure pour l'instrumentation embarquée est aussi un enjeu majeur. On notera notre forte dépendance aux aléas des choix technologiques et stratégiques des plateformes de réalisation micro-électronique ou des industriels. Une fédération des efforts entre laboratoires, instituts du CNRS et autres établissements devrait être recherchée lorsque cela permet de peser sur des décisions de partenaires. L'instrumentation optique continue de progresser grâce à nombre d'innovations portées par nos laboratoires. Celles-ci couvrent les technologies de fabrication de miroirs, de spectroscopie, spectro-imagerie/polarimétrie et photonique. L'instrumentation ELT, VLT mais également les missions spatiales WFIRST, JWST voire LUVOIR et HabEx fournissent un vaste champ d'application aux technologies françaises d'imagerie à haut contraste que ce soit via les aspects composants, coronagraphie, contrôle et extraction de la donnée. Le développement de technologies pour la très haute résolution angulaire (interférométrie optique) doit redevenir actif. L'exigence de références toujours plus précises en temps et fréquence et les contraintes de leur distribution restent fortes (REFIMEVE+). Elles reposent sur un effort R&D poussé. On soulignera la montée en puissance des horloges optiques, des lasers à peignes de fréquence ainsi que les problématiques « système ». L'expertise française dans ce domaine est toujours aussi forte. En AA, leur potentiel pour la détection d'ondes gravitationnelles ou la synthèse d'ouverture doit être investigué. L'exploration de l'héliosphère, ses frontières et magnétosphères, des planètes et petits corps du système solaire repose en très grande partie sur des missions spatiales. La rareté des missions Européennes, les temps longs requis pour leurs développements rendent d'autant plus critique le maintien de l'excellente R&D menée en France pour faire monter le niveau de maturité des technologies. Seule cette anticipation peut permettre de bénéficier d'opportunités.



Premier capteur courbe commercial produit par la société CURVE S.A.S., jeune pousse du CNRS issue du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. Ce modèle à 12 millions de pixels présente une courbure de rayon 150 mm. Il est destiné à être utilisé pour la recherche en neurosciences.

© Cyril Fréssillon/CURVE S.A.S./CNRS Photothèque



Diode Schottky de doubleur de fréquence du canal à 1200 GHz de l'instrument SWI de la mission JUICE de l'ESA. Le méso (carré central) a un côté de 14 microns.

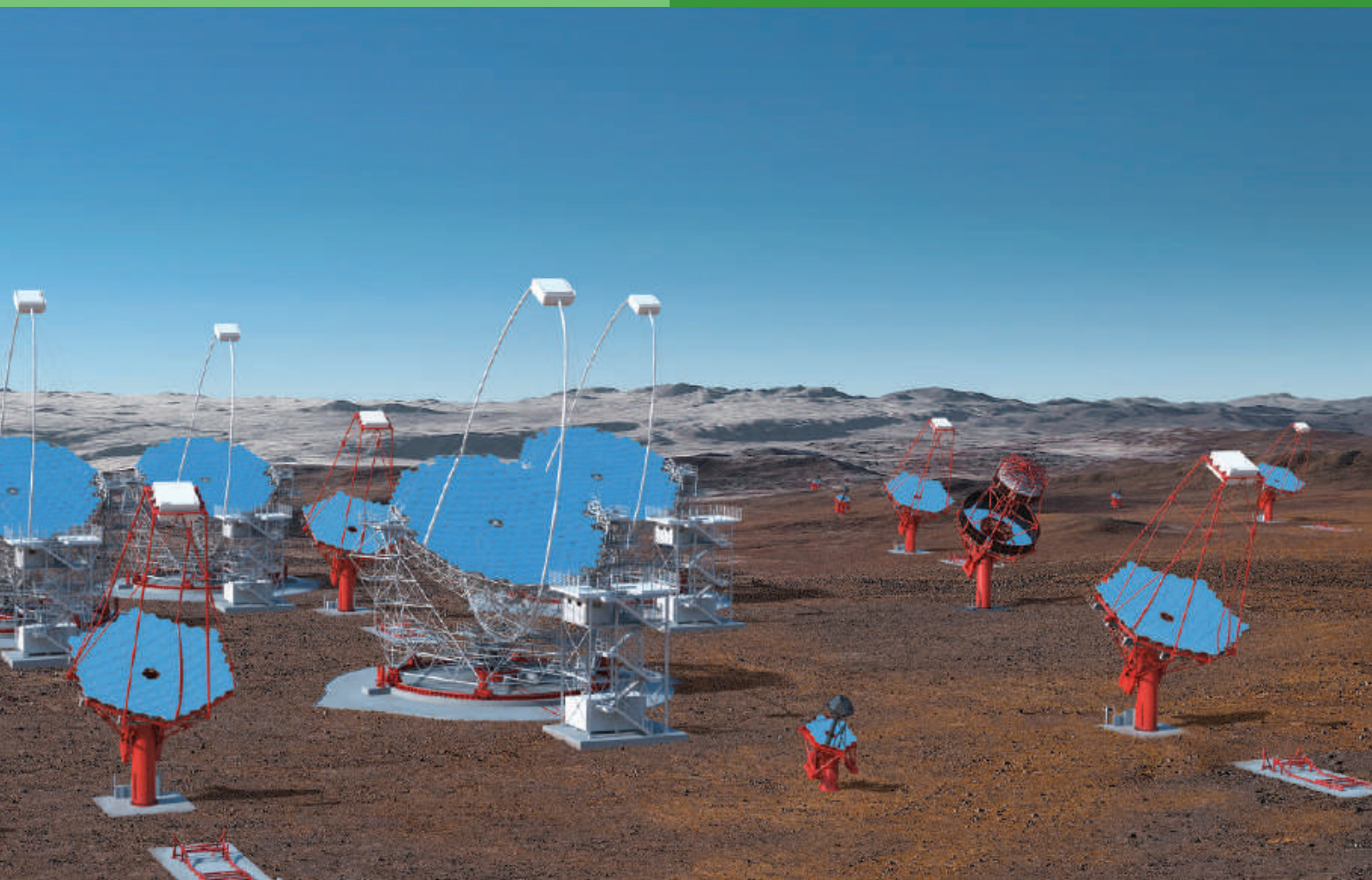
© C2N/LERMA



Les technologies d'essaims, la miniaturisation des capteurs magnétiques, plasmas, les architectures de systèmes radars, les analyseurs chromatographiques et spectrographes de masse miniaturisés, les sismomètres interférométriques ainsi que les LIDAR embarqués font partie des grandes expertises de nos laboratoires. La détection d'ondes gravitationnelles et de leurs contreparties électromagnétiques illustre la nouvelle ère de l'astronomie multi-messager. L'expérience des laboratoires d'astronomie dans le domaine de la simulation et des intégrations optiques, de la métrologie laser et du traitement de données devrait permettre à l'INSU de contribuer aux futures infrastructures telles que Advanced Virgo au sol et LISA dans l'espace.

LE NUMÉRIQUE ET LA DONNÉE

La recherche AA est particulièrement productrice de données et gourmande en temps de calcul. Elle doit profiter de l'explosion des développements industriels autour du « Big-data », intelligence artificielle (IA) et du calcul haute performance pour la modélisation comme pour le traitement. Pour cela, elle doit garder la main sur les technologies matérielles et logicielles en formant et recrutant du personnel. Pour le calcul comme pour le traitement de la donnée, la recherche AA doit adopter une approche « d'instrument numérique ». On notera les conséquences de l'augmentation forte des analyses multi-techniques et multi-messagers qui impliquent une forte hétérogénéité des données. Cela suppose de soutenir, dans le contexte « Sciences Ouvertes », les principes FAIR. Il faut continuer à développer les standards et technologies d'interopérabilité, de mise en valeur des données ainsi que l'intégration de l'IA. La réalisation instrumentale ne doit pas dissocier matériel et logiciel mais placer l'extraction du signal au cœur de ses développements.



Le Cherenkov Telescope Array (CTA) dans l'hémisphère sud.

© Gabriel Pérez Díaz, IAC / Marc-André Besel, CTAO

ORGANISATION ET STIMULATION DE LA R&D

La R&D est une activité au (très) long cours qui nécessite d'être sanctuarisée dans les laboratoires. Il est crucial qu'elle adopte une structure projet pour renforcer sa visibilité. Elle requiert un personnel dédié, formé et décloisonné qui puisse, au besoin, évoluer entre réalisation et recherche instrumentale amont. Elle nécessite aussi que le laboratoire accepte les prises de risques et sache développer une culture d'innovation. Ceci suppose que les principales tutelles, dont l'INSU au CNRS, accompagnent les laboratoires dans leurs recrutements, favorisent les partages d'expérience et mutualisations et les incitent à élargir leurs horizons collaboratifs et sources de financements (industrie, programmes européens). Par ailleurs, un renforcement du partage d'information, voire une coordination des soutiens à la R&D entre les instituts du CNRS (INSU, IN2P3, INSIS, INP) et les organismes partenaires CEA, CNES ...) serait souhaitable.

On notera enfin l'omniprésence des incitations à la valorisation de nos R&D. Tous nos laboratoires ne s'y préparent pas de la même manière et c'est une culture qui mérite d'être répandue. Elle ne doit pas être vécue comme un poids mais comme une opportunité. Pour que cela se fasse, il faut former aux enjeux de la propriété intellectuelle, apprendre à trouver la bonne interface avec les industriels et créer les conditions pour que la valorisation ne soit pas perçue comme se faisant au détriment de la recherche en astronomie.

Groupe F • *Interfaces interdisciplinaires*

DAHBI TALBI

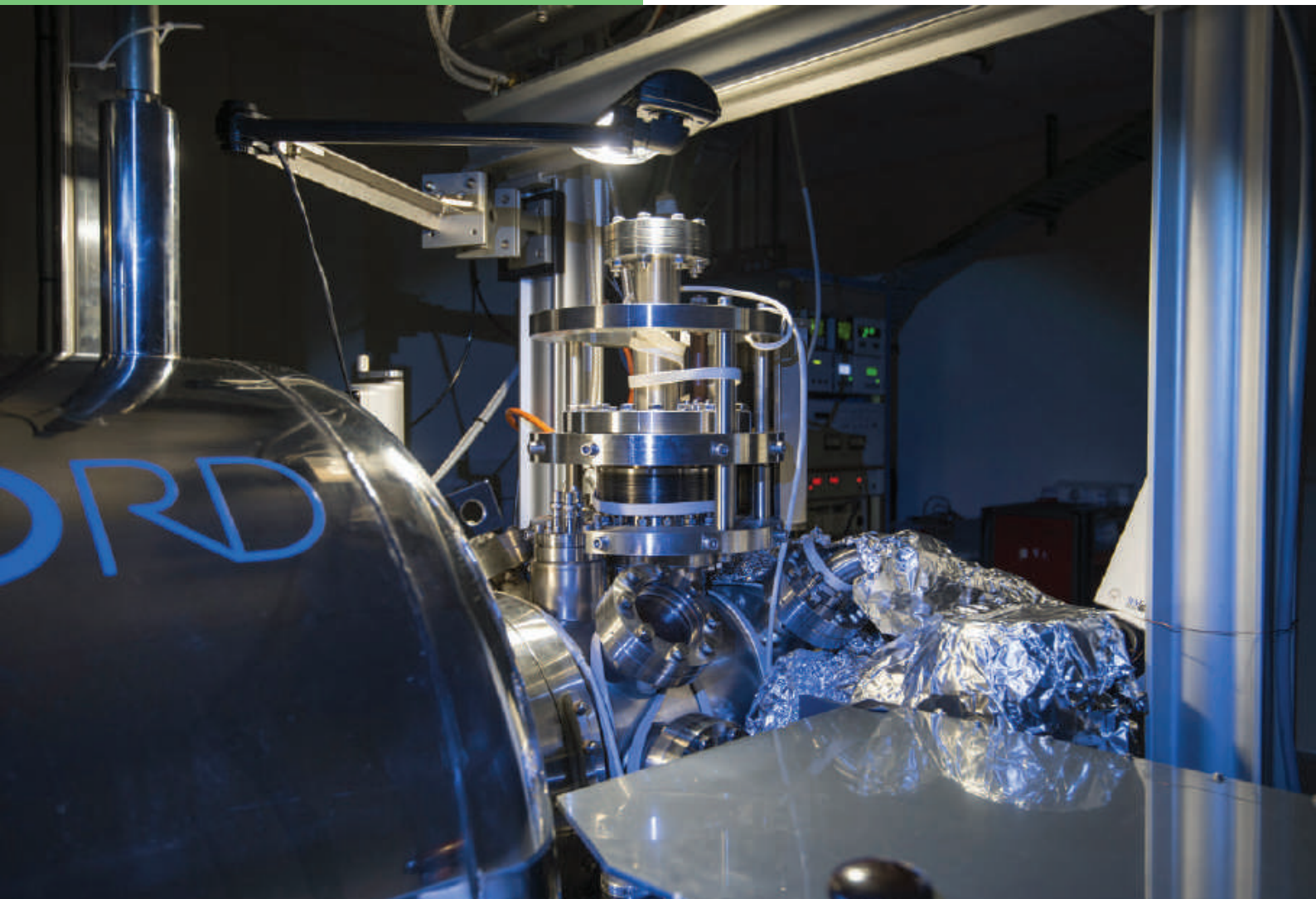
Si l'INSU/AA a toujours travaillé en relation étroite avec les autres disciplines la vigilance est de mise pour que cette interdisciplinarité ne s'épuise pas en raison de la difficulté montante à la pratiquer dans le contexte actuel de la recherche en France, comme le révèle l'enquête menée auprès de la communauté concernée. En effet si cette communauté considère que l'activité interdisciplinaire est un facteur de richesse aussi bien personnel que pour la dynamique scientifique du laboratoire / de l'équipe, elle la ressent comme un handicap pour les recrutements, voire pour l'évolution de carrière. Son financement est jugé insuffisant et fastidieux à obtenir. La mission du CNRS pour l'interdisciplinarité (MITI et ex-MI) est globalement critiquée pour son fonctionnement top-down, ses défis lancés sur des temps trop limités et des appels d'offres pour essentiellement des collaborations inter-instituts et défavorisant les laboratoires ou les équipes interdisciplinaires rattachées à un même institut principal bien que les chercheurs proviennent de plusieurs instituts. Enfin il est considéré que l'interdisciplinarité pâtit du système de financement par projets (type ANR), les évaluations de ceux-ci se faisant dans des comités thématiques qui ne peuvent pas toujours couvrir le spectre disciplinaire élargi d'un projet interdisciplinaire. Les programmes nationaux de l'INSU/AA sont eux bien perçus et l'augmentation de leurs moyens souhaitée. Parmi les solutions préconisées par la communauté, la plus importante concerne les recrutements CNRS pour lesquels il est suggéré que les postes aux interfaces soient pris sur des postes de la section 17 même pour un concours sans coloriage thématique. La création de commissions interdisciplinaires est aussi avancée. Les financements de thèses interdisciplinaires sont plébiscités et la possibilité qu'elles soient portées par deux écoles doctorales est mise en avant. Enfin, il est demandé à ce que les appels d'offres pour promouvoir l'interdisciplinarité portent sur des temps suffisamment longs car l'interdisciplinarité demande du temps.

Les questions ayant trait aux phénomènes cosmiques de haute énergie et à la physique des astroparticules nécessitent une grande diversité d'outils théoriques et de moyens observationnels et expérimentaux. Sur toutes ces questions, les liens sont très forts entre l'INSU/AA, l'IN2P3 et l'INP. De nombreux sujets en cosmologie impliquent aussi des interactions fortes entre ces instituts autour par exemple des questions fondamentales de l'origine des perturbations primordiales, de l'énergie noire, de la matière noire. Les premières observations des ondes gravi-

tationnelles en provenance de systèmes binaires d'étoiles compactes ont bouleversé la thématique « hautes énergies » ouvrant une nouvelle fenêtre sur l'univers avec des répercussions dans de nombreux domaines en astrophysique. L'approche interdisciplinaire des hautes énergies va se poursuivre avec des projets comme SVOM, CTA impliquant déjà l'INSU/AA, l'IN2P3 et le CEA. Il conviendrait néanmoins de mieux fédérer les efforts entre INSU/AA et IN2P3 pour le suivi des contreparties électromagnétiques aux événements observés en ondes gravitationnelles et/ou neutrinos pour essayer de rattraper le retard de la France dans le domaine des événements transitoires. D'un point de vue théorique, la réactivité des chercheurs sur des sujets exploratoires de nouvelle physique est entravée par le cloisonnement de leurs instituts. Il est donc urgent de fédérer des efforts répartis entre INSU/AA, IN2P3 et INP pour faciliter les recrutements aux interfaces et assurer aux projets un soutien financier coordonné sur une durée raisonnable.

La physique fondamentale dans l'espace, la métrologie de l'espace-temps, les systèmes de référence, la mécanique céleste et spatiale sont des champs d'investigation de l'INSU/AA où l'interdisciplinarité est présente de manière structurelle, aussi bien en interne à l'INSU du fait des relations avec les géosciences (INSU/OA et TS) pour les études en géodésie qu'en externe avec l'INP pour la physique fondamentale, les développements en métrologie et pour les systèmes de référence qui impliquent aussi l'INSIS. La détection d'ondes gravitationnelles et de leurs contreparties électromagnétiques pour des binaires d'étoiles à neutrons ont constitué un formidable test de la théorie de la gravité, qui a été obtenu grâce à des collaborations entre chercheurs de l'INSU/AA, l'IN2P3 et l'INP. Cette collaboration est amenée à se développer dans le cadre de la mission spatiale LISA, pour laquelle l'INSU/AA s'est fortement positionnée pour les phases de validation et d'intégration. Il faudrait que l'INSU/AA évolue sur LISA afin d'avoir une réelle capacité de stimulation des projets interdisciplinaires. De même, la communauté aux interfaces astrophysique et physique théorique devrait se mobiliser en soutien de la phase R&D de l'interférométrie atomique pour la détection des ondes gravitationnelles.

La compréhension des milieux astrophysiques comme le milieu interstellaire, les atmosphères de planètes les intérieurs d'étoiles et de planètes ... ne peut se passer de l'astrophysique de laboratoire théorique et expérimentale



impliquant des interactions fortes avec des chercheurs de l'INP, l'INC et l'INSIS. Les progrès numériques (calculs de taux d'excitation/désexcitation collisionnelle, de collisions réactives...) et expérimentaux (spectroscopie haute résolution, chimie en phase condensée et/ou sous rayonnement, lasers de puissance) ont permis des avancées indéniables dans notre compréhension de ces milieux. Mais les défis à relever sont nombreux. On pourrait citer celui de pouvoir fournir des données atomiques et moléculaires de plus en plus fines pour une meilleure exploitation des instruments d'observation (ALMA, JWST ...) et pour laquelle l'expertise tend à disparaître au vu de départs à la retraite proches voire avérés de toute une génération de physico-chimistes impliqués dans cette thématique astro-physique. C'est particulièrement critique dans le domaine de la spectroscopie et des opacités des milieux denses et/ou très chauds. Il est donc crucial pour les PN concernés de réfléchir aux actions à mettre en place, pour rendre at-

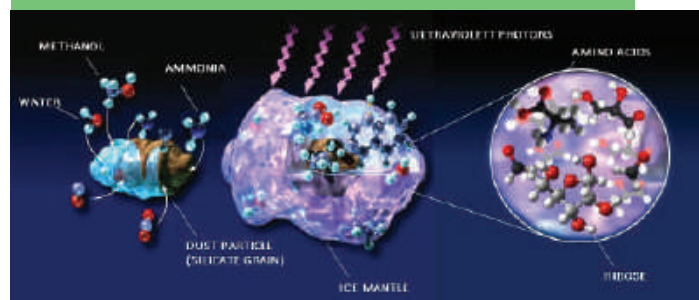
tractive ces thématiques de recherche aux yeux des jeunes physico-chimistes en formation.

Le domaine des sciences planétaires de l'INSU/AA est lui aussi largement multidisciplinaire et regroupe des expertises et des thématiques très diverses : cosmochimie, dynamique gravitationnelle, géologie, exploration spatiale, qui émergent traditionnellement dans le domaine des sciences de la Terre et de la planète (INSU/TS), mais les activités hors INSU (INP, INC, INSIS) pour les sciences des matériaux, la chimie analytique ou encore la physico-chimie (ex. simulation de la matière organique cométaire ou météoritique en laboratoire) constituent un apport important. La caractérisation des échantillons prélevés par les sondes Hayabusa 2 et OSIRIS-REx qui permettra d'explorer de manière inédite le lien astéroïde-chondrite carbonée, émergera aussi dans un contexte interdisciplinaire où l'accès à des outils analytiques de pointe et/ou des méthodes de traitement de

données particulièrement innovantes seront des atouts décisifs. Pour une forte valeur ajoutée à l'exploitation scientifique des retours de mission spatiale, il faudrait veiller à accompagner et structurer ces activités en formant, lorsque les données deviennent publiques, de nouvelles équipes interdisciplinaires, impliquant des spécialistes sur des domaines scientifiques ciblés et une partie des membres des équipes instrumentales, qui possèdent une connaissance irremplaçable de la réduction des données.

Les plasmas spatiaux du domaine héliophysique couvrent des conditions très variées, allant des conditions chaudes et denses du cœur du Soleil proches de celles des tokamaks, aux environnements plus froids et dilués des éclairs d'orage proches des plasmas industriels, ce qui conduit à des rapprochements entre chercheurs de domaines plasma différents issus de l'INSU/AA, l'INSU/OA, l'INP et l'INSIS. L'étude des processus plasma dans l'Héliosphère apporte des données importantes pour la météorologie de l'espace, discipline aussi à l'interface de la science et de la société civile, puisqu'elle s'occupe des effets néfastes de l'activité du Soleil et de l'environnement spatial de la Terre sur les infrastructures. Des actions pour aider au rapprochement avec les SHS faciliteraient l'émergence d'études sur les conséquences cette fois sociétales de la météorologie de l'espace.

L'astronomie dispose de grandes masses de données libres d'accès, avec des formats et protocoles d'échanges bien standardisés. De plus en plus d'astrophysiciens, notamment dans les grandes collaborations, font de la science des données leur activité principale et ont donc des bases statistiques solides. Néanmoins, étant donné le développement extrêmement rapide de nouvelles techniques, notamment d'Intelligence Artificielle, il se révèle difficile pour la communauté INSU/AA de se maintenir à niveau. Il est donc important qu'elle forge des liens solides avec des laboratoires et instituts dont l'activité principale de recherche est la science des données pour s'assurer la maîtrise de ces dernières et pour l'INSU/AA de colorier des postes pour ces profils à l'interface.



La chimie des glaces interstellaires et cométaires peut être simulée en laboratoire. Un mélange eau, méthanol et ammoniac, condensé à basse température (78K) et photolysé par un rayonnement ultraviolet, conduit à la production du ribose, l'un des constituants principaux des molécules d'ARN.

© Cornelia Meinert (CNRS) & Andy Christie (Slimfilms.com)

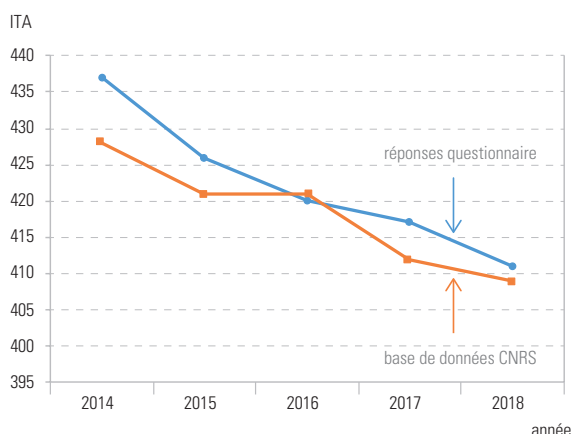
Groupe G • Ressources de la discipline

PIERRE-OLIVIER LAGAGE

RESSOURCES HUMAINES

Effectifs

Si le nombre de chercheurs et d'enseignants-chercheurs avec un statut permanent est resté globalement stable au niveau de 800 personnes au cours de la période 2014-2018, le nombre d'ITA (Ingénieurs, techniciens, administratifs) CNRS a fortement diminué (voir Figure ci-dessous).



Évolution du nombre d'ITA dans les laboratoires AA selon 2 sources : les réponses au questionnaire envoyé aux laboratoires et la base de données CNRS.

Cette diminution est en contradiction avec le plan de charge élevé des laboratoires, que ce soit pour l'instrumentation spatiale, avec notamment le programme Cosmic Vision 2015-2025 de l'ESA, pour les programmes au sol (instruments pour l'ELT, pour CTA...), pour les activités de R&D, pour l'astrophysique de laboratoire ou pour répondre aux besoins grandissants pour l'exploitation scientifique (Science des données) et pour le développement des codes pour les simulations sur les calculateurs massivement parallèles. De plus cette diminution rend la programmation pluriannuelle des ressources humaines des grands projets en pratique peu effective, les tutelles n'assurant pas le renouvellement des personnels ITA nécessaires. Il est donc recommandé de stopper la diminution des effectifs d'ITA.

Évolution des métiers

Le temps consacré par les chercheurs à l'administration de projets (soumission, rapports, expertise de projets...) continue à augmenter. Cette constatation est largement partagée par la communauté scientifique française et nous fai-

sons nôtre la recommandation : 'Redonner du temps dédié à la recherche aux chercheurs et enseignants-chercheurs'.

Le développement des simulations numériques et des grands volumes de données à la complexité croissante fait apparaître un besoin en numériciens, experts en calcul scientifique et en Science des Données (chercheurs et ingénieurs), indispensable pour garantir un retour scientifique de qualité. D'où la recommandation d'augmenter le nombre de chercheurs et d'ingénieurs travaillant dans le domaine des simulations numériques et dans celui de la Science des données. Les groupes ingénieurs, chercheurs ainsi formés pourront interagir efficacement avec des chercheurs spécialistes de ces domaines hors INSU/AA dans un esprit 'gagnant – gagnant'.

Les métiers « cœurs » des personnels techniques de l'INSU/AA sont en majorité des BAP C et E (60%). La complexification des développements instrumentaux impacte ces métiers cœurs. Il est à noter l'augmentation des besoins en support à la gestion de projet.

Concernant les personnels administratifs, la complexification des réglementations, des procédures et des outils, rend nécessaire :

- de recruter au minimum en catégorie B pour les personnels de la BAP J ;
- d'augmenter la proportion de catégorie A (AI) dans les unités ;
- d'offrir des perspectives d'évolution au sein des structures (passage T → AI et AI → IE très difficile aujourd'hui).

Avec la complexification des projets instrumentaux, il est recommandé d'organiser très tôt les contributions françaises aux grands projets instrumentaux à travers des discussions entre directeurs de laboratoires et responsables scientifiques/chefs de projets, et d'encourager la mise en place d'équipes intégrées multi-laboratoires, comme cela a été fait, par exemple, pour l'instrument AIRS de la mission ARIEL.

Personnels non permanents

230 chercheurs post-doctorants ont travaillé dans les laboratoires INSU/AA en 2018, ce qui donne un rapport global chercheurs post-doctorants sur chercheurs permanents de 28%, avec de grandes disparités selon les laboratoires (de 7 à 79%). Le nombre de post-doctorants a varié de fa-



Vue d'artiste du télescope spatial ARIEL de l'ESA dont le lancement est prévu pour 2028

© ESA

çon significative au cours des années. On constate une augmentation continue du nombre de post-doctorants de 2014 à 2017, leur nombre passant de 197 à 245. Cette tendance constatée lors du précédent exercice de prospective se confirme. Elle résulte de la mise en place de nombreux guichets permettant le financement de post-docs. En 2018, on assiste pour la première fois depuis des années à une diminution de leur nombre.

166 ITA sur contrat temporaire ont travaillé dans les laboratoires INSU/AA en 2018, ce qui donne un rapport global non permanents sur permanents de 28%, avec là aussi des disparités importantes selon les laboratoires (de 12% à 47%). Sous l'impulsion du CNES, le recours à l'assistance technique devrait se développer. Le coût horaire de l'assistance technique est bien plus élevé que celui d'un CDD. Toutefois le personnel est, en général, plus vite 'opérationnel' et le nombre d'heures peut être ajusté au besoin. Les recours au CDD ou à l'assistance technique ont chacun des avantages et des inconvénients. Avoir le choix permet aux laboratoires de s'adapter au mieux à leurs besoins.

RESSOURCES FINANCIÈRES

Les ressources financières annuelles totales qui arrivent dans les laboratoires INSU/AA¹ se situent au niveau de 64,8 M€² et ont été globalement stables sur la période 2014-2018 (fluctuation de +/- 3% selon les années, sans qu'au-

cune tendance ne se dégage). 15% de ces ressources proviennent des tutelles (51% du CNRS, 26% des Universités, 14% de l'Observatoire de Paris...)³. Une part significative des ressources en provenance des tutelles est attribuée à travers des appels à projet; de plus, certains financements sont spécifiques, si bien que la dotation en soutien de base des laboratoires ne représente que 8% du budget total des laboratoires. Les 85% du budget des laboratoires non financés par les tutelles sont obtenus via des appels à projets. Près de la moitié (46%) des ressources proviennent d'appels à projets du CNES. Les autres sources de financement sont l'Europe (notamment pour des ERC), le PIA (LabEx, IdEx), l'ANR, les régions...

Les projets amènent des 'marges' aux laboratoires à travers les coûts indirects sur les contrats européens, les prélèvements contractuels des laboratoires sur les contrats CNES (5,5%), les marges dégagées lors de contrats industriels, etc. Le montant total des 'marges' affichées par les laboratoires est de 1,3 M€ /an, ce qui représente 2,3% des 55 M€ que les laboratoires vont chercher en dehors des tutelles. Une bonne partie de ces marges sont utilisées pour contribuer au financement des frais fixes des laboratoires, si bien que la marge de manœuvre réelle apportée aux laboratoires est inférieure aux 1,3 M€. Il est recommandé de mener une réflexion entre l'INSU/AA et les laboratoires pour étudier la possibilité d'augmenter les marges des laboratoires, par exemple en valorisant leurs plateformes technologiques et leur savoir-faire quand c'est possible⁴, comme d'autres communautés l'ont fait, par exemple au CRPG avec le SARM⁵.

1- Hors masse salariale des personnels permanents.

2- À noter que certaines dépenses, comme des dépenses d'infrastructure, sont financées par les tutelles sans passer par les laboratoires.

3- Bien que le CNES soit devenu tuteur de certains laboratoires au cours de la période 2014-2018, nous avons continué à mettre tout le financement apporté par le CNES dans la rubrique 'ressources propres'.

4- Un recensement des plateformes AA se trouve dans le document du Groupe B.

5- <http://helium.crgp.cnrs-nancy.fr/SARM/index.html>.

Groupe H • *Formation et impact sociétal de l'astronomie*

VÉRONIQUE BUAT

L'astrophysique est enseignée à tous les niveaux d'un cursus universitaire, dans un contexte et avec des objectifs qui varient : depuis l'enseignement d'ouverture à la démarche scientifique pour les primo-entrants à l'université jusqu'à l'enseignement de spécialité de la deuxième année du master. L'engouement pour l'astrophysique est bien visible sur les forts effectifs atteints pour les enseignements des premières années de licence, ainsi que dans les formations accessibles en ligne. Maintenir, au minimum, et si possible développer ces enseignements d'ouverture sur les sciences apparaît un enjeu majeur pour la société, afin d'initier chaque étudiant au discours et à la démarche scientifique, quel que soit son parcours universitaire ultérieur.

L'enseignement de l'astrophysique en master est généralement dispensé au travers d'unités d'enseignement en première année, préfigurant une deuxième année consacrée à la discipline. Seuls quelques établissements proposent une formation à l'astrophysique intégrée sur les deux années du master. En province, hormis Toulouse, les effectifs restent faibles, avec souvent moins de 10 étudiants en deuxième année de master. Il est pourtant essentiel d'assurer la pérennité de ces formations pour garder un vivier d'étudiants suffisamment proches de nos laboratoires. La création de parcours internationaux à Nice ou à Marseille, la mutualisation des formations entre Lyon et Montpellier ou les cours partagés entre Strasbourg et Grenoble sont autant d'initiatives récentes pour accroître le nombre d'étudiants dans les masters dont les premiers bilans sont ressentis comme positifs et prometteurs.

Avec seulement 20 à 25% de femmes dans les contingents de master, le domaine de l'astrophysique est affecté par la faiblesse inquiétante du nombre de femmes en physique. Des actions concertées et volontaristes à destination des lycées et des licences doivent être développées afin de convaincre les jeunes femmes qu'elles ont toute leur place dans notre discipline.

Le groupe a recensé 752 thèses en Astrophysique soutenues entre 2013 et 2018 dans la trentaine d'Écoles Doctorales (ED) inscrivant des étudiants dans la thématique, soit une moyenne de 125 thèses par an. Les effectifs en fonction des ED sont très variables, jusqu'à 50 inscriptions par an à l'ED 'Astronomie et Astrophysique d'Île-de-France' pour moins d'une thèse par an pour les plus petits effectifs. Ces thèses sont préparées dans 62 laboratoires, avec pour la moitié d'entre eux une seule thèse par an en moyenne. Ces chiffres soulignent l'importance et la diversité des petites commu-

nautés qui contribuent à la discipline, en complément des grandes unités de recherche en astrophysique. 31% des thèses sont soutenues par des femmes.

Le nombre de contrats doctoraux attribués par les ED varie dans un rapport de 1 à 4 entre les ED. Malgré ces particularités locales, il n'y a pas de biais flagrant dans le rapport entre le nombre total de thèses et le nombre de chercheurs, du fait de la diversité des sources de financements des contrats doctoraux. Il est souvent difficile de compléter les financements partiels, attribués par certains organismes comme l'ESO, le CNES ou les régions. Enfin il faut veiller à préserver la diversité thématique des sujets de thèses.

Les compétences acquises lors de la préparation de la thèse facilitent les débouchés professionnels des docteurs : trois ans après la thèse plus de 95% des docteurs ont un emploi (CDD ou CDI), la formation par la recherche fonctionne donc bien dans le contexte actuel. Toutefois, six ans après la thèse, l'emploi dans la recherche publique reste très minoritaire, avec un total de 25% à parts égales en France et à l'étranger. Il est dès lors très important de sensibiliser les directeurs de thèse à la poursuite de carrière de leurs étudiants, très souvent hors du monde académique, et de proposer des formations aux encadrants et aux doctorants pour préparer au mieux les futurs docteurs à cette transition.

La diffusion des connaissances fait partie des missions des chercheurs et enseignants-chercheurs. Les scientifiques sont les producteurs de savoir et de science, et apportent les dernières connaissances. La société s'interroge sur de nombreux sujets et est avide de débats. Dès lors, cette activité de médiation/diffusion doit avoir une véritable reconnaissance institutionnelle, avec une harmonisation sur les trois corps de la discipline : CNRS, CNAP et CNU ainsi que pour les personnels techniques. Elle doit être reconnue à son réel niveau d'investissement et prise en compte dans l'évolution des carrières et les évaluations de l'HCERES.

La présence au sein de l'INSU d'un contact permanent pour la médiation scientifique en Astrophysique apparaît indispensable. L'initiation d'un réseau d'expertise national en médiation scientifique permettrait aux participants de partager expériences, outils et supports. L'organisation de formations courtes pour les personnels professionnaliserait les techniques de médiation et d'utilisation d'outils, afin d'améliorer la prise en compte des publics variés. Une mutualisation des réseaux existants pour ces formations : (universités, OSU) est à rechercher.

La préoccupation environnementale est prégnante dans notre communauté et la motivation des personnels se révèle forte pour réduire l'impact de leurs activités. Des actions sont mises en place localement dans les laboratoires. Il apparaît essentiel que les organismes comme le CNRS prennent la mesure de l'impact des pratiques de la recherche sur l'environnement et accompagnent les initiatives des personnels, de nature à maintenir la confiance des citoyens avec les pratiques de recherche.

Il convient de souligner la prise en compte de l'enjeu énergétique et de son impact environnemental par les équipes françaises dans la préparation des nouveaux projets de la discipline.

L'impact économique des activités de recherche de nos laboratoires en astronomie se mesure principalement par les montants financiers allant vers l'industrie à travers les grands projets spatiaux et depuis le sol de la discipline, par les partenariats entre un laboratoire et une entreprise et enfin par les actions de valorisation comme les licences d'exploitation de brevets.

Les chercheurs et ingénieurs doivent être incités à valoriser leurs travaux en vue de leur exploitation commerciale par des partenaires industriels. Une simplification des procédures de valorisation et un meilleur accompagnement dans les démarches à suivre et dans la communication en amont s'avèrent nécessaires pour développer cette valorisation.

Les personnels de nos laboratoires optent largement pour la diffusion de leur logiciel en mode *open source* pour en assurer un accès maximisé dans la communauté. Il apparaît nécessaire de mener une réflexion globale au niveau de l'INSU (et du CNRS) sur les types de valorisation à rechercher pour les logiciels au-delà de l'accès libre.

ACRONYMES

4MOST	4-metre Multi-Object Spectrograph Telescope
AI	Assistant Ingénieur
ALMA	Atacama Large Millimeter Array
ANO	Action Nationale d'Observation
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ARIEL	Atmospheric Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large-survey
ArTéMIS/ArINCA	Architectures de bolomètres pour des Télescopes à grand champ de vue dans le domaine sub-Millimétrique au Sol/ ArTeMiS INstrument for SPICA
AS	Action Spécifique
ASHRA	Action Spécifique Haute Résolution Angulaire
ASOV	Action Spécifique Observatoires Virtuels
ATHENA	Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics
BAP	Branche d'Activité Professionnelle
CCAT	Cerro Chajnantor Atacama Telescope
CDD	Contrat à Durée Déterminée
CDI	Contrat à Durée indéterminée
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CFHT	Canada-France-Hawai'i Telescope
CFIS	Canada-France Imaging Survey
CHEOPS	CHaracterising ExOPlanets Satellite
CID	Commission Inter-Disciplinaire
CIFRE	Convention Industrielle de Formation par la REcherche
CIO	Comité Inter-Organismes
CMB-S4	Cosmic Microwave Background-Stage 4
CNAP	Conseil National des Astronomes et Physiciens
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre Nationale de la Recherche Scientifique
CNU	Conseil National des Universités
ComUE	Communauté d'Universités et Établissements
CONCERTO	CarbON CII line in post-rEionisation and ReionisaTiOn epoch
CRPG	Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques

CS	Conseil Scientifique	INS2I	Institut des Sciences de l'Information et de leurs Interactions
CSAA	Commission Spécialisée Astronomie Astrophysique	INSB	Institut des Sciences Biologiques
CTA	Cherenkov Telescope Array	INSHS	Institut des Sciences Humaines et Sociales
DAS AA	Directeur Adjoint Scientifique Astronomie-Astrophysique	INSIS	Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
DOR	Dialogue Objectifs Ressources	INSMI	Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions
EAI	European Astrobiology Institute	INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
EAS	European Astronomical Society	INSU/OA	INSU/Océan Atmosphère
ED	École Doctorale	INSU/TS	INSU/Terre Solide
EFISOFT	ELT French Instrument control SOFTWARE team	IR	Ingénieur de Recherche
ELT	Extremely Large Telescope	IR/TGIR	Infrastructure de Recherche/Très Grande Infrastructure de Recherche
EquipEx	Équipement d'Excellence	IRAM	Institut de Radio-Astronomie Millimétrique
ERC	European Research Council	ITA	Ingénieur Technicien Administratif
ESA	European Space Agency	ITN	Innovative Training Network
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures	JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
ESO	European Southern Observatory	JUICE	Jupiter Icy Moons Explorer
ESPaDOnS	Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars	JWST	James Webb Space Telescope
EST	European Solar Telescope	KM3Net	Cubic Kilometre Neutrino Telescope
EUR	École Universitaire de Recherche	LabEx	Laboratoire d'Excellence
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Re-useable	LIDAR	Light Detection and Ranging
GIS PARADISE	Groupement d'Intérêt Scientifique Plateformes pour les Activités de Recherche Appliquée et de Développement en Instrumentation au Sol et Embarquée	LISA	Laser Interferometer Space Antenna
GRAND	Giant Radio Array for Neutrino Detection	LiteBIRD	Lite (Light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection
H2020	Horizon 2020	LOFAR	LOW Frequency ARray
HabEx	Habitable Exoplanet Observatory	LPR	Loi de Programmation de la Recherche
HARMONI	High Angular Resolution Monolithic Optical and Near-infrared Integral field spectrograph	LSST	Legacy Survey of Space and Time
HCERES	Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur	LUVOIR	Large UV/Optical/Infrared Surveyor
HIRES	High REsolution Spectrograph	MAORY	Multi-conjugate Adaptive Optics Relay
HPC	High Performance Computing	MATISSE	Multi AperTure Interferometry and SpectroScopic Experiment
HPDA	High Performance Data Analytics	MAVIS	MCAO-Assisted Visible Imager and Spectrograph
IA	Intelligence Artificielle	MESRI	Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'innovation
IdEx	Initiative d'Excellence	METIS	Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph
IE	Ingénieur d'Études	MICADO	Multi-Adaptive Optics Imaging CameraA for Deep Observations
IN2P3	Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules	MITI	Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires
INC	Institut de Chimie	MOONS	Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph
INEE	Institut Écologie et Environnement	MOSAIC	Multi-Object Spectrograph for Astrophysics, Intergalactic-medium studies and Cosmology
INP	Institut de Physique	MSE	Maunakea Spectroscopic Explorer
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique		

MUSE	Multi Unit Spectroscopic Explorer	TBL	Télescope Bernard Lyot
NASA	National Aeronautics and Space Administration	TESS	Transiting Exoplanet Survey Satellite
NenuFAR	New Extension in Nançay Upgrading LOFAR	THEMIS	Télescope héliographique pour l'étude du magnétisme et des instabilités solaires
NOEMA	NORthern Extended Millimeter Array	THESEUS	Transient High-Energy Sky and Early Universe Surveyor
NRT	Nançay Radio-Telescope	UMR	Unité Mixte de Recherche
NTE	Nordic Optical Telescope Transient Explorer	VISTA	Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy
OHP	Observatoire de Haute Provence	VLT	Very Large Telescope
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Réspatiales	VLTi	Very Large Telescope Interferometer
OSIRIS-REx	Origins-Spectral Interpretation-Resource Identification-Security-Regolith Explorer	VRO	Vera Rubin Observatory
OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers	WEAVE	WHT Enhanced Area Velocity Explorer
PCMI	Programme national de Physique et Chimie du Milieu Interstellaire	WFIRST	Wide Field Infrared Survey Telescope
PCS	Planetary Camera and Spectrograph	X-IFU	X-ray Integral Field Unit
PIA	Programme d'Investissement d'Avenir		
PLATO	PLAnetary Transits and Oscillations of stars		
PN	Programme National		
PNCG	Programme National Cosmologie et Galaxies		
PNGRAM	Programme National Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie		
PNHE	Programme National des Hautes Énergies		
PNP	Programme National de Planétologie		
PNPS	Programme National de Physique Stellaire		
PNST	Programme National Soleil-Terre		
R&D	Recherche et Développement		
R&T	Recherche et Technologie		
REFIMEVE	Réseau Fibré Métrologique à Vocation Européenne		
RH	Ressources Humaines		
SARM	Service d'Analyses des Roches et des Minéraux		
SF2A	Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique		
SKA	Square Kilometer Array		
SOXS	Son Of X-Shooter		
SPHERE	Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch		
SPICA	SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics		
SPIRou	SPectropolarimètre InfraRouge		
SPV	Service Partenariats Valorisation		
SVOM	Space Variable Objects Monitor		
TARANIS	Tool for the Analysis of RAdiation from lightNIing and Sprites		

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Centre National de la Recherche Scientifique
3, rue Michel-Ange 75016 Paris
www.insu.cnrs.fr

