

II. Les grands défis de l’astronomie - 2. R&D pour l’astronomie du futur

G. Coussot, B. Cugny, B. Fang, O. Gasnault, O. Godet, D. Gratadour, P. Henri, E. Huby, F. Leblanc (DS),
L. Leboulleux, M. N’Diaye, B. Neichel, M. Sauvage, F. Stalport, É. Thiébaud, J. Treuttel

1. INTRODUCTION	1
2. DES FILIERES D’EXCELLENCE POUR SAISIR LES OPPORTUNITES	1
a. Temps-fréquence	1
b. Astronomie des hautes énergies et multi-messager	2
c. Mesures dans le domaine Soleil-Terre, plasmas spatiaux	2
d. Développements pour la planétologie et l'exobiologie	3
e. Haute résolution angulaire (ASHRA)	4
f. Technologies optiques	4
g. Détecteurs et chaînes de détection	5
h. R&D numérique	5
3. LIENS AVEC LES PRINCIPAUX PARTENAIRES	6
a. Prospective technologie CNES	6
b. Les grands programmes en astronomie	7
c. Relations avec l’industrie	7
4. LIEN AVEC LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX	7
5. CONCLUSION: ORGANISATION DE LA R&D ET MOYENS DANS LES LABORATOIRES	8

1. INTRODUCTION

Le prix Nobel de physique en 2020 pour la découverte du trou noir supermassif au centre de la Voie Lactée puise sa source dans les recherches en optique adaptative et photonique où la France a joué un rôle pionnier dès les années 1990. Lancé en 2021, le JWST a formé des images inédites d'exoplanètes à l'aide de coronographes à masques interférentiels inventés en France à l'aube des années 2000. Le positionnement national sur les missions d'exploration du système solaire est rendu possible grâce à son excellence sur plusieurs filières : SuperCam/ChemCam pour l'analyse des roches, la chromatographie pour l'analyse des atmosphères planétaires, l'instrumentation *in-situ* pour l'observation des environnements planétaires, etc. Ces exemples illustrent le lien étroit entre les réussites astrophysiques actuelles et les avancées technologiques issues de recherches menées en France des années à des décennies auparavant. La participation française dans les projets dimensionnants de la discipline est intimement liée à la capacité de la communauté à contribuer avec des technologies-clé pour proposer des modes d'observation inédits. Dans ce contexte, l'objectif fixé au groupe de prospective est d'identifier les filières technologiques indispensables, à maintenir et à lancer à l'échelle de 15 ans, compte tenu des enjeux scientifiques et environnementaux, pour lever certains verrous technologiques et développer des moyens d'observation inédits. L'analyse repose sur les résultats de deux enquêtes (organisation de la R&D dans les laboratoires, recensement des projets de R&D), les interactions avec de nombreux collègues et l'expertise des membres du groupe.

2. DES FILIERES D’EXCELLENCE POUR SAISIR LES OPPORTUNITES

a. Temps-fréquence

La R&D en métrologie temps-fréquence bénéficie à de nombreuses applications : physique fondamentale, spectroscopie, relativité, géodésie, synchronisation, et positionnement par satellites. Son

avenir passera du domaine micro-onde à fréquences optiques, marqué par la redéfinition de la seconde dans la prochaine décennie, avec des améliorations attendues sur les échelles de temps et le transfert. Le SYRTE, en collaboration avec d'autres instituts de métrologie, joue un rôle de leader dans cette redéfinition. Grâce à l'IR REFIMEVE, labellisée en 2021 par le MESRI, des campagnes de comparaison d'horloges optiques en Europe valident leur performance et les technologies associées. Le SYRTE diffuse les signaux de référence en temps-fréquence auprès des mondes académique et industriel, en co-dirigeant le réseau fibré REFIMEVE et les activités R&D. Au-delà de la capacité à mesurer le champ gravitationnel, tester l'existence de la matière noire ou évaluer d'autres lois fondamentales de la physique avec une précision accrue, un objectif clé de la R&D est de développer des moyens de transfert de temps plus précis (100 ps sur une porteuse optique) couplés à des meilleurs dispositifs de synchronisation (sous 10 ns via le réseau White Rabbit), comme l'équivalent optique du maser à hydrogène, transportable et déployable sur le terrain (du type horloge à réseau optique transportable avec une exactitude de 10^{-17} ou meilleur en fréquence relative). Ces moyens renforceront les observations entre sites distants sur Terre pour l'astronomie multi-messager.

Recommandation [TF-1] : soutenir les projets de R&D en génération et dissémination de références temps-fréquence à très haute performance dont la durée de développement est souvent de l'ordre de 10 ans ou plus.

Recommandation [TF-2] : fournir des ressources dédiées, notamment le développement et le maintien de capacités opérationnelles, et favoriser l'interdisciplinarité au sein de l'INSU, afin de permettre à une communauté plus large de bénéficier de la métrologie temps-fréquence.

b. Astronomie des hautes énergies et multi-messager

L'astronomie des ondes gravitationnelles révolutionne notre compréhension de l'univers, grâce aux découvertes faites avec Virgo et PTA dont le radiotélescope de Nançay est un pilier. Ces succès résultent d'un travail de R&D considérable qui se poursuit pour améliorer les capacités de détection. À l'horizon 2040, l'Einstein Telescope (ET) et LISA étendront ce pouvoir transformatif, avec une place de choix pour la France. Ces projets ambitieux stimulent des activités de R&D en fabrication de nouveaux miroirs (couches minces, saphir), sur des innovations en lasers (puissant, compact ou stabilisé), en cryogénie (utile également pour NewAthena & LiteBIRD), et dans l'élaboration de bancs de métrologie pour des mesures précises de stabilité (< 10 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ dans la bande 0,03-10Hz pour LISA). Le déploiement du réseau REFIMEVE s'avère essentiel pour le développement de l'astronomie des ondes gravitationnelles.

En astronomie multi-messager, la recherche de contreparties électromagnétiques fiables au signal d'une onde gravitationnelle reste un défi majeur. Le segment à haute énergie semble une clé pour augmenter le nombre de détections conjointes. Il est important de développer des R&D pour doter le segment spatial à haute énergie d'une instrumentation couvrant tout le ciel en continu et avec une sensibilité adéquate. Le déploiement de constellations de nano-satellites représente une solution intéressante à explorer.

Recommandation [HM-1] : favoriser les R&D visant à pérenniser les compétences en cryogénie dans les laboratoires de l'INSU pour mener à bien ces développements en vue de l'ET, LISA, NewAthena/X-IFU et LiteBIRD. Développer une stratégie conjointe entre l'INSU, l'IN2P3 et le CEA pour conserver ces compétences.

Recommandation [HM-2] : développer des R&D avec l'aide du CNES, des CSU français et de l'ESA visant à explorer l'apport du New Space avec le déploiement de constellations de nano-satellites.

c. Mesures dans le domaine Soleil-Terre, plasmas spatiaux

L'instrumentation dédiée à la mesure des plasmas spatiaux, la surveillance du Soleil, et ses relations avec la Terre et les planètes se répartit entre les volets sol (~30%) et espace (~70%). Le soutien du CNES aux R&D spatiales constitue un appui indéniable qui manque à l'instrumentation sol.

Concernant l'instrumentation sol, la compréhension des effets du Soleil sur l'atmosphère, l'ionosphère et la magnétosphère terrestres, requiert plus une maintenance ou jouvence des moyens existants, voire un accroissement de la couverture instrumentale, que des R&D. En physique solaire, le développement de spectro-imageurs apparaît essentiel pour accéder aux petites échelles spatiales ou temporelles.

Concernant l'instrumentation spatiale, les développements portés par les filières New Space, permettant des constellations de nano-satellites, offrent des opportunités à saisir pour l'étude des relations Soleil-Terre et des plasmas spatiaux avec une couverture spatiale significative. Les projets de R&D visent la miniaturisation des capteurs, de l'électronique embarquée et des systèmes de déploiement :

spectromètres ions et électrons, magnétomètres, instruments électriques. Des études visent à diminuer la télémétrie en développant de nouveaux traitements embarqués pour sélectionner ou extraire les données à transmettre au sol. Les constellations satellitaires produiront des données multi-points qui nécessitent des R&T pour leur traitement sol. Les laboratoires engagés dans les études de Phase A spatiales (e.g. M-MATISSE et Plasma Observatory) bénéficient des financements (CNES, ESA) et libèrent les moyens humains IT pour accélérer des R&T sur de courtes durées (12 à 18 mois).

Recommandation [PS-1] : renforcer les moyens humains (via des recrutements en thèse, IT) au CNRS pour accompagner les moyens matériels existants, notamment fournis par le CNES, visant la miniaturisation des instruments embarqués.

Recommandation [PS-2] : renforcer la R&T visant à développer des nouveaux algorithmes de traitements embarqués et sol afin de maximiser le retour scientifique des observations multi-points.

d. Développements pour la planétologie et l'exobiologie

La compréhension des objets planétaires fait l'objet d'importants efforts de R&D, au niveau de la miniaturisation d'un instrument, l'adaptation des expériences à des environnements extraterrestres, l'amélioration et la maturation des détecteurs. L'acoustique s'est récemment révélée être une technique pour l'étude *in-situ* des atmosphères planétaires (e.g. Perseverance) et plusieurs travaux sont en cours. L'*in-situ resource utilization* (ISRU) est devenue une filière à part entière dans l'exploration planétaire, avec des opportunités d'études de R&D connexes sur la propriété des matériaux (e.g. régolite lunaire) ou le triage des échantillons sur place. L'étude des exoplanètes a stimulé un grand nombre d'activités de R&D pour accroître les capacités de détection, notamment en vélocimétrie radiale à haute précision, en spectro-imagerie et en couplage entre haute dynamique et haute dispersion spectrale.

En exobiologie, l'étude *in-situ* des milieux pré-biotiques et la recherche de biosignatures représentent des défis technologiques pour des mesures hors laboratoire. On voit ainsi apparaître des besoins d'analyse moléculaire *in-situ*, de chromatographies, de techniques d'extraction de la matière organique et son piégeage/pré-concentration, de la manipulation de microfluidique, et d'amélioration en spectroscopie infrarouge et spectrométrie de masse à très haute résolution. La collecte et le retour d'échantillons vis-à-vis de la recherche du vivant ainsi que l'exploration des glaces dans le système solaire impliquent respectivement des défis de contamination et de températures extrêmes à surmonter.

Les thématiques de miniaturisation de systèmes embarqués dans des milieux jusqu'à présent inexplorés en exobiologie ([bio]capteurs, microsystèmes) sont souvent portées par des instituts hors INSU (INSIS, INC, INSB) qui manquent de visibilité sur les besoins des thématiques AA.

Avec l'évolution des pratiques dans la recherche spatiale internationale, développer des filières de nouveaux composants électroniques et optiques, des matériaux innovants adaptés aux hautes tensions ou des récepteurs hautes fréquences permet à la France de répondre rapidement aux appels d'offre tout en limitant l'implication pour des projets à l'issue plus incertaine. Cette tendance se retrouve dans différentes activités de R&D : ASIC génériques dans les chaînes de détection, composants pour les hautes tensions, sismomètre pour les lunes du système solaire, détecteur d'aérosols, récepteur hétérodyne THz, etc.

Recommandation [PL-1] : développer des systèmes de préparation des échantillons pour optimiser le retour scientifique et accompagner le développement d'instrumentation analytique *in-situ* en vue des missions de la prochaine décennie (e.g. MMX, Europa Clipper, Dragonfly, Tianwen-2, Mars Sample Return et les missions lunaires).

Recommandation [PL-2] : stimuler, à l'échelle inter-instituts du CNRS, la coordination des activités d'astrophysique de laboratoire en lien avec la mise en place d'outils analytiques de pointe et les environnements contrôlés adaptés pour l'étude des retours d'échantillons extraterrestres dans les laboratoires terrestres.

Recommandation [PL-3] : inciter le développement de systèmes miniaturisés et le transfert technologique pour des applications spatiales avec le développement de nouveaux matériaux et la miniaturisation de systèmes optiques, via le financement de projets à haut risque ou le PEPR Origins.

Recommandation [PL-4] : encourager l'INSU à mettre en place des actions interdisciplinaires (e.g. via la MITI) avec d'autres instituts du CNRS (e.g. INSIS, INC, INSB) pour répondre aux enjeux de R&D en miniaturisation avec des applications vers l'exobiologie.

e. Haute résolution angulaire (ASHRA)

L'**Optique Adaptative** (OA) fait l'objet en France d'une R&D soutenue sur les 30 dernières années, reconnue à l'échelle mondiale, et valorisée notamment dans les grands instruments de l'ESO. Aujourd'hui, les travaux sont principalement tirés par : (i) le changement d'échelle de 8 à 40 m imposé par l'ELT, (ii) la très haute performance avec l'OA extrême pour l'observation d'exoplanètes en vue du projet ELT/PCS. Le passage à l'ELT impose des défis significatifs pour la mise au point de systèmes d'OA efficaces. Plusieurs incertitudes subsistent quant à la mesure ou la compréhension fine des perturbations et font l'objet d'efforts de R&D : l'évolution de la turbulence atmosphérique sur 40 m, la caractérisation de la turbulence du dôme, la fragmentation de l'analyse de surface d'onde par les araignées du télescope. Le cœur de ces développements porte sur les composants (caméras rapides et sans bruit, miroirs déformables, modulateurs ultra-rapides, calculateurs temps-réel), de nouveaux analyseurs de surface d'onde, et les algorithmes pour la prédiction et la gestion du grand nombre de degrés de liberté avec les contraintes imposées par le temps réel. La validation des technologies en laboratoire et sur ciel est cruciale, notamment en l'absence d'un accès privilégié aux grandes infrastructures de l'ESO.

Les activités de R&D en **Haute Dynamique** visent principalement à soutenir l'observation d'exoplanètes pour (i) accéder aux champs inaccessibles en populations d'exoplanètes, et (ii) dresser une caractérisation physique et chimique de planètes telluriques les plus proches de leur étoile. Les instruments actuels ont permis d'observer des planètes gazeuses chaudes, depuis le sol (SPHERE, GPI, SCExAO) ou l'espace (JWST) avec un contraste planète/étoile jusqu'à 10^{-6} à 200 mas. Etudier des planètes gazeuses froides ou rocheuses requiert des contrastes de 10^{-6} à 10^{-10} à moins de 100 mas, sur des bandes spectrales larges de l'UV proche à l'IR moyen. Les efforts de R&D portent sur plusieurs volets pour atteindre et stabiliser le contraste requis : la coronagraphie, le contrôle spatio-temporel de la surface d'onde, la spectroscopie à haute résolution, le développement des composants innovants et l'élaboration de bancs optiques de validation en laboratoire et sur ciel. Les efforts bénéficieront, au sol, à la jouvence des moyens actuels (e.g. SPHERE/SAXO+, GPI2.0, HiRISE) et aux instruments de l'ELT (HARMONI, MICADO, METIS, PCS) et, dans l'espace, à JWST et aux missions envisagées (Roman, HWO, LIFE), avec une expertise française reconnue au niveau international.

Les activités de R&D pour l'**Interférométrie Optique** visent à améliorer l'instrumentation et le traitement des données des observatoires actuels (VLTI, CHARA) et en projet (LIFE, PFI). Ces actions sont principalement motivées par l'observation des exoplanètes, grâce aux récents succès sur GRAVITY. Cependant, la filière présente des applications bien plus vastes en astrophysique générale, e.g. les noyaux actifs de galaxies, les disques circumstellaires ou les objets stellaires jeunes. Les efforts de R&D actuels se concentrent sur le dépassement des limites des instruments actuels, notamment en augmentant leur sensibilité (e.g. GRAVITY+) et en améliorant les techniques de traitement des données acquises (e.g. MATISSE, GRAVITY). Des projets exploratoires concernent l'élaboration de nouveaux concepts tels que l'interférométrie annulante ou hétérodyne, et le potentiel déploiement de réseaux d'interféromètres optiques à grand nombre d'ouvertures et à bases kilométriques. La France joue également un rôle-clé dans la réflexion en cours à l'échelle internationale quant à l'extension du réseau VLTI. La R&D en astrophotonique a connu un essor significatif ces dix dernières années et avec un soutien récent via le PEPR Origins. Ces développements concernent des composants opérant dans des bandes du visible à l'infrarouge, pour offrir des observations multi-spectrales, notamment des atmosphères exoplanétaires.

Recommandation [HRA-1] : renforcer les capacités de développement de R&D en haute résolution angulaire, notamment en maintenant les moyens nationaux de démonstration et d'accès au ciel dans les laboratoires INSU, pour favoriser la montée en maturité des concepts et technologies proposés en vue des instruments au sol avec l'extension du VLTI et le projet ELT/PCS, et missions spatiales avec HWO et LIFE. Encourager l'ASHRA à continuer à jouer son rôle d'animateur de prospective, en particulier, avec les moyens précités.

f. Technologies optiques

La communauté dispose d'une forte expertise de R&D en optique et photonique avec des développements innovants au niveau composant (e.g. MOEMS, réseaux de diffraction non plans, guides d'onde visible et infrarouge pour l'interférométrie et la spectroscopie, optiques *freeform* et capteurs courbes) et concept instrumental à faible nombre d'optiques (e.g. CASTLE). Ces approches reposent sur la miniaturisation ou

l'utilisation de nouveaux matériaux tout en assurant une sensibilité accrue. Des retombées sont notamment attendues pour l'observation de l'univers à faible brillance de surface et le suivi d'événements transitoires.

Les spectrographes font l'objet de R&D soutenues pour diverses applications astrophysiques. Les principaux développements concernent les spectro-imageurs à base de MOEMS, les spectrographes ultra-compacts, les spectrographes à transformée de Fourier via optique intégrée et les spectro-polarimètres. Si ces activités pointent surtout dans les domaines UV, visible ou infrarouge, un intérêt croissant apparaît dans les rayons X dans la perspective de NewAthena.

Recommandation [TO-1] : inciter l'INSU à soutenir les projets de R&D en technologies optiques tournés vers la miniaturisation et l'utilisation de nouveaux matériaux, via les moyens de soutien (projets RIRI, MITI, CSIT) pour favoriser l'émergence de nouveaux modes d'observation.

g. Détecteurs et chaînes de détection

Les R&D et R&T¹ en chaînes de détection pour l'astrophysique abordent des aspects très larges allant du développement physique et du design du détecteur à sa caractérisation et calibration. Les activités de R&T se répartissent comme suit :

(i) La recherche sur l'interaction onde ou particule (bolomètres, rectificateurs de fréquence, résonateurs, comptage, hautes énergies), les phénomènes physiques associés, et le travail de design (hétérodynes THz, SSD plasma). Pour soutenir cette R&T, il est important de sécuriser une filière d'approvisionnement des détecteurs et de préserver les spécificités des métiers. (ii) La fabrication de détecteurs avec des filières qui s'appuient sur des collaborations étroites avec des micro-technologies européennes ou des infrastructures nationales. Certaines filières sont à la portée d'une structure académique (e.g. les détecteurs de JUICE-SWI, KIDs). D'autres filières nécessitent un partenaire industriel, avec le bénéfice de transferts technologiques (e.g. sources fluorescentes en vue de NewAthena/X-IFU) mais également le risque de frein ou d'arrêt (e.g. grandes matrices IR). (iii) La caractérisation et la calibration sont deux activités où l'expertise amène une reconnaissance internationale (capteurs IR au LESIA, CEA) et offrent une compréhension fine des systèmes de détection. Ces activités de position amont permettent d'identifier les objectifs scientifiques possibles, d'orienter les filières R&T existantes et d'alimenter le cycle d'activité.

Les activités de R&D font apparaître des cadres programmatiques dans leur orientation : (i) les réseaux de détecteurs (matrices de détecteurs sub-millimétriques et polarimétriques pour SPICA/B-BOP, caméra hétérodyne THz multipixel pour FIRSST), (ii) l'optimisation liée à la spatialisation (miniaturisation des chaînes de lecture de détecteurs, utilisation d'ASIC, miniaturisation des capteurs magnétiques).

Recommandation [Det-1] : maintenir les capacités de caractérisation et calibration des détecteurs au sein des laboratoires pour soutenir ou relancer le cycle de la recherche sur la physique du détecteur.

Recommandation [Det-2] : aborder les aspects de volumes, puissance et coût en chaîne de détection avec le volet d'encombrement aux interfaces des sous-systèmes qui souvent sont spécifiques à un instrument.

h. R&D numérique

Notre discipline s'appuie sur une R&D numérique de pointe pour répondre à des impératifs opérationnels (instrumentation, observatoire virtuel), avec une notion de qualité de service, et fonctionnels (simulations, traitement de données), avec un objectif de performance. Cette R&D exploite et développe des outils transverses (traitement du signal, fouille massive, IA, Exascale) offrant des possibilités de passerelles intéressantes avec d'autres domaines de la recherche.

Les principaux besoins pour soutenir cette R&D sont l'expertise sur des compétences techniques toujours plus variées (codage GPU, modèles d'IA) et les moyens pour faire face à la demande croissante de puissance de calcul et de volume de données. Répondre à ces besoins devient difficile pour une équipe, voire un institut, et il faut pouvoir s'appuyer sur des capacités mutualisées au niveau national. Une mutualisation des moyens est déjà effective avec l'accès à des supercalculateurs (Jean Zay, Ad Astra ou le

¹ R&D et R&T sont deux termes presque interchangeable mais qui cependant diffèrent suffisamment pour permettre une classification des recherches menées dans le domaine des chaînes de détection: en peu de mots, les activités de R&T se focalisent sur des aspects technologiques dans une logique d'innovation, celles de R&D envisagent le sujet de façon plus globale et dans une logique de production.

futur Jules Verne) pour initier des activités de R&D à peu de frais. Une bonne partie des besoins en expertise est couverte par des initiatives récentes (PEPR NumPEX, Cloud, IA) avec un travail de veille et de collaboration sur les solutions émergentes.

Outre ces aspects techniques, la R&D numérique développe des algorithmes de traitement et de contrôle pour une exploitation optimale des instruments mais aussi pour la relaxation de contraintes dans la conception instrumentale. Cette R&D contribue à démultiplier le potentiel des instruments avec des moyens et un impact environnemental sans commune mesure avec ceux des développements matériels requis par la faisabilité d'un instrument ou l'optimisation de ses performances. Le domaine de l'Astronomie et Astrophysique (AA) présente des problèmes qui suscitent l'intérêt d'autres laboratoires du domaine numérique. Pour rester ancrée dans la réalité des besoins en AA, cette R&D doit être portée par la communauté AA et il faut envisager l'enseignement de disciplines comme le traitement du signal (TS) et l'IA directement dans nos filières.

Recommandation [Num-1] : Soutenir la R&D en science des données et développer les synergies avec les autres domaines des sciences informatiques, sensibiliser et préparer nos étudiants par l'enseignement de disciplines comme le TS et l'IA, et accompagner ces profils au CNRS avec des postes tournés à l'interdisciplinarité (e.g. CID55).

Recommandation [Num-2] : Soutenir la mutualisation des expertises et des moyens numériques afin de répondre efficacement aux besoins et favoriser l'émergence de pôles de compétences et/ou de moyens au niveau national lorsque ceux-ci n'existent pas.

3. LIENS AVEC LES PRINCIPAUX PARTENAIRES

a. Prospective technologie CNES

Le CNES accompagne le développement d'un certain nombre de technologies jusqu'à leur mise en œuvre dans des bancs expérimentaux par des supports de R&T, des thèses et des phases 0/A. Parmi les filières, on peut citer la spectro-polarimétrie UV, la haute dynamique, le submillimétrique/THz, les chaînes de détection, et les chaînes cryogéniques à haute performance pour le refroidissement des plans focaux.

Le CNES assure un support prioritaire aux contributions françaises des missions ESA et NASA. Il peut être amené à prendre des maîtrises d'œuvre de petites missions ou contributions. L'agence maintient un savoir-faire à large base tout en développant de nouvelles capacités, telles que la miniaturisation des instruments (spectro-imageurs), l'exploration de nouvelles technologies de détecteurs à faible flux, la spectro-polarimétrie IR pour de l'analyse *in-situ*, les calculateurs et traitements embarqués (IA), les instruments variés dédiés à la mesure *in-situ* pour la planétologie et le domaine Soleil-Terre, les technologies nécessaires à de l'instrumentation répartie (e.g. NOIRE, mission radio interférométrique imageur HF), la R&D numérique, et l'amélioration des performances ballons et nanosats.

Depuis 2023, le processus de R&T CNES a évolué vers un mécanisme accru de co-construction entre laboratoires, industriels et experts CNES. Les propositions émanant des laboratoires font globalement l'objet d'une augmentation en qualité et maturité, et simultanément d'une baisse en nombre, révélatrice de la difficulté des équipes à dégager du temps. Les laboratoires pourraient plus s'emparer des Projets EXploratoires (PEX), destinés à étudier certains concepts et développer de nouvelles compétences côté CNES. Les deux premières recommandations sont adaptées d'un rapport du groupe de synthèse transverse pour le SPS 2024 :

Recommandation [CNES-1] : privilégier, côté CNES, la réactivité et l'agilité pour mettre en place rapidement, en amont de la phase de dépôt d'une proposition à un appel d'offre par des scientifiques français qui auront ensuite besoin du soutien du CNES, une aide à la construction du consortium scientifique ainsi qu'un plan d'action vigoureux permettant d'amener les contributions envisagées jusqu'au TRL d'entrée minimal.

Recommandation [CNES-2] : veiller pour le CNES à mieux informer ses partenaires, laboratoires et industriels des nouvelles possibilités ouvertes. Assurer une plus grande ouverture à des partenaires académiques avec des compétences en recherche amont dans les domaines de l'ingénierie et des logiciels. Veiller à inclure leurs experts dans les Communautés d'experts.

Recommandation [CNES-3] : poursuivre et encourager les initiatives de R&T communes entre INSU et CNES.

b. Les grands programmes en astronomie

Les missions (projets ESA Voyage 2050, LISA, NewAthena, LIFE, HWO, LiteBIRD, FIRSST), les projets au sol (SKA, VLT/VLTI, ELT, Einstein Telescope), le réseau T-REFIMEVE et l'élaboration d'horloges à réseau optique dans le domaine temps-fréquence élargissent parmi les grands programmes les plus susceptibles d'orienter la R&D dans les laboratoires. La communauté demeure fortement attachée à préserver la R&D amont ou de veille et dissociée d'un programme spécifique, avec par exemple les développements de briques technologiques telles que les détecteurs, les miroirs ou l'optique intégrée. Cette stratégie d'exploration assure une position française avant-gardiste sur les projets de la discipline.

Recommandation [Déf-1] : veiller pour l'INSU à soutenir la R&D amont sans objectif astrophysique prédéfini pour favoriser l'exploration instrumentale ou technologique et faciliter l'émergence de modes d'observation inédits (e.g. à travers la CSAA, MITI, RIRI).

Recommandation [Déf-2] : encourager la CSAA à développer et maintenir une vision rafraîchie des filières d'excellence à soutenir via différents canaux (e.g. programmes européens, CNES, CNRS: GDR, RIRI, MITI) en lien ou non avec des missions ou grands programmes de la discipline.

c. Relations avec l'industrie

Les partenariats industriels sont basés sur du co-développement, du co-financement ou co-encadrement de thèse et du transfert d'expertise ou de technologie. Ces partenariats concernent surtout l'accès à des plateformes technologiques ou des contrats de service vers l'entreprise. Des laboratoires mentionnent l'importance de la valorisation, des collaborations avec des industriels, et chercheront à faire grandir les collaborations vers ces acteurs. On note également une petite fraction des perspectives qui portent sur du transfert vers des thématiques hors AA, du transfert de technologie ou des aspects de commercialisation. Une majorité de R&D a recours à de la sous-traitance ou de la prestation externe pour toutes les étapes (conception, réalisation, validation) et sur tous les métiers, témoin de la disparition de la réalisation dans les laboratoires. Un réel risque existe de perte sèche de savoir-faire des unités au profit des industries et un risque de disparition d'expertise en cas d'arrêt ou de manque d'intérêt économique de l'entreprise.

Recommandation [Ind-1] : maintenir les compétences dans les laboratoires pour développer et pérenniser des filières instrumentales. En cas d'externalisation, s'assurer du maintien du savoir-faire dans les unités avec un suivi de la R&D par une personne référente, des accords négociés de veilles industrielles et de savoir-faire avec les partenaires externes, ou la documentation formelle du projet.

Recommandation [Ind-2] : amener l'INSU via une analyse de la CSAA à reconsidérer sa politique de soutien aux moyens mi-lourds, notamment dédiés aux aspects d'expérimentation, de caractérisation et de métrologie de composants, au sein des laboratoires.

4. LIEN AVEC LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Les laboratoires expriment un besoin fort d'avoir des outils communs au niveau national et des procédures standardisées pour l'évaluation de l'empreinte environnementale de leurs activités, notamment de R&D, et engager les actions pertinentes de réduction. Si les motivations de R&D restent majoritairement tirées par des thématiques AA, une fraction importante des laboratoires est disposée à développer de la R&D dédiée à la décarbonation des infrastructures de recherche, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la diminution de la pollution sous toutes ses formes, et la frugalité de la consommation en ressources énergétiques et minérales.

Les conséquences environnementales de ce besoin croissant de moyens numériques et matériels seraient significativement réduites avec l'apport de travaux de R&D dédiés à la frugalité.

Recommandation [Env-1] : mettre en place des procédures et outils communs, étendus au calcul du coût environnemental des achats, au niveau institutionnel, tout en veillant à minimiser la charge administrative pour accompagner l'ensemble des laboratoires dans l'évaluation de l'empreinte environnementale.

Recommandation [Env-2] : soutenir et encourager la R&D en lien avec les enjeux environnementaux, former les personnels de la R&D au défi climatique et écologique, à travers un soutien financier et des actions de formation pilotées par l'INSU.

5. CONCLUSION: ORGANISATION DE LA R&D ET MOYENS DANS LES LABORATOIRES

La R&D est aujourd'hui structurée au sein des laboratoires par axes thématiques, structures extérieures, projets ou équipes dédiées spécifiquement à la R&D, à parts presque égales. Les principales collaborations sont de nature inter-laboratoires ponctuelles sur programmes permettant la mise en commun de moyens, d'instruments ou de thèses sur des projets multidisciplinaires. Elles peuvent être identifiées sur le long terme, en LabCom avec des entreprises, ou avec d'autres agences nationales ou européennes. Les financements sont généralement de type ANR, ERC, PEPR, ou FUI pour soutenir la recherche appliquée. La R&D exploratoire est souvent présente et peut parfois dominer les activités programmatiques.

La R&D revêt un caractère fondamental pour l'astrophysique car elle se trouve au cœur des prochaines grandes découvertes, comme le démontre la genèse de nombreux résultats récents. Paradoxalement, elle se trouve démunie de moyens (humains, matériels et financiers) au profit de la réalisation des projets programmatiques en cours. Cet aspect fait encourir un risque certain pour le positionnement futur de la France dans les projets en astronomie, représente une préoccupation communautaire et requiert une vigilance institutionnelle.

Recommandation [Orga-1] : libérer du temps pour les personnels dans les laboratoires afin de mener de la veille technologique (disposer des moyens techniques et des ressources en gestion de projet dans les laboratoires), réaliser des études préliminaires (instaurer une culture et une reconnaissance des travaux amont), construire des projets de R&D, éventuellement transverses avec d'autres disciplines (au sein de l'INSU et avec les autres instituts du CNRS) et se coordonner avec d'autres organismes de recherche (e.g. CEA, CNES, ONERA).

Soutenir les projets de R&D et les besoins spécifiques d'interdisciplinarité dans les filières identifiées plus haut est essentiel pour répondre aux enjeux scientifiques et environnementaux à long terme.

Recommandation [Orga-2] : encourager la CSAA et la CSIIT à renforcer la coopération entre les thématiques de l'INSU dans le domaine de la recherche instrumentale.

La représentation des femmes en R&D reste encore bien trop modeste (e.g. les femmes représentent 21% des personnes porteuses de projets R&D recensés dans les enquêtes, elles représentent 23% des personnes en poste permanent d'après [Bot & Buat \[2020\]](#)).

Recommandation [Orga-3] : mettre en place au CNRS des actions incitatives pour remédier à la sous-représentativité des femmes en R&D (e.g. exposition des formations, politiques de recrutement, rôle modèle) et des initiatives pour favoriser une plus grande exposition des filières de formation aux besoins de la R&D (e.g. actions du Labex FOCUS).

Face aux développements effectués à l'extérieur des laboratoires, le maintien et le renforcement des capacités d'expérimentation, de caractérisation de composants et de métrologie des unités s'avèrent essentiels pour préserver le savoir-faire et assurer les veilles technologiques en France. Les laboratoires soulignent un besoin de compétence et d'expertise en IA et fabrication additive pour répondre aux besoins de la R&D.

Recommandation [Orga-4] : mettre en place au CNRS des actions de formation des personnels et des laboratoires en intelligence artificielle et fabrication additive afin de soutenir les R&D.

La montée en maturité de briques technologiques constitue un aspect déterminant pour favoriser leur inclusion dans les futurs grands projets.

Recommandation [Orga-5] : Valoriser au CNRS avec des moyens accrus la montée en TRL des R&D, en particulier entre TRL3 (preuve de concept) et 6 (démonstrateur dans un environnement significatif).

L'apparition de modes d'observation inédits est à ce prix pour permettre à la France de contribuer avec des technologies clé et mener les futures découvertes astrophysiques.