

GROUPE THEMATIQUE

ASTRONOMIE ET ASTROPHYSIQUE

Braine Jonathan, Dartois Emmanuel, Foglizzo Thierry, Grosso Nicolas, Gry Cécile, Halloin Hubert, Hébrard Guillaume, Knödseder Jürgen, Laudet Philippe (thématicien), Maffei Bruno, Marques João (président), Prunet Simon, Ristorcelli Isabelle

La thématique astronomie-astrophysique cherche à comprendre l'évolution de l'Univers et de ses constituants. Elle couvre des domaines aussi variés que l'inflation cosmique, la formation des galaxies, des étoiles et des planètes, leur vie et ultimement leur mort. Elle a des interfaces importantes avec la physique fondamentale, notamment via la physique de l'univers primordial, la matière noire, l'énergie noire, et les ondes gravitationnelles, mais aussi avec les groupes système solaire et exoplanètes et avec le groupe Soleil-héliosphère-magnétosphère. La discipline est caractérisée par une diversité d'échelles de temps, des premiers instants à l'âge actuel de l'univers, et de taille des objets, des filaments cosmiques aux atomes et molécules. De nombreux processus physiques sont en jeu, tels que la gravitation, la turbulence, l'accélération de particules, la nucléosynthèse. Ces processus agissent sur les champs de rayonnement, le champ magnétique, le rayonnement cosmique... dans des milieux très divers comme les différentes phases de gaz et les grains de taille variable. Les effets environnementaux et de rétroaction à toutes les échelles y jouent un rôle majeur. Les recherches en astronomie et astrophysique visent à comprendre :

- **L'origine, le contenu et l'évolution de l'Univers**

La nature de la matière noire et celle de l'énergie noire sont des questions ouvertes à l'interface avec la physique fondamentale. L'astrophysique s'attache à en mesurer les effets sur l'évolution et la structuration de l'Univers pour en comprendre les propriétés et contraindre leurs natures. De nombreuses questions portent également sur **l'origine et l'évolution primordiale de l'Univers** : quelles sont les conditions prévalant après l'inflation cosmique, comment les premières perturbations de matière issues de l'inflation ont-elles donné naissance à la toile cosmique, aux premières galaxies, aux premiers trous noirs ?

- **L'évolution et la structuration de la matière**

Les baryons dans l'Univers traversent des phases très différentes, sur des échelles très différentes, des filaments cosmiques aux trous noirs en passant par le milieu interstellaire et les étoiles. Les mécanismes d'échange de matière et d'énergie entre les différentes échelles et phases des milieux posent encore de nombreuses questions : comment le gaz est-il accrété et transformé à l'échelle des amas de galaxies, des galaxies et de leurs trous noirs centraux ? Comment les trous noirs centraux et les étoiles rétroagissent à leur tour sur le milieu intergalactique ?

Dans les galaxies, des étoiles se forment et meurent enrichissant le milieu interstellaire (MIS) en éléments lourds et y injectant de l'énergie. De nombreuses questions concernent la formation des étoiles et des planètes, la physique des intérieurs stellaires, et la rétroaction des étoiles sur le milieu interstellaire. Enfin, les étoiles massives explosent à la fin de leur vie, laissant derrière une étoile à neutrons ou un trou noir. Si ces objets compacts se trouvent dans un système binaire, ils finissent éventuellement par fusionner, générant des ondes gravitationnelles (OG) et éventuellement un sursaut gamma. Plusieurs questions restent sans réponse sur la physique et les effets de ces phénomènes transitoires et violents.

1 BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

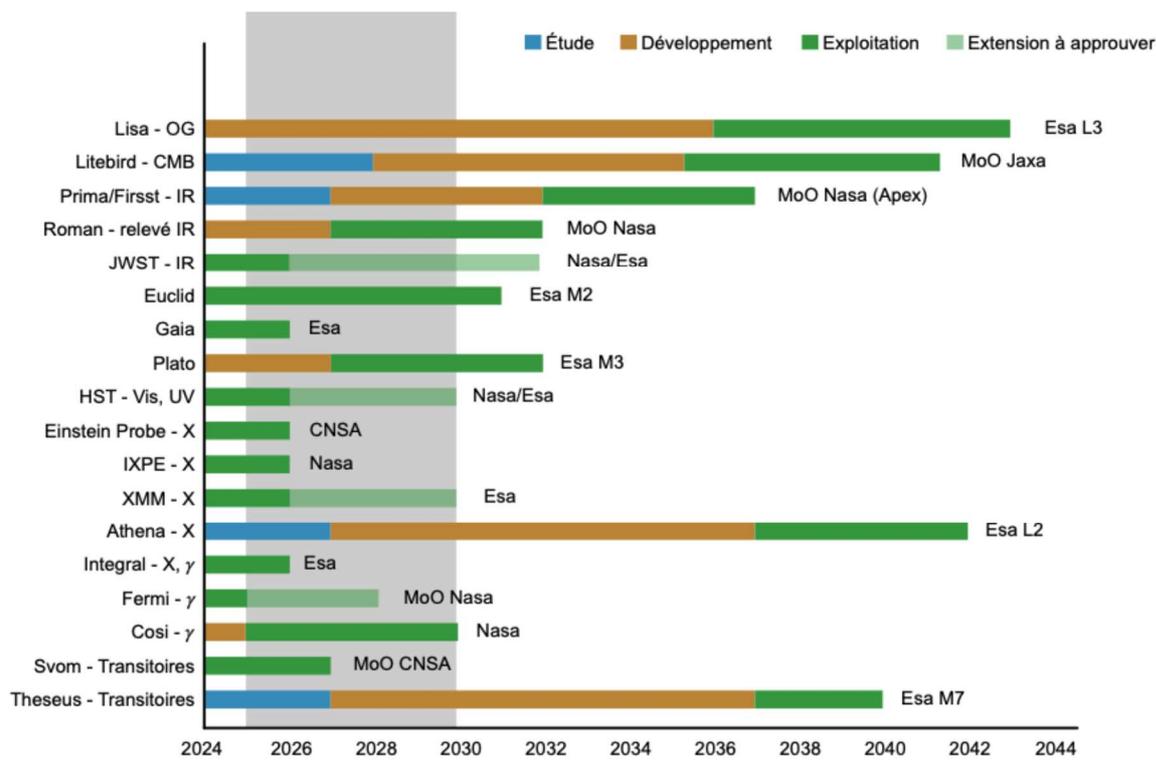


Figure 1 : Missions avec participation du Cnes dans la thématique astronomie et astrophysique. La bande grise correspond à la période couverte par cette prospective.

La **Figure 1** rassemble les missions avec participation du Cnes dans la thématique astronomie et astrophysique. Un grand nombre de missions en exploitation a permis à la communauté française d'obtenir de nombreux résultats scientifiques ces derniers 5 ans. Ces résultats sont décrits dans la section en dessous.

1.1 QUELQUES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES MARQUANTS

Seuls sont résumés ici des résultats impliquant des missions spatiales à forte implication française, une liste exhaustive de l'ensemble des avancées dans la discipline dépasse le cadre de ce document.

1.1.1 POURSUITE DES OBSERVATIONS ET TROISIÈME CATALOGUE GAIA

La mission **Gaia**, lancée en 2013, continue de cartographier la Galaxie et ses environs. Les derniers catalogues EDR3 (décembre 2020) et DR3 (juin 2022) contiennent l'astrométrie et la distance parallactique pour 1,8 milliard d'étoiles, et une détermination de leur mouvement propre, vitesse radiale, et paramètres astrophysiques (température, rayon, métallicité) pour des millions d'entre elles. Le catalogue recense également 6,6 millions de candidats quasars, les positions et orbites de 160 000 objets du système solaire, et bien d'autres données. Les données de **Gaia** ont déjà apporté une révolution dans plusieurs domaines de l'astrophysique. Plus de 10 000 articles utilisant les données de **Gaia** ont été publiés depuis son lancement, un record pour une mission spatiale.

Les résultats scientifiques obtenus à partir des données **Gaia** concernent presque tous les domaines de l'astrophysique, et sont trop nombreux et variés pour être repris en détail. Nous présentons dans ce rapport quelques aspects particulièrement marquants.

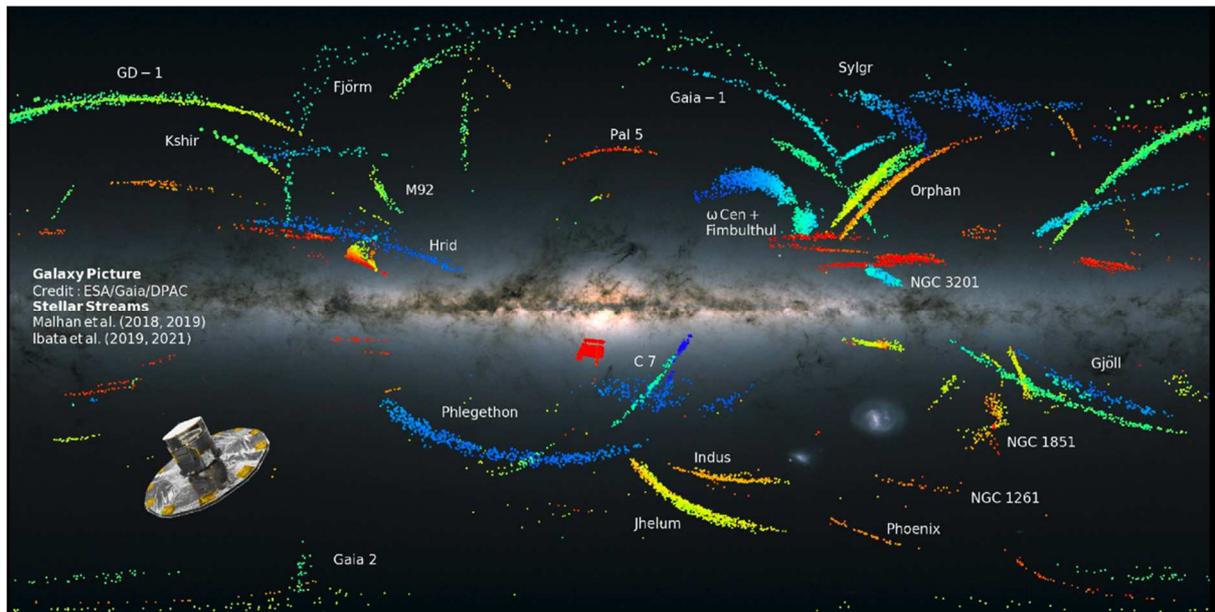


Figure 2. Courants stellaires identifiés grâce à Gaia. Les galaxies grossissent par accrétion de plus petites galaxies. L'image est celle de notre galaxie, la Voie Lactée, et les courants stellaires montrés en couleurs sont les traces laissées par les trajectoires des petites galaxies arrivées sur le disque de la Voie Lactée. L'identification de ces courants a pu s'effectuer grâce à l'extrême précision des mesures de vitesse et de position de GAIA. Des équipes françaises ont été impliquées dans la découverte d'une partie de ces courants.

Gaia a révolutionné la connaissance de notre Galaxie et « l'archéologie Galactique » est devenue une discipline à part entière. Ce sont maintenant 10 milliards d'années de son histoire mouvementée et de sa transformation, par accrétions successives et collisions avec d'autres galaxies, qui sont retracées en particulier à partir des positions et des mouvements des amas globulaires, des courants stellaires et des satellites et de l'identification, parmi eux, des vestiges de ces fusions (**Figure 2** ~~Figure-2~~).

La DR3 a fourni des contraintes de plus en plus précises sur les distances et les mouvements 3D des étoiles distantes, et donc sur la courbe de rotation et le potentiel gravitationnel qu'on peut en déduire. Certains travaux conduits par des équipes françaises impliquent une révision à la baisse de la quantité de matière sombre à moins de 25 kpc du centre de la Galaxie. Ce résultat est en tension avec d'autres mesures utilisant les amas d'étoiles. Les débats et les études se poursuivent sur ce sujet.

Les mesures de Gaia sur les étoiles (position, distance, mouvement, abondances élémentaires) permettent d'en faire une classification précise, avec la détermination de leur luminosité intrinsèque, et la construction de cartographies tri-dimensionnelles des différents types stellaires, ainsi que de l'extinction par le milieu interstellaire sur leur ligne de visée. De nombreuses retombées pour toute la communauté scientifique découlent de ces mesures : milieu interstellaire, évolution galactique, petits corps du système solaire, etc.

1.1.2 Le JWST A DÉJÀ PERMIS DES RÉSULTATS REMARQUABLES

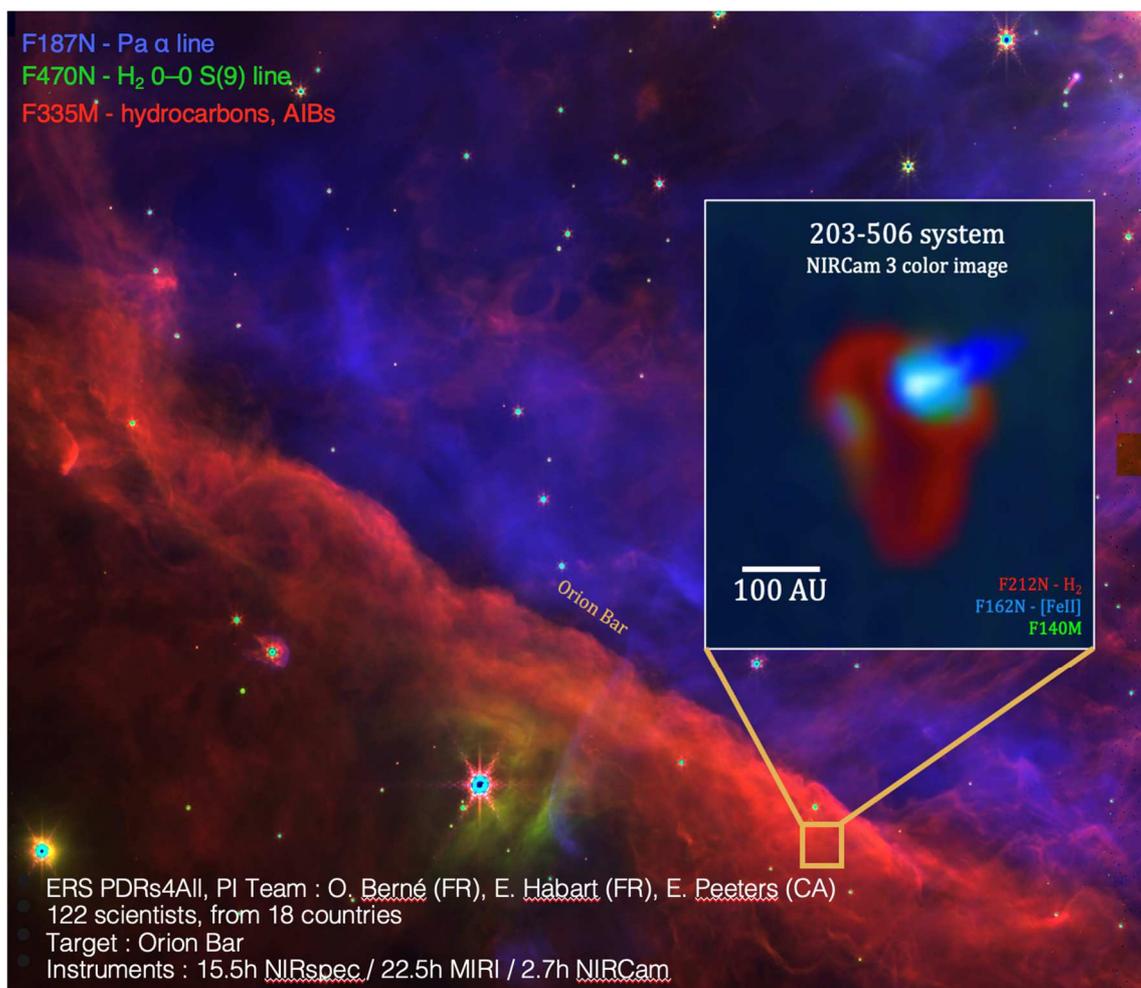


Figure 3. Image JWST NIRC3 de la barre de la nébuleuse d'Orion en trois couleurs. Rouge, vert, et bleu révèlent respectivement les hydrocarbures polyaromatiques, le gaz moléculaire et le gaz ionisé. La barre, un mur de gaz dense et de poussières, et la surface du nuage moléculaire d'Orion 1 en arrière-plan sont éclairés par un groupe de jeunes étoiles massives et chaudes, le Trapèze, situé en haut à droite hors de l'image. Zoom sur un disque protoplanétaire présentant un puissant flot de photoévaporation, induit par le rayonnement FUV du Trapèze. Voir Berné, O., Martin-Drumel, MA., Schroetter, I. et al. Nature 621, 56–59 (2023) ; Habart, E., Peeters, E., Berné, O., et al. 2024, Astronomy & Astrophysics, 685, A73. (2024)

Très vite après sa mise en service, le **JWST** (James Webb Space Telescope) a commencé à produire de nombreux résultats.

Les équipes françaises en particulier, très impliquées dans les observations du milieu interstellaire et des disques protostellaires et protoplanétaires, ont mené ou participé à des découvertes à fort impact sur la formation stellaire et sur la chimie menant à la formation de matière organique complexe. Un exemple est la détection du cation CH₃⁺ avec Miri-MRS à la surface d'un disque protoplanétaire autour d'une étoile jeune. Cette espèce, pierre angulaire de la chimie du carbone interstellaire, très réactive, peut déclencher dans les régions irradiées en UV la formation de molécules beaucoup plus complexes à base de carbone.

L'observation spectroscopique détaillée de nuages denses permet de suivre l'évolution temporelle des grains. Elle a montré que l'accroissement en taille des grains se produit avant la phase proto-stellaire, ce qui va affecter la compréhension des processus les mettant en jeu : extinction, pénétration des champs de radiation, chimie de surface.

Le **JWST**, idéalement adapté à l'observation de l'Univers lointain, a déjà fourni de nombreuses observations de galaxies à très grand décalage spectral. Leur détection et le suivi spectroscopique de ces galaxies âgées de 500 millions à un milliard d'années révèlent leurs propriétés en termes de nombre, masse, luminosité et métallicité et nécessitent de nouveaux modèles détaillés de la réionisation.

1.1.3 AUTRES RÉSULTATS SPATIAUX NOTABLES

De nombreux résultats ont été obtenus avec une participation française à l'exploitation scientifique d'observatoires spatiaux. Nous en citons quelques-uns, particulièrement marquants.

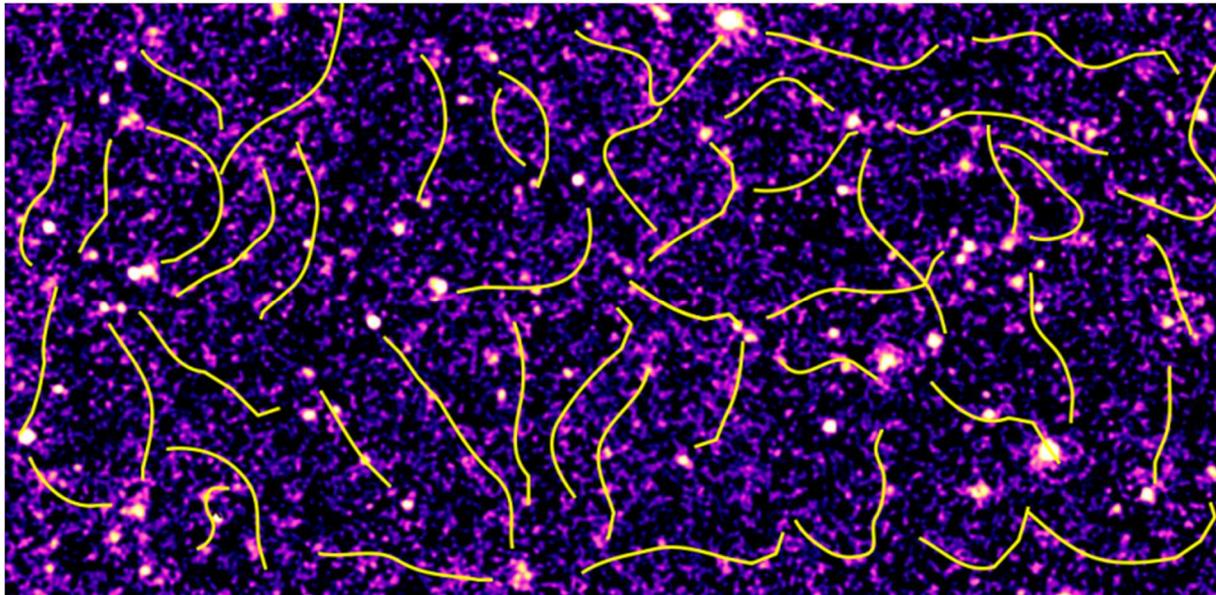


Figure 4. Emission thermique en rayons X du gaz chaud intergalactique des filaments (montrés en jaune) de la toile cosmique observée par l'instrument eROSITA de la mission russo-allemande SRG.

Le satellite **XMM-Newton** est encore en exploitation avec toujours un fort engagement de la communauté scientifique française. Le projet CHEX-MATE, notamment, a pu obtenir une vue précise des propriétés statistiques de la population locale d'amas de galaxies et dans le régime des masses élevées, dévoiler l'origine du chauffage non-gravitationnel, mesurer comment leur gaz est façonné par l'effondrement dans le halo de matière noire et les fusions qui ont construit les amas d'aujourd'hui, résoudre les incertitudes principales dans les déterminations de la masse qui limitent les conclusions cosmologiques et construire les fondations de la science des amas pour les relevés de prochaines générations. L'exploitation des observations **XMM-Newton**, soutenue par le CNES, a donné lieu à de nombreuses publications.

Des observations avec **IXPE** (*Imaging X-ray Polarimetry Explorer*) de la Nasa ont révélé un écho en rayons X émis par le trou noir central (Sgr A*) de la Galaxie il y a 200 ans. L'écho observé requiert une intensité de l'émission X d'origine d'un million de fois celle de Sgr A* aujourd'hui, et explique pourquoi la luminosité des nuages moléculaires entourant Sgr A* est plus intense que la normale. Ces observations aident à comprendre ce qui fait passer un trou noir à l'état actif.

Les résultats finaux de **Planck** ont été dévoilés en 2020. Ces résultats ont confirmé le modèle cosmologique actuel et raffiné ses paramètres. L'exploitation des données de **Planck** se poursuit, avec de nombreux nouveaux résultats dont la détection du gaz chaud intergalactique dans les filaments de la toile cosmique. Cette détection a été confirmée avec les données d'archives **ROSAT** et celles de l'instrument X **eROSITA** sur la mission russo-allemande **SRG** (Spectrum-Roentgen-Gamma). Ce signal, associé à l'émission thermique du gaz chaud

intergalactique de 460 filaments de la toile cosmique, est montré en **Figure 4**~~Figure 4~~. Le premier relevé de 140 deg² de **eROSITA** a été publié.

1.2 BILAN PROGRAMMATIQUE

1.2.1 AVANCEES PROGRAMMATIQUES

Le **JWST** (*James Webb Space Telescope*), observatoire spatial Nasa avec contribution Esa, dédié à l'astronomie dans l'infrarouge proche (NIR) et moyen (MIR), a été lancé le 25 décembre 2021 et placé au point de Lagrange L2. Les performances de ce télescope révolutionnaire et de ses instruments, dont le spectro-imageur Miri, sont excellentes. L'instrument Miri est sous la responsabilité de l'Esa et à très forte participation du Cnes et des laboratoires français,

Euclid est la mission M2 de l'Esa dédiée à l'étude de la matière noire et de l'énergie noire, par effet de lentille gravitationnelle et à partir de la distribution tridimensionnelle des galaxies. **Euclid** utilise un télescope grand angle et deux instruments : une caméra dans le visible (VIS), pour mesurer la déformation des galaxies, et une caméra/spectromètre dans le NIR (NISF), pour mesurer leurs décalages spectraux photométriques et spectroscopiques, et ainsi déterminer les distances à ces galaxies. **Euclid** a été lancé le 1^{er} juillet 2023 et placé au point de Lagrange L2. Les performances du télescope et des instruments se sont révélées excellentes. La qualité des premières images publiées en novembre 2023 démontre clairement tout le potentiel d'**Euclid** et les premiers résultats ont été publiés en mai 2024.

La mission franco-chinoise **Svom** (*Space Variable Objects Monitor*) a été lancée le 22 juin 2024.

La mission **Lisa** (*Laser Interferometer Space Antenna*) de l'ESA, (avec une contribution importante de la NASA), dédiée à la détection des ondes gravitationnelles à basse fréquence, a été adoptée début 2024. Elle est au cœur des thématiques Physique Fondamentale et Astrophysique.

1.2.2 BILAN DES PRIORITÉS DU PRÉCÉDENT SÉMINAIRE

Le bilan programmatique des priorités du précédent séminaire est décevant, car aucune des deux priorités majeures de la thématique Astronomie et Astrophysique n'a pu être adoptée ou présélectionnée par l'Esa.

Le groupe regrette que l'adoption de la mission **Athena** (*Advanced Telescope for High Energy Astrophysics*), priorité programmatique majeure des deux précédents séminaires de prospective, ait subi un retard lié à un surcoût pour l'Esa. Il se réjouit que la mission consolidée soit maintenant en bonne voie pour une adoption en 2027.

Le groupe déplore que la mission **Spica** (*Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics*), autre priorité programmatique majeure, ait été brutalement arrêtée en cours de phase d'étude compétitive par l'ESA.

Parmi les priorités substantielles, la mission dédiée au fond diffus cosmologique **Litebird** est toujours en phase d'étude et de redéfinition. Dans le domaine des phénomènes transitoires, la mission **Theseus** (*Transient High Energy Sky and Early Universe Surveyor*), non sélectionnée en M5, est passée en phase A compétitive pour la mission M7 de l'ESA.

Les missions UV **Arago** et gamma **Astrogam**, priorités modérées du précédent séminaire, n'ont pas été sélectionnées par l'Esa ni en M5 ni en M7.

2 RECOMMANDATIONS DU GROUPE

2.1 THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES ET MOYENS D'OBSERVATION

L'extraordinaire diversité de champs d'étude de la thématique astronomie et astrophysique demande une complémentarité des moyens d'observation pour répondre aux grandes questions de la discipline. Un seul domaine, ou une seule méthode d'observation, ne suffisent pas pour capturer toute la diversité et la richesse de la physique de cette thématique. Au-delà du rayonnement électromagnétique (EM, observé en photométrie, spectroscopie, polarimétrie, imagerie), d'autres messagers comme les neutrinos, les rayons cosmiques et les ondes gravitationnelles peuvent être observés actuellement.

L'accès à l'espace est essentiel pour beaucoup de méthodes d'observation. En effet, l'atmosphère terrestre est transparente au rayonnement EM visible, ainsi qu'aux fréquences entre environ 10 MHz et 1 THz (radio et millimétrique) ; les autres fréquences sont fortement ou totalement absorbées. Leur observation se fait nécessairement depuis l'espace. D'autre part, la turbulence de l'atmosphère induit des distorsions des images astronomiques, ainsi que de la scintillation. Des mesures astrométriques ou photométriques de précision ne peuvent donc se faire que depuis l'espace, même à des longueurs d'onde où l'atmosphère est transparente.

Les sections suivantes décrivent les questions scientifiques prioritaires identifiées par le groupe, ainsi que les moyens d'observation depuis l'espace jugés essentiels pour avancer dans leur compréhension. Un tableau récapitulatif reliant les objectifs scientifiques aux moyens d'observation se trouve à la fin de la section 3.

2.1.1 ORIGINE ET ÉVOLUTION PRIMORDIALE DE L'UNIVERS

Selon le modèle cosmologique du Big Bang chaud, la phase d'inflation primordiale a propagé les fluctuations de densité initiales jusqu'aux échelles cosmologiques. Ces fluctuations sont à l'origine des structures actuelles de la matière dans l'Univers : filaments de la toile cosmique, amas de galaxies et galaxies. La théorie de l'inflation prédit l'existence d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles qui a laissé une empreinte sur la polarisation du fond diffus cosmologique (CMB, Cosmic Microwave Background), inaccessible depuis le sol : les modes-B. La polarisation du CMB permet donc de sonder les ondes gravitationnelles primordiales et en conséquence de contraindre la physique de l'inflation.

Les autres modes de polarisation du CMB (modes-E) portent aussi de l'information : elles permettent de mesurer l'âge de l'Univers à l'époque de la réionisation, quand les premières étoiles se sont formées.

Litebird est la seule mission en étude dédiée à la polarisation du CMB. Cette mission est à l'interface de l'astrophysique et de la physique fondamentale puisque le rayonnement fossile est un accès unique à la physique de très haute énergie et à la physique de l'inflation. Le groupe soutient fortement une contribution française majeure à cette mission.

Les écarts du CMB au spectre de corps noir, appelés distorsions spectrales, sont le résultat de processus qui perturbent l'équilibre thermique entre la matière et le rayonnement. Ces distorsions spectrales fournissent donc des informations sur l'évolution thermique de l'univers depuis le Big Bang. Cependant, à la suite de la non-sélection M7 de **Fossil** (*FTS for CMB Spectral Distortion Exploration*), il n'y a plus de mission dédiée à cette thématique dans le paysage programmatique. Le groupe soutient la continuation du support du Cnes aux activités tournées vers la spectrométrie du ciel submillimétrique pour la mesure des distorsions spectrales du CMB, notamment à travers le démonstrateur ballon **Bisou**.

2.1.2 STRUCTURE ET ÉVOLUTION DE LA MATIÈRE

De nombreuses questions se posent sur la formation et l'évolution des systèmes, de l'échelle des filaments cosmiques aux étoiles, et sur le cycle des baryons dans les galaxies. Pour y

répondre, il est nécessaire d'observer la composante baryonique de l'Univers dans toutes ses phases et toutes les échelles, car elles sont physiquement reliées.

La matière du milieu interstellaire (MIS) a longtemps été décrite comme appartenant à différentes phases bien définies : un milieu très chaud ($T \sim 10^6$ K) et ionisé, émettant en rayons X mous, des milieux chauds ($6000 - 10^4$ K) diffus neutres ou ionisés, et un milieu froid ($10 - 200$ K) et dense, atomique ou moléculaire, dont les nuages de formation stellaire occupent seulement une petite fraction du volume. Bien que ces différentes phases soient souvent supposées en équilibre hydrostatique global, l'aspect multi-phase du MIS appelle de plus en plus des conditions hors-équilibre et l'aspect dynamique du MIS ne peut être ignoré. Les relations entre les différentes phases, leurs interfaces, la façon dont la matière circule d'une phase à l'autre (en particulier de H à H₂ qui est la première étape vers la formation stellaire), le rôle de la turbulence et du champ magnétique, sont des questions ouvertes pour comprendre le cycle de la matière dans notre galaxie. Il est nécessaire d'élargir cette connaissance aux galaxies externes avec le même niveau de détail, en particulier dans les galaxies pauvres en métaux, où la composition chimique, les conditions physiques et la topologie changent considérablement, avec des conséquences significatives sur l'évolution galactique.

Entre gaz intra-amas, intergalactique, et circumgalactique, le gaz chaud comprend au moins la moitié des baryons. Ce gaz chaud se situe également dans les restes de supernova, autour des étoiles (vent), et dans les couronnes stellaires.

Les rayons X, inobservables depuis le sol, offrent un accès unique à l'Univers chaud et tracent des phénomènes gravitationnels intenses, telle l'accrétion par les trous noirs supermassifs au centre des galaxies actives. L'énergie libérée par ce processus est évacuée sous forme de rayonnement X et en énergie mécanique sous forme de jets ou vents. La rétroaction des trous noirs supermassifs affecte à son tour le gaz chaud galactique et circumgalactique et façonne l'évolution des galaxies hôtes. Plusieurs questions restent ouvertes : Comment le gaz chaud se structure dans les filaments cosmiques ? Comment coévoluent les galaxies et leurs trous noirs supermassifs ? Comment les trous noirs supermassifs accrètent de la matière et lancent des jets ?

La mission **NewAthena** est un observatoire dédié à l'exploration de l'Univers en imagerie et spectroscopie X pour répondre à ces grandes questions. La **spectroscopie haute résolution en rayons X, spatialement résolue, de l'instrument X-IFU** est un nouveau moyen d'observation emblématique pour étudier la physique de l'Univers chaud et énergétique. Ce thème est identifié comme prioritaire depuis plusieurs exercices de prospective. Dans cette perspective, le groupe renouvelle son fort soutien à la mission **NewAthena**.

La composante baryonique froide et dense, atomique ou moléculaire, est à l'origine de la formation des étoiles et des planètes dans les galaxies. Les observations de cette composante permettent d'étudier l'origine et l'évolution des galaxies, des éléments lourds et de la poussière ainsi que la formation stellaire dans la Voie Lactée et les galaxies proches et de caractériser les signatures chimiques de la genèse des systèmes planétaires.

Beaucoup de raies et de bandes moléculaires se trouvent dans l'**infrarouge lointain (FIR)**, non couvert par le **JWST**, qui observe dans l'infrarouge proche et moyen, ni par aucun autre observatoire. La **spectroscopie** dans cette bande fournit des informations essentielles sur les processus physiques et chimiques en jeu. Comme illustré dans la Figure 5, la **polarimétrie** donne accès au champ magnétique qui joue un rôle essentiel dans la structuration de la matière. La mesure du degré de polarisation apporte de nouvelles contraintes aux modèles de poussières.

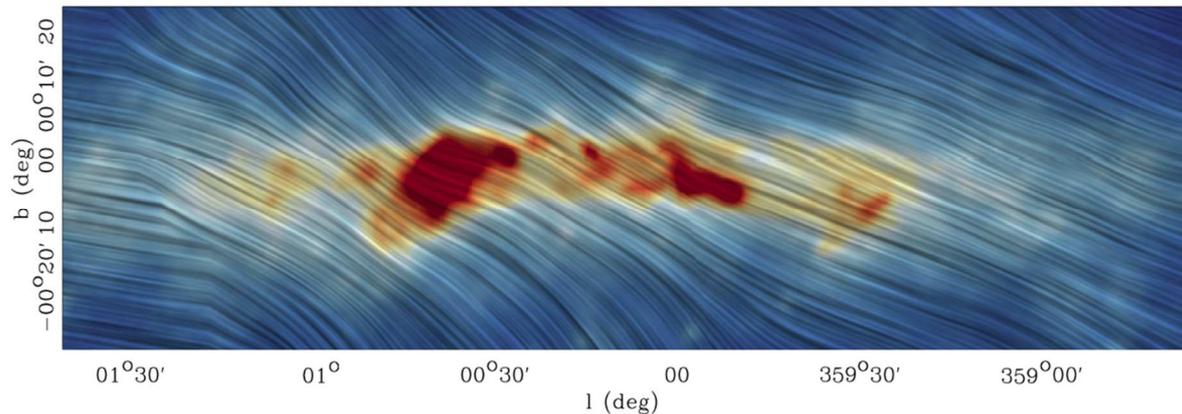


Figure 5. Cartographie de la région du centre galactique avec le ballon PILOT, montrant les lignes de champ magnétique déduites à partir des données de polarisation.

Des avancées technologiques (cryogénie, détecteurs) rendent possible un gain de deux ordres de grandeur en sensibilité par rapport aux décennies précédentes. Le *Decadal Survey 2020 in Astronomy and Astrophysics* américain a reconnu l'importance de cette fenêtre de longueur d'onde (ainsi que celle des rayons X), et la Nasa a ouvert un appel Nasa APEX 2023 pour une mission de classe Probe dans le domaine FIR ou en rayons X.

La mission **Spica** avec la Jaxa ayant été arrêtée, car jugée trop chère et complexe pour le cadre M5 Esa, la communauté française s'est impliquée dans les réponses à cet appel Nasa sur deux projets particulièrement intéressants dans le FIR : **Prima** (*Probe far-Infrared Mission for Astrophysics*) et **Firsst** (*Far-IR Spectroscopy Space Telescope*). Le groupe apporte un fort soutien à la participation française à ces missions d'opportunité.

La perte de masse des étoiles chaudes ou évoluées impacte fortement leur évolution ainsi que le MIS. Les mécanismes associés sont encore largement débattus, mais le rôle du champ magnétique est reconnu : il confine les vents stellaires magnétisés et rétroagit sur l'étoile, notamment en freinant sa rotation.

La **spectropolarimétrie dans l'UV** permet de détecter et de caractériser les champs magnétiques et les environnements locaux des objets astrophysiques. D'autres questions pertinentes concernent les interactions entre les étoiles et leurs planètes. Un instrument de spectroscopie avec haute résolution spectrale couvrant tout le domaine UV est aussi essentiel pour l'étude du MIS dans toutes ses phases. Dans l'UV lointain, un grand nombre de transitions en absorption dans le spectre d'étoiles chaudes ou de quasars éclairent la composition, la dynamique et les propriétés physiques de toutes les phases du MIS. Un instrument dédié à la spectropolarimétrie dans l'UV n'a jamais existé.

On rappelle que la spectropolarimétrie est une spécialité française, avec des instruments en activité au sol tels que ESPaDOnS et SPIRou au CFHT et NARVAL au Télescope Bernard Lyot. La communauté française est impliquée dans le projet **Pollux**, un spectropolarimètre UV-Visible à haute résolution pour **HWO** (*Habitable Worlds Observatory*), mission flagship de la Nasa. **HWO** est un observatoire généraliste UV-visible-NIR dont le lancement est prévu pour la décennie 2040. Le groupe soutient la poursuite des efforts engagés par le Cnes pour les Phases 0 et A d'**Arago**, notamment à travers le démonstrateur nanosatellite **Casstor**, dans le but de développer l'instrument **Pollux**.

Enfin, l'observation de systèmes de petite dimension angulaire ou haut contraste (permettant l'étude d'objets à faible luminosité proches d'objets brillants) a un intérêt évident pour la communauté astronomie et astrophysique : les régions des disques protoplanétaires proches

de l'étoile, les étoiles évoluées et leurs éjections de matière, et les régions centrales des noyaux actifs de galaxies, où résident des trous noirs supermassifs.

Ces observations peuvent se faire depuis le sol en utilisant l'interférométrie à grande ligne de base. Depuis l'espace, l'interférométrie dans l'IR (inaccessible depuis le sol) et/ou l'imagerie haut contraste dans le visible avec l'utilisation d'un coronographe ont été étudiées pendant la décennie 2000.

Deux projets ambitieux sont actuellement en étude : le projet européen **LIFE** (Large Interferometer For Exoplanets), un interféromètre IR, et l'instrument HCI (High-Contrast Imaging) proposé pour **HWO**. Bien que ces projets soient à long terme, il est essentiel d'impliquer et d'organiser la communauté scientifique compétente autour de ces projets. Le groupe soutient cette implication de la communauté dès maintenant.

2.1.3 LES PHÉNOMÈNES ÉNERGÉTIQUES ET/OU TRANSITOIRES

Les sursauts gamma apparaissent dans tout le ciel de façon imprévisible. On pense que les sursauts gamma courts sont le résultat de la fusion d'étoiles à neutrons (kilonova) et les sursauts gamma longs sont associés à l'effondrement du cœur des étoiles très massives. Plusieurs questions restent cependant ouvertes : comment explosent les supernovæ ? Quels sont leurs progéniteurs ? Quel est le rôle des kilonovæ dans l'origine des éléments ?

À cause de leur grande luminosité, les sursauts gamma peuvent être détectés à des très grandes distances et servir alors de sondes de l'époque de réionisation, contribuant à élucider comment et quand se sont formés les premiers objets : étoiles, trous noirs, galaxies.

Une surveillance en X très grand champ permet de détecter le plus tôt possible et le plus grand nombre possible de contreparties de sursauts gamma. La spectroscopie rapide dans le NIR permet de déterminer la position et le décalage spectral de la galaxie hôte. Le groupe soutient la mission **Theseus**, en phase A compétitive pour une mission M7 de l'Esa, et rappelle que c'est la seule mission de cette thématique encore candidate en M7. L'astronomie multi-messagers sera en plein essor pendant la décennie de 2030 grâce à la 3^{ème} génération de détecteurs d'ondes gravitationnelles et de neutrinos.

La localisation rapide des contreparties EM des sources d'OG nécessite une autre stratégie d'observation, comme celle proposée par le projet **ComCube**. Ce projet est une constellation de nanosatellites pour la polarimétrie à haute précision des sursauts gamma et la localisation très rapide des sources pour le suivi multi-longueurs d'onde et multi-messagers. D'autres projets d'essaims de microsatellites, tel que la mission Chinoise **Catch**, peuvent constituer de bonnes opportunités.

Enfin, l'origine du rayonnement cosmique, les mécanismes d'accélération de particules, la nature des particules accélérées et leur impact sur l'environnement sont des questions clés en astrophysique. Le rayonnement cosmique excite les noyaux atomiques du milieu interstellaire, donnant lieu à des raies gamma dans le domaine du MeV. L'observation des raies permet l'étude de la composante basse énergie du rayonnement cosmique qui joue un rôle important pour la chimie du milieu interstellaire. Des raies gamma sont également produites lors des décroissances d'isotopes radioactifs, et leur observation permet d'étudier les mécanismes d'explosion des supernovæ, la nature de leurs progéniteurs et d'éclaircir le rôle des supernovæ et des kilonovæ dans la synthèse des éléments. Notons également les signatures de l'annihilation électrons-positrons, qui se manifestent uniquement dans le domaine du MeV, et dont l'origine reste toujours inexpliquée.

Tandis que des observations à haute énergie ont amélioré notre compréhension de l'Univers non-thermique et des raies gamma nucléaires, l'annihilation électrons-positrons ainsi que le rayonnement cosmique de basse énergie sont seulement observables dans le domaine du

MeV. À la suite de la non-sélection d'**Astrogam** en M5 et M7, il n'y a pas de mission dédiée à ce domaine prévue en Europe. Du côté de la Nasa, la mission **Così** (Compton Spectrometer and Imager) a été sélectionnée en 2021. Des équipes françaises sont engagées scientifiquement dans cette mission, et le groupe soutient cette implication. Les questions qui peuvent être élucidées dans cette gamme d'énergie concernent les mécanismes d'explosion des supernovæ et la nature de leurs progéniteurs. L'observation de raies correspondant à la désintégration d'éléments radioactifs permet d'éclaircir le rôle des supernovæ et des kilonovæ dans la synthèse des éléments. Le rayonnement cosmique de basse énergie, essentiel pour la chimie du milieu interstellaire mais qui échappe pour le moment aux observations à cause de la modulation solaire, peut être étudié au travers de raies d'excitation caractéristiques. Les observations au MeV permettent également de révéler les contreparties électromagnétiques des événements d'ondes gravitationnelles.

2.2 RECHERCHE ET TECHNOLOGIE

Pour la mesure de la polarisation et des distorsions spectrales du CMB, ainsi que pour la spectroscopie X spatialement résolue (Athena/X-IFU) et le FIR, les efforts se concentrent sur la détection basse température très sensible ainsi que sur les chaînes cryogéniques actives et passives atteignant 100 à 50 mK dans l'espace. L'accroissement de la sensibilité avec un budget de masse limité doit passer par l'intégration des fonctionnalités de polarisation et de spectroscopie basse résolution directement dans les détecteurs. Enfin, dans le cas de la spectropolarimétrie UV (préparation de l'instrument Pollux), les défis techniques incluent les matériaux et revêtements, ainsi que les techniques d'adhérence moléculaire des composants des modulateurs, l'efficacité des revêtements UV, les lames dichroïques, la performance des détecteurs CMOS dans l'UV, et l'efficacité des réseaux et des cross-disperseurs.

La validation de ces concepts se fait souvent à travers des démonstrateurs ballon et nanosatellites. Des exemples sont le ballon **Bisou** pour les distorsions spectrales et le nanosatellite **Casstor** pour la spectropolarimétrie UV. Mais les ballons et les nanosatellites peuvent jouer un rôle au-delà de démonstrateur. Si la limitation en taille et poids peut être restrictive pour la plupart des sujets scientifiques, les nanosatellites peuvent être pertinents pour des niches spécifiques : c'est le cas du suivi multi-longueurs d'onde de phénomènes transitoires. Le groupe soutient la continuation des efforts sur toutes les techniques qui permettent d'utiliser les nanosatellites pour l'astrophysique multi-messagers : pointage de précision, chaînes de détection basse consommation pour le MeV, polarimètre-imageur gamma, vol en formation pour les essais.

Le groupe note un intérêt croissant dans la communauté pour l'utilisation de la Lune comme base d'observation. Des projets incluent un télescope de grand diamètre posé à l'intérieur d'un cratère situé dans les zones polaires pour l'observation dans l'IR et un observatoire lunaire d'ondes gravitationnelles.

2.3 DONNÉES, MOYENS AU SOL ET ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE

Le retour scientifique d'**Euclid** dépend crucialement d'observations au sol. Dans ce cas, le but est de déterminer les décalages spectraux photométriques des galaxies avec une précision impossible à obtenir avec les bandes d'observation d'**Euclid**. Si les observations au sol pour les données de la DR1 (correspondant à l'hémisphère nord) sont déjà assurées par le consortium Unions, ce n'est pas le cas pour le relevé de l'hémisphère sud. Un Memorandum of Understanding (MoU) a été signé récemment avec le consortium Rubin-LSST, mais la stratégie d'observation n'est pas encore établie.

L'analyse multi-longueurs d'onde, voire multi-messagers, est essentielle pour beaucoup de questions scientifiques et particulièrement dans le cas des phénomènes transitoires. L'espace peut donner accès à une couverture multi-longueur d'onde et de tout le ciel, et l'observation

au sol offre la possibilité d'utiliser de l'instrumentation plus lourde. Le suivi rapide au sol des sursauts gamma détectés depuis l'espace permet notamment de localiser la rémanence à plus basse énergie, observer rapidement la courbe de lumière et déterminer le décalage spectral. Les observations au sol sont donc essentielles à la réalisation des objectifs scientifiques, et demandent une couverture temporelle (donc géographique) complète.

Cette couverture au sol est difficile à mettre en œuvre. Dans le cas de **Svom**, l'achat de temps d'observation, ou la réponse à des appels d'offres ouverts pour accéder aux télescopes au sol, sont des possibilités qui ont été considérées pour assurer le suivi, mais elles ne sont pas optimales. Le groupe recommande l'utilisation d'un réseau dédié de télescopes optiques au sol pour le suivi des transitoires observés par **Svom** et des futures missions dans le domaine, comme le télescope franco-mexicain Colibri.

Le groupe rappelle l'importance de mettre en place un suivi au sol bien en amont du lancement d'une mission pour assurer le retour scientifique, surtout dans les cas où les observations au sol sont essentielles pour les objectifs scientifiques de la mission spatiale.

Les mesures observationnelles, seules, ne permettent pas toujours d'accéder directement aux quantités physiques d'intérêt. En effet, le lien entre mesure et grandeur physique est très souvent indirect en astrophysique. Ce lien se fait fréquemment à travers des modèles ou des simulations numériques parfois lourdes. Par exemple, la détermination de l'âge des étoiles observées par **Plato** à travers l'astérosismologie dépend crucialement de modèles stellaires. Cette détermination d'âge est aussi juste que le sont les modèles stellaires sous-jacents. Il est donc indispensable de prendre en compte les besoins de simulations dans la préparation des missions.

Le volume et la complexité des données attendues des missions en exploitation et en développement demandent des techniques d'analyse sophistiquées et innovantes, avec une utilisation de plus en plus courante de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle. Le soutien financier du Cnes à l'exploitation des données des missions spatiales est impératif pour garantir et valoriser un retour scientifique conséquent.

Le groupe rappelle l'importance de la documentation, pérennisation et libre accès aux données issues des missions spatiales. Le niveau d'exploitation des données utilisables existantes doit également être pris en compte dans le contexte d'engagement d'une nouvelle mission. Étant donné le fort impact environnemental des missions spatiales, il convient de s'assurer que les données d'archive soient faciles d'accès pour le plus grand nombre de membres de la communauté, et que leur exploitation scientifique au long cours bénéficie de financements dédiés, bien au-delà de la durée de vie nominale des missions.

3 CONCLUSIONS

Les données spatiales ont permis des avancées remarquables dans tous les domaines de l'astrophysique. Grâce à l'accompagnement scientifique du CNES, la communauté bénéficiera de l'exploitation des missions **XMM-Newton, Fermi, Gaia, JWST, Euclid** et de celles à venir, **Svom et Plato**.

A part **Lisa**, aucune mission de la thématique astronomie et astrophysique n'a été adoptée depuis **Plato (2017)**, ou sélectionnée depuis **Athena (2014)**, par l'Esa.

Du fait de cette situation programmatique particulièrement défavorable, de nombreux objectifs scientifiques majeurs de la précédente prospective restent fortement d'actualité et à soutenir, dont certains prioritaires depuis plusieurs exercices de prospective.

Les moyens d'observation considérés comme prioritaires par la communauté pour y répondre n'ont pas évolué de façon significative depuis le dernier séminaire de prospective.

Le tableau suivant reprend les priorités de missions et indique le cadre principal de réalisation envisagé.

Objectifs scientifiques	Observations ou mesures	Cadre de réalisation, phase et niveau de priorité
Structuration du gaz chaud dans les filaments cosmiques. Coévolution des galaxies et leurs trous noirs supermassifs. Physique de l'accrétion dans les trous noirs supermassifs.	Spectroscopie X haute résolution spatialement résolue	Mission NewAthena, L2 ESA – phase A Majeure
Formation des structures en IR et rôle du champ magnétique. Milieu interstellaire galactique et extragalactique.	Spectroscopie et polarimétrie du MIR au FIR	MoO APEX NASA, future L ESA Majeure
Formation des premières structures. Nature de l'énergie sombre et de la matière sombre. Histoire thermique de l'univers.	Spectroscopie et polarimétrie en submillimétrique	LiteBIRD (MoO JAXA) – phase A Future M ou L ESA Majeure
Supernovæ, kilonovæ, origine des éléments. Histoire de la formation des trous noirs et de leur fusion. Les premières étoiles, galaxies.	Surveillance en X très grand champ et NIR	Theseus, M7 ESA – phase A compétitive Substantielle
Rétroaction des étoiles sur le milieu interstellaire. Interaction étoiles-planètes. Activité stellaire.	Spectroscopie haute résolution et polarimétrie en UV et FUV	MoO NASA, nanosats, POLLUX-HWO (NASA) Substantielle
Explosions de supernovæ, kilonovæ. Origine des éléments chimiques. Origine des rayons cosmiques.	Observations dans le domaine du MeV	MoO NASA, nanosats, future M ESA Modérée
Formation stellaire, disques proto-planétaires. Disques d'accrétion au tour d'objets compacts.	Accès à haute résolution angulaire / haut contraste	HCI-HWO (NASA), LIFE (ESA) Modérée