

Prospective INSU/AA – Document de synthèse du groupe de travail E

« Moyens du futur et R&D amont »

M. Ferrari, P. Kern, S. Lacour, Y. Lecoq, A. Lopez-Ariste, A. Maestrini, N. Man, F. Martinache, S. Maurice, K. Perraut (coordinatrice), M. Piat, J. Richard, F. Sahraoui, V. Tatischeff, E. Thiébaud, S. Torchinsky,

Résumé

Le mandat du groupe E concerne la prospective des moyens d'observation sur la période 2025-2035 ainsi que les développements de R&D amont correspondants. Comme la prospective spatiale européenne est clairement structurée par le programme Cosmic Vision de l'ESA et d'opportunités de vol sur des missions internationales et qu'au niveau français, la déclinaison de ces grands axes est pilotée par le CNES, il n'est pas dans les prérogatives de ce groupe de travail de discuter les recommandations issues du colloque de prospective du CNES tenu au printemps 2014. Les domaines d'observation accessibles uniquement depuis l'espace ne sont donc présentés que du point de vue R&D.

Au sol, plusieurs instrumentations sont envisagées ou en discussion dans la communauté, avec des niveaux de choix qui diffèrent selon les domaines parce que la maturité de la réflexion ou de la technique diffère. Ainsi, certains projets correspondent à une étape aboutie, venant à la suite de démonstrateurs opérationnels dans lesquels la communauté française a eu un rôle majeur : c'est le cas de SKA phase 2 et des projets de distribution d'horloges. Dans le domaine des spectrographes multi-objets (MOS), une feuille de route est établie pour les premières phases de l'E-ELT. Celle-ci se base sur l'expertise en conception, implantation et exploitation d'instruments comme MUSE par la communauté française. Celle-ci doit continuer à coordonner ses efforts autour d'une telle instrumentation pour l'E-ELT. Pour la haute dynamique sur l'E-ELT et pour la résolution angulaire optique sub-milliseconde d'angle, le retour d'expérience des instruments récemment opérationnels (SPHERE) ou bientôt installés (GRAVITY, MATISSE) sera essentiel pour définir une feuille de route réaliste incluant des démonstrateurs en laboratoire et sur le ciel. Compte tenu de son engagement historique dans ces techniques de Haute Résolution Angulaire, la communauté française doit contribuer très activement à la définition de ces feuilles de route. Enfin, une réflexion est à mener autour de l'instrument MSE pour dégager les synergies possibles avec les autres MOS ou le domaine de niche d'une telle instrumentation.

Les laboratoires français de l'INSU en Astronomie et Astrophysique possèdent un fort potentiel de recherche technologique préparatoire aux futures grandes missions de la discipline, d'appui aux instruments en cours de réalisation et d'analyse de concepts nouveaux. Le paysage de la discipline en termes de R&D est assez marqué par plusieurs axes forts historiques, coordonnés au sein de communautés formellement organisées (AS-GRAM, AS-HRA par exemple) ; ce pavage mérite d'être complété par une structuration large pour des technologies critiques. La communauté est très dynamique, dans des domaines très variés incluant toutes les facettes de l'optique, l'instrumentation plasma, les circuits électroniques dédiés, ou encore les lasers ultra-stables pour la métrologie de distance ou pour les horloges utilisées en temps-fréquence. Les développements sur les détecteurs apparaissent comme critiques pour nos contributions aux futures réalisations instrumentales de la discipline, sur l'ensemble des thématiques de l'astrophysique. Les grands axes de développement au sein des laboratoires concernent la plupart des domaines de longueur d'onde, des X- γ jusqu'au centimétrique voire au-delà (pour SKA), en passant par l'infrarouge et le millimétrique et sub-millimétrique (pour ALMA, NOEMA). Ils concernent également les mesures in situ, en particulier pour la physique spatiale (magnétosphère terrestre, vent solaire et planétologie). Dans ce contexte, l'accès à des centrales technologiques du type de celles du réseau RENATECH est essentiel pour les phases amont tandis que l'accès à des centrales technologiques dédiées assurant une production dans la durée est primordial pour l'implémentation de ces technologies dans des instruments livrables, que ce soit pour le spatial ou des grands instruments au sol.

Enfin, les laboratoires français occupent une place prépondérante dans le paysage international pour le développement instrumental, apparaissant souvent comme premiers investigateurs d'instruments novateurs. Cette particularité est aussi un moteur puissant de R&D et permet de fédérer des moyens dédiés qui peuvent être importants avec des supports du CNES, de l'ESA, de l'ESO ou des programmes cadres de l'union européenne.

A - Grandes questions astrophysiques

En nous appuyant sur les documents de prospective des programmes nationaux, nous avons analysé les avancées prévues dans chaque thématique grâce aux moyens d'observation prévus. Nous avons fait ressortir les besoins propres à chaque domaine.

A.1. Formation et évolution des étoiles et des planètes

La formation des étoiles et des systèmes planétaires est l'un des moteurs de l'évolution tant chimique que physique de l'univers. Cette problématique est reliée à nos origines pour comprendre à la fois comment le système solaire s'est formé, et pour suivre l'évolution chimique de la matière, depuis les molécules interstellaires simples jusqu'à la vie planétaire. La masse des étoiles régit toute leur évolution, détermine leur fin de vie et l'impact que chaque étoile exerce sur son environnement et sur sa galaxie hôte. Il est donc fondamental de comprendre l'origine des masses stellaires et de leur distribution.

Il paraît important d'aborder les questions fondamentales en lien avec la formation et l'évolution stellaires selon deux approches complémentaires : en considérant les étoiles comme des entités uniques (« Stars as Sun ») et dans le cadre plus général de l'évolution galactique (« Stars in galaxies »). Dans ce contexte, le triptyque observation, caractérisation et modélisation restera un principe fort pour les années à venir.

A.1.1. Etude individuelle des étoiles en tant que systèmes complexes

L'objectif est de répondre aux questions scientifiques portant sur leur origine, leur activité, leur environnement, leur structure, et leur anatomie. *L'un des besoins forts (déjà exprimé depuis longtemps et auquel certaines techniques essayent de répondre) est d'être à même d'imager l'unité astronomique centrale pour étudier les différentes interactions : étoile-compagnons, étoile-disque, étoile-vents stellaires.* Ces études sont à mener sur des objets jeunes de différentes masses et de différentes luminosités pour comprendre le scénario de formation pour les étoiles de Herbig, les différents régimes d'accrétion (en imageant les interactions étoile/disque, les flots d'accrétion, ...), la formation des jets, les processus de dissipation du disque protoplanétaire et donc les scénarios de formation des planètes (accrétion des grains, streamers d'accrétion, ouverture de gaps). *Cela nécessite une approche multi-échelle et multi-lambda : complémentarité ALMA en radio (phases initiales de formation), interférométrie optique (gaz et poussières chaudes), Herschel en infrarouge (minéralogie des disques et atmosphères planétaires) et X (activité).*

Concernant la structure interne et l'évolution des étoiles, les grandes questions à appréhender dans un futur proche concernent essentiellement les processus de transport et d'extraction du moment cinétique mis en évidence par l'astérosismologie dans les phases avancées de l'évolution des étoiles (Kepler), les mécanismes de perte de masse (jouant un rôle primordial dans l'évolution des galaxies), la génération des champs magnétiques et leur impact sur l'évolution des étoiles, et les multiples effets de la binarité et des systèmes planétaires. Pour cela, la résolution spectrale seule n'est plus suffisante ; la résolution angulaire non plus. De même que pour l'étude des champs magnétiques la polarimétrie classique apporte une information restreinte puisqu'intégrée : même si les techniques d'imagerie Doppler ont permis de reconstruire des cartes de champ magnétique, une capacité d'imagerie directe en lumière polarisée des environnements et des surfaces stellaires serait un puissant moyen de diagnostic des processus physiques. *Dans le futur, il faut donc se donner les moyens de combiner, sur différents domaines spectraux, ces différentes techniques : spectro-interférométrie avec des résolutions spectrales permettant de résoudre les diverses composantes (cellules de convection, vents, disques, compagnons), combinaison de l'analyse polarimétrique et de la haute résolution angulaire pour étudier la distribution des champs magnétiques à la surface des étoiles et dans les disques.*

A.1.2. Etude des populations stellaires à l'échelle de la Galaxie et au-delà

Avec les grands relevés observationnels (Herschel, Gaia, Kepler, Brite, Tess, Plato, ...), l'idée est d'étudier les étoiles dans leur diversité et de dégager des tendances/évolutions à une échelle galactique. Ces grands surveys seront essentiels pour tracer les courants d'étoiles dans la galaxie. *La compréhension de l'évolution des systèmes jeunes passe par un suivi temporel d'un grand nombre d'objets, sur des temps suffisamment longs (plusieurs périodes de rotation), sur de grands domaines spectraux (du Balmer jump aux raies de CO), avec de la haute résolution spectrale (plusieurs dizaines de milliers) et de la photométrie continue pendant quelques mois (COROT puis Kepler et Plato).* En effet cette évolution est fortement liée à l'irradiation de l'étoile centrale à l'origine de la photo-évaporation du disque, des turbulences dans le disque et nécessite de comprendre les mécanismes d'accrétion et les phénomènes de propagation dans le disque. Il est par ailleurs essentiel de comprendre les modes de formation des géantes (core accretion, instabilité gravitationnelle, formation par effondrement de nuages), les échelles de temps de formation, les lieux de formation (migration ?), les interactions disques-planètes, que ce soit les disques protoplanétaires ou bien les disques de débris, les interactions gravitationnelles entre planètes ou étoiles-planètes menant à une architecture stabilisée dynamiquement des systèmes. Pour les exoplanètes jeunes et leur environnement de formation, *le besoin en résolution angulaire pour étudier les systèmes des jeunes associations proches (Taurus, Sco-Cen) à l'échelle de l'unité astronomique rend l'interférométrie optique essentielle.*

A.1.3. Caractérisation des exoplanètes

Le domaine stellaire prend aussi une importante dimension transverse avec la possibilité de caractériser les planètes et d'initier des études comparatives. En effet, même si les efforts faits pour la détection des exoplanètes avec différentes techniques (vitesse radiale, imagerie directe, transit, astrométrie) doivent être poursuivis, en particulier pour permettre de couvrir le plus largement possible le diagramme masse-période, les enjeux portent de plus en plus sur la caractérisation des propriétés physiques des exoplanètes (masse, composition, température, albedo, ...) et ce, pour différents types spectraux d'étoiles centrales. Cela passe par la mise en œuvre d'instrumentations dédiées (optique adaptative extrême, astrométrie à très haute précision par exemple) et, pour certaines méthodes, par l'étude et la correction des effets limitant les capacités de détection (activité stellaire par exemple pour les techniques indirectes). *La caractérisation des atmosphères requiert de la spectroscopie sur de grands échantillons, en mode haut contraste photométrique (méthode des transits) ou direct (optique adaptative extrême (XAO), coronographe, imageur à intégral de champ sur l'E-ELT (European-Extremely Large Telescope) par exemple. La recherche de bio-marqueurs ne pourra se faire que par le biais d'une mission spatiale dédiée.*

A.2. Formation et évolution des galaxies

A.2.1. Physique des galaxies et formation stellaire

L'histoire de la formation stellaire dans les galaxies semble étroitement liée à celle des trous noirs centraux. Ce résultat nous amène à de nombreuses questions concernant les effets dominant l'évolution des galaxies : quelle est l'importance de l'environnement ? Comment les structures internes d'une galaxie (bulbe, disques, barres) évoluent-elles dans ce contexte ? Pour répondre à ces questions *il faut poursuivre le suivi observationnel multi-longueurs d'onde (du domaine X pour l'étude des AGNs au visible/infrarouge pour le contenu en étoile et poussières des galaxies ainsi que la cinématique du gaz)*, en complément des simulations numériques de formation des galaxies.

Une des questions fondamentales, liée aux processus de formation stellaire dans les galaxies, est de caractériser les conditions physiques et chimiques en œuvre dans le milieu interstellaire. *Pour cela, l'instrumentation dans l'infrarouge lointain nous a permis des avancées spectaculaires, mais la résolution spatiale d'ALMA et de NOEMA vont poursuivre ce travail avec un niveau de détail inégalé. Par ailleurs, la sensibilité des spectrographes du domaine visible au radio vont permettre de repousser les limites des mesures de cinématique jusqu'aux galaxies les plus distantes, et étudier les interactions entre ces galaxies et le milieu circumgalactique, notamment avec des instruments comme MUSE au VLT. A plus long terme, l'E-ELT sera la prochaine avancée majeure avec ELT-IFU (HARMONI) qui étudiera des galaxies à haute résolution spatiale en proche-infrarouge, en attendant de possibles futurs instruments multi-objets.*

A.2.2. Notre galaxie et son environnement proche

La Voie Lactée et les galaxies du Groupe Local nous renseignent de manière très précise sur l'évolution chimique et sur le contenu en gaz dans les galaxies, ce qui permet de mieux comprendre leur processus de formation et d'évolution (notamment les épisodes de fusion). Le lancement de Gaia ouvre une nouvelle voie dans ce domaine, avec la cartographie précise (en position et cinématique) d'un milliard d'étoiles dans la Voie Lactée et le Groupe Local. Nous espérons apprendre davantage sur la structure et l'histoire de formation de notre Galaxie, ainsi que sur les populations stellaires dans le Groupe Local. *Ce travail sera poursuivi par la suite avec le satellite JWST (lancement en 2019). Enfin SKA nous apportera en complément le contenu précis en gaz neutre. Les besoins se tournent maintenant sur le suivi spectroscopique sol de Gaia, avec plusieurs projets en développement (WEAVE, 4MOST) pour effectuer de la spectroscopie multi-objets grand champ ($\sim 1^\circ \times 1^\circ$) à haute résolution ($R \sim 10000$ à 20000).*

A.2.3. L'Univers distant et l'époque de réionisation

Les techniques d'imagerie et spectroscopie jusqu'à présent limitées aux galaxies à redshift intermédiaire nous permettent dès à présent de nous tourner vers de plus grand redshifts, *avec notamment les nouveaux instruments visible et proche infrarouge sur le VLT comme KMOS et MUSE, en attendant les premiers instruments E-ELT (notamment HARMONI)*. La spectroscopie à intégrale de champ nous permet de mieux interpréter la cinématique et les abondances résolues dans les galaxies les plus distantes, ainsi que les interactions avec le milieu intergalactique. Ces informations sont essentielles pour comprendre les mécanismes de formation et d'évolution de ces galaxies. *JWST et ALMA repousseront les limites concernant les abondances et les propriétés physiques pour les sources les plus distantes ($z > 7$).*

Par ailleurs, Planck a permis une avancée considérable sur l'étude des amas (ou proto-amas) les plus distants avec l'observation de plus de 1200 amas par effet Sunyaev-Zel'dovich. *A plus long terme, la mission Euclid (lancement en 2020) nous permettra la détection directe des amas au travers de leur contenu en matière noire.*

Enfin, une des questions fondamentales de cosmologie et physique des galaxies est de savoir quelle est la nature des sources responsables de la réionisation du milieu intergalactique, et la nature précise de ce processus (début, durée). *En complément de*

L'observation directe des premières galaxies par JWST et ALMA, le projet LOFAR (opérationnel en 2016) devrait nous permettre d'imager l'époque de réionisation au travers de l'émission HI à 21 cm par tomographie à différents redshifts. L'arrivée de cet instrument devrait considérablement modifier notre connaissance de cette époque. Enfin, à plus long terme, ce travail devrait être poursuivi à plus grande échelle et avec une sensibilité accrue par SKA.

A.3. Relations Soleil-Terre-Planètes

A.3.1. Physique solaire et vent solaire

Le chauffage coronal, les éruptions et la dynamo solaires continuent d'être les problèmes de base de la physique solaire. Les avancées sur la compréhension du champ magnétique dans la photosphère et de la structure interne du soleil des deux dernières décennies ont amené les recherches actuelles vers la compréhension du couplage magnétique entre les différentes couches de l'atmosphère solaire. Avec comme condition aux limites le champ magnétique de la photosphère (relativement bien connu et mesuré mais dominé par la dynamique du plasma), on veut comprendre la structure du champ dans la chromosphère et la couronne, sa dynamique et les processus de transport d'énergie associés. Le dépôt d'énergie photosphérique dans la couronne par l'intermédiaire du champ magnétique (soit par reconnexion soit par des ondes) devrait pouvoir expliquer le chauffage de la couronne. A ces problématiques physiques s'ajoutent celles liées à la génération du vent solaire, son accélération (pour atteindre des vitesses ~800 km/s) et son chauffage observé depuis les premières données de la sonde Voyager (décroissance moins rapide de la température du plasma en s'éloignant du soleil). Ces problèmes, bien qu'ils soient anciens, demeurent encore très mal connus. *Côté spatial, des progrès significatifs dans la compréhension de ces phénomènes sont attendus des missions ESA/Solar Orbiter (2017, distance d'approche $D \sim 0.3$ UA) et NASA/Solar Probe Plus (2019, $D \sim 10$ Rs) auxquelles participe fortement la communauté française. Des télescopes solaires en exploitation ou en cours de préparation sont aussi dédiés à l'étude de ces problèmes physiques (THEMIS aux Canaries, le radio-héliographe de Nançay et à moyen-long terme le projet EST de grand télescope solaire européen).*

A.3.2. Couplage vent solaire-magnétosphère terrestre

L'interaction du vent solaire avec les magnétosphères planétaires génère une multitude de phénomènes physiques très universels comme les chocs, la turbulence ou la reconnexion magnétique, dont l'étude est cruciale pour comprendre la dynamique globale de la magnétosphère. Ces phénomènes sont de plus en plus explorés en 3D par des missions multisatellitaires (essais de 4-5 satellites) comme les missions ESA/Cluster (séparation >100km), NASA/Themis (quelques milliers km) et NASA/MMS (>10km). *Un besoin se fait sentir pour une mission multi-satellites multi-échelles comme Cross-Scale (7-12 satellites soumise à l'ESA en 2009) pour explorer les trois échelles simultanément : MHD, ion et électrons (horizon 2025-2030). Deux autres missions émergent de la prospective CNES : TWINS (étude de la turbulence et dissipation aux échelles électroniques, soumise à l'ESA en 2012 en S1) et Alfvén (étude de l'accélération des particules dans la zone aurorale soumise en M3 en 2012). Ces deux missions devraient être proposées au prochain appel d'offre M4 de l'ESA.*

A.3.3. Couplage Atmosphère-Ionosphère-Magnétosphère et météo de l'espace

Le but est de comprendre d'une manière globale les interactions entre ces trois interfaces et le processus d'échange de matière et d'énergie qui s'y produisent (échappement des particules de l'atmosphère, convection ionosphérique, ...). Plusieurs instruments au sol continueront d'être exploités. C'est le cas du radar à diffusion cohérente EISCAT (et le futur EISCAT 3D) et SuperDARN qui permettent de sonder l'ionosphère en mesurant des profils en altitude de grandeurs vectorielles comme la vitesse du plasma ou le champ électrique). Le satellite CNES/TARANIS (lancement prévu en 2016) devrait permettre d'étudier les phénomènes lumineux transitoires (transferts impulsifs d'énergie de la basse atmosphère jusque dans l'ionosphère). La dynamique globale de l'ionosphère-magnétosphère est étroitement liée aux recherches actuelles en météo de l'espace. Cet axe de recherche est actuellement en plein développement ; il allie recherche fondamentale (ex. génération/propagation des éjections de masse coronale et leur interaction avec la magnétosphère terrestre) et recherche appliquée (effets sur les satellites, navigation, ...). L'ESA a lancé le programme SSA (Space Situational Awareness) en 2008 contenant un segment Météo de l'Espace (SWE). *Plusieurs missions sont discutées au sein de la communauté et pourraient être proposées lors des prochains appels d'offre (ex. S2 ESA-Chine) comme INSTANT (au point de Lagrange L5) ou SWUSV.*

A.3.4. Exploration des magnétosphères planétaires et planétologie comparée

Plusieurs enjeux se dégagent des projets d'exploration planétaire : i) la compréhension de la formation et de l'évolution des planètes analogues à la Terre et celle de leur structure interne par les mesures du champ magnétique (Mercure sera explorée par la mission ESA-JAXA/Bepi-Colombo (lancement 2016, insertion en orbite 2022)) ; ii) l'exploration des zones d'habitabilité (les satellites de Jupiter (Ganymède, Europe et Callisto) seront explorés par la mission JUICE (lancement en 2022)) ; iii) l'interaction avec le vent solaire et l'érosion des atmosphères planétaires (Mars) ; iv) l'exploration de nouveaux systèmes comme la géante glacée Uranus (pour laquelle une mission Pathfinder (2031-2034) a été soumise en L2/L3 à l'ESA). La France a une forte participation dans les missions planétaires déjà engagées (ex. Bepi, JUICE).

A.4. Planétologie

Les grandes questions en planétologie sont partagées par toute la communauté internationale (NASA, Decadal Survey ; ESA, Cosmic Vision ; Astronet). Elles s'organisent autour de 3 thématiques – non disjointes : origine, évolution et habitabilité.

A.4.1 Origine du Système Solaire & Matière Primitive

C'est la « dimension astrophysique », celle de la formation des objets du Système Solaire il y a 4,56 milliards d'années à partir d'une nébuleuse gazeuse. De ce nuage naissent deux types de planètes : à l'intérieur de la ligne des glaces, les planètes telluriques, à l'extérieur, les planètes géantes et glacées. De cette époque survivent des petits objets, plus ou moins primitifs, les astéroïdes et les comètes. La thématique des origines a extraordinairement évolué ces dernières années, grâce à l'observation d'exoplanètes à différents stades de leur évolution, grâce à de nouvelles données des missions autour de petits corps, au renouveau de l'exploration de la Lune, à la simulation numérique et l'amélioration des performances de l'analyse en laboratoire d'échantillons extraterrestres. *L'étude des petits corps est un accès privilégié à cette thématique, comme en témoignent les nombreuses missions en cours de réalisation : Rosetta (noyau cométaire, ESA), DAWN (Vesta – Cérès, NASA), New Horizon (Pluton, NASA), ou en préparation : Hayabusa-2 (retour échantillons NEO, JAXA, > 2015), OSIRIS-REX (retour échantillons NEO, NASA, > 2017). La mission InSIGHT (intérieur de Mars, NASA, > 2017) apportera de précieuses informations sur l'origine de Mars.*

A.4.2 Propriétés et évolution des planètes

Il s'agit de comprendre l'évolution du Système Solaire après sa formation. On parle de « planétologie comparée », la référence à la Terre étant explicite et au cœur de la thématique. L'étude des planètes géantes dans leur ensemble et leurs interactions (planètes – satellites – anneaux – magnétosphères) est particulièrement instructive. La vision globale du système de Saturne, les études très détaillées de Vénus, Mercure et surtout Mars ont énormément fait progresser cette thématique. Surfaces et atmosphères sont très bien caractérisées ; néanmoins les structures internes sont encore difficiles d'accès. De plus en plus de spécialistes des géosciences font de la planétologie et apportent leur savoir-faire. *Il s'agit ici d'étudier des planètes ou des systèmes dans leur ensemble, via des missions orbitales, en cours : Cassini (système de Saturne, NASA-ESA), Mars Express (Mars, ESA), Venus Express (Vénus, ESA), MAVEN (atmosphère de Mars, NASA), JUNO (système de Jupiter, NASA), et en préparation : BepiColombo (Mercure, ESA, > 2016), JUICE (Ganymède et Europa, ESA, > 2023).*

A.4.3 Habitabilité des planètes

L'étude de « la vie et de ses origines » est désormais une thématique à part entière de la planétologie. On s'intéresse à la recherche de chimie organique extra-terrestre et sa caractérisation, qui est à la base de tous les êtres vivants sur Terre. Quant aux conditions favorables à l'apparition de la vie (on parle d'habitabilité), la question est plutôt au passé pour Mars et Vénus. *Mars est la cible privilégiée de l'étude de l'habitabilité dans le Système Solaire avec la mission MSL (Mars, NASA) en cours d'exploitation et deux missions ambitieuses en préparation : ExoMars (Mars, ESA, 2016 et 2018), MARS2020 (Mars, NASA, après 2020).*

A.5. Phénomènes extrêmes de l'univers et physique fondamentale

Les domaines d'étude en phénomènes extrêmes et physique fondamentale sont variés et ont tous pour point commun de nécessiter le développement de technologies aux limites de ce qui est fait actuellement. Il apparaît aujourd'hui cinq axes principaux qui sont le lieu des grands enjeux scientifiques de demain.

A.5.1. Phénomènes transitoires rapides et énergétiques

L'astronomie des phénomènes transitoires est en plein développement avec l'émergence de nouveaux moyens de recherche de variabilité dans tout le ciel à différentes longueurs d'onde (Pan-STARRS, LSST, LOFAR, SKA), et l'optimisation des moyens robotiques de suivi dans un contexte où plusieurs missions fourniront des alertes (GAIA, SVOM, ...) et où la recherche de contreparties électromagnétiques à des sources non-photoniques (Adv. Virgo) pourrait devenir cruciale. Les sources transitoires peuvent être associées à des explosions stellaires (novae, supernova, hypernovae), à des coalescences de systèmes binaires compacts, à des phénomènes d'accrétion-éjection autour d'objets compacts (objets stellaires ou trous noirs supermassifs) ou encore à des éruptions de magnétars. On peut s'attendre à une meilleure description (statistique ou multi-longueurs d'onde/multi-messagers) des transitoires déjà connus et à la découverte de nouvelles classes de phénomènes variables. Le débat actuel sur l'origine des « fast radio transients » est illustratif des questionnements qui émergeront alors. *A l'horizon 2021 – 2022, la mission sino-française SVOM constituera une nouvelle étape dans l'utilisation des sursauts gamma comme sonde de l'univers lointain (avec l'optimisation du suivi robotique au sol en infrarouge).*

A.5.2. Astronomie de nouveaux messagers

Pour confirmer la découverte des ondes gravitationnelles (Advanced Virgo, LIGO, MIGA, eLISA), il est important d'effectuer un suivi électromagnétique (EM) de leurs détections. Cela permettra d'associer une source EM connue, d'en déduire les propriétés physiques et la dynamique tant du processus de coalescence que de l'explosion qui se produit après la formation du trou noir. *Cette recherche doit associer des moyens à toutes les longueurs d'onde, du radio (LOFAR, SKA) aux rayons gamma de hautes énergies (ICE Cube, Auger, HESS, Fermi) sans oublier la partie X et optique (Tarot, Swift).* Rendu très difficile à cause de la très grande erreur de localisation, parfois répartie en plusieurs régions disjointes du ciel, et de l'incertitude sur les propriétés réelles de la contrepartie, il est nécessaire de mettre en place un suivi coordonné sur plusieurs moyens, certains en détections, d'autres en études approfondies. La préparation des outils qui permettront de donner en temps réel une vue panchromatique et multi-messagers des événements gravitationnels doit se faire dès maintenant. On peut penser à l'analyse scientifique des données issues de plusieurs moyens en radio, infrarouge et visible, rayons X et gamma, issues du suivi LIGO/Virgo et MIGA, à l'exploitation des données de Fermi, à l'étude des événements liés aux coalescences de binaires (et notamment la possibilité d'événements non focalisés longs), la signature d'une étoile à neutron ultra-magnétisée (magnétar).

A.5.3. Tests des théories de la gravitation

La mission Pharo/ACES permettra des tests de la relativité générale à très haut niveau d'ici à quelques années (mesure du redshift gravitationnel à 2.10^{-6} , soit plus de 30 fois mieux que la mission GP-A). La mission Microscope permettra également des tests du principe d'équivalence pour des masses macroscopiques à 10^{-15} . Des missions spatiales de nouvelle génération dédiées à ce type de test (orbitographie et payload optimisés) ouvriront des domaines de performances inégalées (1 ordre de grandeur d'amélioration par rapport à Pharo/ACES pour le test du redshift par exemple), inatteignables par les outils existants ou prévus à courte échéance. *On pense en particulier à des développements d'horloges spatiales dédiées (type STE-QUEST) ou de senseurs gravito-inertiels de nouvelle génération (atomes froids) permettant de tester le principe d'équivalence pour des objets "quantiques" de quelques masses atomiques. Du côté des moyens au sol, les performances des horloges de laboratoire permettront bientôt de sonder le potentiel gravitationnel local (et autres effets relativistes) avec une précision inégalée (centimétrique voir millimétrique), totalement inaccessible aux autres technologies. Ces études seront utilement complétées par des explorations en champ fort via des observations astronomiques (de pulsars voire de trous noirs doubles), pour lesquels, en particulier, SKA sera un instrument d'étude majeur.*

A.5.4. Tests de la théorie d'inflation

L'inflation est aujourd'hui au cœur du modèle cosmologique privilégié par les observations, en particulier après les premiers résultats de Planck. Cette phase d'expansion très rapide aux tout premiers instants de l'Univers permet en effet de résoudre plusieurs problématiques comme l'uniformité du fond cosmologique (CMB), l'origine des fluctuations de densité, la platitude de l'Univers. Il reste néanmoins à démontrer l'existence de cette phase inflationnaire et à contraindre la physique sous-jacente. Ceci est possible avec la mesure des modes B, une empreinte particulière laissée par l'inflation dans la polarisation du CMB. La détection des modes B permettrait donc de démontrer définitivement l'existence de l'inflation et de déterminer l'échelle d'énergie associée à cette physique. Elle fournirait la première mesure des fluctuations quantiques à l'origine des grandes structures qui se sont formées par la suite. Après l'annonce - aujourd'hui controversée - de la détection des modes B par l'expérience américaine BICEP2, Planck fournira la première contrainte depuis l'espace mais sa sensibilité en polarisation reste limitée. *Une expérience spatiale dédiée à la polarisation du CMB est donc la prochaine étape et permettrait une meilleure couverture spatiale et spectrale que les différents projets suborbitaux en cours ou en préparation.* La communauté française travaille aujourd'hui pour une proposition à l'appel d'offre M4 de l'ESA (CORe+). L'expérience au sol QUBIC dont le déploiement pourrait s'étendre jusqu'en 2020 explore une technique de détection originale, l'interférométrie bolométrique, et permettra de plus la mise au point des technologies nécessaires à un futur satellite.

A.5.5. Energie Noire

Plusieurs projets sont en développement pour élucider la nature de l'énergie noire, responsable de l'expansion accélérée de l'Univers et de 70% de l'énergie totale de l'Univers. La mesure de la signature des oscillations acoustiques des baryons (BAO) dans la distribution de masse à différentes époques de l'Univers sera le moyen de faire le choix entre les différentes explications. *Les relevés en visible sont ou seront faits par des instruments au sol (SDSS, BOSS) ou dans l'espace (Euclid) ; en radio des projets du type « Intensity Mapping » sont en développement (e.g. BAOradio en France en collaboration avec le projet Tianlai en Chine) puis SKA permettra de mesurer simultanément la position des galaxies et leurs redshifts avec une très haute précision.*

B - Moyens du futur

De l'analyse menée en première partie, il apparaît que les approches multi-échelles et multi-longueurs d'onde sont essentielles. Les besoins qui ressortent portent donc sur la sensibilité, la résolution angulaire, la résolution spectrale, la résolution temporelle, le champ de vue, la dynamique et la couverture spectrale. Pour chaque thématique, il convient à l'avenir d'augmenter significativement l'une, ou mieux une combinaison, de ces caractéristiques :

- Pour la formation des étoiles et des planètes, il importe de combiner très haute résolution angulaire, haute dynamique et haute résolution spectrale sur des domaines spectraux larges.
- Pour la formation et l'évolution des galaxies, l'approche multi-longueurs d'onde, la résolution spatiale et la spectroscopie multi-objets grand champ à haute résolution spectrale sont indispensables.
- Pour l'étude des relations Soleil-Terre, une approche multi-satellites et multi-échelles est mise en œuvre, avec de meilleures résolutions spatiale, temporelle et en énergie des instruments dédiés.
- La thématique Planétologie s'appuie principalement sur des moyens spatiaux d'exploration de nouveaux objets du système solaire, ou de retour vers des objets déjà visités avec une instrumentation plus complète.
- Pour les phénomènes extrêmes de l'univers et la physique fondamentale, les besoins portent sur une haute résolution temporelle, une meilleure couverture spatiale et spectrale, ainsi que sur la distribution d'horloges.

En ce qui concerne le spatial, la prospective spatiale européenne est clairement structurée par le programme Cosmic Vision de l'ESA. Aujourd'hui le paysage programmatique de l'ESA est clair avec un appel d'offre pour les missions M4 qui devrait être ouvert en 2014 pour un lancement en 2025, le lancement de la mission L2 (sur la thématique « the hot and energetic universe ») en 2028, et celui de la mission L3 (sur la thématique « the gravitational universe ») en 2034. Au niveau français la déclinaison de ces grands axes est pilotée par le CNES dont la prospective s'est tenue au printemps 2014. Nous rappelons dans une première partie les propositions du CERES pour dégager les besoins en R&D amont nécessaires. Il ne s'agit pas dans ce document de s'exprimer sur ces propositions, ni de discuter des recommandations issues du colloque de prospective CNES. Pour le sol, les moyens du futur identifiés sont décrits dans une seconde partie.

[L'INSU contribue fortement aux développements des instrumentations sol et des missions spatiales par l'implication et l'expertise de ces personnels, chercheurs, techniciens et ingénieurs. Néanmoins, les laboratoires français ont de plus en plus de difficultés à tenir leurs engagements dans la durée dans les grands projets sol et dans les missions spatiales auxquels ils participent à cause de l'érosion de son personnel, notamment technique, phénomène qui s'est accru ces dernières années. Il est essentiel que l'INSU poursuive et renforce son soutien aux activités instrumentales sol et spatiales.]

B.1. Prospective spatiale

Formation des planètes et émergence de la vie. L'étude de l'origine du système solaire et de la matière primitive ainsi que de l'habitabilité des planètes nécessitent l'analyse d'échantillons, si possible sur Terre. Ce peut être de la matière primitive (origine du système solaire) ou martienne (habitabilité). La priorité est mise sur ExoMars et Mars 2020 pour l'analyse in situ d'échantillons martiens et la préparation d'une mission de retour d'échantillons à long terme (Mars Sample Return). D'autre part, une mission dédiée à la caractérisation spectroscopique des atmosphères des exoplanètes apparaît logiquement comme l'étape suivante de Plato et permettra à terme d'aborder les questions d'habitabilité et de recherche de biosignatures.

Physique du système solaire et de l'héliosphère. Une attention particulière est portée sur les planètes géantes (planètes – satellites – anneaux – magnétosphères) avec, à long terme, une priorité mise sur une mission d'exploration des planètes géantes glacées (L4). Pour comprendre le couplage Soleil – vent solaire – magnétosphère (météorologie de l'espace), les priorités concernent la participation à des missions pour la microphysique des plasmas : ALFVEN pour l'étude de la physique aurorale (M4), TWINS pour l'étude de la turbulence aux échelles électroniques dans le vent solaire (M4), INTERHELIOPROBE pour explorer l'héliosphère hors du plan de l'écliptique (mission d'opportunité – Russie). Pour la météorologie de l'espace on peut citer la mission INSTANT (S2) et une participation ciblée au programme SSA. Enfin, à plus long terme, pour explorer des régions et des régimes spatio-temporels nouveaux, la priorité porte sur une sonde solaire très près de la couronne et hors du plan de l'écliptique.

Lois physiques qui gouvernent l'Univers. En ce qui concerne la physique fondamentale, les priorités sont les suivantes :

- Utiliser les ondes gravitationnelles pour sonder l'univers (eLISA – L3) : étude de la formation et de l'évolution de systèmes de binaires massifs, de la coalescence de trous noirs, du fond stochastique d'ondes gravitationnelles pour apporter de nouvelles limites sur les constantes cosmologiques qui gouvernent l'évolution de l'univers (vitesse et accélération de l'expansion, rapport de la masse baryonique à la matière et à l'énergie noire)

- Tester le principe d'équivalence sur des ondes de matière quantiques
- Etudier la physique des trous noirs avec la mission Athena (thématique « The hot and energetic Universe » – L2)
- Remonter à la période de l'inflation du Big Bang par l'observation de la polarisation du fond diffus cosmologique

Origine et évolution de l'Univers. Parmi les questions relatives à la formation, la structuration et l'évolution de l'Univers, deux thèmes sont d'actualité : la période de l'inflation, sujet qui a une importance particulière pour la physique fondamentale, et la sortie des âges sombres et la formation des premiers objets (étoiles, galaxies). Les missions prioritaires concernent la formation des premières structures (amas distants de galaxies, évolution des galaxies et de leurs noyaux) avec Athena, la détection des modes B de polarisation du CMB qui nous renseignent sur les premiers instants de l'Univers (CoRE+), l'étude des mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies via l'observation dans l'ultraviolet ($z < 2$) ou l'infrarouge ($z < 10$) avec des missions de type SPICA (M4), une meilleure compréhension des processus de croissance des galaxies par fusion avec eLISA. Enfin, il apparaît essentiel d'élaborer une feuille de route pour un observatoire post Herschel dans l'infrarouge/submillimétrique.

Enfin, pour préparer l'avenir, les phases 0 identifiées correspondent à eLISA, la faisabilité d'emport en ballon d'horloges optiques, un spectropolarimètre ultraviolet pour comprendre la formation et l'évolution des étoiles, un spectro-imageur solaire pour l'étude de la raie Ly α de l'hydrogène (FASOLASI). Les actions de R&T stratégiques identifiées sont la conception d'instruments d'analyse in situ, en particulier sur les questions de spectroscopie de masse (Orbitrap, pour lequel le besoin d'un démonstrateur est exprimé) et de datation, les chaînes de détection et la cryogénie associée dans le domaine des rayons X et submillimétrique, l'interférométrie atomique pour l'espace et liens optiques.

B.2. Prospective instrumentale sol

Vers les surveys spectroscopiques avec les MOS sur les grands télescopes

La communauté française a une forte expertise dans la conception, l'implantation et l'exploitation des spectromètres multi-objets (MOS) sur les grands télescopes (FLAMES/GIRAFFE, VIMOS, MUSE). Pour l'E-ELT, la communauté insiste sur le besoin urgent d'installer un MOS lors de la phase 3 du plan d'instrumentation (ELT-3). Avec sa haute définition spatiale, un niveau de multiplexage élevé (100 – 250 fibres) et une résolution spectrale allant jusqu'à 20000, MOSAIC serait un MOS dédié à l'étude du milieu intergalactique et à la cosmologie. Pour permettre à l'instrumentation européenne de rester compétitive avec le TMT américain, il serait nécessaire que MOSAIC soit rapidement suivi (pour ELT-6) soit d'un second MOS multi-fente avec des capacités d'imagerie (comme DIORAMAS), soit d'un spectrographe grand intégral de champ basé sur le concept de MUSE et avec un plus grand champ qu'HARMONI. Dans tous les cas, il faut noter que pour véritablement bénéficier du gain en sensibilité (pour des détections limitées par le fond de ciel) et justifier l'installation d'un tel instrument sur l'E-ELT, il sera essentiel de garantir que l'instrument fonctionnera de concert avec une MOAO (Multi-Object Adaptive Optics) produisant une image à la limite de la diffraction dans tout le champ de l'instrument. Dans le cas contraire, l'instrument ne sera pas compétitif par rapport au TMT optimisé pour un plus grand champ. De plus, les programmes et les instruments pour lesquels la résolution angulaire est centrale seraient pénalisés. Les développements R&D nécessaires concernent donc l'optique adaptative multi-objets (MOAO dont un démonstrateur CANARY est installé sur le télescope WHT aux Canaries), les traitements optique efficaces pour des optiques de grande dimension et les découpeurs de champs (asphériques ou métalliques pour augmenter la capacité et l'ouverture des spectrographes).

[La communauté française doit poursuivre sa démarche fédérée autour des développements ELT-MOS.]

La spectroscopie multi-objets grand champ (1,5° x 1,5°) pourrait être envisagée sur le CFHT nouvelle génération avec MSE (Mauna Kea Spectroscopic Explorer). Ce télescope de la classe des 10m serait dédié majoritairement à des observations spectroscopiques systématiques avec une résolution spectrale pouvant aller jusqu'à 20000 ou 40000 et un taux de multiplexage massif (de 800 à 3200 fibres). Ces caractéristiques permettraient d'observer rapidement de grandes parties du ciel (et donc, en particulier, pour les objets stellaires, de grandes parties de la Galaxie ou du Groupe Local) jusqu'à des magnitudes inaccessibles aux télescopes de 4 m. La synergie serait très importante avec Gaia pour le suivi des étoiles faibles, en permettant la mesure des compositions chimiques et des vitesses radiales. La plus haute résolution spectrale serait un point très fort par rapport au concurrent américain PFS sur SUBARU. Les besoins en R&D concernent le multiplexage, les torons de fibres et les réseaux holographiques.

[Compte tenu de l'expertise de la communauté française dans les développements MOS et des enjeux pour garder un accès aux régions du ciel couvertes par le CFHT, il apparaît souhaitable que l'INSU soit partie prenante de l'étude de concept d'un instrument comme MSE.]

Vers la haute dynamique avec l'E-ELT

Après les instruments de 1^{ère} génération (MICADO et HARMONI), un imageur IR moyen (METIS), un spectrographe multi-objet (MOSAIC) et un spectrographe visible et proche IR à haute résolution (CODEX/SIMPLE) seront installés sur l'E-ELT. L'installation de l'instrument couvrant l'application phare de l'E-ELT, i.e. l'imagerie et la caractérisation spectrale des planètes extrasolaires, est reportée à la période 2025-2030, afin de lever une série de verrous technologiques identifiés au moment de l'examen de la proposition EPICS (aujourd'hui PCS). Le retour d'expérience de l'instrument d'optique adaptative extrême SPHERE, en cours de validation au VLT, va contribuer à la définition de la stratégie haute dynamique sur l'E-ELT. Les spécificités de ce télescope commandent une certaine prudence quant à la simple transposition des concepts d'instruments à haut contraste actuels. Par exemple, on anticipe sur l'E-ELT qu'une fraction significative (entre 0.5 et 1%), et partiellement aléatoire (défaillances et calendrier de retraitement), de la surface du primaire sera manquante ou défaillante de manière routinière, avec un impact potentiellement dévastateur sur les performances d'un instrument à haute dynamique. De plus, la résolution angulaire de l'E-ELT est suffisamment fine pour que le diamètre angulaire des étoiles cibles impose un plancher de la réjection coronographique. Plusieurs actions de R&D sont en cours tant au niveau composants (miroirs déformables, coronographes, ...) que système (bancs développés dans les laboratoires Lagrange, LESIA et IPAG) et explorent en partie ces aspects.

[Il faut coordonner les efforts en très haute dynamique autour de l'E-ELT et proposer une feuille de route commune, qui implique les laboratoires ainsi que les industriels qui fabriquent les miroirs déformables, les calculateurs rapides et les détecteurs à haute performance nécessaires au succès de cette application phare de l'E-ELT.]

Vers la très haute résolution angulaire optique

En 2025, avec son ouverture de 40 mètres, l'E-ELT à la limite de la diffraction offrira une résolution de l'ordre de 10 mas dans le proche infrarouge alors que les instruments de 2^{ème} génération du VLTI auront 10 ans. Avec une base maximale de 200 mètres, le VLTI conservera un avantage de taille et restera donc un moyen unique d'observations à la résolution de la milliseconde d'angle dans l'hémisphère Sud. Il est donc essentiel de réfléchir dès à présent au futur de cette infrastructure, en étudiant les possibilités d'évolution ou d'extension à moyen et long termes. Au niveau européen, l'établissement d'une feuille de route long-terme pour le VLTI est préconisée par Astronet (« *Recommendation 4.6: A coherent long-term plan should be established under the auspices of ESO and the European Initiative for Interferometry during the coming two years. It should be built on the realizations of Gravity and MATISSE and prepare the future plans for enhanced high angular resolution capabilities in the ELT era and in complement to exoplanets and stellar physics space missions.* ») et encouragée par le Visiting Committee de l'ESO (« *Large baseline optical interferometry is probably the only possibility for future ultra-high spatial resolution capabilities in the visible and the infrared from the ground. Given the infrastructure of the VLT-I and its expertise, ESO is in an excellent position to assume the leadership role in these techniques in the future.* »).

Pour aller en-deçà de la résolution angulaire de quelques millisecondes d'angle, il sera essentiel de développer un interféromètre optique à bases kilométriques ou de pousser l'instrumentation vers les courtes longueurs d'onde. A l'instar de ce que fait actuellement ALMA dans le domaine radio, les développements futurs doivent s'orienter vers de la spectro-interférométrie à plus petites longueurs d'onde (visible, infrarouge), avec des capacités spectrales conséquentes (< 10km/s), de manière à résoudre les étoiles spatialement et dynamiquement.

[En se basant sur l'expertise acquise depuis la mise en opération du VLTI, expertise qui sera renforcée avec l'exploitation des instruments de 2^{ème} génération, une feuille de route à long terme de l'interférométrie optique longue base doit être proposée pour préparer le futur du VLTI (correction adaptative et suivi de franges, nombre de télescopes accru, nouvelles fenêtres spectrales, augmentation de la résolution angulaire) et au-delà. Compte tenu de son implication historique et de son expérience, tant dans la réalisation de grands instruments interférométriques que de démonstrateurs, la communauté française doit prendre une place importante dans la démarche européenne soutenue par l'ESO et par Astronet.]

A plus long terme, plusieurs démarches sont initiées en Europe (au sein du groupe de travail « The Future of Interferometry in Europe de l'European Interferometry Initiative entre autres) et aux Etats-Unis. On peut citer la réflexion commune autour du projet PFI (Planet Formation Imager) avec, pour objectifs, de résoudre l'étendue gravitationnelle d'une planète dans un disque protoplanétaire (pour comprendre la dynamique des disques), d'être capable de faire de la spectro-imagerie des molécules de gaz plus chaudes que celles observées par ALMA, d'imager les vents, les chocs, les disques, la convection, ... En termes de R&D, des ruptures technologiques seront indispensables et il sera donc essentiel d'étudier les gains potentiels apportés par les nouveaux détecteurs (comptage rapide de photons) et les technologies issues des télécommunications qui pourraient répondre aux exigences de tels imageurs (nouveaux concepts de lignes à retards (MEMS, interconnexions optiques, composants photoniques actifs), interférométrie hétérodyne via des peignes de fréquences, conversion paramétrique, ...).

SKA Phase 2 : vers plus de sensibilité et plus de bandes de fréquences

Avec sa surface collectrice de 1 km², SKA Phase 2 permettra un relevé des galaxies avec les mesures simultanées du redshift et de la position. Le catalogue d'un milliard de galaxies avec des redshifts précis permettra la détection du signal des oscillations acoustiques de baryons avec suffisamment de précision pour contraindre l'équation d'état de l'univers (le paramètre w) et donc répondra à la question de l'énergie noire et la validité de la théorie générale de relativité. SKA Phase 2 sera aussi essentiel pour la détection de l'époque de réionisation et pour la tomographie de cette époque de la naissance des premières étoiles de l'univers. La grande surface collectrice du SKA et sa résolution angulaire fine, sa capacité à faire des relevés rapides avec son grand champ de vue, ainsi que l'accès à des bandes de fréquences contiguës de 50 MHz à 20 GHz (ou 30 GHz) avec SKA Phase 2 seront aussi nécessaires pour d'autres projets clefs comme, par exemple, la détection des disques proto-planétaires et les planètes naissantes, la détection de molécules organiques aux systèmes planétaires extra-solaires, la mesure de rotation de polarisation pour comprendre la nature et l'origine de magnétisme dans l'univers, la détection de phénomènes transitoires, ... En termes de R&D, les besoins portent sur les circuits intégrés (pour l'amplification, la combinaison des signaux, la conversion analogique/numérique) et sur les composants numériques pour le traitement de signal. Les laboratoires français sont des partenaires majeurs dans le développement de la technologie novatrice des réseaux phasés denses pour la radioastronomie. Ainsi, la France a fourni le circuit intégré « Beamformer Chip » au cœur du prototype EMBRACE (Programme Cadre FP6) et est responsable des tests et de la caractérisation du prototype sur le site de Nançay. Elle est actuellement partenaire des Pays-Bas et du Royaume-Uni pour le développement de la prochaine génération d'instruments.

[Au vu de l'apport significatif en sensibilité, essentiel pour les thématiques phares que sont l'étude des galaxies et de l'énergie noire, et de l'expertise acquise sur des projets comme EMBRACE et NenuFAR, la communauté française a tout intérêt à s'impliquer dans la Phase 2 de SKA.]

Distribution d'horloges

Pour les tests des théories de gravitation, des moyens de comparaison sol-sol (distances continentales et intercontinentales) et sol-espace de performances compatibles avec les horloges du futur (la picoseconde de résolution en temps alors que seule la nanoseconde est aujourd'hui accessible pour les moyens de comparaison d'horloges distantes) restent à créer et à déployer. Ils permettront des tests à très haute performance des modèles et des théories fondant la physique moderne (isotropie de l'espace, dérivées des constantes fondamentales, principe d'équivalence, théories de la gravitation,...). Les technologies sous-jacentes à ces mesures de haute précision (moyens de comparaisons optique-optique et optique-micro-onde, moyens de comparaison longue distance de très haute performance, génération et exploitation de signaux à très bas bruit,...) devront également être développés pour garantir le rendement scientifique optimum des développements en cours. On peut citer l'EquipEx REFIMEVE s'appuyant sur le transfert longue distance d'une fréquence optique ultra-stable sur un réseau Internet sans perturbation du trafic. Ces développements technologiques permettront également des fertilisations croisées et des retombées majeures sur d'autres domaines connexes en astronomie/astrophysique pouvant tirer parti de la génération et la distribution de signaux de référence/synchronisation optique et micro-onde de très haute performance (VLBI,...).

[Les horloges optiques est un domaine dans lequel la France possède une très forte expertise à la pointe de la compétition mondiale. Les applications en physique fondamentale et appliquée (sonde du potentiel gravitationnel, des théories de la gravitation, ...) seront en forte progression dans les quelques dizaines d'années à venir. Cette thématique doit impérativement être soutenue par l'INSU dans la durée].

Méthodologie : renforcer la co-conception

Penser le traitement du signal dédié à un instrument dès sa conception serait hautement bénéfique à de nombreux titres. Tout d'abord, la bonne connaissance des effets instrumentaux est incontournable pour traiter correctement les mesures et en tirer des résultats optimaux aux limites ultimes de sensibilité de précision et de résolution. Cela devient aussi indispensable pour développer les moyens (matériels et méthodologiques) nécessaires à la calibration d'instruments de plus en plus sophistiqués. La diversité de phase en XAO (eXtreme Adaptive Optics) est un exemple de la puissance de cette alliance. Par ailleurs, la capacité de compenser par un traitement adapté certains défauts instrumentaux peut contribuer à relaxer notablement les spécifications d'un instrument et donc à réduire les coûts et le temps de développement. De façon peut-être plus déterminante, cela peut être le seul moyen de rendre possible des projets ambitieux, lorsque de nouveaux instruments ne peuvent plus être une simple extrapolation de ceux existants (par exemple comme dans le cas de l'optique adaptative et des instruments de l'E-ELT). En optimisant le couple instrument-traitement, la co-conception lève donc des points durs et ouvre de nombreuses possibilités. Pour en tirer les pleins bénéfices en astronomie, il faut toutefois en étendre activement la mise en œuvre car la co-conception est une démarche encore relativement marginale, en partie parce qu'elle nécessite de faire travailler simultanément (et non plus séquentiellement) des chercheurs de domaines différents.

C – R&D amont

A partir du travail de revue réalisé au colloque R&D de Grenoble en 2011 et des retours des laboratoires à l'enquête envoyée début 2014, nous avons pu établir un panorama de la communauté R&D française ainsi que des axes de R&D amont à poursuivre pour répondre aux spécifications des moyens du futur.

C.1. La communauté R&D française

Les laboratoires français de l'INSU AA possèdent un fort potentiel de recherche technologique préparatoire aux futures grandes missions de la discipline, d'appui aux instruments en cours de réalisation et d'analyse de concepts nouveaux.

Le paysage de la discipline en termes de R&D est assez marqué par plusieurs axes forts historiques, coordonnés au sein de communautés formellement organisées. C'est le cas en particulier du domaine des temps-fréquence avec l'AS-GRAM, de la haute résolution angulaire avec l'AS-HRA et, dans une moindre mesure, des activités détecteur avec, dans le passé, le programme DCMB (« Développement Concerté de Matrices de Bolomètres ») et, actuellement, le programme BSD (« B-mode Superconducting Detectors ») directement ciblé sur les mesures du CMB et le LabEX FOCUS. Ce dernier axe est souligné par plusieurs équipes comme critique pour nos contributions aux futures réalisations instrumentales de la discipline, sur l'ensemble des thématiques de l'astrophysique. Les grands axes de développement au sein des laboratoires concernent la plupart des domaines de longueur d'onde, des X- γ jusqu'au millimétrique, en passant par l'infrarouge. Ils concernent également les analyses in situ, en particulier pour la planétologie.

La discipline a un besoin critique d'avoir accès à des moyens de réalisations technologiques pour mettre au point et réaliser des composants spécifiques, en particulier relevant de la micro-technologie. Ceci concerne les domaines de la détection, des MEMS, de la photonique/optique intégrée, ... Dans les phases amont, l'accès à des centrales du type de celles du réseau RENATECH est essentiel. Il permet de manière souple de tester et valider de nouveaux concepts. Ces moyens sont souvent insuffisants pour assurer une production de composants compatible avec les besoins d'une instrumentation opérationnelle (au sol ou dans l'espace). En particulier se pose très souvent la question de la pérennité des technologies entre le moment de la démonstration, et le réel besoin opérationnel, qui peuvent être espacés de plusieurs années. C'est pourquoi l'accès à des centrales dédiées assurant une production dans la durée (IRAM, industriels, LETI/MINATEC en France en particulier) est primordial pour l'implémentation de ces technologies dans des instruments livrables, que ce soit pour le spatial ou des grands instruments au sol.

Les laboratoires français occupent une place prépondérante dans le paysage international pour le développement instrumental, apparaissant souvent comme premiers investigateurs d'instruments novateurs. Cette particularité est aussi un moteur puissant de R&D et permet de fédérer des moyens dédiés qui peuvent être importants avec des supports du CNES, de l'ESA, de l'ESO ou des programmes cadres de l'union européenne.

L'apparition d'un certain nombre de nouveaux développements depuis le colloque R&D en 2011 illustre le dynamisme de la discipline. Ceci est vrai dans le domaine des temps-fréquence avec l'utilisation de peignes de fréquence, destinés à la métrologie ou de systèmes de distribution d'horloges, par exemple pour des réseaux d'antennes. De nouveaux développements sont apparus comme les capteurs MEMS pour l'exploration planétaire ou encore le développement d'ASIC spécifiques pour des applications très diverses et qui pourraient avoir un impact fort pour le conditionnement des détecteurs, en particulier spatiaux.

En revanche, certains développements menés dans le passé ne sont plus mentionnés lors de l'enquête réalisée pour cet exercice de prospective (matériaux, contrôle commande, antenne pour la radio astronomie, moyens de tests innovants). Même si de tels développements subsistent peut-être encore dans les unités de la discipline, ils ne semblent plus être au centre des préoccupations pour la réalisation des futurs instruments.

C.2. R&D amont

C.2.1. Instrumentation spatiale

Sur la base des savoir-faire dans les laboratoires INSU qui sont inscrits dans la durée, plusieurs filières instrumentales ont pu voir le jour. C'est le cas pour la spectro-imagerie ; l'analyse élémentaire, la minéralogie, et l'imagerie au sol ; la chimie in situ ; la sismométrie ou les radars ; l'instrumentation plasma in-situ. Il est intéressant de constater que les instruments d'une même famille s'appliquent éventuellement à différents objets et que ces familles couvrent dans l'ensemble toutes les thématiques de la discipline. Chaque famille a des perspectives de développement engagées pour les années à venir. On peut par exemple citer le développement R&T Orbitrap pour spatialiser un spectromètre de masse à très haute résolution permettant la mesure moléculaire et isotopique d'atmosphères et de sols planétaires avec une résolution en masse 20 fois supérieure aux performances actuelles. Nous insistons sur le rôle primordial qu'a joué la R&T du CNES dans l'émergence de ces équipements.

Au sein de la communauté « Plasmas » française, l'expérience forte et mondialement reconnue dans l'instrumentation spatiale peut se décliner en deux grandes catégories : les instruments « Ondes » (magnétomètres et antennes électriques dans diverses gammes fréquentielles (du continu au MHz), analyseurs de bords et récepteurs radio) et les analyseurs plasmas (détecteurs d'électrons, spectromètres de masse – neutres, protons, ions lourds). Actuellement plusieurs développements R&D sont en cours pour réaliser des sauts technologiques importants (miniaturisation, minimisation de la consommation, spatialisation de technologies existantes). On peut par exemple citer l'utilisation de la technologie des magnétorésistances (GMR – Giant MagnetoResistance, TMR – Tunnel magnetoresistance) pour développer une nouvelle génération de magnétomètres hybrides en fort partenariat avec les industriels (ex. THALES), le développement, en étroite collaboration avec TelecomParisTech, de récepteurs radio basse fréquence numérique (1 kHz – 100 MHz) miniaturisés avec une nouvelle architecture permettant de s'affranchir des étages analogiques ou encore le développement d'ASIC à faible bruit et durcis en radiation pour l'électronique embarquée à bord des satellites.

C.2.2. Systèmes d'optique adaptative

Dans le contexte de l'E-ELT, il est important de noter que pour vraiment bénéficier du gain en sensibilité offert par la surface collectrice, l'optique adaptative est essentielle pour les observations d'objets dont la détection est limitée par le fond de ciel, en ramenant la taille du seeing (médian $\sim 0.7''$ dans le visible) à celle de la diffraction, dans un champ allant de $0.5'' \times 1.0''$ (HARMONI) à un champ de $7' \times 7'$ d'arc (MOSAIC). La suite instrumentale très riche de l'E-ELT couvre tous les cas d'utilisation de l'OA, du plus simple avec la SCAO (Single-Conjugate Adaptive Optics) aux plus complexes : LTAO/MCAO (Laser Tomography/Multi-Conjugate Adaptive Optics), MOAO/GLAO (Multi-Object/Ground Layer Adaptive Optics) et XAO (eXtreme Adaptive Optics). Même s'ils contrôleront en priorité les miroirs actifs de l'infrastructure de l'E-ELT, chaque concept d'instrument inclut au moins un analyseur de surface d'onde pour les instruments de première lumière. Les applications grand champ (MOS) demandent un effort supplémentaire avec plusieurs analyseurs de surface d'onde et, au minimum, une correction de type GLAO opérée par le miroir M4 du télescope. Plusieurs cas scientifiques requièrent cependant une correction plus fine et donc des optiques de contrôle supplémentaires comme éléments constitutifs des instruments.

[L'expertise française en optique adaptative, dans les laboratoires INSU et à l'ONERA, est incontestable. Cette communauté devrait être soutenue pour continuer à jouer un rôle majeur dans les développements pour l'E-ELT. L'effort de coordination du développement de l'aspect optique adaptative de tous les instruments qui partagent l'accès aux mêmes infrastructures et font l'expérience du même environnement (atmosphère, vibrations) doit être poursuivi afin d'en optimiser l'efficacité et l'uniformité (lois et algorithmes de contrôle, interfaces logicielles) ; le groupe de travail AO4ELT mis en place par l'INSU peut y contribuer. Enfin, le savoir-faire français sur les miroirs déformables ainsi que les développements sur les détecteurs doivent être fortement soutenus dans la durée, avec un accompagnement des industriels concernés par les acteurs INSU possédant une connaissance pointue des besoins à satisfaire.]

C.2.3. Optique

Ces développements sont essentiels pour plusieurs axes stratégiques de la discipline. Pour les futurs grands télescopes au sol et dans l'espace, le recours à de nouvelles technologies est indispensable pour atteindre les objectifs visés : structures optimisées, phasage de segments ou de modules séparés, optiques asphériques, optiques actives, arrangements de plans focaux. Celles-ci sont développées au LAM, à l'IAP et au SAp.

De même, pour les futurs instruments MOS, des efforts de R&D sont nécessaires compte tenu de la complexité des systèmes considérés : poursuite, à Lyon (CRAL et LabEx PIO), des efforts faits pour MUSE sur les découpeurs de champ et les traitements de surface multi-diélectriques (qui peuvent être appliqués plus généralement à l'ensemble de l'instrumentation), systèmes actifs multi-objets de type CANARY au LESIA, étude de réseaux holographiques VPH (Volume Phase Holographic) au GEPI.

Les miroirs déformables sont sur le chemin critique pour l'E-ELT puisqu'ils n'existent pas à ce jour de composants adaptés aux ELT, ni en Europe, ni aux Etats-Unis. Deux fabricants français développent aujourd'hui deux technologies complémentaires et nécessaires : CILAS pour les miroirs du module MCAO, et ALPAO avec une technologie semblant pouvoir répondre aux besoins de la MOAO (pour MOSAIC), voire de la XAO (pour PCS). Il est essentiel de soutenir ces partenaires dans la durée.

Les avancées en optique guidée (fibres), en optique intégrée planaire (y compris sur des matériaux actifs), en optique non linéaire, en MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems), en impression 3D d'objets métalliques pourront apporter des solutions techniques aux besoins demandés par les futurs instruments, que ce soit les MOS (fentes programmables, par exemple), les correcteurs de front d'onde (optique active, micro-miroirs déformables), ou les instrumentations interférométriques (transport de faisceaux, recombinaison, réalisation de lignes à retard). Ces technologies permettent de considérer un multiplexage important entre des faisceaux d'entrée et des canaux de sortie (spectroscopiques ou interférométriques, ou champ). De tels développements sont menés au LAM, au LESIA, au GEPI et à l'IPAG, en lien avec des centrales technologiques, des laboratoires hors INSU et des industriels.

C.2.4. Détection

Plusieurs laboratoires sont investis dans le développement de détecteurs, avec des réalisations de tout premier rang mondial. Les développements en cours visent pour l'essentiel une amélioration de la sensibilité, de la rapidité des détecteurs mais surtout, dans de nombreux cas, du nombre de pixels. Ceci est particulièrement vrai pour le millimétrique et sub-millimétrique (KIDs, TES et MIS) et pour l'infrarouge. A noter que de nouveaux concepts de détecteurs et de structures de détecteurs émergent actuellement. Il conviendra de suivre les développements en cours au niveau international, en particulier pour le comptage de photons, nécessité par différentes applications comme la cryptographie quantique. Actuellement la communauté française, à l'INSU comme à l'IN2P3, mène un grand nombre d'actions, en lien avec des plateformes technologiques dédiées et financées par différentes sources (instituts, CNES, CEA, LabEx, ESA, ...). Des besoins communs à plusieurs types de détecteurs font également l'objet de développements très spécifiques et d'efforts concertés, comme les circuits de lecture refroidis multiplexés (fréquentiel ou temporel), les matrices de détecteurs elles-mêmes, les technologies de bolomètres pouvant adresser le millimétrique/sub-millimétrique et le domaine X, la cryogénie sub-Kelvin. Sur ce dernier point, la question de l'autonomie et de la facilité d'emploi des machines cryogéniques (y compris à la température de l'azote liquide) reste un point dur et est en cours d'investigation par différentes équipes (Institut Néel, Département Basses Températures du CEA, IPAG).

[Compte tenu de l'ampleur des activités technologiques associées, il est essentiel qu'il existe des lieux d'échanges et de concertation pour s'assurer que des développements lourds similaires ne sont pas menés en parallèle. Une structuration nationale serait très utile. La mise en place d'un groupe de travail, missionné par l'IN2P3, l'INSU, le CEA, le CNES et dirigé par le CNES, autour des activités millimétriques/sub-millimétriques/X va dans ce sens. On peut aussi penser à la mise en place de réseaux comme les réseaux Instrumentation de l'IN2P3 (sur les thématiques Photodétecteurs, Détecteurs gazeux, Détecteurs semi-conducteurs, Détecteurs cryogéniques, Radiodétection, Microélectronique, DAQ/xTCA, R&D mécanique).]

[Pour pouvoir prétendre à une contribution forte dans de futures missions spatiales, il est primordial de maintenir le savoir-faire français dans les laboratoires INSU (et hors INSU), de poursuivre des développements technologiques très spécifiques à chaque domaine de longueurs d'onde et de permettre la mise en œuvre de filières de production via des moyens financiers et humains importants qui doivent être mobilisés dans la durée.]

Détection infrarouge (IR). Des filières innovantes de matrices IR de photodiodes à avalanche sur HgCdTe ont été initiées par plusieurs groupes, aux Etats Unis et en Europe, dans un consortium français (CEA/LETI, SOFRADIR, IPAG, LAM et ONERA – FUI RAPID) et par le groupe Selex en Angleterre. Ces développements marquent un tournant significatif en ouvrant des sensibilités accrues pour le proche IR, à terme une capacité de comptage de photons étant considérée. Les premiers tests de matrices pour l'astrophysique sont en cours par les deux équipes européennes, en laboratoire et sur le ciel pour RAPID. La particularité de la solution française est de permettre des fréquences trames très élevées (jusqu'à 2 kHz) et d'opérer sur une bande très large ([0,4 μm ; 3,4 μm]). Des efforts restent à faire pour atteindre une maturité industrielle et pour avoir des cibles de grands formats (supérieurs à 1k x 1k). Des efforts sont faits dans ce sens au sein du LabEx FOCUS. Ces développements sont cruciaux pour l'interférométrie et l'analyse de surface d'onde. Un autre besoin concerne les détecteurs de grande dimension en proche IR. De tels développements sont en cours au SAp sur financement ESA, pour viser une filière européenne de ce type de détecteur. Dans l'IR moyen, il est essentiel de disposer de détecteurs avec la sensibilité requise et fonctionnant à des températures compatibles avec des missions spatiales de durée suffisante (pour des missions du type de Echo par exemple). Cette question est étudiée au SAp avec le LETI et SOFRADIR avec un soutien du CNES et de FOCUS.

Plans focaux millimétriques (mm) / sub-millimétriques (sub-mm). Dans cette gamme, la détection de la polarisation du mode B du CMB (avec une expérience spatiale dédiée comme CORÉ+ permettant une meilleure couverture spatiale et spectrale), la formation des étoiles et l'évolution des galaxies imposent le développement des grands plans focaux comportant un nombre accru de pixels avec les meilleures performances. A ce jour, deux solutions sont en concurrence : les KIDs et les bolomètres avec, pour ces derniers, deux approches de thermomètres, les MIS (haute impédance) et TES (basse impédance). Un développement de TES est mené en France par des équipes parisiennes (IAS, APC, CSNSM, IEF) avec une contribution de l'IRAP pour l'électronique chaude. Ces détecteurs sont aujourd'hui réalisés par l'assemblage de sous-ensembles de 256 pixels et permettent la réalisation du plan focal du premier module de QUBIC qui contiendra 2048 TES. La lecture multiplexée de 128 détecteurs utilise des SQUIDS et un ASIC SiGe refroidi à 4 K. La capacité à développer en France de larges détecteurs MIS a été démontrée à travers les projets PACS/HERSCHEL (dont le détecteur à courte longueur d'onde constitue, avec 2048 pixels, la plus grande caméra de bolomètres envoyée dans l'espace) et ARTEMIS/APEX. Les bolomètres sont réalisés par technologie silicium en série (CEA/LETI), par matrices de 16 x 16 pixels aboutables sur trois de leurs côtés. Les innovations technologiques en cours ont notamment pour but de réaliser la mesure de la polarisation directement sur le pixel (LETI, Irfu, AIM avec le soutien de FOCUS). Une limite des détecteurs de la génération actuelle provient de la complexité de l'électronique de lecture à très basse température pour de grands nombres de pixels, nécessitant un multiplexage. Pour atteindre des taux de multiplexage supérieurs à 1000 (soit un gain d'un facteur 10 par rapport à ce qui est fait actuellement), il est impératif d'étudier les technologies avec une forte capacité de multiplexage intrinsèque. Pour permettre une augmentation significative de la capacité de multiplexage, un multiplexage fréquentiel est rendu possible par le concept des KIDs (Microwave Kinetic Inductance Detector – MKID) : un fil supraconducteur est intégré dans un circuit micro-onde résonant ; la variation de la fréquence de résonance induite par les

variations de l'inductance cinétique du fil est mesurée. C'est la technologie utilisée pour la camera NIKA2 réalisée à Grenoble (Institut Néel, IPAG, LPSC, IRAM) et installée sur l'antenne de 30 m de l'IRAM. Ces développements sont actuellement soutenus par une ANR, une ERC et le LabEx FOCUS.

Caméras hétérodynes millimétriques et THz (0.1 – 5 THz). Les caméras hétérodynes sont un enjeu majeur pour les futurs instruments au sol (grands télescopes et interféromètres) et spatiaux (interféromètres, satellites de survey, sondes planétaires et à terme rovers) en spectroscopie à haute résolution sur l'ensemble du spectre millimétrique et THz. Trois défis technologiques sont à relever : la génération et la distribution du signal d'oscillateur local sur chaque mélangeur (détecteur) de la caméra, l'extraction et l'amplification du signal en fréquence intermédiaire (signal transposé en bande centimétrique) en sortie de chaque mélangeur et enfin le traitement de l'information occupant une bande passante de plusieurs dizaines de GHz pour chaque pixel de la caméra. Les solutions électroniques et photoniques à la génération cohérente entre 0.1 et 5 THz sont complémentaires et doivent être développées pour couvrir l'ensemble du spectre électromagnétique : amplificateurs de puissance sur matériaux III-V (InP, GaAs, GaN) et fonctionnant à des fréquences supérieures à 100 GHz, multiplicateurs de fréquences à diodes Schottky, photo-mélangeurs, oscillateurs fondamentaux à jonctions Josephson, lasers à cascades quantiques THz (QCLs). Les technologies de détecteurs cohérents, tant refroidis qu'à température ambiante (pour les sondes planétaires), doivent progresser pour diminuer le bruit (limité par le bruit quantique), augmenter les bandes passantes en fréquence intermédiaire (afin d'augmenter la fenêtre d'observation instantanée de l'instrument) et pour gagner en uniformité et reproductibilité. Les jonctions supraconducteur / isolant / supraconducteur (SIS), les mélangeurs à bolomètres à électrons chauds ou à diodes Schottky et également les amplificateurs sub-millimétriques à faible bruit sont des technologies qui doivent être développées ou améliorées. Ces développements sont portés par le LERMA (en partenariat avec le Laboratoire de Photonique et Nanostructures) et par l'IRAM.

Détecteurs X-γ. Dans le domaine des rayons X, le développement de matrices de microcalorimètres à semi-conducteur ouvre la voie à la très haute résolution spectrale (quelques eV à 6 keV). Par ailleurs, la réalisation de matrices de détecteurs ultra-compactes en CdTe permettra d'étendre le domaine de détection aux rayons X durs/γ mous, jusqu'à environ 200 keV, avec d'excellentes performances en termes de finesse d'image et de spectroscopie (résolution de 1.2 keV à 60 keV). Ces développements sont portés par le laboratoire AIM (CEA/Irfu). A plus haute énergie, dans le domaine des rayons γ de moyenne énergie (0.1 – 100 MeV), les détecteurs en silicium à micropistes double-faces (DSSSD) ont connu diverses avancées technologiques ces dernières années (grande surface de détection, homogénéité, ...), notamment du fait de leur utilisation massive dans des expériences de physique des particules. Le principal verrou technologique à lever sur ces détecteurs pour un futur télescope spatial à grand champ de vue (de l'ordre de π sr) disposant de résolutions angulaire ($\Delta\theta \sim 1,5^\circ$ à 1 MeV) et spectrale ($\Delta E/E \sim 1,5\%$ à 1 MeV) suffisantes pour traiter toutes les composantes du fond diffus cosmique porte sur l'augmentation de la résolution spectrale (détection de quelques dizaines à quelques centaines de keV). Pour les calorimètres-imageurs, de nouveaux matériaux scintillants comme le bromure de cérium (CeBr₃) semblent bien adaptés et pourraient être couplés à des matrices de photomultiplicateurs silicium (SiPM) pour mesurer la distribution spatiale de la lumière de scintillation et en déduire les positions 3D des dépôts d'énergie. De par leur compacité et leur robustesse, et du fait qu'ils ne sont alimentés qu'en basse tension (quelques dizaines de Volts), ces photodétecteurs devraient avantageusement remplacer les traditionnels photo-multiplicateurs à tube (PMT) dans les applications spatiales. Actuellement ces développements sont portés par quatre laboratoires franciliens (APC, CSNSM, AIM, IPNO) avec le support du CNES et des LabEx UnivEarthS et P2IO.

Détecteurs innovants. Les avancées technologiques remarquables de ces dernières années ont permis l'émergence de nouveaux détecteurs, en particulier des détecteurs courbes et des détecteurs directement intégrés/collés à l'instrument, en particulier pour la spectroscopie. Il convient de suivre et de favoriser ce type de développements.

C.2.5. Circuits électroniques dédiés

Tout comme les technologies de la détection sont particulièrement critiques pour l'instrumentation de la discipline qui exige des capteurs à la limite de la technologie, les circuits de lecture, de traitement et d'analyse du signal sont essentiels, dans tous les domaines du spectre électromagnétique. On peut par exemple citer le développement pour SKA de circuits intégrés pour toute la chaîne analogique : amplificateurs bas bruit, filtres, multiplexeurs, phasage-sommation (beamformer) et convertisseurs analogique-numérique. Ces développements se font entre des laboratoires INSU (à Nançay et à Bordeaux) et des partenaires industriels (NXP, ST Microélectronique).

De plus, des besoins communs émergent comme la miniaturisation pour le spatial, la réduction du bruit, le développement d'ASIC pour la numérisation haut débit, les FPGA, les GPU pour le temps réel, le développement d'ASIC cryogéniques, ... Pour l'instrumentation spatiale, le besoin d'ASIC durcis en radiations émerge fortement (électronique à faible bruit, faible consommation et faible masse pouvant être utilisée sur tout type d'instruments comme les magnétomètres ou les spectromètres de masse, ...). Le développement d'ASIC pour les applications de mesures de haute précision, de temps-fréquences, de distribution d'horloges embarquées est aussi indispensable.

[Les développements d'ASIC dédiés pour les applications en astronomie devraient être menés de manière plus concertée.]

C.2.6. Lasers ultra-stables pour la métrologie absolue

eLISA est constitué d'une constellation de trois satellites distants de 10^6 km, en orbite autour du soleil. Le passage d'une onde gravitationnelle se traduira par une modification des distances inter-satellites qui ne sera que de quelques picomètres à des fréquences comprises entre 10^{-5} et 10^{-1} Hz. Trois défis technologiques doivent donc être relevés : la possibilité de conserver sur des trajectoires géodésiques les satellites protégés de toute influence externe (via le contrôle permanent de la position relative grâce à des micropropulseurs corrigeant perpétuellement la trajectoire des satellites), la mesure avec précision de la position relative des satellites (par interférométrie), la diminution d'un facteur 100 environ des bruits des quatre lasers utilisés pour l'interférométrie. Les deux premiers défis seront testés lors de la pré-mission LISAPathfinder (ESA/NASA) qui sera lancée mi-2015. Quatre lasers (Nd:YAG) assureront les deux liens entre les satellites pour la mesure précise de leur position et il est primordial d'éliminer le bruit inhérent à chaque laser.

En parallèle, dans le domaine temps-fréquences, les horloges optiques ont besoin de lasers ultra-stables (largeur de raies < 1 Hz et instabilités $< 10^{-15}$) pour l'interrogation des transitions atomiques (lasers continus) et les comparaisons entre horloges (lasers femto-secondes). Le développement de telles sources au sol est bien avancé, quoique des améliorations soient encore nécessaires pour atteindre les limites ultimes des horloges, mais la spatialisation de ces technologies reste embryonnaire en France (en particulier par rapport à l'Allemagne) et devra faire l'objet de support conséquent pour assurer la fiabilité et la haute performance des dispositifs. En outre, les sources d'atomes froids et ultra-froids spatiales ou au sol se basent de plus en plus sur des lasers continus allant jusqu'à quelques Watts de puissance et des largeurs de raies de quelques dizaines de kHz, dont la possibilité de spatialisation reste un point important à explorer.

Les R&D à développer concernent le niveau de maturité des systèmes lasers embarqués du point de vue de leur encombrement, de leur poids, de leur efficacité, de leur rendement (faible consommation électrique) et surtout de leur fiabilité (aucune maintenance possible pendant la durée de la mission). Les lasers à solides sont les candidats actuels du projet eLISA et on peut espérer que les projets Virgo et LIGO terrestres pourront faire bénéficier aux projets spatiaux de leur développement en matière de lasers fibrés pour ce qui est des paramètres d'encombrement et de consommation. Il reste néanmoins, quel que soit le type de lasers, les aspects de « spatialisation » et de durée de vie qu'il faut mener dans des tests à très long terme pour assurer une fiabilité totale. Dans la mesure de distances absolues telles que celles envisagées pour les hyper-télescopes, les distributions d'horloges sont nécessaires et les lasers continus sont associés à des lasers femtosecondes. De tels développements sont menés au SYRTE (Observatoire de Paris), au Département Artemis de l'OCA et au Laboratoire de Physique des Lasers à Paris.

[Il est essentiel de soutenir les développements de systèmes lasers appliqués à la métrologie et aux horloges optiques pour la comparaison de haute précision en temps-fréquence. Ces applications fédèrent une communauté française à forte visibilité internationale et vont prendre de l'ampleur en instrumentation et dans les applications astrophysiques, spatiales ou au sol.]

C.2.7. R&D en science des données

Il y a encore beaucoup à gagner pour le retour scientifique des instruments astronomiques par le traitement du signal. Par exemple, si l'approche inverse a clairement démontré sa capacité à tirer le meilleur parti des observations malgré leurs défauts (flou, distorsion, bruit, incomplétude des mesures, ...), ce potentiel est loin d'être complètement ou correctement exploité. Par ailleurs, les nouveaux instruments fournissent des informations de plus en plus riches mais aussi moins directement utilisables. Le développement de nouvelles méthodologies est essentiel du fait de la forme des données (algorithmes de reconstruction d'image en interférométrie par exemple), des signaux parasites et du bruit (méthodes de détection pour les exoplanètes, de séparation de composantes pour extraire le fond cosmologique des données de Planck) ou de leur volume (traitement statistique pour mesurer l'astigmatisme cosmique). Ces instruments posent aussi de nouveaux problèmes dont l'impact ne devrait pas être négligé. C'est le cas par exemple de la modélisation et surtout de la calibration de la réponse impulsionnelle non-stationnaire (et donc non convolutive) en optique adaptative grand champ ou en spectrographie intégrale de champ. Des méthodes d'auto-calibration (inspirées de la déconvolution aveugle) sont peut-être une solution mais restent à développer dans ce contexte. Enfin, le développement des moyens de calcul autorise des traitements sophistiqués en temps réel pendant les observations et il faut exploiter ce moyen d'améliorer les performances des instruments (cophasage des miroirs segmentés des interféromètres et des très grands télescopes, contrôle en optique adaptative). Cet aspect n'est pas sans lien avec la co-conception discutée en section B. Le développement et l'exploitation des instruments en astronomie posent une large variété de problématiques susceptibles de motiver des développements au sein de la communauté Traitement du Signal (TS). Nous devons toutefois maîtriser et développer activement les méthodologies car il ne s'agit pas seulement d'adapter des approches existantes mais aussi d'en inventer de nouvelles pour les finalités de l'astronomie. Cela suggère un renforcement des liens avec les chercheurs du TS mais aussi un soutien des activités de R&D et une évolution culturelle au sein de la communauté astronomique (pour intégrer le TS à la formation des astronomes, valoriser la R&D en science des données et motiver des vocations, pour passer des chaînes de traitement de type « pipeline » à des approches plus globales et optimales).

Recommandations

Nous rappelons les recommandations du groupe :

- **L'INSU contribue fortement aux développements des instrumentations sol et des missions spatiales par l'implication et l'expertise de ces personnels, chercheurs, techniciens et ingénieurs.** Néanmoins, les laboratoires français ont de plus en plus de difficultés à tenir leurs engagements dans la durée dans les grands projets sol et dans les missions spatiales auxquels ils participent à cause de l'érosion de son personnel, notamment technique, phénomène qui s'est accru ces dernières années. **Il est essentiel que l'INSU poursuive et renforce son soutien aux activités instrumentales sol et spatiales.**

Moyens du futur

- La communauté française doit poursuivre sa démarche fédérée autour des développements **E-ELT-MOS**.
- Compte tenu de l'expertise de la communauté française dans les développements MOS et des enjeux pour garder un accès aux régions du ciel couvertes par le CFHT, il apparaît souhaitable que l'INSU soit partie prenante de l'étude de concept d'un instrument comme **MSE**.
- Il faut coordonner les efforts en très **haute dynamique** autour de l'**E-ELT** et proposer une feuille de route commune, qui implique les laboratoires ainsi les industriels qui fabriquent les miroirs déformables, les calculateurs rapides et les détecteurs à haute performance nécessaires au succès de cette application phare de l'E-ELT.
- Au vu de l'apport significatif en sensibilité, essentiel pour les thématiques phares que sont l'étude des galaxies et de l'énergie noire, et de l'expertise acquise sur des projets comme EMBRACE et NenuFAR, la communauté française a tout intérêt à s'impliquer dans la **Phase 2 de SKA**.
- En se basant sur l'expertise acquise depuis la mise en opération du VLTI, expertise qui sera renforcée avec l'exploitation des instruments de 2^{ème} génération, une feuille de route à long terme de **l'interférométrie optique longue base** doit être proposée pour préparer le futur du VLTI (correction adaptative et suivi de franges, nombre de télescopes accru, nouvelles fenêtres spectrales, augmentation de la résolution angulaire) et au-delà. Compte tenu de son implication historique et de son expérience, tant dans la réalisation de grands instruments interférométriques que de démonstrateurs, la communauté française doit prendre une place importante dans la démarche européenne soutenue par l'ESO et par Astronet.
- **Les horloges optiques** est un domaine dans lequel la France possède une très forte expertise à la pointe de la compétition mondiale. Les applications en physique fondamentale et appliquée (sonde du potentiel gravitationnel, des théories de la gravitation, ...) seront en forte progression dans les quelques dizaines d'années à venir. Cette thématique doit impérativement être soutenue par l'INSU dans la durée.

R&D amont

- L'expertise française en **optique adaptative**, dans les laboratoires INSU et à l'ONERA, est incontestable. Cette communauté devrait être soutenue pour continuer à jouer un rôle majeur dans les développements pour l'E-ELT. L'effort de coordination du développement de l'aspect optique adaptative de tous les instruments qui partagent l'accès aux mêmes infrastructures et font l'expérience du même environnement (atmosphère, vibrations) doit être poursuivi afin d'en optimiser l'efficacité et l'uniformité (lois et algorithmes de contrôle, interfaces logicielles) ; le groupe de travail AO4ELT mis en place par l'INSU peut y contribuer. Enfin, le savoir-faire français sur les miroirs déformables ainsi que les développements sur les détecteurs doivent être fortement soutenus dans la durée, avec un accompagnement des industriels concernés par les acteurs INSU possédant une connaissance pointue des besoins à satisfaire.
- Compte tenu des enjeux forts pour les instruments à venir, en particulier sur les détecteurs, il est fondamental que l'INSU maintienne et conforte l'accès de ses laboratoires à des **moyens de réalisations technologiques**, aussi bien à des plateformes de type recherche (pour tester et valider de nouveaux concepts) qu'à des centrales de production (pour l'implémentation de technologies dans des instruments livrables, que ce soit pour le spatial ou des grands instruments au sol).
- Compte tenu de l'ampleur des activités technologiques associées aux **développements des détecteurs**, il est essentiel qu'il existe des lieux d'échanges et de concertation pour s'assurer que des développements lourds similaires ne sont pas menés en parallèle. Une structuration nationale serait très utile. La mise en place d'un groupe de travail, missionné par l'IN2P3, l'INSU, le CEA, le CNES et dirigé par le CNES, autour des activités millimétriques/sub-millimétriques/X va dans ce sens. On peut aussi penser à la mise en place de réseaux comme les réseaux Instrumentation de l'IN2P3 (sur les thématiques Photodétecteurs, Détecteurs gazeux, Détecteurs semi-conducteurs, Détecteurs cryogéniques, Radiodétection, Microélectronique, DAQ/xTCA, R&D mécanique).

- Dans le domaine de la **détection**, pour pouvoir prétendre à une contribution forte dans de futures missions spatiales, il est primordial de maintenir le savoir-faire français dans les laboratoires INSU (et hors INSU), de poursuivre des développements technologiques très spécifiques à chaque domaine de longueurs d'onde et de permettre la mise en œuvre de filières de production via des moyens financiers et humains importants qui doivent être mobilisés dans la durée.
- Les **développements d'ASIC** dédiés pour les applications en astronomie devraient être menés de manière plus concertée.
- Il est essentiel de soutenir les développements de **systèmes lasers appliqués** à la métrologie et aux horloges optiques pour la comparaison de haute précision en temps-fréquence. Ces applications fédèrent une communauté française à forte visibilité internationale et vont prendre de l'ampleur en instrumentation et dans les applications astrophysiques, spatiales ou au sol.