

Rapport de synthèse des travaux du groupe III.1: Moyens prioritaires

D. Aubert, J.-P. Berger¹, M. Bertin, O. Coeur-Joly, T. Contini, L. Jocou, A. Lamberts, A. Maury

Mis à jour le 15 Octobre 2024

Moyens instrumentaux radio sol : M. Douspis, S. Masson, **A. Maury**, C. Ng, J. Pety, P. Salomé

Moyens instrumentaux optiques sol: S. Antier, **T. Contini**, J.-C. Cuillandre, C. Dougados, B. Gelly, J., Lodewyck, S. Maurogordato, J. Richard, A. Santerne

Moyens instrumentaux sol hautes énergie/astrophysique multi-messager : P. Cristofari, D. Gotz, **A. Lamberts**, E. Pointecouteau

Moyens d'astrophysique de laboratoire : B. Albertazzi, **M. Bertin**, J. Noble, V. Vuitton

Moyens numériques : **D. Aubert**, C. Bot, B. Ceconi, M. Huertas, L. Jouve, M. Le Jeune, F. Le Petit, G. Lesur C. Surace

Plateformes et plateaux techniques : **O. Coeur-Joly**, **L. Jocou**

1 : coordinateur

Contenu

SYNTHESE DES PRINCIPALES RECOMMANDATIONS..... 2

MANDAT ET METHODOLOGIE..... 3

LES MOYENS PRIORITAIRES AU SERVICE DES DEFIS DE L'ASTRONOMIE 3

MOYENS D'OBSERVATION SOL 3

MOYENS D'OBSERVATION SOL RADIO.....3

MOYENS D'OBSERVATION SOL OPTIQUE.....6

MOYENS D'OBSERVATION SOL HAUTES ENERGIES ET MULTI-MESSAGERS9

MOYENS POUR LE CIEL TRANSITOIRE..... 11

COMPLEMENTARITE SOL-ESPACE 12

ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE..... 14

PLATEFORMES INSTRUMENTALES ET PLATEAUX TECHNIQUES..... 15

PARADISE 16

PLATEAUX TECHNIQUES 16

MOYENS NUMERIQUES 17

IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES (ET SUR LES) MOYENS DE L'ASTRONOMIE/ASTROPHYSIQUE..... 20

Synthèse des principales recommandations

La communauté astronomique française bénéficie d'un accès privilégié à une diversité de moyens d'observation existants ou à venir. L'astronomie multi-messagers est devenue une réalité et l'avènement de télescopes comme le Véra Rubin va ouvrir une fenêtre extraordinairement riche sur l'univers transitoire. Elle est en position de relever les défis scientifiques liés à l'étude des interactions et de leur complexité à toutes les échelles dans l'univers ainsi que la compréhension des processus influant l'évolution des systèmes astrophysiques depuis leur naissance jusqu'à leurs stades ultimes. Ses compétences en recherche/réalisation instrumentale et astrophysique de laboratoire la placent en excellente position pour relever les défis d'une instrumentation et expérimentation toujours plus exigeantes. Cette richesse ne doit pas cacher des points de vigilance majeurs. Cette réflexion globale nous amène à mettre en évidence les points saillants suivants.

- La communauté astronomique française est dans une trajectoire de hausse importante de son empreinte environnementale. Il faut accompagner, à l'aide de ressources humaines et d'outils dédiés, son effort pour évaluer son impact et définir une stratégie de développement des moyens du futur conformes aux engagements nationaux de réduction d'empreinte.
- Il ressort des enquêtes, des analyses des PN et des entretiens l'expression unanime d'un besoin massif de soutien à l'exploitation des moyens que ne satisfont pas les canaux actuels (ANR, ERC). La question de l'équilibre entre effort de réalisation instrumentale et ressources humaines pour l'exploitation des données doit être aussi posée.
- Il faut continuer l'engagement sur l'instrumentation ELT (METIS, MICADO, HARMONI, MORFEO) en portant une attention particulière à la gestion des ressources humaines dont l'implication dans le prochain quinquennat va être critique et marquée par des agendas d'instruments serrés. Le financement de MOSAIC devra être sécurisé. Par ailleurs, la communauté devra renforcer sa coordination pour l'exploitation scientifique des instruments ELT.
- Les instruments du programme VLT 2030, déjà présents dans la précédente prospective : Gravity+, Saxo+ et BlueMUSE doivent être accompagnés jusqu'à leur exploitation scientifique.
- L'IRAM et le CFHT sont deux infrastructures très utilisées par la communauté française qui ont fait des efforts de mise à niveaux importants. Il convient de soutenir leur exploitation et finalisation d'instrumentation.
- La consolidation de la nature du SRC-SKA tant du point de vue de l'architecture du centre, des ressources nécessaires et l'implication de la communauté doit être une priorité majeure. Il faut mettre à profit cette opportunité pour élaborer une stratégie nationale de gestion de grands volumes de données depuis son traitement jusqu'à son stockage et mise en valeur pérenne.
- La CSAA est encouragée à développer une stratégie nationale de soutien aux moyens essentiels à l'étude des transitoires au sol et espace dans le contexte particulier de l'astronomie hautes énergie et multi-messager.
- La communauté est confrontée au défi aigu de la pérennisation des compétences humaines et ressources techniques nécessaires au maintien de plateformes et instruments, qu'ils soient institutionnels ou bien obtenus par des financements extérieurs à durée limitée. Une réflexion nationale coordonnée doit être engagée pour définir une stratégie de maintien de compétences et de soutien sur la base des enjeux scientifiques prioritaires.
- La stratégie de regroupement des expertises nationales (vélocimétrie radiale, spectro-polarimétrie, spectroscopie multi-objets) au sein de services nationaux d'observations renouvelés doit être consolidée.
- La communauté d'astrophysique de laboratoire doit être soutenue dans son effort de coordination nationale et de définition d'une stratégie de gestion pérenne des outils expérimentaux et numériques.
- De nombreuses thématiques scientifiques dépendent désormais d'une capacité de calcul Exascale croissante. Elles nécessitent pour cela le maintien et développement de compétences d'ingénierie calcul pérennes et adaptées aux technologies. Un effort de coordination nationale, de maintien des compétences acquises, en particulier dans le contexte des PEPR doit être mené sans tarder.
- Plusieurs projets de nouvelles infrastructures « post-ELT » sont à l'étude (WST, AtLAST, UT5) en réponse à une probable prochaine phase d'études ESO. La communauté française devra être vigilante au réalisme des calendriers et ressources, l'apport scientifique et à la cohérence avec sa stratégie de réduction d'impact environnemental.
- Les quatre actions spécifiques ont montré leur rôle essentiel dans l'animation méthodologique de la communauté. Le groupe recommande leur reconduction.

Mandat et méthodologie

L'objectif de ce groupe est de définir le paysage des moyens du domaine à l'échelle de 15 ans en lien avec les besoins de la discipline. Par moyens on entend outils d'observation sol, plateformes et astrophysique de laboratoire et le numérique au sens large. Il fait le lien avec les recommandations de la prospective 2019 et les évolutions constatées par rapport à ces recommandations. Ce travail tient compte de l'évolution des thématiques de la discipline (liens avec le groupes *II.1 Thématiques et interdisciplinarité*) ainsi que les contraintes environnementales et sociétales (liens avec les groupes *I.2 Défi climatique et écologique*, et *I.3 Télescope et territoires, astronomie participative*). Le groupe a été alimenté par la prospective CNES grâce à une participation croisée de certains des membres.

Les travaux du groupe se sont déroulés au sein des sous-groupes de travail suivants : moyens sol radio, moyens sol optique et infrarouge, moyens sol hautes énergies/astronomie multi-messenger, moyens d'astrophysique de laboratoire, moyens numériques, plateformes et plateaux techniques. Chacun des groupes s'est appuyé sur des enquêtes ouvertes ciblant : pour les moyens instrumentaux sol, les responsables de moyens existants ou en projet ; pour l'astrophysique de laboratoire, les responsables d'expériences ; pour les moyens numériques, les utilisateurs de grands moyens de calcul, les directeurs de laboratoire et d'observatoires et les mésocentres de calcul ; pour les plateformes et les plateaux techniques, le directeur de PARADISE et les directions de laboratoires AA. En s'appuyant sur les réponses aux enquêtes, des retours de PI ou Co-I de missions spatiales, des entretiens et discussions ciblées complémentaires si nécessaire, nous avons pu établir un bilan comparatif des avancements par rapport à ce qui avait émergé de la prospective 2019. Les propositions du groupe de travail portent : 1) sur les moyens à soutenir en priorité ; 2) sur des recommandations à caractère organisationnel et structurant ; 3) sur les moyens nécessitant une vigilance particulière. Les critères employés pour établir les priorités ont été 1) l'importance des moyens dans la résolution des défis thématiques issus des retours des Programmes Nationaux et discutés au sein du groupe de travail II.1 ; 2) la nécessité de finir ce qui a été entamé ; 3) le niveau d'engagement scientifique et technique pour développer les moyens au sein des laboratoires INSU en incluant la gestion de la donnée ; 4) la faisabilité (ressources humaines et financières) dans le contexte actuel ; 5) l'importance pour l'accompagnement de missions spatiales qui a été évalué via une analyse croisée des retours d'enquête, du retour de la prospective CNES via sa représentante au sein du comité de pilotage et des remontées directes du groupe «Thématiques».

Les moyens prioritaires au service des défis de l'astronomie

Moyens d'observation sol

Moyens d'observation sol radio

Radioastronomie aux basses fréquences

Le précédent quinquennat (2019-2024) a vu la France rentrer officiellement dans SKA-Observatory en lui faisant acquérir le statut d'OSI dans la feuille de route ministérielle. Ceci représente l'aboutissement d'années d'effort d'une communauté de recherche et d'industriels qui s'est mobilisée et structurée de manière efficace avec le soutien du ministère et de l'INSU. La participation de la France dans la construction de l'observatoire SKA est donc maintenant engagée et s'est concrétisée, par exemple, par la création d'un laboratoire commun "hors les murs", ECLAT, regroupant plusieurs partenaires qui a pour objectif de créer un centre d'excellence sur le calcul haute performance (HPC) et intelligence artificielle au service de l'instrumentation astronomique. L'observatoire SKA a fait le choix de déléguer à la communauté la construction des centres de données, les SKA Science Regional Centers (SRC), ce qui représente un défi, avec des risques, scientifiques et techniques considérables. A l'échelle de la communauté française, on peut constater un important décalage entre les objectifs affichés et les ressources techniques et humaines actuellement disponibles, tant au niveau technologique que scientifique.

Sur le site de l'Observatoire Radioastronomique de Nançay (ORN), LOFAR et NenuFAR sont des instruments innovants utilisés par une communauté restreinte mais leader dans son domaine. Ils forment une infrastructure de recherche labellisée

intégrée dans la collaboration internationale LOFAR-ILT qui vient tout récemment d'acquiescer un statut d'ERIC. Les prochaines années devraient voir le commissioning de LOFAR 2.0 aux performances accrues. NenuFAR devrait également être validée comme super station LOFAR. Le NRT, qui a bénéficié d'un effort substantiel de mise à niveau a montré récemment qu'il était une pièce maîtresse du dispositif d'études de chronologie des pulsars (Pulsar Timing Array). Il restera compétitif jusqu'à l'avènement de SKA. Le réseau décimétrique NDA est en phase de jeunesse et son exploitation représente un faible coût humain et financier. Il continue à jouer un rôle dans les études long-terme faites sur Jupiter par exemple. Le NRH et SuperDARN sont des instruments dont la rénovation vient de s'achever ou est prévue en 2024, qui servent une petite fraction de la communauté PNST INSU. La jeunesse du NRH a été justifiée par l'accompagnement aux missions spatiales solaires dans le contexte de la météorologie de l'espace, tandis que la technique de diffusion cohérente utilisée par l'instrument SuperDARN permet de faire de la surveillance de l'ionosphère à grande échelle pour la climatologie de l'espace. Malgré leur faible production scientifique, leur intérêt réside surtout dans leur rôle sociétal pour la météorologie de l'espace.

Enfin les activités VLBI regroupées dans l'ERIC JIVE ont permis, entre autres, la construction de systèmes de référence, spatiaux ou terrestres dans laquelle la (petite) communauté française a joué un rôle important. C'est un lieu d'innovation scientifique et technologique aux applications larges. Néanmoins, l'augmentation prévisionnelle du coût de la participation française ne peut se justifier au vu de leur faible exploitation actuelle par notre communauté. On notera par ailleurs que les systèmes de référence ont une importance cruciale pour les missions d'observations de la Terre.

Points de vigilance et recommandations

- Il faut donner les moyens à la communauté d'assurer l'exploitation scientifique de SKA à la hauteur des engagements financiers. Il est aussi primordial que la communauté affine et affiche clairement ses priorités scientifiques pour s'assurer que celles-ci seront bien au cœur de possibles choix opérationnels futurs faits par le SKAO, en particulier s'il fallait dans un premier temps limiter le flux de données produites. Il est essentiel de mettre en place un cadre réaliste des coûts financiers et humains pour un SRC français. De ce point de vue, la lettre de mission du MESR en 2023, chargeant SKA-France le soin de mener une étude des besoins nécessaires au nœud français du SRC, est la bienvenue.
- Dans un contexte aux ressources limitées avec des jalons contraignants, les retours scientifiques en radio basses fréquences gagneront à se faire via une synergie nationale. Il faut garder le soutien à LOFAR/NenuFAR tout en stimulant la participation du personnel aux réseaux d'expertise pour SKA, et mobilisant les ressources de manière cohérente : matérielles, humaines, scientifiques et R&D en traitement du signal.
- Au vu de son faible coût et de sa production, il semble justifié de maintenir à NDA un soutien à son fonctionnement dans l'immédiat, tout en planifiant une revue de projet pour arbitrer sur son avenir à l'horizon 2030.
- Le soutien de l'INSU au NRH dans la durée doit être justifié par une stratégie scientifique. L'OFRAME doit être encouragé à jouer pleinement son rôle d'animation, de coordination et de prospective de la communauté météorologie de l'espace. Une évaluation par un comité d'experts internationaux des apports de cet instrument avant la prochaine prospective doit être envisagée.
- Le prolongement du soutien à JIVE doit donc être conditionné à l'identification rapide d'autres grandes questions scientifiques d'intérêt pouvant être explorées dans le futur à l'INSU grâce aux instruments VLBI et une expression d'implication plus forte de notre communauté (par exemple celle des transitoires). Une possible extension du soutien par d'autres domaines de l'INSU devrait être explorée.
- L'Action Spécifique SKA-LOFAR et SKA France doivent continuer à jouer un rôle fort de coordination et d'animation scientifique et technique.

Radioastronomie millimétrique et sub-millimétrique

Les observatoires (sub-)millimétriques IRAM et ALMA servent de nombreux thèmes de recherche en astrophysique comme l'attestent les nombreuses publications à participation française. Les développements successifs en sensibilité et résolution ont été couronnés de succès et ont permis de maintenir ces observatoires à la pointe en servant une communauté

large. Par exemple, l'IRAM a finalisé avec succès l'extension de son réseau NOEMA, priorité des prospectives précédentes, à 12 antennes et longues lignes de bases. Des projets d'ajout d'antenne pour NOEMA, améliorant l'observabilité au sud, et d'augmentation de la bande passante sont à l'étude. Du côté d'ALMA la priorité est l'augmentation de la bande passante dans le cadre du Wideband Sensitivity Upgrade (WSU) à l'horizon 2030. L'antenne de 30m de l'IRAM a connu une jouvence importante. Elle devrait bénéficier du développement d'un instrument hétérodyne multi-faisceaux grand champ, déjà prioritaire lors de la dernière prospective. Celui-ci devrait révolutionner les capacités de nombreux cas scientifiques qu'il sera ensuite envisageable de porter vers d'autres moyens. L'IRAM et ALMA font partie des moyens unanimement considérés comme prioritaires dans les retours d'enquêtes et la prospective des programmes nationaux. La fusion des Services Nationaux d'Observations correspondants soit être saluée. Cependant, comme dans la précédente prospective, on peut constater que l'accompagnement à l'exploitation scientifique en France de ces grands instruments est limité et impacte en particulier le retour des grands programmes dans un contexte international compétitif.

Les instruments conçus par des équipes françaises, tels Concerto (APEX), NIKA2 (30m), ArTéMiS/A (APEX) ont montré l'expertise française dans le domaine de l'imagerie grand champ (sub-)millimétrique. Ce sont des vecteurs de développements instrumentaux innovants au service de programmes scientifiques ciblés mais ambitieux. Ils sont souvent menés sur ressources propres durant leur phase de définition et de construction. Le succès de leur exploitation scientifique, néanmoins, repose sur la disponibilité des ressources humaines adéquates dans la durée. Pour NIKA 2, le transfert de responsabilité à l'IRAM a été un succès. Dans le cas particulier de Concerto, pourtant priorité de la dernière prospective et ouvert à la communauté, on ne peut que regretter l'impact négatif considérable de son retrait trop rapide du télescope APEX qui a laissé l'équipe en grande difficulté pour l'exploitation des données. Chacun des projets a soumis à cet exercice des propositions d'évolution (spectro-imageur Concerto2, NIKA 3 et Artemis) basées sur des améliorations technologiques dont les objectifs scientifiques sont encore à consolider.

Dans un futur plus lointain (décennie 2030-2039), le projet d'antenne de 50m AtLAST ambitionne de révolutionner l'observation en spectro-imagerie grand-champ ($>1^\circ$) dans le (sub)millimétrique. Son modèle de financement/gouvernance reste encore à définir et son instrumentation représente un défi technologique important. La communauté française est actuellement peu engagée dans la définition de ce projet (cas scientifiques et instrumentation), malgré son activité sur de nombreuses thématiques et son savoir-faire instrumental reconnu.

Radioastronomie du fond diffus cosmologique

La communauté française (IN2P3, INSU) possède une longue et grande expertise dans l'étude du fond cosmologique diffus (CMB). La complémentarité Sol/Espace est importante pour couvrir l'ensemble des échelles spatiales nécessaires pour détecter et caractériser les modes B du CMB. De ce point de vue, le succès récent de la phase 0 du CNES de BISOU et la dynamique autour du projet de source de calibration spatiale CosmoCal pour les télescopes sol montrent le dynamisme de la communauté sur le sujet. Cependant les prochaines missions spatiales (LiteBIRD) sont envisagées dans un horizon lointain (post 2030). Maintenir un accès aux données sol doit permettre de préserver au mieux l'expertise de traitement des données et d'analyse du CMB. L'annonce récente du retrait des Etats-Unis de l'exploitation du site polaire rend le Simons Observatory (SO, Chili) incontournable. Cependant, la communauté CMB sol INSU est historiquement plus petite que la communauté CMB Espace. Le projet d'instrument SATFR pour le SO, porté par l'IN2P3, offre une opportunité de retour scientifique important, de valorisation de l'investissement dans le traitement de données et les technologies KIDs et d'animation de la communauté autour d'un projet commun à condition que son déploiement soit assuré d'ici 2027.

Points de vigilance et recommandations :

- Il est important de continuer à soutenir l'IRAM dans son développement. La rénovation de ses bâtiments doit lui permettre de continuer à jouer pleinement son rôle unique de centre d'expertise et conserver la plateforme technologique associée à la pointe pour la décennie à venir. Par contre, l'ajout d'une antenne supplémentaire à NOEMA ne semble pas justifié par un programme scientifique d'intérêt communautaire.
- La mise en opération de la spectroscopie haute résolution multi-faisceaux sur le télescope de 30m de l'IRAM est fortement encouragée.

- La stratégie financière de l'ESO pour participer au développement du Wideband Sensitivity Upgrade (WSU) sur ALMA, et les coûts attendus pour les futurs développements d'ALMA à l'horizon 2030, doivent être clarifiés.
- Le soutien à la seconde génération d'instruments (spectro-)imageurs sub-millimétriques doit reposer sur un retour d'expérience de l'exploitation des premières générations, une sécurisation d'accès à du temps de télescope et un plan d'exploitation des données pensé dans la durée.
- La communauté utilisatrice de spectro-imagerie grand champ sub-millimétrique doit être encouragée dès maintenant à identifier rapidement les cas scientifiques AtLAST qui lui sont pertinents, et investir sur les efforts de recherche et développement en conséquence.
- Le projet SATFR doit être soutenu sous réserve d'une consolidation de son modèle de financement et d'une clarification de la politique de partage des données CMB. La communauté est encouragée à se rassembler autour de ce projet pour renouveler une feuille de route ambitieuse, trans-instituts incluant sol et espace en préparation de la quatrième génération d'instruments sol et satellites.

Moyens d'observation sol optique

La communauté française a accès à une grande variété de moyens d'observations dans le visible et infrarouge: des instruments pour les grands télescopes, des télescopes instrumentés sur le sol métropolitain, des infrastructures de recherche, des réseaux de télescopes répartis sur le globe. La plupart des moyens lourds (30 au total) sont opérés dans des infrastructures de recherche de type OSI (ESO), IR (instrumentation ESO, LSST, REFIMEVE) et IR* (CFHT). Une grande majorité de ces moyens (64%) n'étaient pas disponibles pendant le précédent quinquennat (2019-2024), alors que 28% des moyens nécessitent une jouvence ou une mise à niveau dans ce quinquennat. On notera que 14% sont des projets à plus long terme (décennie 2030-2040). Une grande partie des moyens (~60%) peut être regroupée en trois grandes catégories de *spécificités techniques* associées généralement à des objectifs scientifiques distincts : la *haute résolution angulaire* (14 moyens), incluant les systèmes d'optique adaptative (OA) et l'interférométrie, la *haute résolution spectrale* (12 moyens), et la *spectroscopie multi-objets massive* (11 moyens) incluant les spectrographes à intégral de champ (IFS). Une autre catégorie concerne des moyens dédiés (ou utiles) pour l'astronomie multi-messager du *ciel transitoire* (voir section dédiée plus bas). Enfin deux autres regroupements plus petits concernent les *références espace-temps* (4 moyens) et l'étude du *soleil & la météo de l'espace* (5 moyens).

Instrumentation ESO/ELT : La première lumière de l'ELT est prévue maintenant fin 2028. Les instruments de première lumière MICADO, MORFEO, HARMONI et METIS, priorités de la dernière prospective, sont actuellement en phase de design final et devraient être construits au cours du prochain quinquennat. Cela a été possible grâce à l'attribution de l'équipex F-CELT à l'INSU (2021). Le groupe fait le constat d'une grande pression sur les personnels causée par un engagement très large au vu des ressources disponibles et une sous-estimation de la durée et de la complexité des projets dont les jalons peuvent varier fortement. Par ailleurs le groupe s'interroge sur le calendrier de réalisation d'instruments aussi agressif qui ne semble pas avoir de justification scientifique et qui risque d'être confronté à la réalité de mise en opération du télescope. Concernant les instruments de première génération, le spectromètre à haute précision ANDES a signé son accord de construction et MOSAIC (seul instrument à PI français) est en phase B et travaille à la consolidation du design et de son plan de financement et ressources humaines. Enfin l'ESO semble souhaiter démarrer une réflexion de phase A pour l'instrument PCS (imageur haut contraste) dès 2024.

Instrumentation ESO/VLT(I) : Les nouveaux spectrographes multi-objets VISTA/4MOST et VLT/MOONS, recommandés lors de la prospective 2019 devraient être validés sur le ciel en 2025. Ils ont un rôle important dans l'accompagnement sol des missions spatiales GAIA et Euclid. Un point de vigilance sera la disponibilité des ressources humaines pour leur exploitation avec des équipes déjà impliquées dans la mise en route de WEAVE, DESI et bientôt Subaru/PSF. Les trois projets de la feuille de route ESO VLT 2030 restent de fortes priorités pour la communauté. GRAVITY+, dont l'intégration est en cours (2024-25), ouvrira de nouvelles voies au VLTI avec des performances accrues en résolution (OA extrême) et en sensibilité ; il bénéficiera également à MATISSE. SAXO+ (ex SPHERE-upgrade), dont

le feu vert pour la construction est attendu à l'été 2024, est également un démonstrateur technologique pour l'ESO et la communauté HRA en préparation à ELT/PCS. BlueMUSE, qui capitalise sur le grand succès de MUSE, commence sa phase officielle de design préliminaire cette année. Le projet mène également des activités de R&D importantes.

A plus long terme, plusieurs propositions d'instrumentation future pour le VLT ont été soumises à l'enquête avec un niveau de maturité assez bas. Elles montrent cependant que la communauté continue à se projeter avec des idées nouvelles qui reposent souvent sur le succès de développements précédents. On notera le projet de spectrographe multi-objet à haute résolution spectrale (HRMOS), de spectro-polarimètre pour le VLT (VNIS) anticipant la fin des observations au CFHT après 2033, la construction d'un cinquième télescope (UT5) pour augmenter la capacité du VLTI et pour lequel un livre blanc est en cours de rédaction, ou encore une mise à jour de PIONIER pour la caractérisation d'exoplanètes.

CFHT: Le Télescope Canada-France-Hawaii a fêté ses 45 ans en 2024. C'est un télescope compétitif qui fait face à plusieurs défis financiers, techniques et sociétaux. Les pannes liées à l'usure sont de plus en plus nombreuses avec des contraintes budgétaires qui ne permettent pas de développer un plan de maintenance préventive. Le budget constant en US\$, non ajusté à l'inflation et dépendant des fluctuations monétaires, se traduit par une réduction du personnel (~20%) et la perte de certaines compétences clés. Enfin, la situation très incertaine de l'astronomie au Mauna Kea, avec un renouvellement possible du bail en 2033 qui sera négocié avec la nouvelle autorité MKSOA à partir de 2028, pèse sur l'avenir du CFHT, en particulier pour son éventuelle transformation en un télescope dédié à la spectroscopie massive (projet MSE). Le projet Wenaokea (ex VISION) combinera fin 2024 les deux instruments de spectro-polarimétrie ESPaDOnS et SPIRou. Cela permettra de simplifier significativement les opérations au télescope et d'augmenter le retour scientifique. Le maintien de MegaCam permettra de poursuivre, entre autres, les grands programmes d'observation nécessaires au succès de la mission spatiale Euclid. Le financement de MSE nécessite impérativement l'arrivée de nouveaux partenaires, ce qui n'est pas facilité par l'avenir incertain de l'astronomie au sommet du Mauna Kea.

Télescopes nationaux (T193 & TBL): Les deux télescopes nationaux: le T193 à l'observatoire de Haute-Provence et le TBL à l'observatoire du Pic-du-Midi restent compétitifs sur la scène internationale à l'ère des VLT/ELT, et ce, grâce à des instruments dédiés sur des thématiques fortes (exo-planètes, magnétisme stellaire) pour lesquelles la communauté française a été pionnière. Les deux instruments du TBL, NeoNARVAL et SPIP, seront bientôt couplés dans le même principe que Wenaokea au CFHT afin de pouvoir couvrir l'ensemble du domaine visible et infrarouge en spectro-polarimétrie. Une jouvence importante de l'instrument SOPHIE(-Red) sur le T193, afin d'augmenter les performances dans le rouge, a pris du retard. Sur le dernier mandat, le T193 s'est aussi doté du spectrographe MISTRAL, particulièrement utile pour l'observation du ciel transitoire mais dont le temps de télescope est limité. L'ONERA est par ailleurs le maître d'œuvre pour la DGA d'un télescope de la classe des 2m baptisé PROVIDENCE qui sera installé à l'OHP et qui ne devrait, sur le papier, pas faire appel à des ressources INSU. Ce télescope sera équipé d'une optique adaptative extrême et d'étoile laser pour observer les satellites. Du temps scientifique et de R&D (environ cent nuits par an) est prévu pour la communauté INSU mais les conditions de son octroi ainsi que ses objectifs ne sont pas connus.

Moyens de référence espace-temps : REFIMEVE, projet de réseau optique fibré à l'échelle nationale pour le transfert temps-fréquence, est labellisé IR depuis 2021 aux côtés de RENATER. Le réseau est déployé à plus de 75%, avec plus de 90% de disponibilité à l'année. Des développements en cours consistent à disséminer un signal de temps en plus du signal de fréquence optique. L'opération et le développement de REFIMEVE nécessite des ressources de fonctionnement ainsi que du personnel technique (IE/R) pour le service de données, ressources difficilement finançables via des appels à projet. Le moyen national temps-fréquence (MNTF), qui établit et diffuse les références nationales de temps et de fréquence 24h/24, répond aux besoins de la communauté A&A et remplit des obligations de la communauté scientifique envers le pays, en termes de métrologie scientifique, légale, civile, etc. Le parc des horloges vieillissant soulève le problème de la pérennisation de ce moyen stratégique. La station MéO poursuit ses objectifs scientifiques en métrologie laser de grande précision en équilibrant son travail entre le Service d'Observation et la R&D instrumentale. Une mise à niveau du laser Lune, qui aura bientôt 40 ans et qui ne permet pas d'exploiter la précision millimétrique de la prochaine génération de réflecteurs lunaires en déploiement à l'horizon 2025, apparaît comme indispensable avec un coût allant de 500k€ (solution minimale) à 2M€ (excellence métrologique).

Soleil & Météo de l'espace : Le spectrohéliographe, CLIMSO et METEOSPACE sont trois "petits" moyens destinés à la surveillance de l'activité solaire et à la météo de l'espace, ayant en commun l'observation en imagerie et/ou coronographie du soleil entier fortement soutenus par le PNST. Le spectrohéliographe est affecté par la disparition au LESIA des personnels en charge par départ à la retraite ou mobilité : un recentrage de l'instrument vers l'Observatoire de Paris qui en

a la responsabilité paraît souhaitable. CLIMSO, dont le fonctionnement quotidien est assuré par une association d'amateurs, sera équipé dès 2025 d'une nouvelle lunette C3 afin d'étudier la couronne solaire comme source d'événements pour la météo de l'espace. Enfin, la finalisation du projet METEOSPACE sur le plateau de Calern viendra compléter ces moyens de surveillance de l'activité solaire d'ici 2025. Les données temps-réel seront intégrées aux services civils et militaires de météo de l'espace. Le groupe recommande une labellisation dans le cadre d'une extension du SNO 3Soleil. Avec l'optique adaptative opérationnelle depuis 2021 et l'arrivée d'un nouveau spectro-polaro-imageur (début 2025, collaboration INAF) le télescope THEMIS peut redevenir compétitif. Une exploitation scientifique active de cette nouvelle instrumentation par la communauté nationale doit être une priorité. Le projet European Solar Telescope (EST) situé aux Canaries est une priorité au niveau européen (Astronet). Le nouvel accord de collaboration prévoit un niveau égal de participation indépendamment de la « taille » des pays. Pour le prochain quinquennat, cela impliquerait une contribution française de ~5M€/an pendant 5 ans pour la construction, puis ~1M€/an pour les opérations. Le groupe fait le même constat qu'en 2019 d'une expression d'intérêt de la communauté solaire mais d'une mobilisation très limitée dans les études scientifiques et techniques de l'instrument.

Télescopes dédiés à la spectroscopie massive, WST & MSE : Deux projets majeurs de télescopes dédiés à la spectroscopie massive (MOS, IFU), grande expertise française, sont à l'étude à l'horizon 2035-40, un télescope de 11m pour MSE (Hawaii) et de 12m pour WST (Chili) permettant d'acquérir le spectre de ~20,000 objets sur un champ étendu de quelques deg², avec l'utilisation en simultanée d'un IFU panoramique pour WST. Ce type de moyen est une forte priorité de la discipline en particulier pour le suivi spectroscopique des grands relevés photométriques en cours (GAIA, Euclid) et à venir (LSST, SKA, CTA, Roman, ...). La visibilité sur le projet MSE est actuellement très limitée car il est confronté aux incertitudes concernant l'avenir du site et a besoin de nouveaux financements/partenaires pour débiter une phase d'étude de concept. WST bénéficie d'une forte mobilisation d'un consortium européen incluant l'Australie et a obtenu un financement Horizon Europe en 2024 pour une étude de concept. Ce projet souhaite s'inscrire dans la feuille de route ESO post-ELT dont les pré-études devraient être initiées en 2028.

Points de vigilance et recommandations

- Au vu des recouvrements de calendriers des différents instruments, en particulier pour l'ELT et le VLT/I mais également pour les études de concept (MSE, WST, HWO), il faut s'attendre à des difficultés de ressources et une pression considérable sur les personnels.
- La communauté, sous l'impulsion de la future CSAA, est encouragée à renforcer la préparation de l'exploitation des instruments ELT en développant une vision trans-instruments par thématique scientifique.
- La priorité sur MOSAIC et les instruments de 1ère lumière de l'ELT empêchent d'envisager une contribution technique majeure à l'instrument ANDES malgré son intérêt fort pour la communauté.
- Le groupe exprime son inquiétude sur la convergence des calendriers de SAXO+, PCS et du télescope spatial NASA HWO qui impliquent tous la mobilisation de ressources OA et imagerie haut contraste à un moment de pression forte de la première génération ELT.
- Le groupe recommande de ne pas mettre en œuvre de nouveau chantier instrumental au VLT mais de s'assurer que ce qui a été décidé lors de la prospective 2019 soit bien mené à terme (GRAVITY+, SAXO+ et BlueMUSE). Il faut défendre auprès de l'ESO l'exploitation scientifique de SAXO+.
- L'INSU est encouragé à soutenir le maintien d'un programme de développement instrumental actif à l'ESO ; mais soutenable et reposant sur un calendrier et des ressources réalistes et une justification scientifique exigeante.
- L'INSU devrait suivre l'impact du développement de PROVIDENCE sur ses ressources avec attention. Les conséquences de l'éventuelle migration de MISTRAL sur le télescope sont à étudier.
- La CSAA devrait évaluer si l'accès de MISTRAL au T193 de l'OHP est suffisant pour lui permettre de jouer un rôle d'importance dans l'étude des transitoires.
- Pour le CFHT le groupe émet les recommandations suivantes : 1/ augmenter la fraction de temps de télescope pour les prochains *Large Programs* (2025-26) et réfléchir à la mise en place de *Legacy Surveys* jusqu'à la prochaine décennie (échéance du bail, ~2027-2032) afin d'optimiser l'exploitation des instruments en opération. 2/ Maintenir en opération les instruments essentiels MegaCam et Wenaokea au succès des missions spatiales

(Euclid, PLATO, ARIEL, etc). 3/ Réduire les risques financiers en maintenant (au minimum) la contribution française actuelle indexée sur l'inflation et le coût de la vie à Hawaïi. 4/ Poursuivre les efforts pour changer de paradigme et développer un modèle d'astronomie communautaire au Mauna Kea en symbiose avec la population locale.

- Les deux télescopes nationaux ont encore un rôle important à jouer dans l'accompagnement des missions spatiales, telles que PLATO, ARIEL, et SVOM mais les volumes d'observation requis pour ces tâches ainsi que la stratégie d'exploitation sont à consolider.
- Le groupe encourage la CSAA à organiser un retour d'expérience critique de l'apport du programme européen ORP avant l'élaboration de toute stratégie de renouvellement.
- L'effort de mutualisation/synergie des SNOs autour de la vélocimétrie radiale et de la spectro-polarimétrie doit être soutenu. Cela pourrait aboutir à la création d'un pôle thématique national en spectroscopie haute résolution. Une réflexion similaire sur la spectroscopie multi-objet et spectro-imagerie doit être encouragée.
- L'infrastructure REFIMEVE bénéficierait grandement d'un soutien pour accéder aux ressources mutualisées de gestion d'information développés par la DT de l'INSU. Par ailleurs il est important de promouvoir des actions interdisciplinaires au sein de l'INSU et au CNRS, avec l'INSIS et l'INP.
- L'INSU et les partenaires concernés devraient se pencher sur l'impact d'un parc d'horloges vieillissant et développer une stratégie de maintenance pérenne.
- L'installation du spectromètre italien IBIS 2.0 sur THEMIS devrait être soutenue. Un bilan de son exploitation scientifique par la communauté française doit être réalisé avant la prochaine prospective.
- Malgré son intérêt scientifique, le groupe renouvelle le constat fait lors de la dernière prospective du faible engagement de la communauté française dans les études préparatoires (techniques et scientifiques) de l'European Solar Telescope. Cette dynamique ne justifie pas l'investissement de ressources au niveau requis. L'expérience acquise par l'exploitation d'IBIS derrière l'optique adaptative à THEMIS reste une porte d'entrée intéressante pour le futur.
- Les projets WST et MSE sont des projets majeurs d'infrastructure ayant des objectifs scientifiques en grande partie similaire et exigeront des ressources considérables. Dans le cadre d'un effort majeur de rationalisation de ses développements instrumentaux et de la baisse de son empreinte environnementale la communauté française ne pourra pas faire l'économie de choix d'ici 2030.

Moyens d'observation sol hautes énergies et multi-messagers

Le domaine des hautes énergies et du multi-messager est structuré par, d'une part les missions spatiales (rayons X, gamma, ondes gravitationnelles) et d'autre part par les grands projets internationaux où le moteur français est souvent l'IN2P3. Huit moyens ont été recensés (Virgo, Einstein Telescope, KM3Net, H.E.S.S., CTA, LHAASO, SWGO, GRAND), pour la moitié une évolution de moyens déjà identifiés lors de la prospective de 2019. Virgo, KM3Net, H.E.S.S., CTA, bénéficient du statut d'IR/IR*, Einstein Telescope est inscrit sur la feuille de route ESFRI et les projets GRAND et LHAASO sont considérés comme MasterProjet à l'IN2P3. Les moyens couvrent quatre messagers (ondes électromagnétiques, ondes gravitationnelles (OG), rayons cosmiques et neutrinos), et produisent souvent des données "privées", très hétérogènes et peu interopérables ce qui pose la question de services d'observations dédiés et de leur intégration dans l'observatoire virtuel. Les thématiques de recherche sont essentiellement du périmètre PNHE, mais également PNGRAM (Ondes gravitationnelles), PNCG (recherche de matière noire), PNPS (évolution stellaire). L'INSU copilote une partie des infrastructures sol (CTA, HESS, LSST, Ego-Virgo). L'accès des chercheurs de l'INSU à HESS, LSST et LHAASO se fait via l'achat de tickets.

Après les succès remarquables des détecteurs d'OG, le détecteur européen Virgo traverse des difficultés majeures pour atteindre la sensibilité voulue pour la campagne O4. Cela soulève des inquiétudes pour la suite de la collaboration Ligo-Virgo-Kagra (LVK) mais également pour la contribution à l'Einstein Telescope. La mise en place d'une stratégie corrective

efficace par l'EGO (European Gravitational Observatory) est une nécessité absolue. Une solution technique, basée sur des cavités courtes a été choisie mais nécessite de sécuriser un financement et d'évaluer l'impact pour la campagne O5 (2027).

L'Einstein Telescope (ET) est le projet européen de 3e génération pour la détection d'OG au kHz, prévu pour la fin des années 2030. Le budget total est estimé autour du milliard d'euros. Les Pays-Bas et l'Italie, potentiels pays hôtes, ont déjà massivement investi. La fin de la phase préparatoire (et choix du site) est prévue pour 2026 et le design préféré est considéré par une part importante de la communauté comme risqué. A ce jour la France dispose d'un rôle d'observateur dans le comité directeur de l'ET. Des chercheurs INSU ont des rôles importants dans la préparation de l'exploitation astrophysique montrant que notre communauté dispose d'experts. Malgré une organisation de collaboration très figée, il y a un enjeu important à structurer, animer et mettre en valeur l'expertise de la communauté INSU scientifique et instrumentale.

KM3Net est un observatoire de neutrinos dont l'instrument ARCA dédié aux neutrinos hautes énergie monte en puissance et devrait être pleinement opérationnel en 2028. C'est un projet financé par l'IN2P3 mais qui, dans la ligne des précédentes recommandations, a vu les liens avec la communauté INSU (en lien avec CTA) se renforcer: 1) statut d'observateur du LAM ; 2) une sensibilité et des résolutions accrues et 3) par les accords en cours d'élaboration entre KM3Net et plusieurs instruments dans le giron de l'INSU (Colibri, SVOM, Nenufar, GRANDMA). On notera cependant que, comme pour la plupart de ces infrastructures la politique de mise à disposition des données reste fermée et mérite discussion. Néanmoins ces évolutions justifient une plus grande participation de l'INSU.

GRAND est un projet de détecteur radio de neutrinos d'ultra haute énergie, avec une résolution angulaire dix fois meilleure que KM3Net ou ICECUBE et un seuil d'énergie 1000 fois plus grand. Le projet, dont la contribution française repose sur une petite équipe qui se renforce, a progressé en accord avec les recommandations : les prototypes de GRANDProto300 et GRAND@Nançay ont été déployés en Chine et en France et la validation du principe de détection est en cours. Le projet doit passer à une phase R&D grande échelle (GRAND10k) si la Chine reste ouverte à la collaboration. Une stratégie de développement complémentaire pour la phase suivante semble se dessiner en Argentine. Elle doit être précisée. Ce passage à l'échelle est conditionné à la mise en place d'une collaboration européenne et internationale structurée.

Le réseau CTAO, priorité à l'INSU de longue date et structuré par CTA-France, a démarré le commissioning des "Large Telescopes". La construction des autres (Moyens et Petits), dans laquelle l'INSU est très impliqué, débutera en 2026-27. L'ensemble devrait être opérationnel en 2029. La structure du financement à parts égales par le CEA/INSU/IN2P3 est garantie pour les prochaines années mais pas au-delà. Des difficultés persistent dans la mise en place de la structure européenne (ERIC). La hausse des coûts amène des discussions avec les partenaires allemands sur la réduction du nombre de télescopes avec un impact potentiel considérable sur la science.

H.E.S.S continue à produire de la science activement. La contribution française au financement des opérations, assuré essentiellement par l'IN2P3 et le CEA, devrait être assurée jusqu'à l'avènement de CTA. L'accès de la communauté INSU continue de se faire via des tickets.

LHAASO est un détecteur gamma de très haute énergie en opérations en Chine. Il s'agit du premier instrument capable d'observer le ciel dans la bande d'énergie allant de 100 GeV à 1 PeV. L'instrument a acquis le statut de "master project" à l'IN2P3 mais sans financement. L'INSU n'est pas impliqué mais on note un petit groupe de chercheurs actifs qui doit abonder à des tickets pour y accéder.

Points de vigilance et recommandations :

- Il est important de continuer à stimuler la communauté INSU exploitant les détecteurs d'OG et de mettre en valeur l'expertise dans le domaine de la R&D par exemple au travers d'actions transversales soutenues par MITI.
- Une implication active de l'INSU dans le « board » de VIRGO est cruciale afin de peser sur les choix qui permettront de continuer à contribuer à la collaboration LVK dans les temps.
- L'INSU doit accompagner l'IN2P3 dans le soutien du projet d'Einstein Telescope auprès du ministère. Un affichage fort, coordonné et conditionné au choix du design du détecteur est nécessaire.
- L'INSU doit s'assurer que la performance de CTA ne soit pas dégradée par des choix économiques.

- KM3Net a ouvert une fenêtre des hautes énergies unique. Il est important de clarifier ce que l'on peut espérer en retour des accords de collaboration.
- Le passage à l'échelle de GRAND nécessite un soutien international robuste, au-delà de l'INSU, pour financer la construction et les opérations. La mise en place d'une structure internationale motivée par un programme scientifique est fortement encouragée. Elle est la condition d'un éventuel soutien plus important de l'INSU.
- La CSAA devrait définir une stratégie de financement des tickets qui soit claire et pluriannuelle (par appel d'offres), pour permettre les participations des équipes INSU à l'exploitation des moyens extra-INSU. Celle-ci devrait être motivée par la valeur des projets scientifiques.
- Beaucoup d'instruments évoqués fonctionnent sur un modèle "PI", dans lequel les données ne seront jamais publiques. Dans un contexte de science ouverte qui s'impose en astronomie, une réflexion sur la politique de données est à encourager et devrait être discutée dans le cadre du groupe de contact INSU/IN2P3.

Moyens pour le ciel transitoire

L'exploration du ciel transitoire, que ce soit avec des moyens dédiés ou non, a connu un essor important ces dernières années avec un champ de découverte considérable qui rentre dans les exercices de prospective de plusieurs instituts (INSU, IN2P3, INP). La variété d'objets/processus à l'origine des transitoires, depuis les météorites, géo-croiseurs jusqu'aux sursauts gamma lointains, nécessite une approche systématique et coordonnée couvrant les hémisphères Nord et Sud. Leur étude est liée à une "science sur alerte", où l'on distingue i) les générateurs d'alertes (fournissant le temps de l'événement, une localisation, et la nature astrophysique de l'alerte) ii) les moyens de suivi (confirmation de la nature de l'événement et sa caractérisation, localisation précise de l'objet) et iii) les outils nécessaires au recueil, tri et diffusion de l'information. Elle entraîne une mobilisation importante et à la volée, de la part des scientifiques, mais aussi, de moyens en termes d'observations à planifier et de méthodologies d'analyses de données. Les générateurs d'alertes se sont multipliés dans les dernières décennies avec l'avènement de l'astronomie multi-messager : détecteurs d'ondes gravitationnelles (LIGO, VIRGO, KAGRA), satellites hautes énergies (Fermi et bientôt SVOM), les détecteurs de neutrinos (KM3Net et IceCube) et très bientôt le télescope Rubin-LSST.

Notre enquête a identifié 15 "moyens" (télescopes, instruments, réseaux, logiciels) en activité (10) ou en projet (5) revendiquant explicitement un lien avec l'étude des transitoires auquel nous pouvons ajouter le VLBI et les moyens radio de suivi ultra-rapides (de l'ordre de la minute pour les Fast Radio Burst). Parmi ces moyens cinq ont été explicitement dimensionnés pour gérer les alertes dans le contexte "hautes énergies". Colibri (sursaut gamma + ciel transitoire généraliste), est un télescope robotique de 1-m soutenu par le CNES installé au Mexique possédant une caméra visible, et équipé à terme d'une voie infrarouge CAGIRE développée en France également. Il a été conçu pour assurer le suivi des alertes SVOM. GRANDMA (ondes gravitationnelles, neutrinos, kilonova, sursauts gamma) est un réseau qui mobilise 35 télescopes photométriques et spectroscopiques dans le monde. La collaboration a développé le programme de science participative Kilonova-catcher (~150 membres). On notera deux projets de télescopes de petit diamètre grand champ TAMARINS (la Réunion, en phase d'étude) et ELIXIR (OHP, en pré-construction) qui se positionnent explicitement sur le suivi de transitoires hautes énergies.

D'autres instruments sont dédiés à l'étude des phénomènes variables. Le projet TAROT (qui fait partie partiellement du réseau GRANDMA), est composé de 3 télescopes robotiques au champ d'application large mais qui inclut les transitoires hautes énergies. MISTRAL au T193 de l'Observatoire de Haute Provence est le seul spectro-imageur d'accès direct à la communauté française. Il a été conçu pour l'étude d'une large gamme de phénomènes transitoires et s'est positionné également en soutien de SVOM. Son accès au ciel est néanmoins restreint par son partage du temps avec les grands programmes de SOPHIE. FRIPON est composé de 200 caméras réparties dans le monde et s'appuie sur le projet de sciences participatives Vigie-Ciel pour ses études. ASTEP+, un télescope de 40 cm, installé à Concordia a été conçu principalement pour le suivi de transits exoplanétaires mais peut suivre certains transitoires tout comme EXTRA un réseau de trois télescopes à la Silla. UniversCity (Calern) est un petit télescope dédié à un spectre large d'objectifs dont les occultations de petits corps. On notera enfin l'existence du courtier d'alertes Fink qui assure le traitement des alertes du télescope Rubin-

LSST et synergies avec d'autres observatoires. C'est un exemple vertueux de développement coordonné et ouvert. Il est financé par l'IN2P3 mais bénéficie à la communauté INSU dont plusieurs chercheurs sont impliqués.

A plus long terme on gardera en mémoire que d'ambitieux projets de spectro-imageurs, WST et CFHT-IFU, se sont positionnés sur le segment de la caractérisation spectroscopique de l'alerte.

Plusieurs constats peuvent être faits. Le suivi de sources transitoires nécessite des moyens dédiés au Nord et au Sud. L'essentiel des sources nécessite d'être sur le ciel en moins d'une journée, une couverture de toutes les longitudes est donc moins cruciale ou peut être menée en collaboration. La majeure partie des moyens en projet ou développement ont un programme scientifique peu détaillé et un plan de gestion des données peu accessible. Ils souffrent en conséquence d'un déficit de visibilité auprès des programmes nationaux concernés. Ces moyens sont souvent soutenus par des petites équipes. Ceux en opération font état de difficultés récurrentes dans l'opération, le traitement, la gestion et la mise en valeur de la donnée. L'accès aux données est par ailleurs souvent peu formalisé, indirect et requiert le passage par le porteur de projet. La majorité des télescopes recensés est centrée surtout sur le "grand champ, peu profond" qui est relativement bien couvert. Pour la thématique transitoires hautes énergies une plus grande profondeur sur un grand champ est souhaitable. L'infrarouge est nécessaire pour l'identification et la caractérisation des sources. Le suivi des transitoires nécessite également de la spectroscopie moyenne et/ou haute résolution, dont l'accès risque d'être difficile. Au Nord, au-delà de MISTRAL, l'accès se fait par le programme Européen ORP, dont l'avenir est incertain. Au Sud, SOXS est l'instrument idéal, mais la stratégie du choix des sources est complexe, et seule la collaboration SVOM bénéficie d'un accord spécifique. Enfin, le financement initial de la plupart des projets est souvent d'origine locale ou de partenaires institutionnels (CNES, IN2P3). L'INSU est sollicité à la marge, souvent pour compléter le financement, assurer la pérennité de l'exploitation et ou le soutien dans la gestion de la donnée sans avoir la possibilité de peser sur les orientations scientifiques.

Points de vigilance et recommandations :

- Le groupe considère qu'il n'est pas prioritaire d'investir dans de nouveaux moyens "grand champ et peu sensibles".
- Étant donné les enjeux particuliers liés au suivi sol de SVOM, il est recommandé que l'INSU soutienne les opérations de Colibri au niveau nécessaire si le CNES ne s'implique pas plus.
- Un accès à la spectroscopie dans les 2 hémisphères est essentiel mais actuellement limité par manque d'accès au télescope de MISTRAL et les difficultés d'accès "facile" à d'autres télescopes. L'impact d'une éventuelle migration de MISTRAL sur le télescope PROVIDENCE devrait être examiné.
- Le consortium européen ACME (2024-2029), financé par le programme Horizon Infraserp devrait être, pour le prochain quinquennat, le guichet de référence pour soutenir la mise à niveau des moyens de la science des alertes. Le groupe recommande que la CSAA, sous l'égide des programmes nationaux concernés, développe une stratégie coordonnée de soutien des moyens de suivi des alertes et transitoires basés sur des programmes scientifiques et techniques aboutis.
- En fonction des résultats d'une telle coordination, une réflexion sur la création d'un SNO thématique "alertes et transitoires" pourra être envisagée. Elle devrait inclure le développement de logiciels dédiés comme le courtier Fink.
- La CSAA est encouragée à s'emparer du sujet de la science citoyenne afin d'évaluer comment la soutenir au mieux dans la durée et de manière cohérente entre les différents projets.

Complémentarité sol-espace

De nombreux moyens au sol sont associés à l'exploitation scientifique de la mission *GAIA* (2013-25). Les spectrographes à grand multiplex sont fondamentaux pour l'étude de la Voie lactée et du Groupe local, avec l'exploitation imminente de WHT/WEAVE, VISTA/4MOST, et VLT/MOONS. Ces suivis permettent à la fois d'étendre à un volume plus important

L'analyse cinématique des étoiles et d'y apporter l'information cruciale sur la composition chimique de ces objets. La synergie GAIA - grands relevés spectroscopiques va donc permettre des avancées spectaculaires en archéologie galactique. L'exploitation scientifique de GAIA implique également l'utilisation de spectrographes à haute résolution spectrale comme T193/Sophie-red, VLT/UVES, TBL/NeoNarval, T360/NIRPS, et VLT/HRMOS, ELT/ANDES parmi les moyens à long terme. Une synergie importante est également attendue dans le domaine de la physique stellaire avec les nouveaux moyens développés en haute résolution angulaire, en particulier pour la compréhension des systèmes binaires (VLTI), et l'optimisation des mesures des paramètres stellaires. Les principaux instruments concernés sont VLTI/HiRISE, VLTI/GRAVITY+, VLT/MAVIS, et ELT/HARMONI. GRAVITY+ permettra entre autres la confirmation des candidats exoplanètes fournis par GAIA, et le cas échéant leur suivi astrométrique de longue durée. En ce qui concerne les petits corps du système solaire, le suivi sol est essentiel pour compléter les données photométriques GAIA sur des périodes plus longues et contraindre leurs propriétés physiques. Les télescopes de petite taille robotisés, tels que OCA/UniversCity, et OHP/ELIXIR ont un rôle de tout premier plan à jouer, en exploitant les occultations stellaires par les astéroïdes pour contraindre les paramètres de ces objets. Bien que les observations GAIA s'arrêtent en 2025, une longue et fructueuse synergie avec les moyens au sol est attendue pour la dizaine d'années à venir, avec des avancées majeures prévues dans de multiples thématiques.

La conduite des grands relevés d'imagerie au sol en optique fait partie intégrante de la mission *Euclid* (2023+). Les données sol sont combinées aux données spatiales pour l'obtention des redshifts photométriques qui sont critiques à la réalisation des objectifs scientifiques. Un plan de collaboration est en cours avec Rubin-LSST et le programme CFIS entrepris au CFHT avec MegaCam depuis 2017, couvre une partie importante du ciel Nord. Un programme d'extension vient d'être soumis en 2024 pour faire le lien avec Rubin-LSST, avec un calendrier s'étendant jusqu'en 2029. L'émergence des instruments de spectroscopie massive (WEAVE, DESI, bientôt 4MOST, MOONS, PFS, et à plus long terme MSE et WST) permettra l'enrichissement de la mission via des suivis spectroscopiques. En outre, les instruments de type IFS, tels que BlueMUSE, HARMONI et MOSAIC seront essentiels, grâce à leur résolution spectrale, à la caractérisation astrophysique des galaxies et des structures à grande échelle de l'Univers lointain détectées par Euclid.

La mission franco-chinoise *SVOM* (2024+) permettra la détection de sursauts gamma et leur localisation immédiate. L'alerte sera transmise aux instruments au sol qui assurent le suivi à différentes échelles de temps. Ceux-ci jouent un rôle crucial car ils permettent de mesurer la distance, la localisation précise et d'effectuer la caractérisation des objets indispensables au retour scientifique de la mission. Le réseau de suivi au sol est clairement indispensable à une bonne exploitation scientifique de la mission. Grâce à ses performances (sensibilité, rapidité de réaction, gamme spectrale), le télescope robotisé COLIBRI équipé de la caméra infrarouge CAGIRE joue un rôle de suivi crucial. D'autre part, le suivi sol suppose l'accès à d'autres infrastructures pilotées par l'IN2P3 via des tickets. La mission *THESEUS* (2037+) fait partie des trois missions candidate pour l'appel M7 de l'ESA en compétition pour une sélection définitive en 2026. C'est la seule mission ESA pour la détection des transitoires hautes énergies pour la décennie 2030+ et représente le successeur de SVOM à l'horizon 2030+. Elle est d'une grande importance pour l'astronomie multi-messager. Son retour scientifique bénéficiera grandement de l'instrumentation sol, en particulier la haute résolution spectrale et la sensibilité d'ANDES sur l'ELT, qui permettra de mesurer la métallicité et la fraction d'hydrogène neutre pour les sursauts à très grand redshift.

Une synergie importante est attendue entre la mission *PLATO* (2026+), dont l'objectif principal est d'étudier un grand nombre de système exo-planétaires (en particulier les exo-Terres) et les spectrographes à haute résolution spectrale sur des télescopes de 2m à 4m. Le suivi du *champ Sud*, priorité du consortium pour les 2 premières années, sera assuré par les instruments HARPS, NIRPS et ESPRESSO de l'ESO. Si PLATO observe ensuite un *champ Nord* (non acté actuellement), celui-ci sera suivi par la panoplie de spectrographes accessibles par la communauté française : NeoNarval et SPIP au TBL, Sophie(-red) au T193, et SPIROU au CFHT. CHARA/SPICA permettra également de fournir plusieurs centaines de cibles pour PLATO et des calibrations pour le pipeline. D'autres instruments sol comme ASTEP+ et NIRPS permettront également de fournir des cibles pour la mission *ARIEL* (2029) dont l'objectif est d'analyser la composition chimique des atmosphères des exoplanètes. SPIROU au CFHT jouera un rôle fondamental pour l'accompagnement de cette mission afin de caractériser la variabilité stellaire des étoiles M. À plus long terme, ANDES sur l'ELT, grâce à sa haute résolution spectrale, sera complémentaire d'ARIEL pour la caractérisation des atmosphères planétaires.

JWST (2023+) est un observatoire spatial présentant de nombreuses complémentarités avec les moyens sol (haute résolution spectrale/angulaire, spectroscopie de type IFS, etc) dans de multiples thématiques scientifiques. Les premiers résultats publiés avec le JWST ont montré à quel point la synergie avec les instruments sol est essentielle. Dans le domaine de la physique stellaire/exoplanètes la haute résolution spectrale permet de fournir les informations cinématiques inaccessibles avec JWST, l'imagerie avec OA donne de meilleurs résultats en termes de résolution angulaire que le JWST pour des sources brillantes, et l'imagerie à haut contraste permet de sonder les zones très proches des étoiles, là où le JWST donne des informations sur des zones plus externes. En ce qui concerne l'étude de l'univers jeune, une synergie importante est attendue entre MOSAIC et JWST pour le suivi de cibles à très grand redshift, et la cartographie des premières structures remontant jusqu'à l'époque de la réionisation. L'instrument BlueMUSE offrira également une couverture complémentaire unique dans le bleu.

Les synergies entre le futur observatoire en rayons X *NewAthena* (2037+), équipé du spectro-imageur X-IFU, et les moyens sol sont nombreuses. Elles concernent la caractérisation des sources du ciel transitoire avec les moyens de détection d'ondes gravitationnelles au sol (LIGO, VIRGO, KARA, PTA) et dans l'espace avec LISA, l'observation des neutrinos avec IceCube et KM3NeT, ou encore les phénomènes à très hautes énergies avec CTA. La disponibilité de l'ELT et de son instrumentation de pointe (MICADO, HARMONI & MOSAIC) permettra en outre de caractériser les sources de rayons X à grand redshift (AGN primordiaux, proto-amas, etc). Dans la même veine, le futur interféromètre spatial *LISA* (2035+) bénéficiera grandement d'une synergie avec les grands relevés (Rubin, ZTF, SKA, Gaia) ainsi que les suivis spectrométriques Euclid.

La mission *SolarOrbiter* ne fait pas remonter de besoin critique en matière d'accompagnement sol sur des instruments français. NRH, NDA etc. sont des moyens sol qui viennent compléter la mission, mais ne sont pas "critiques" pour son bon fonctionnement ou son retour scientifique.

Astrophysique de laboratoire

La communauté française a fait remonter 73 moyens, à majorité (~ 90%) expérimentaux (expériences de laboratoire) mais regroupe aussi (~ 10%) des activités théoriques (codes de simulations de physique/chimie fondamentales). Les moyens sont très distribués à l'échelle nationale, avec plus de 19 laboratoires et 2 IR* (SOLEIL, GANIL) impliqués. On remarquera cependant des pôles géographiques (Paris Intramuros, Paris-Saclay, Rennes, Grenoble, Marseille et Toulouse) qui concentrent à eux seuls 75 % des moyens d'astrophysique de laboratoire en France.

Thématiques. Les moyens d'astrophysique de laboratoire se définissent tous dans 3 grandes thématiques scientifiques : Physique et chimie du milieu interstellaire (41 %), Planétologie (45 %) et Physique à haute densité d'énergie et MHD (14 %), relevant des programmes nationaux PCMI, PNP et PNPS/PNST/PNHE. Il faut noter que les thématiques sont poreuses, avec 50 à 75% des moyens identifiés se définissant sur deux thèmes, notamment PCMI et PNP. Les disciplines associées aux moyens peuvent être regroupées en 4 blocs : la physique atomique et moléculaire et la spectroscopie ; la physico-chimie dans des conditions extrêmes (basses températures et pressions, photochimie du gaz et des solides, collisions à faibles énergie d'impact) ; l'analyse chimique à haute sensibilité et haute résolution ; l'hydrodynamique, MHD et plasmas. Les moyens d'astrophysique de laboratoire sont identifiés en lien avec l'exploitation de grandes missions d'astrophysique spatiales. Beaucoup de moyens (55 %) revendiquent un lien avec les télescopes spatiaux IR, notamment le JWST (40 % des moyens). Une part importante (~ 50 %) est également associée aux missions spatiales de sonde in-situ et de retour d'échantillons (*JUICE*, *MMX*, *Cassini-Huygens*, *Hayabusa 2*, *new Horizons*, *Osiris Rex*, *Mars express*, *Rosetta*, *Europa Clipper*...). Parmi ces derniers, 17 moyens d'astrophysique de laboratoire, tous identifiés dans la thématique PNP, sont spécifiquement dédiés aux analyses des retours-échantillon et participent ainsi directement à l'exploitation des missions. Les moyens sont également mis à contribution dans l'exploitation de moyens d'observation au sol, avec en majorité les télescopes/interféromètres de l'IRAM (NOEMA, 30 m) et ALMA. Enfin, les activités d'astrophysique de laboratoire sont par essence centrales aux activités de simulation astrophysique (physique stellaire, physico-chimie du milieu interstellaire et des atmosphères planétaires), les données produites alimentant directement les codes numériques impliqués.

Les moyens ouverts à des utilisateurs extérieurs, hors collaborations (42% des répondants) font état d'une double difficulté :

le manque de personnel pour assurer l'accompagnement et l'absence de structuration nationale qui donne un cadre de gestion. La communauté analyse de retour-échantillon semble sensiblement mieux structurée, par exemple dans le cadre d'infrastructures de recherche transversale RéGEF, dont l'extension était une recommandation de la précédente prospective. De manière générale, la lourdeur des procédures, la faible rentabilité du "modèle économique" et l'absence de personnels techniques INSU associés de manière pérenne sont jugés comme des freins à l'activité.

L'astrophysique de laboratoire dans l'INSU Les moyens d'astrophysique de laboratoire sont, au niveau national, hébergés à majorité dans des laboratoires dont la tutelle principale n'est pas l'INSU. 37 % des moyens sont dans des laboratoires INSU, à hauteur quasi-égale avec les moyens hébergés à l'INP (36 %). Les autres moyens sont principalement hébergés dans des laboratoires INC (17 %) et INSIS (10 %). Cette distribution varie suivant les thématiques développées : les moyens dédiés au retour-échantillon sont principalement hébergés à l'INSU (68 %) dans des laboratoires non AA. Ils sont de plus insérés pour une partie d'entre eux dans des structures trans-INSU, notamment dans le cadre de l'infrastructure de recherche transversale RéGEF, avec une interconnexion forte avec les thématiques INSU-OA et INSU-TS de géochimie. En revanche, seulement 25 % des moyens PCMI ou 45 % des moyens PNP ayant répondu à l'enquête sont hébergés dans des laboratoires de l'INSU. L'INSU joue un rôle important dans le financement des moyens d'astrophysique de laboratoire, notamment via les PN et la CSAA. La dynamique de migration des moyens d'astrophysique de laboratoire vers des laboratoires non-INSU s'est cependant confirmée depuis 2019 avec les départs de plusieurs équipes scientifiques et des moyens vers des laboratoires INP et INC. Elle s'explique, entre-autres, par la difficulté d'héberger et d'exploiter de manière pérenne des instruments expérimentaux. L'astrophysique de laboratoire possède de plus la particularité de ne pas avoir de service national d'observation propre. Les SNO existants en lien avec l'astrophysique de laboratoire sont des services liés aux bases de données. La production même des données ne fait pas l'objet de services, et la présence de personnels CNAP est toujours anecdotique malgré les recommandations de la dernière prospective. Enfin, on notera le rôle d'importance que joue depuis le PEPR Origins dans le développement de nouveaux outils.

Points de vigilance et recommandations :

- L'astrophysique de laboratoire est très interdisciplinaire et distribuée ce qui affecte sa visibilité.
- Des structururations "thématiques" existent et sont soutenues par les programmes nationaux ou GDR DE (PILSE, EMIE, EPICE) ou le PEPR Origins. Un manque de structuration transverse empêche l'élaboration d'une réelle politique scientifique à l'échelle nationale capable de conseiller les instituts sur l'élaboration d'une stratégie de priorisation, pérennisation et mutualisation des ressources. Il est recommandé de mettre en place un GDR "Astrophysique de Laboratoire" impliquant l'INSU, INP, INC et l'INSIS dont le mandat sera de faire émerger des grands pôles d'astrophysique de laboratoire, à la fois thématiques et géographiques, en soutien des missions spatiales.
- La pérennisation des développements menés au sein PEPR Origins devra être intégrée au prochain exercice de prospective nationale sur l'astrophysique de laboratoire.
- L'identification de pôles structurants pourra conduire à la définition de services nationaux d'observation CNAP dont la tâche de service serait d'assurer le fonctionnement des moyens mutualisés et l'accueil d'utilisateurs comme le maintien de base de données essentielles à l'interprétation (par ex. JWST).
- Le groupe maintient également la recommandation de création de postes chercheur bi-disciplinaires (INSU-INP, INU-INC...), tel que formulé dans la prospective précédente.
- Il est important d'améliorer les conditions d'hébergement des moyens au sein des laboratoires INSU. Le groupe recommande à l'INSU de prendre en compte le soutien pérenne aux activités expérimentales dans les dotations récurrentes des laboratoires.
- Dans un contexte riche de missions spatiales de collecte d'échantillons soutenues par le CNES, il est recommandé de prioriser à court terme le soutien en ressources humaines dédiés aux moyens d'analyse de retour-échantillon.

Plateformes instrumentales et plateaux techniques

Paradise

Paradise est une infrastructure de recherche depuis 2022 dont la vocation est de structurer la mutualisation des outils et infrastructures de six laboratoires pour le développement, l'intégration, le test et l'étalonnage d'instruments pour l'instrumentation spatiale astronomique. Son fonctionnement repose sur un budget annuel d'environ 6 M€ et moins de 40 ETPs. L'activité concerne à plus de 80% la communauté A&A, le reste étant majoritairement des prestations externes. Une grande partie de l'effort actuel porte sur la mise en place d'un mode économique souple et efficient pour ses différentes plateformes : mise en place des tarifications intégrables dans les appels d'offre, auto-financements par des prestations externes. Elle améliore la qualité de ses prestations, et notamment les processus d'accueil sur les équipements, les protocoles de test et les rapports d'essai en incitant à suivre des normes de qualité (La PIT a obtenu la certification ISO 9001). Enfin, la plateforme organise depuis 2022 des formations pour le personnel technique.

Depuis 2020 la plateforme a contribué à divers projets clé : intégration et livraison de NISP / Euclid (LAM), polissage du miroir du NGR télescope (LAM), étalonnage de JUICE / MAJIS (IAS), finalisation de la caméra MXT (AIM), étalonnage de la caméra PLATO (IAS) et campagne d'essai de ZIFO / LISA au LAM. A moyen terme, PARADISE interviendra sur les instruments ELT, MOSAIC et HARMONI, intégrés dans les locaux du LAM. Coté spatial, elle contribuera aux missions ESA, JAXA et NASA telles que les missions M4 (ARIEL /AIRS), M5 (EnVISION), M7, L2 (ATHENA / XIFU), et les potentielles contributions à l'AIT de LISA et de Dragonfly.

Bien qu'elle soit pleinement fonctionnelle, la structure rencontre des difficultés et défis. La formation du personnel est longue et nécessite de l'expertise pour les exigences spatiales notamment. Le fonctionnement s'accommode donc mal de personnels non permanents et le départ de personnels en mobilité ou retraite constitue une réelle difficulté. La montée en niveau des normes de qualité fait exploser les coûts de fonctionnement et de jouvence qui prennent une part de plus en plus importante du budget récurrent. De la même manière, des jouvences d'infrastructures immobilières (Centrale de Traitement d'Air, bâtiments, ...) ne peuvent être financées par les budgets classiques de fonctionnement de PARADISE.

Points de vigilance et recommandations :

Pour que PARADISE puisse affronter ses défis il faut l'aider à : 1) maintenir un potentiel RH compétent et pérenne ; 2) contractualiser le soutien financier ; 3) développer à l'échelle de l'INSU une structure d'accompagnement au développement de modèles économiques des infrastructures de PARADISE. Celle-ci devrait comprendre, en particulier un soutien à la gestion administrative d'accueil pour les prestations industrielles ; 4) soutenir l'enrichissement de son parc d'équipements afin de répondre aux besoins liés aux nouveaux grands instruments ou à des besoins de tests en environnement spécifique.

Plateaux techniques

L'exercice de prospective a inclus, pour la première fois, une enquête sur les "plateaux techniques" définis comme "un ensemble d'appareils et dispositifs ainsi que les ressources humaines nécessaires à leur opération, concourants à la recherche et à l'expérimentation scientifique et pouvant être ouverts à une plus large communauté scientifique ou à des collaborations industrielles". Ne figurent pas dans ces plateaux les équipements de "PARADISE", les parcs informatiques et les développements recensés par la DIIRO (Développements Instrumentaux Innovants pour la Recherche et l'Observation), traités par ailleurs. Dix laboratoires ont répondu à l'enquête, et 33 plateaux techniques ont été recensés. 6 d'entre eux n'ont pas été retenus car figurant déjà dans PARADISE ou correspondant à des salles blanches ou ateliers d'électronique. Les plateaux ont été classés selon les types suivants : 1) *La métrologie (3 plateaux)* : activités de diffusion de références nationales de temps/fréquence et mesures de surfaces optiques. 2) *L'astrophysique de laboratoire (12 plateaux)* : analyses physico-chimiques des solides extraterrestres, des composés organiques ; recréation des conditions du milieu interstellaire pour l'interprétation des observations astronomiques ; simulation du plasma spatial terrestre ou planétaire ; spectromètres de masse à très haute résolution pour le spatial; 4) *Les plateaux de développement et d'intégration (6 plateaux)* : développements technologiques ou développement de moyens de tests ou caractérisation en appui au développement de projets; 5) *Les ateliers mécanique (6 plateaux)* : usinage et métrologie de pièces mécaniques

Le coût initial des plateaux techniques est élevé allant d'environ 300 k€ à 1 M€ pour la plupart avec des coûts de fonctionnement d'environ 5% du coût initial. Les fonds d'achat proviennent de sources très variées (CNES, CNRS, Régions, laboratoires, ERC, ANR, contrat de valorisation), alors que les coûts de fonctionnement reposent davantage sur les laboratoires, les projets et les dotations des tutelles ou des OSU. Un grand nombre de plateaux fonctionnent avec 3 ETP ou moins (~70%). Seuls 3 plateaux disposent de plus de 5 ETP, et 2 d'entre eux sont des ateliers mécaniques. Plusieurs laboratoires font remonter la criticité d'avoir des plateaux reposant sur un seul expert.

Les plateaux techniques sont quasi exclusivement utilisés par et pour AA, tandis que les plateaux d'astrophysique de laboratoire partagent leur exploitation avec d'autres domaines (TS, OA, Physique, Chimie, partenaires industriels). Ils sont globalement très sollicités. Pour certains leur taux d'utilisation annuel est proche de 100%, tandis que pour d'autres le manque de personnel ou le coût d'approvisionnement des fluides (Helium) rendent impossible leur utilisation en continu.

Si les coûts de fonctionnement restent en général supportables pour les laboratoires, financer la jouvence des équipements requiert des financements plus importants et complexes à trouver. Une autre difficulté est le manque de personnel technique : la majorité des plateaux est déjà de fait en sous-effectif ou confrontée au départ futur d'ITs et leur non remplacement conduira à la perte d'un savoir-faire long à acquérir. Par ailleurs le groupe fait le constat que peu de plateaux techniques sont adaptés à une tarification à l'usage, les principaux freins étant le manque de ressources IT pour assurer un fonctionnement de type « service » et une ouverture à une communauté plus large, et la complexité d'utilisation de certains dispositifs qui ne sont pas automatisables.

Points de vigilance et recommandations :

- Il est nécessaire de mieux communiquer sur l'existence de ces plateaux et sur leurs spécificités scientifiques et techniques.
- Plusieurs équipes vont, ou ont déjà atteint une taille sous-critique. Comme cela avait été préconisé lors du dernier exercice, il est nécessaire de favoriser le recrutement de chercheurs expérimentateurs/trices en plus des ingénieurs et techniciens en support des plateaux techniques.
- Le groupe recommande à la CSAA d'établir une stratégie d'accompagnement du fonctionnement pluri-annuel des équipements mi-lourds jugés stratégiques (banc 50 mK de caractérisation des détecteurs pour le spatial, le Moyen National Temps-Fréquence, etc).
- Dans le contexte des moyens d'astrophysique de laboratoire l'INSU devrait coordonner une réflexion sur la stratégie de priorisation et d'accompagnement des plateaux techniques financés sur projets (ERC)
- Les ateliers de mécanique ont d'importants coûts de jouvence, des difficultés pour recruter du personnel formé et ils sont souvent en compétition avec la sous-traitance industrielle. Dans ce contexte, maintenir tous les ateliers semble complexe et le constat de l'arrêt *de facto* de certains est clair. Pourtant ceux-ci sont cruciaux pour être réactifs et soutenir certaines activités (intégration d'instruments par exemple). Le groupe recommande que l'INSU (voire le CNRS), élabore une stratégie nationale et régionale de mutualisation et de soutien à ces moyens.

Moyens numériques

L'état des lieux des « moyens numériques » proposé ici repose sur 2 enquêtes : l'une ouverte aux porteurs de projets numériques et offrant une vision au plus près de l'utilisation de ces outils, l'autre à destination des laboratoires et OSUs fournissant une vue complémentaire et davantage intégrée de leur utilisation par leurs équipes et services.

Projets numériques. 53 projets ont répondu à l'enquête. Ils couvrent les thématiques de tous les programmes nationaux, avec 50% de profils déclarés « calcul haute performance » (*High Performance computing*, HPC), 20% « traitement massif de données » (*High Performance Data Analysis*, HPDA), 10% « intelligence artificielle (IA) ». 20% des projets se définissent autrement, notamment autour du développement et l'exploitation de chaînes de traitement de données instrumentales. Cette diversité se manifeste dans le type de calculs réalisés en production (39% font remonter des temps de calculs typiques < 10 000 h CPU mais 25% > à 1 000 000 h CPU) et les volumes de données produites (70% produisent

moins de 10 To de données tandis que 20% produisent au moins 100 To). Ces productions numériques sont réalisées à tous les niveaux de la hiérarchie des moyens de calculs depuis les moyens locaux (70% des répondants) jusqu'au moyens internationaux (23%). Environ 20% des répondants s'estiment bloqués dans le passage à des moyens plus puissants, par manque de formation ou d'information. A noter également que 35% des réponses déclarent dorénavant utiliser des cartes graphiques (GPUs) pour leurs travaux numériques sans que ne nous dispositions de détails techniques sur la configuration.

Une fois la donnée disponible, l'analyse ou le post-traitement se fait quasi-exclusivement (>80%) sur des moyens locaux (labos, OSUs) voire régionaux (mésocentre), pour des volumes traités allant de quelques To jusqu'à plusieurs centaines de To. Il en est également de même pour le stockage et l'archivage. De fait, la mise en place du transfert de données entre le lieu de production (centre de calcul, centre instrumental) et le lieu où s'effectue analyse/stockage/archivage est remontée comme une difficulté majeure par les répondants, avec des volumes stockés localement très importants par certains projets (>100 To pour 30% d'entre eux). Une autre difficulté régulièrement remontée est le manque de solution pérenne pour le stockage et/ou l'archivage des données : la durée d'archivage typiquement visée est supérieure à 5 ans, au-delà de la durée de vie typique des projets qui fournissent souvent les ressources initiales pour l'hébergement de ces données.

Ces données (ou les produits de leur exploitation) ont en grande majorité, vocation à être publiées et partagées, et 70% des répondants disent rendre des données publiques, généralement par des canaux bien établis (SNOs, CDS, base de données de mission) souvent de façon interopérable avec les standards de l'observatoire virtuel (OV). En revanche, moins de 40% disent générer des DOIs pour leurs données. Les projets ne publiant pas de données (dominés par la simulation) évoquent un manque de temps et de soutien humain et matériel. La publication de code sur plateformes publiques concerne quant à elle 50% des répondants et nous constatons que la faible valorisation des activités de publication et le support limité reste le principal frein au partage. Plus généralement, une part importante (40%) des répondants disent ne pas disposer de support ingénieur pour leurs activités numériques, le reste déclarant moins d'un ETP, essentiellement dédié à des tâches d'administration système, puis de développement d'application/code/pipeline. Le support provient essentiellement du CNRS ou des centres de calculs.

Plusieurs défis récurrents nous sont remontés. Le premier est la problématique de la gestion au sens large des très grands volumes de données incluant le transfert, le partage, l'exploitation, la question de la pérennisation des moyens matériels et humains associés pour le partage à long terme. Plusieurs projets de notre enquête annoncent déjà quelques dizaines de Po qui seront produits au cours des prochaines années, donnant une idée de l'ampleur des défis à venir. Le second est le passage aux moyens de calcul Exascale, qui repose notamment sur un parallélisme accru et la généralisation de nouvelles architectures (dont les GPUs) mais dont les solutions et moyens d'exploitations ne sont pas consolidés.

Bilan Labos/OSUs. Les préoccupations des 15 unités qui ont répondu relèvent davantage de la gestion des données, de l'Intelligence Artificielle, puis ensuite du HPC, même si les défis remontés par celles-ci renvoient à ceux discutés dans l'enquête précédente. Certaines unités font par exemple remonter des gestions de volumes très importants de données (plusieurs Po sur un seul site par exemple) accompagnées d'une forte expertise technique associée. Ces unités ont une conscience aiguë de la problématique de l'accroissement du volume des données à venir, et donc du coût financier et humain que cela implique. Elles remontent également la problématique du transfert de grands volumes de données depuis les sites de production, faisant ainsi écho aux préoccupations des projets eux-mêmes. Toutefois on constate dans les réponses remontées que le niveau de préparation à ces problématiques des différents labos/OSUs est très disparate. En terme de moyens humains dédiés aux activités numériques, le support est pour l'essentiel constitué de personnel permanent, le volume non-permanent représentant 50% de celui-ci à l'exception de l'expertise IA qui repose surtout sur des non-permanents. Ces moyens sont déclarés être en support de SNOs en très grande majorité et sont donc cruciaux pour le maintien des services à la communauté. L'absence de moyens adéquats met en danger certains services de l'ANO 5. Ce point est à mettre en rapport avec le fait que certains projets à venir sont clairement identifiés comme très structurants par les unités sur les aspects numériques : parmi ceux-ci on trouve par exemple la diffusion de grandes simulations, Euclid, Rubin, NenuFAR, LISA et SKA dont le SRC va nécessiter de gros investissements sur ce type de profils.

A l'instar des retours projets les questions 1) de la gestion pérenne de grands volumes de données ; 2) de la montée de compétence en IA et calcul Exascale sont au centre des préoccupations des unités. Sur ce dernier aspect, les unités ayant répondu ne font pas remonter à ce stade de moyens obtenus par le PEPR Numpex, hormis une dans le cadre de la R&D des SDPs SKA et même si les projets font eux remonter des participations au PEPR. Enfin, les unités constatent un manque d'attractivité des métiers BAP E en général dans nos laboratoires face au privé et auquel il faut parvenir à répondre.

Un élément de contexte essentiel : la Science Ouverte. Plusieurs directives de l'Europe, du MESR et du CNRS demandent à ce que les données issues de la recherche soient rendues publiques dans le cadre de la Science Ouverte. Le MESR a par exemple mis en place Research.Data.Gouv qui doit à terme, référencer les données de la recherche française. Cela nécessite que dans les laboratoires de recherche les chercheurs diffusent leurs données (en les documentant) et qu'ils aient accès à des solutions pour les diffuser. Ce sont des sujets importants car on peut s'attendre à ce que dans les prochaines années, l'obtention de financements européens soit cautionnée à la capacité à rendre les produits de la recherche publics.

L'implémentation de ces recommandations en astrophysique doit être réfléchi car a) nous produisons des masses de données et toutes les diffuser en les rendant FAIR peut être un investissement très important en temps humain et en matériel, qu'il faudrait prioriser par rapport à d'autres besoins, b) il faut les articuler avec notre propre organisation pour la diffusion des données (IR* CDS, SNO1/5/6), c) diffuser les données de sa recherche devient donc une tâche de la mission "recherche" des chercheurs et ne peut pas être une mission spécifique des membres du CNAP.

Points de vigilance et recommandations :

- La première recommandation est d'ordre stratégique et découle du constat que se dressent devant nous de nombreux défis : 1) Le maintien des services de diffusion des données dont certains sont en grand danger ; 2) La nécessité de pourvoir les unités en ASR ; 3) Le besoin d'expertise pour initier de nouveaux moyens numériques comme ceux proposés ci-dessous. Il paraît donc indispensable que des arbitrages en faveur de profils ingénieurs "Informatique, Statistiques & Calcul" (BAP E), dédiés à "l'instrument numérique", soient réalisés.

Nous proposons les initiatives suivantes pour répondre à deux défis numériques des prochaines années :

- **La mise en place d'une solution de stockage/calcul pour l'AA** qui dispose de moyens de stockage, archivage mais également de moyens de calcul « proche » de la donnée pour son exploitation. Elle doit aussi fournir des moyens pour la diffusion des données dans le cadre de la Science Ouverte. Cette solution peut éventuellement être distribuée, en reposant par exemple sur le réseau existant de méso-centres et data-centres régionaux labellisés par le MESR, mais doit fournir un « point unique » où la donnée peut être déposée, accédée et exploitée, qu'elle soit de nature instrumentale ou issue de modélisation. Cette solution devra naturellement impliquer notre Infrastructure de Recherche dédiée aux données, le CDS, et les SNOs de diffusion des données, pour bénéficier de leurs expertises et envisager comment elle devra s'articuler avec l'existant. Par ailleurs, le SRC SKA, dont la philosophie s'approche de ce type de moyen, peut apparaître comme un éclaircisseur pour une infrastructure globalement dédiée aux données AA.
- **Un soutien pour le passage à l'Exascale.** Ce passage implique de soutenir par des moyens humains en ingénierie le développement de codes Exascale, massivement parallèles et capables d'exploiter de multiples architectures dont les GPUs. Cette transition concerne à la fois la modélisation numérique et le traitement massif de données. Il faut ainsi disposer d'un corps d'experts en calcul haute performance, pour un développement de codes 'sains' et maintenables au long cours, pour fournir un support utilisateur sur la durée, pour proposer des formations et enfin offrir une veille technologique dans un domaine en évolution permanente. A ce titre, une stratégie nationale AA de pérennisation des ressources injectées actuellement dans cette thématique, dont le PEPR Numpex, doit être mise en place. Cela offrirait une perspective de compétence en R&D sur le temps long au service de développements faisant un usage optimal des évolutions technologiques existantes pour des codes évolutifs.

Enfin nous proposons que plusieurs réflexions soient menées par notre communauté sur les points suivants

- **Consolider la nature du SRC SKA** : cet “instrument dans l’instrument” va nécessiter de grands investissements et donc influencer inévitablement toute politique de moyens autour du numérique. Il est donc important d’avoir rapidement une description réaliste de la nature des SRC, pour permettre aux unités et à la communauté de se positionner et de s’impliquer. L’établissement de liens forts avec d’autres communautés (Inria, INS2I, INSIS, IN2P3 ...) qui a été initié doit être soutenu.
- **Définir une politique d’archivage et de diffusion à long terme en AA** : les mises en place de la politique de Science Ouverte, avec des injonctions fortes, et de recherche.data.gouv, conjuguées au fait que notre discipline produit de plus en plus de données, impliquent qu’il est nécessaire d’avoir une réflexion sur ce qui doit être conservé, à quel endroit et de quelle manière. Cette réflexion doit reposer sur la spécificité des données astronomiques et l’expérience de nos services de diffusion.
- **Consolider l’attractivité des postes à profil numérique/IA face au privé** : c’est une difficulté remontée pour les métiers BAP E en général et pour les expertises IA en particulier. Il faut donc identifier ou faire connaître les leviers nous permettant de garantir le maintien d’une expertise dans nos laboratoires.

Impact environnemental des (et sur les) moyens de l’astronomie/astrophysique

Bien qu’une large fraction de la communauté française soit consciente de la problématique environnementale (Blanchard et al., 2022), très peu (environ 10%) de moyens sols ayant répondu à l’enquête ont aujourd’hui évalué correctement leur empreinte environnementale (à minima carbone). Ceux qui ont pris des mesures majeures pour la réduire sont encore moins nombreux. Les responsables de moyens expriment majoritairement ne pas avoir ni les compétences ni les ressources pour évaluer leur bilan de gaz à effet de serre. L’évolution anthropique du climat amène également une dégradation générale des conditions d’observations dans les observatoires au sol, qui se traduit par une augmentation de la turbulence et du seeing (Cantalloube et al., 2020), du vent forçant la fermeture des coupoles (van Kooten & Izett, 2022), ou encore du taux d’humidité (Allan et al., 2022). Certains phénomènes locaux et temporaires (type El Niño) peuvent toutefois avoir une influence positive sur certains observatoires (Seidel, Otarola & Théron, 2023). Les capacités d’observation au sol sont également affectées par l’environnement proche de la Terre et l’augmentation exponentielle d’objets (satellites et débris) en orbite basse, polluant les observations sols en optique, infrarouge (Hainaut & Williams, 2020) et radio (Vruno et al., 2023). À défaut de régulation internationale forte, ambitieuse et efficace permettant de (1) limiter le réchauffement généralisé de l’atmosphère, et (2) limiter le nombre de satellites autour de la Terre, la communauté française doit tenir compte de ces nouvelles contraintes dans ses choix stratégiques. Plus de la moitié des porteurs de projets numériques ne sont pas en mesure de fournir une estimation, déclarant pour l’essentiel ne pas avoir les outils pour le faire. Ceci indique qu’un effort de mobilisation et d’information est nécessaire sur ces sujets. Pour les autres, 75% indiquent estimer un coût carbone supérieur à 1 Tonne de CO₂/an voire même supérieur à 10 Tonnes de CO₂/an pour 25% d’entre eux : quand il est fait, c’est un constat de forte production de CO₂ qui est fourni par nos collègues.

Points de vigilance et recommandations :

- Le groupe recommande la mise à disposition d’un outil pratique pour accompagner tous les responsables de moyens et de projets afin d’évaluer de manière homogène leur empreinte environnementale (à minima carbone) et les aider dans la transition écologique. Pour le numérique, même si des estimations sont déjà faites, il faut une quantification systématique de ce coût, non seulement pour le calcul mais également pour le stockage et non seulement pour les grands centres de calculs mais également pour les moyens locaux.
- Il est recommandé de mener des études systématiques de l’évolution des conditions d’observation des télescopes et moyens nationaux (CFHT, OHP, TBL, Nancay, IRAM) en termes de nombre de nuits exploitables en lien avec les conditions météorologiques (ciel dégagé, vent, humidité, etc...), seeing, pollution lumineuse et radio (fond de ciel et encombrement des orbites). Cette évolution doit être confrontée avec les objectifs scientifiques et la capacité instrumentale de ces moyens sols afin de juger de leur pertinence sur le long terme.

