

1. Les grandes questions scientifiques

1.1. Le contexte

La thématique Astronomie et Astrophysique se caractérise par une étonnante diversité dans les méthodes d'observation employées (des ondes radio aux rayons gamma, autant au sol que dans l'espace) et dans les échelles considérées (des étoiles situées à quelques années-lumière du Système Solaire jusqu'à l'Univers dans sa globalité).

Les grandes questions scientifiques ont beaucoup évolué au cours des deux dernières décennies, avec notamment la montée en puissance d'une nouvelle thématique, la recherche et la caractérisation des planètes au-delà du Système Solaire, et une cosmologie de précision qui a conduit à une révision profonde de notre vision de notre Univers. Les techniques d'observations ont également considérablement changé, avec l'avènement de l'observation multi-longueurs d'onde et multi-techniques. Désormais, rares sont les découvertes obtenues à partir d'une seule observation issue d'un seul instrument.

1.2. Les enjeux scientifiques pour les prochaines années

1.2.1. Évolution de l'Univers : des premiers instants aux grandes structures

Sous l'influence de la gravitation, l'Univers s'est entièrement structuré en 13,80 milliards d'années, passant d'un milieu quasi-homogène et isotrope, à une toile cosmique formée de structures à toutes les échelles, des étoiles aux galaxies et aux amas de galaxies. Les récentes avancées en cosmologie nous donnent désormais une vue précise du contenu en matière-énergie de l'Univers : ~30% de matière (dont ~85% de matière sombre et seulement ~15% de baryons) et ~70% d'énergie sombre. 96% du contenu en matière-énergie de l'Univers échappe encore à notre compréhension, alors que la nature et les propriétés de ce contenu sont intimement liées à l'ensemble des structures que nous observons.

Au sein de ce cadre, les processus de formation et d'évolution des structures nous apparaissent toujours comme très complexes, quelle que soit l'échelle considérée (des étoiles aux trous noirs, des galaxies aux amas de galaxies) et quelle que soit l'époque étudiée (de la fin des âges sombres jusqu'à l'Univers proche). Les clés d'une meilleure compréhension résident dans l'étude des échanges de matières sombre et baryonique entre structures.

De grandes questions fondamentales restent donc ouvertes :

- *Comprendre la phase d'inflation de l'Univers primordial* : quelle physique a opéré dans les premiers instants de l'Univers ?
- *Caractériser l'énergie sombre et la matière sombre* : quelle est la nature de l'énergie sombre ?, Comment la matière s'assemble-t-elle au sein des grandes structures et quel rôle y joue la matière sombre ?
- *Comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets* : comment et quand se sont formés les premiers objets, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies ?, Comment et quand la réionisation a-t-elle eu lieu ?
- *Comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies* : comment le gaz est-il accrété et transformé à l'échelle des amas de galaxies, des galaxies et de leurs trous noirs centraux ?, Comment la formation et l'évolution de ces structures affectent en retour leur réservoir de baryons ?

Fournir des réponses à ces questions éclairera notre compréhension de la formation des galaxies et des

grandes structures, du cadre cosmologique dans lequel cette formation opère et des processus physiques qui y prennent part.

1.2.2. Formation et évolution des étoiles et des planètes

La formation et l'évolution des étoiles et des planètes sont des questions fondamentales qui influencent de nombreux autres domaines de l'astrophysique. En particulier, le milieu interstellaire est intimement lié aux étoiles et aux planètes. Elles s'y forment et y meurent, les enrichissant au passage de nouveaux éléments lourds et y injectant de l'énergie. Pendant toute la vie des étoiles, plusieurs processus physiques influencent leur dynamique et impactent donc leur évolution. En particulier, la rotation, le champ magnétique, les pulsations et la perte de masse (vent, éjections), ainsi que les interactions avec un compagnon stellaire ou planétaire sont des facteurs-clés. Enfin, l'étude des exoplanètes est un domaine qui a très fortement évolué durant la dernière décennie et de nouvelles questions plus précises ont émergé.

De grandes questions fondamentales restent donc ouvertes :

- *Comprendre la formation des étoiles et des planètes* : comment évoluent la composition chimique et le moment cinétique du milieu interstellaire et des étoiles, ainsi que les propriétés de la poussière interstellaire ?, Quel est le rôle des différents processus pendant la formation stellaire et planétaire ?, Comment se forment les étoiles massives ?, D'où vient le champ magnétique fossile et comment peut-il survivre dans les étoiles ?
- *Comprendre l'évolution des étoiles et des planètes* : comment fonctionnent et interagissent les processus physiques à l'intérieur des étoiles ?, Comment les étoiles et les planètes interagissent entre elles et avec leur environnement proche ?, Que se passe-t-il dans les dernières phases de la vie des étoiles ?
- *Caractériser les exoplanètes et chercher les biosignatures* : quelle est l'architecture des systèmes planétaires ?, Quelles sont les structures internes des différents types de planètes ?, Quelles sont les conditions physiques qui règnent à la surface des petites planètes et à l'intérieur des planètes gazeuses et sont-elles favorables à l'apparition de la vie ?

1.2.3. Étudier l'Univers énergétique

Les phénomènes les plus énergétiques dans l'Univers se rencontrent à l'échelle microscopique (énergie atteinte par les particules et leur rayonnement), à l'échelle stellaire (énergie libérée dans les explosions, énergie mécanique des effondrements, éjections ou chocs de matière, etc.), jusqu'aux échelles galactiques et intergalactiques (accrétion par les trous noirs super-massifs, jets galactiques). Ils sont souvent associés à des conditions physiques extrêmes (champs gravitationnels ou magnétiques intenses, hautes densités de matière, mouvements relativistes, etc.). Leur étude fait appel à l'astrophysique des hautes énergies et présente des interfaces étroites avec la cosmologie, la physique subatomique et la physique fondamentale. Ce champ de recherche s'est beaucoup développé ces dix dernières années avec l'avènement d'observatoires à haute performance en rayons X et gamma, au sol et dans l'espace, et d'importantes synergies existent avec l'ensemble des autres domaines de longueur d'onde. Dans un avenir proche, des avancées sont attendues des détecteurs de messagers non-photoniques (ondes gravitationnelles, neutrinos de haute énergie, rayons cosmiques d'ultra-haute énergie).

Les grandes questions associées peuvent se décliner comme suit :

- *Comprendre les explosions stellaires et la naissance des objets compacts* : comment explosent les supernovae et quelles étoiles en sont les progéniteurs ?, Quels objets compacts sont formés par les

explosions stellaires ?, Quel est l'effet de ces explosions sur le milieu interstellaire et la Galaxie ?

- *Comprendre l'environnement des objets compacts* : comment se font l'accrétion et l'éjection de matière ?, Quels sont les mécanismes non thermiques autour des objets compacts ?
- *Identifier l'origine des rayons cosmiques* : quelles sont les sources du rayonnement cosmique galactique ?, Quelles sont les sources et la composition aux ultra-hautes énergies ?
- *Utiliser l'Univers comme laboratoire de physique fondamentale* : est-ce que les lois de la physique fondamentale établies sur Terre sont valables dans des conditions extrêmes ?

2. Bilan depuis le dernier colloque

2.1. Bilan programmatique

La période couvrant le dernier exercice de prospective a tout d'abord été marquée par la mise en service en 2009, puis l'exploitation scientifique, de deux très importantes missions de l'ESA : la mission Planck dédiée à l'observation du fond diffus cosmologique, et la mission Herschel consacrée aux observations astronomiques dans les domaines de l'infrarouge lointain et du submillimétrique. Elle s'est poursuivie par le succès du lancement, en décembre 2013, de la mission européenne Gaia consacrée à l'étude de la structure, de la formation et de l'évolution de la Galaxie.

L'exploitation scientifique de nombreuses missions s'est également poursuivie. La mission CoRoT, première mission spatiale française d'astrophysique depuis plus de 30 ans, a continué ses observations dans le domaine de la détection des exoplanètes et de la micro-variabilité stellaire. Toutefois, suite à une panne, l'arrêt officiel de la mission a été décidé en juin 2013, après 6 ans d'opérations. Les missions européennes XMM et INTEGRAL, et la mission américaine FERMI fonctionnent toujours nominalement et continuent de fournir des données de qualité dans le domaine des hautes énergies.

Cette période se caractérise aussi par la mise en place effective du programme *Cosmic Vision* de l'ESA qui prend la suite des programmes Horizon 2000 et Horizon 2000 Plus. Plusieurs missions d'astronomie et d'astrophysique ont ainsi été sélectionnées dans ce cadre :

- Les thèmes scientifiques pour les deux futures missions de type *Large* (L2/L3), respectivement *The Hot and Energetic Universe* (2028) et *The Gravitational Universe* (2034), sont désormais choisis et directement liés à l'astrophysique. Même si la définition des missions associées à ces objectifs scientifiques va suivre un long processus qui prendra plusieurs années, cette sélection aura un impact très important sur la communauté française en raison de l'importance de ces missions.
- La seconde mission de type *Medium* sélectionnée par l'ESA (M2, 2020), Euclid, est consacrée à la compréhension de l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers et à la nature de l'énergie sombre. Cette mission, dont le *Principal Investigator* est français, mobilise déjà un très grand nombre d'astronomes français et représente un enjeu très important pour la France.
- La troisième mission de type *Medium* sélectionnée par l'ESA (M3, 2024), PLATO, est consacrée à la recherche et à l'étude des systèmes planétaires extrasolaires, en particulier les planètes de type terrestre dans la zone habitable autour d'étoiles comme le soleil, et à la caractérisation précise des étoiles hôtes par sismologie.
- La première mission de type *Small* de l'ESA (S1, 2017), CHEOPS, est quant à elle dédiée à la recherche de transits d'exoplanètes devant des étoiles brillantes ($V < 9$) déjà connues pour posséder des planètes.

Plusieurs projets sous ballon stratosphérique ont également été décidés lors de cette période : EUSO-Ballon (premier vol en 2014), projet devant démontrer le concept de détection des rayons cosmiques

de très haute énergie depuis l'espace, et FIREBall 2 (premier vol en 2015 ou 2016), projet consacré à l'étude de l'émission UV du milieu intergalactique dans lequel on pourrait trouver une grande fraction des baryons manquants dans l'Univers local.

2.2. Quelques résultats scientifiques saillants

Nous ne présentons ici que quelques résultats saillants obtenus au cours de ces dernières années. Le choix est avant tout illustratif et n'est donc pas un jugement de valeur.

2.2.1. Herschel

Lancé en 2009, conjointement avec le satellite Planck, le satellite européen Herschel a été éteint en juin 2013 avec la fin de la réserve d'hélium liquide indispensable au fonctionnement de tous les instruments à bord. Il a offert une vue nouvelle sur l'Univers froid.

Les scientifiques français ont été particulièrement actifs lors de l'exploitation de la mission. On notera par exemple la première étude détaillée de la structure du milieu interstellaire dense où se forment les étoiles. Pour la première fois, il a été possible de mettre en évidence des striations dans le milieu interstellaire (figure 1) correspondant à des écoulements de matière vers les filaments. Ces mouvements turbulents qui ont lieu à des vitesses supersoniques feraient suite aux explosions d'étoiles massives.

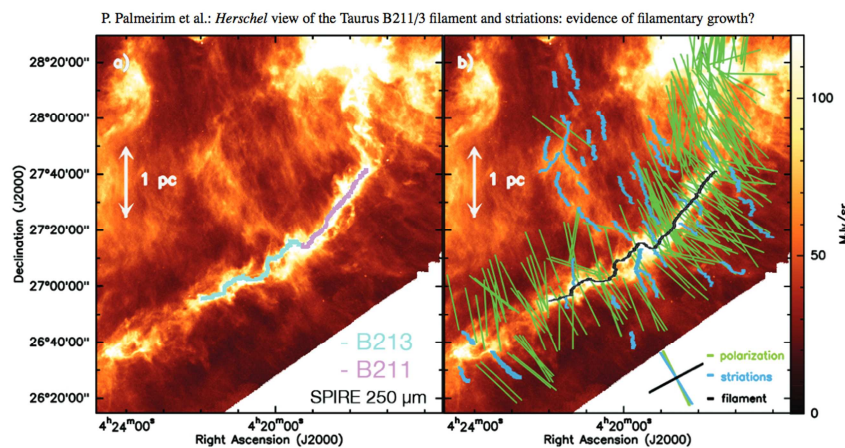


Figure 1 : Ecoulements de matière vers les filaments observés par Herschel.

Plusieurs molécules (H_2O^+ , H_2Cl^+ , HCl^+ , etc.) ont également été découvertes par Herschel. Celui-ci a notamment permis l'étude de la molécule H_2O , quasiment inobservable depuis le sol, et qui a été découverte dans l'astéroïde Cérès, autour de toutes les proto-étoiles et même dans les disques proto-planétaires ou dans les cœurs pré-stellaires gelés. Le domaine extragalactique n'est pas en reste avec par exemple la découverte de l'évacuation de $10^8 M_{\text{Sol}}$ à la vitesse de 1000 km/s dans Arp220, ou l'étude du fond cosmologique infrarouge qui a révélé des galaxies en pleine activité dans des halos de matière sombre.

2.2.2. Planck

Également lancé en 2009 avec le satellite Herschel, le satellite européen Planck a été désorbité en octobre 2013 après avoir livré les premières cartes complètes du ciel dans le continuum millimétrique et submillimétrique. La carte des anisotropies de température du fond de rayonnement cosmologique à 3 K, ou *Cosmic Microwave Background* (CMB), obtenue par Planck est la plus précise à ce jour (figure 2) et demeurera probablement une référence pendant de très nombreuses années.

L'analyse statistique de cette carte est en remarquable accord avec les prédictions d'un modèle d'Univers fondé sur le *Big Bang* inflationnaire. L'Univers, après la mission Planck, est ainsi très bien décrit par moins de dix paramètres : une normalisation des fluctuations, les densités réduites de matière sombre (0,26) et de matière ordinaire (0,05), une constante cosmologique non nulle (0,69) équivalente à l'énergie sombre (le total des densités est égal à l'unité donc la courbure est nulle à mieux que un pour mille près), l'indice de la loi de puissance des fluctuations initiales de densité d'énergie qui vaut 0,96 (significativement différent de 1 en accord avec le paradigme inflationnaire), une réionisation de l'Univers vers un *redshift* de 11 et enfin la constante de Hubble de $67,8 \pm 0,8$ km/s/Mpc (légèrement inférieure à la valeur donnée par d'autres observations). L'Univers a dorénavant un âge précisément connu de 13,80 milliards d'années à 40 millions d'années près.

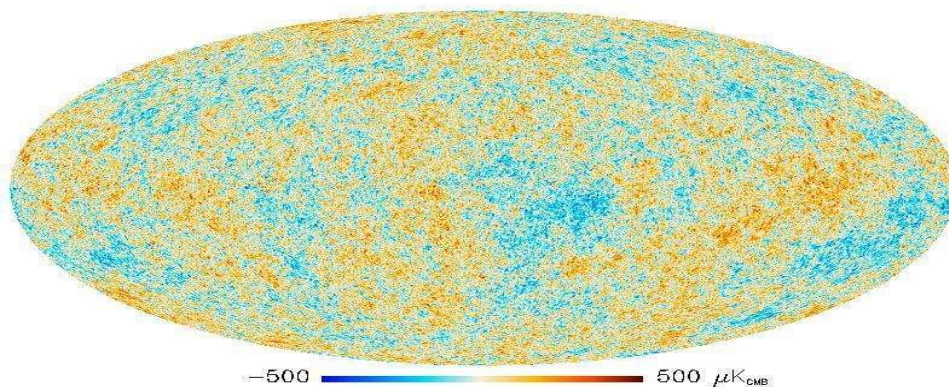


Figure 2 : Carte du ciel complet en projection Mollweide du CMB en coordonnées galactiques (centre galactique au centre, plan galactique sur une ligne horizontale centrale). Les anisotropies témoignent des fluctuations de densité de la matière, 380 000 ans après le Big-Bang, qui ont conduit à la formation des grandes structures et des galaxies.

2.2.3. CoRoT

Lancé en décembre 2006, CoRoT était la première mission spatiale française d'astrophysique depuis plus de 30 ans. Cette mission a abouti à de très nombreuses découvertes en exoplanétologie, comme en physique stellaire. Ainsi CoRoT a découvert 34 nouvelles exoplanètes qui illustrent bien la grande diversité des exoplanètes par rapport aux planètes de notre système solaire. Leurs périodes orbitales s'échelonnent d'une vingtaine d'heures pour CoRoT-7b, à 95 jours pour CoRoT-9b qui reste l'une des très rares exoplanètes « tièdes » au rayon mesuré. La densité de ces planètes couvre une gamme étonnamment large : CoRoT-20b, près de deux fois plus dense que la Terre, révèle un intérieur très enrichi en éléments lourds dont l'origine est difficile à expliquer par les modèles actuels de formation planétaire ; CoRoT-26b, moins dense que Saturne, a une taille anormalement grande, toute aussi difficile à expliquer. CoRoT a aussi découvert et mesuré les rayons des deux premières naines brunes à courte période orbitale, CoRoT-3b et 15b.

La caractérisation précise des oscillations de type solaire a pu être possible pour la toute première fois. Les modes d'oscillation ont été mesurés jusqu'au niveau d'une partie-par-million pour des étoiles de masse intermédiaire ($\sim 2 M_{\odot}$) à très massives ($\sim 45 M_{\odot}$), révélant des phénomènes jusqu'alors impossibles à atteindre. Par exemple, CoRoT a permis la découverte d'oscillations excitées stochastiquement dans les étoiles massives, ce qui explique l'éjection de matière de certaines étoiles massives vers le disque circumstellaire (appelé phénomène Be). La sismologie des étoiles massives a aussi permis de mesurer la taille de leur cœur. Par ailleurs, la sismologie des géantes rouges a véritablement débuté avec CoRoT et est maintenant l'un des domaines les plus prometteurs et actifs

en sismologie avec des applications à l'évolution galactique. Hormis les oscillations, les données de CoRoT ont aussi révélé la signature de divers phénomènes qui sont à présent étudiés activement : la granulation, l'activité stellaire, la cartographie des hétérogénéités de surface, etc.

3. Propositions du groupe Astronomie et Astrophysique

Les propositions du groupe sont basées sur les critères suivants :

- les grandes questions scientifiques à aborder lors des prochaines années, questions mises à jour en fonction des dernières avancées ;
- le contexte programmatique national et international, en particulier les conséquences de la sélection des missions *Cosmic Vision* de l'ESA ;
- la maturité des propositions de la communauté française soumises via l'appel à idées du CNES ;
- l'historique de la communauté française (implication sur des missions passées, les développements en R&T, etc.).

3.1. Les futures missions européennes

Le thème scientifique pour la deuxième mission de type *Large* (L2) de l'ESA, "**The Hot and Energetic Universe**", est désormais officiellement choisi et le processus de définition de la mission associée a démarré. Le groupe réitère son soutien à la mission Athena associée à ce thème scientifique qui a toujours été identifié comme prioritaire dans les différents exercices de prospective. Il invite la communauté à se mobiliser pour préparer cette ambitieuse mission et permettre à la France de jouer un rôle important dans sa réalisation, tout en assurant un retour scientifique au moins proportionnel à son implication.

Le thème pour la troisième mission de type *Large* (L3), "**The Gravitational Universe**", est également officiellement choisi, mais la définition de la mission va suivre un plus long processus. Là aussi, la communauté est invitée à se mobiliser, en particulier via l'organisation du suivi, pour cette mission qui ouvrira une nouvelle fenêtre sur notre Univers.

3.2. Propositions pour des futures missions européennes ou missions d'opportunité

Le groupe a identifié le thème scientifique suivant comme prioritaire (P0) :

- "**Comprendre la phase d'inflation de l'Univers primordial**" via la recherche et l'étude des modes B de la polarisation du fond diffus cosmologique. La France possède déjà une expérience reconnue dans ce domaine, notamment grâce aux développements menés sur la mission Planck. Le groupe propose donc de soutenir prioritairement une participation à une future mission européenne de type M4 (type CoRE). En cas de non sélection, une participation à une mission d'opportunité avec la NASA (type Pixie) ou la JAXA (type LiteBIRD) doit être soutenue si une telle éventualité se présente.

Ensuite, le groupe a identifié les thèmes suivants, sans interclassement (P1) :

- "**Comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies**" de l'Univers proche ($z < 2$) à l'Univers lointain (jusqu'à $z=10$). Quelle que soit la méthode, l'intérêt est d'obtenir des informations sur le processus de mise en place des galaxies et des grandes structures. Les grands redshifts permettent en effet d'observer les galaxies dans leurs stades initiaux, via essentiellement des observations dans l'infrarouge, et de comprendre l'histoire de leur évolution postérieure. A l'inverse, observer à un *redshift* modéré

($z < 2$) permet d'accéder aux détails des échanges en cours entre galaxies et gaz diffus, par exemple en observant dans l'ultraviolet l'émission du proche environnement des galaxies, ou bien de remonter aux processus dynamiques qui ont opéré durant la vie d'une galaxie, c'est-à-dire à son histoire d'assemblage. Le groupe propose donc de soutenir une participation à une future mission européenne de type M (type SPICA, tel que défini au début 2013¹) ou une participation à une mission d'opportunité (type MIGAL avec la NASA).

- **“Caractériser les exoplanètes et chercher les biosignatures : quelles sont les conditions physiques qui règnent à la surface des petites planètes et à l'intérieur des planètes gazeuses, et sont-elles favorables à l'apparition de la vie ?”** via l'étude des atmosphères des exoplanètes. La prochaine grande étape de cette thématique est l'étude de l'atmosphère et des propriétés d'un grand nombre de planètes de tous types, la quête ultime étant naturellement la recherche de traces de biosignatures. Le groupe propose de soutenir, en fonction des opportunités programmatiques, une participation à une future mission européenne de type M ou à une mission d'opportunité.

Le groupe propose ensuite les thèmes scientifiques suivants, sans interclassement (P2) :

- **“Comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets”** via l'observation de l'Univers lointain dans l'infrarouge. La détection, puis l'étude, des premiers objets formés dans l'Univers permettra une meilleure compréhension de la fin des âges sombres. Le groupe propose de soutenir une participation à une petite mission d'opportunité.
- **“Comprendre les explosions stellaires (et la nucléosynthèse associée), la physique des objets compacts” et “comprendre l'origine des rayons cosmiques galactiques”** en observant l'Univers dans le domaine du MeV. La mission devra couvrir tout le ciel, tout en opérant sur une large bande spectrale autour du MeV, avec une très bonne sensibilité, ainsi que des résolutions angulaire et en énergie suffisantes pour étudier toutes les composantes du ciel. Ultiment, l'identification des sources contribuant au fond diffus gamma cosmique devra être obtenue.
- **“Comprendre la formation et l'évolution des étoiles et des planètes”** en observant les étoiles dans l'ultraviolet et le visible. Cette mission permettra l'étude de l'évolution et de l'environnement des étoiles de tous types en mesurant leurs vents et leurs magnétosphères, grâce à un spectropolarimètre opérant dans l'ultraviolet et le visible.

Remarques importantes :

- **Le groupe Astronomie et Astrophysique tient à souligner l'importance de préserver dans le programme du CNES la possibilité de participation à de futures missions d'opportunité.**
- **Toutefois, le groupe rappelle qu'une éventuelle participation à une mission d'opportunité ne doit pas se faire au détriment d'une mission déjà décidée de type M ou L de l'ESA qui doit demeurer absolument prioritaire. Une telle participation doit donc se faire en regard du contexte programmatique.**

Enfin le groupe a identifié deux thèmes scientifiques potentiellement prometteurs, mais dont la maturité nécessite une réflexion plus profonde de la communauté scientifique :

- Un observatoire opérant dans le domaine submillimétrique, aux performances bien supérieures à celles de la mission européenne Herschel et de l'éventuelle mission SPICA, permettrait d'aborder de très nombreuses questions, comme par exemple : **“comprendre la fin des âges sombres et**

¹ Le projet SPICA est en cours de redéfinition suite à la demande de la JAXA d'augmenter significativement la contribution européenne. Le groupe suit très attentivement l'évolution du projet et se réserve le droit de mettre à jour son message en fonction des conclusions de ce processus.

étudier la formation des premiers objets”, “comprendre la formation et l’évolution des étoiles et des planètes”, etc. Compte-tenu de l’ampleur d’une telle mission (probablement de type *Large* de l’ESA), le groupe souhaite que les programmes nationaux commencent par proposer conjointement une feuille de route identifiant les grandes questions scientifiques devant être abordées par cette future mission, ainsi que les performances nécessaires pour y parvenir.

- Un observatoire capable d’observer des objets à très faible brillance de surface dans le visible et l’ultraviolet permettrait d’étudier en détail l’assemblage des galaxies et de répondre à la question *“comprendre les mécanismes d’échange de matière et d’énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies”*. Le groupe a conscience de l’intérêt de cette thématique scientifique, mais invite la communauté à se structurer afin de mieux définir sa stratégie et ses besoins.

3.3. Propositions pour les missions nationales et multilatérales

Une seule mission multilatérale est toujours soutenue par le groupe, la mission sino-française SVOM, consacrée à la découverte et à l’étude des sursauts gamma. Cette mission est décidée depuis 2005, mais est toujours en attente du démarrage de sa phase de développement. Compte-tenu du retard, l’intérêt scientifique de la mission a de nouveau été évalué par le groupe qui a confirmé que SVOM a toujours une réelle valeur scientifique. Ceci tient pour beaucoup à l’existence de moyens complémentaires d’observation au sol et dans l’espace, qui seront disponibles au moment du lancement (2020).

En dehors de ce projet, le groupe ne recommande pas de nouvelle mission nationale ou multilatérale.

3.4. Propositions pour les missions ballons

Plusieurs projets embarqués sous un ballon stratosphérique sont déjà décidés et devraient voler dans les années à venir : EUSO-Ballon (premier vol en 2014), PILOT (premier vol en 2015) et FIREBall 2 (premier vol en 2015 ou 2016).

En dehors de ces projets, le groupe ne recommande pas de nouvelle mission ballon.

3.5. Les développements techniques R&T

Le groupe soutient les développements liés aux futures missions associées aux grandes questions scientifiques décrites dans les sections précédentes, en suivant les priorités pour les futures missions européennes et missions d’opportunité :

- **Observer l’Univers dans le domaine des rayons X** : chaînes de détection et cryogénie associée.
- **Étude des modes B de la polarisation du fond diffus cosmologique** : chaînes de détection et cryogénie associée.

Puis :

- **Observer l’Univers dans le domaine du MeV** : chaînes de détection.
- **Observer les étoiles dans l’ultraviolet** : spectropolarimètre embarqué.

En ce qui concerne les thèmes consacrés à la polarisation du fond diffus cosmologique et à l’observation de l’Univers au MeV, le groupe demande que ces développements s’inscrivent systématiquement dans le cadre d’une feuille de route établie par les différents partenaires (tutelles, LabeX, laboratoires, etc.). Le CNES doit prendre l’initiative de la définition de cette feuille de route.

3.6. Proposition de phase 0

Afin de préparer une future mission de type M, le groupe souhaiterait qu'une étude de Phase 0 soit menée sur une mission observant les étoiles dans l'ultraviolet et le visible consacrée au thème scientifique : *“comprendre la formation et l'évolution des étoiles et des planètes”*. Cette mission devra permettre l'étude de l'évolution et de l'environnement des étoiles de tout type en mesurant leurs vents et leurs magnétosphères, grâce à un spectropolarimètre.

3.7. Les nanosatellites

L'essor des nanosatellites a été initialement porté par des intérêts pédagogiques évidents, permettant aux étudiants de développer leurs compétences dans le cadre de projets originaux. Mais les nanosatellites permettent également un accès à l'espace à des coûts potentiellement réduits par rapport à des projets plus volumineux. Toutefois l'astronomie n'est pas forcément le thème le plus porteur pour ces plateformes, la dimension réduite de la charge utile permettant difficilement de rivaliser avec des projets plus classiques, au sol ou dans l'espace. **Les projets pour l'astronomie doivent donc être étudiés au cas par cas, le rapport coût sur retour scientifique devant être évalué en détails.**

3.8. Synthèse des recommandations

Méthode d'observation	Cadre de réalisation	Priorité	R&T associée	Thème scientifique
Observer l'Univers dans le domaine des rayons X	L2 (ESA)	P0	Chaîne de détection et cryogénie	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets - Comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies
Observer les modes B de la polarisation du fond diffus cosmologique	M (ESA) ou Opportunité (NASA/JAXA)	P0	Chaîne de détection et cryogénie	<ul style="list-style-type: none"> - La quête de l'inflation et de l'Univers primordial : quelle physique a opéré dans les premiers instants de l'Univers ?
Observer l'Univers lointain dans l'infrarouge ou l'Univers proche dans l'ultraviolet	M (ESA) ou Opportunité (NASA)	P1		<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre les mécanismes d'échange de matière et d'énergie aux différentes échelles, des étoiles aux trous noirs et aux galaxies
Observer par spectrophotométrie les atmosphères des exoplanètes	M (ESA) ou Opportunité	P1		<ul style="list-style-type: none"> - Caractériser les exoplanètes et chercher les biosignatures
Observer l'Univers dans le domaine du MeV	M (ESA) ou Opportunité	P2	Chaîne de détection	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre les explosions stellaires, la physique des objets compacts. - Comprendre l'origine des rayons cosmiques galactiques.
Observer les étoiles dans l'ultraviolet	M (ESA) ou Opportunité	P2	Spectro-polarimètre	<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre la formation et l'évolution des étoiles et des planètes.
Observer l'Univers lointain dans l'infrarouge	Opportunité	P2		<ul style="list-style-type: none"> - Comprendre la fin des âges sombres et étudier la formation des premiers objets

Rappel: les priorités sont notamment basées sur les grandes questions scientifiques à aborder lors des prochaines années, le contexte programmatique national et international, la maturité des propositions de la communauté française et l'historique de la communauté.

4. L'importance de la complémentarité sol-espace

Les techniques d'observations en astronomie ont considérablement évolué au cours des dernières années avec l'avènement de l'observation multi-longueurs d'onde et multi-techniques. Les communautés scientifiques se définissent désormais moins par leur domaine de longueur d'ondes, que par leur thématique scientifique.

La conséquence la plus notable est que le suivi au sol a désormais un rôle très important dans le retour scientifique des missions spatiales. Ce besoin peut aller de la demande de temps importante sur un télescope, jusqu'à la mise à niveau d'instruments existants ou le développement de nouveaux moyens (ce qui soulève naturellement la question du financement de tels instruments).

L'exemple le plus emblématique est celui de la mission Euclid qui représente un enjeu très important pour la France. Ce projet intègre en effet des données sol et espace, toutes deux indispensables. La partie sol consiste à couvrir 15000 degrés² du ciel avec des télescopes au sol, en 4 bandes visibles et à la profondeur des galaxies les plus lointaines (faibles) de l'échantillon *weak lensing* d'Euclid. C'est ce double relevé sol-espace qui constitue la mission Euclid, et cette synergie est explicite depuis la phase de définition et de sélection. Dans un projet comme Euclid, l'obtention de données photométriques est une condition indispensable à sa réussite. A ce jour l'hémisphère sud est couvert grâce aux relevés photométriques DES et KIDS, mais l'hémisphère nord ne l'est pas encore, le suivi demandé au CFHT, qui est la seule option possible à ce jour, étant visiblement très compliqué à obtenir.

Compte-tenu de l'importance du suivi photométrique depuis le sol pour l'exploitation scientifique de la mission Euclid, le groupe demande que les principaux partenaires, CNES, CNRS et CEA, parviennent à une solution garantissant le suivi sol de la mission, solution qui puisse s'appliquer aux futures missions SVOM et PLATO également très demandeuses.

Pour qu'une véritable synergie entre le sol et l'espace puisse se mettre en place, les agences spatiales pourraient par exemple considérer la possibilité d'acheter du temps sur les télescopes au sol (en comptabilisant dès lors ce montant dans la contribution à la mission), et de participer aux comités d'allocation de temps de ces télescopes, ainsi qu'aux conseils d'administration en charge de ces moyens. Une attitude symétrique de la part des organisations gérant les moyens spatiaux aiderait naturellement à instaurer un dialogue permanent. Cela permettrait ainsi une meilleure coordination, harmonisation et planification des moyens en préservant une vue globale des projets scientifiques qui intègre et garantisse les ressources spatiales et au sol.

Annexe

Questions transverses

En se basant sur l'analyse d'une quinzaine de missions, soit pratiquement l'ensemble des missions passées ou en cours d'exploitation, il est possible de tirer quelques enseignements et tendances pour orienter les choix futurs.

Equilibre et priorités de la programmation

Il est tout d'abord important de noter que l'ESA est le partenaire le plus important pour l'astronomie spatiale (par exemple: Hipparcos, XMM, INTEGRAL, Herschel, Planck). Les missions menées dans ce cadre ont eu, jusqu'à présent, un retour scientifique supérieur aux attentes. Il est toutefois important de souligner que les grands observatoires et les missions de type grand relevé (par exemple Hipparcos, Herschel, Planck) ont eu un impact scientifique encore plus important grâce à leur héritage (*legacy*). Ces observations, généralement délivrées sous forme de données facilement utilisables, peuvent être exploitées pendant de très nombreuses années par des scientifiques non-experts. Il s'agit là d'une vraie plus-value pour ces observatoires et grands relevés.

Les missions d'opportunité, bien que peu nombreuses en astronomie (uniquement Odin, GALEX, Fuse et Fermi), ont montré un retour scientifique très important pour un coût faible. De telles opportunités doivent être saisies dès que cela est possible, c'est-à-dire dès que la France peut offrir une expertise unique et recherchée. Toutefois cette expertise doit s'acquérir et se conserver, ce qui ne peut être obtenu que via des développements menés dans d'autres cadres (par exemple: ballons, missions nationales, etc.).

Dans cette stratégie, les missions nationales, bien que peu nombreuses en astronomie (uniquement Sigma et CoRoT), peuvent y jouer un rôle clef. Jusqu'à présent, elles ont permis l'acquisition d'une expertise unique qui a conduit par la suite à un bon positionnement sur des missions ESA ou des opportunités :

- CoRoT -> CHEOPS -> PLATO
- SIGMA -> INTEGRAL

Les ballons ont un retour scientifique clairement inférieur aux missions spatiales. Leur coût doit donc être limité en conséquence et ils doivent être mis en compétition avec les missions d'opportunité. Cependant, les ballons peuvent être utiles pour tester de nouvelles technologies, accroître le TRL, et développer une expertise qui permet ensuite d'acquérir une place importante sur des missions spatiales ou pour saisir des opportunités. On notera les exemples suivants :

- Archeops -> Planck -> proposition M4 ou Opportunité NASA/JAXA ?
- Foca -> GALEX -> FIREBall -> Opportunité NASA ?

Les ballons doivent ainsi s'inscrire dans une stratégie permettant de contrôler les coûts et de bien définir les objectifs, sous peine d'arriver à des dérives inacceptables (Pronaos, PILOT).

De même, les nanosatellites servent plus souvent à tester de nouvelles technologies ou à former des étudiants qu'à un réel retour scientifique (voir Section 3.6). Cependant, leur coût est potentiellement plus réduit que celui des ballons, d'autant plus qu'ils ne sont en général que très partiellement financés par le CNES. En effet le financement des nanosatellites provient souvent des Régions, des Universités ou des Labex. Dans tous les cas, les projets doivent donc être étudiés au cas par cas, le

rapport coût sur retour scientifique devant être évalué en détails.

Comment investir nos ressources pour le meilleur retour scientifique

Fourniture instrumentale

Le type et l'ampleur de la contribution apportée à chaque mission doivent être étudiés au cas par cas, mais on peut noter en règle générale qu'une contribution *hardware* au cœur de l'instrument (optique, détecteurs, électronique rapprochée, etc.) permet de bien connaître son fonctionnement et amène donc une expertise très utile au moment de l'exploitation, sans pour autant mobiliser les effectifs après le lancement.

Par ailleurs, la France possède de nombreux domaines d'expertises (opto-mécanique, chaîne de détection, cryogénie, etc.), domaines qui sont régulièrement recherchés par les partenaires internationaux.

Le danger sous-jacent est naturellement la volonté des scientifiques de vouloir tout faire qui conduit parfois à un « saupoudrage » inefficace, voire dangereux (remarque naturellement liée à la question “comment aller plus vite?”). La fourniture instrumentale doit donc uniquement se concentrer sur le domaine où l'expertise se situe, et se faire en fonction des opportunités et de la stratégie de la communauté scientifique française.

Segment sol et centre de données

Une participation au segment sol et au centre de données permet, elle aussi, d'acquérir une position intéressante. Ce point est d'autant plus critique que l'instrumentation est spécifique (matrices de bolomètres de Planck par exemple). Elle offre notamment un retour direct aux scientifiques français en permettant d'accéder à des données traitées de bonne qualité (par exemple : XMM, Herschel, Planck).

Il existe cependant un danger potentiel : un tel investissement mobilise beaucoup de chercheurs après le lancement, au moment où ils pourraient être très productifs dans l'exploitation des premières données. Une telle participation n'est donc rentable que dans le cas où la France peut apporter une véritable plus-value sur les données, permettant ainsi aux chercheurs français de bénéficier d'une position privilégiée.

Les contributions à des centres de données ont donc une réelle valeur ajoutée uniquement si elles s'appuient sur des expertises instrumentales fortes, ou des compétences techniques ou scientifiques très spécifiques.

PI or not PI?

Le *Principal Investigator* (PI) est responsable devant les agences et la communauté scientifique des résultats scientifiques obtenus par une mission ou un instrument. A ce titre, il est l'unique interlocuteur pour les agences, et est responsable de l'organisation du consortium, des choix techniques et scientifiques sur la mission ou l'instrument, de la livraison de produits *science-ready*, etc.

Compte-tenu de l'importance de ce rôle dans l'organisation d'un projet, un *PI-ship* permet

d'augmenter la notoriété d'une équipe scientifique, d'un laboratoire et de la France, et de développer la communauté scientifique nationale (en favorisant par exemple l'accès aux moyens hors-CNES, tels que l'ANR, l'ERC, etc.). Elle permet aussi l'acquisition d'une expertise qui permet ensuite de se positionner sur des missions ESA ou des opportunités. On peut citer par exemple la filiation :

- CoRoT (PI mission) -> CHEOPS (CoI) -> PLATO (CoI)
- Sigma (PI mission) -> INTEGRAL (PI instrument)
- Pronaos (PI mission) -> Planck (PI instrument)

L'intérêt d'être PI dépend en partie de la complexité de la mission ou de l'instrument: être PI d'une mission ou d'un instrument ouvert à la communauté (sans données privées), dont l'exploitation scientifique ne fait pas appel à des spécificités particulières, n'est pas forcément un choix très judicieux (où est la plus-value dans ce cas ?). Ainsi la communauté scientifique exploite régulièrement des données issues des missions sans PI français, comme par exemple XMM, HST, Spitzer et Kepler. A l'opposé, être PI d'une mission ou d'un instrument faisant appel à de réelles spécificités (comme par exemple: HFI sur Planck, ISGRI sur INTEGRAL) peut offrir une réelle valeur ajoutée à la communauté.

Dans tous les cas, il est important que le positionnement en tant que PI s'inscrive dans le cadre d'une stratégie globale (afin d'éviter de nouveau un « saupoudrage »). La dynamique du *PI-ship* doit être alors très clairement soutenue par les différentes tutelles afin de faire fructifier le plus possible l'investissement de la France.

Comment aller plus vite?

Enfin, il est peut-être possible de réduire le temps de préparation des missions en investissant en amont dans de la R&T, en particulier dans des briques technologiques, quitte à arrêter ensuite des R&T sur des sujets qui ne s'avèrent plus porteurs, en identifiant des spécificités de la communauté française pour y placer nos efforts, et en s'appuyant sur des feuilles de route thématiques préparées par les diverses communautés scientifiques.

Le “saucissonnage” européen doit être également revu, en souhaitant un équilibre global des différents pays entre les missions, mais pas pour chaque mission. Favoriser des équipes plus resserrées serait sans doute plus économique et moins chronophage.

Par ailleurs le processus de sélection concurrentiel de l'ESA, bien que positif sur le principe, devrait être simplifié. En effet, la multiplication des phases A, très (trop?) demandeuses en ressources, a des conséquences négatives sur les ressources humaines et financières. Une autre conséquence de ce système est le manque d'originalité et de flexibilité dans les sélections puisque les trois missions de type *Large* et deux des trois missions de type *Medium* sont dans le paysage depuis de très nombreuses années.