

# Rapport de synthèse des travaux du groupe

## II.1: Thématiques et interdisciplinarité

### Méthodologie de travail

Ce document résulte des analyses de prospective des sept programmes nationaux (PNs + ASHRA + CET) de la discipline, établies en lien avec la Section 17 du Comité National de la Recherche Scientifique (CoNRS), et en concertation avec les groupes thématiques (GT) du comité d'évaluation de la recherche et de l'exploration spatiale (CERES du CNES).

**Section 17 : Frédérique Motte & Benoit Famaey** et Nabila Aghanim, Donia Baklouti, Frédéric Bournaud, Laurent Cambresy, Sandrine Codis, Karine Issautier, Laurent Lamy, Jeremy Leconte, Laurent Mirioni, Mamadou N'Diaye, Micaela Oertel, Ana Palacios, Alejandra Recio-Blanco, Fabrice Roy, Renaud Savalle, Gilles Theureau, Luigi Tibaldo, Laurence Tresse, Frédéric Vincent

**Directions des PNs : Nadège Meunier** et Guillaume Aulanier, Kévin Belkacem, Ludovic Biennier, Isabelle Boisse, Samuel Boissier, Patrick Charlot, Elodie Choquet, Thierry Fouchet, Maud Langlois, Benoit Lavraud, François Lévrier, Benjamin Magnelli, Frantz Martinache, David Maurin, Pierre-Olivier Petrucci, Matthieu Tristram, Philip Tuckey, Valentine Wakelam

**Présidents des GTs :** John Carter, Matthieu Kretzschmar, Joao Marques, Antoine Petiteau, François Petrelis, Cyril Szopa

**Déléguée Scientifique INSU chargée du suivi du groupe :** Susanna Vergani

### Principaux constats

La **Partie A** du document décrit les grands défis de notre recherche en Astronomie-Astrophysique, la **Partie B** illustre le caractère holistique et hautement interdisciplinaire de nos thématiques.

#### A. Nos grands défis

##### **1- Interactions et complexité dans l'Univers : processus, couplages d'échelles spatiales, états de la matière, phénomènes dynamiques et transitoires**

*Mots-clés :* nucléosynthèse ; physico-chimie des gaz et des phases condensées ; matière noire et énergie noire ; plasmas astrophysiques ; gravitation ; magnétisme ; turbulence ; instabilités ; accréation ; éjection ; chocs ; distribution de la matière ; dynamique ; accélération des particules ; effets de rétroactions...

Ce défi relie l'ensemble des axes de la prospective thématique décrits en détail dans la **Partie B** du document (**Axes 1, 2 et 3**) et la **Figure 2**.

##### **2- De la naissance aux stades ultimes des systèmes astrophysiques : formation, évolution, destruction et recyclage**

*Mots-clés :* Univers primordial ; milieu intergalactique ; Voie Lactée ; milieu interstellaire et nuages moléculaires ; étoiles jeunes, séquence principale et évoluées ; systèmes multiples et amas d'étoiles ; disques protoplanétaires ; systèmes planétaires et petits corps ; vents solaire et stellaires, héliosphère ; atmosphères ; magnétosphères ; supernovæ ; objets compacts ; centres galactiques et noyaux actifs ; galaxies et amas de galaxies, grandes structures...

Ce défi structure les trois grands axes de la prospective thématique décrits en détail dans la **Partie B** du document (**Axes 1, 2 et 3**).

Les **défis 3 et 4** décrits ci-dessous, étant hautement transverses, ne sont pas ré-explicités en détail dans les **Axes 1, 2 et 3**.

### **3- Instrumentation de pointe et programmes d'observation pour sonder les extrêmes : exploiter et (ré-)ouvrir des fenêtres observationnelles, renforcer les expériences de laboratoire**

*Mots-clés* : projets instrumentaux et grands relevés cohérents avec un impact environnemental réduit ; instrumentation innovante pour les télescopes sol et espace et missions d'exploration spatiale ; complémentarité sol-espace et suivis d'alertes ; instrumentation à haute résolution angulaire, à haute dynamique ; exploitation des infrastructures existantes et données d'archive ; expériences de laboratoire...

Fenêtres observationnelles : ondes gravitationnelles ; rayonnement électromagnétique (de la radio au gamma) ; neutrinos, rayons cosmiques ; particules neutres et chargées ; multi-messagers...

L'Astronomie-Astrophysique est une science fondamentale dont l'objectif est de repousser les frontières de la connaissance sur l'Univers dans lequel nous évoluons. Elle a un fort impact sociétal et économique car elle fournit des éphémérides, des suivis de géocroiseurs comme des prévisions de météorologie de l'Espace. Elle s'appuie également sur les industriels pour la réalisation de ses observatoires, elle ouvre la voie à de nouvelles technologies et joue un rôle précurseur pour la promotion d'un mode de travail collectif, inclusif, et qui cherche à limiter son impact environnemental. Plus précisément, l'astrophysique est une science observationnelle pour laquelle les développements instrumentaux de pointe et le déploiement de grandes infrastructures et projets occupent une place prépondérante. Pour lever des verrous scientifiques, notre discipline s'appuie sur les observatoires multi-longueurs d'onde et multi-messagers existants, en construction et en projet, tant au sol que dans l'espace, avec des missions d'exploration spatiale dans notre système solaire effectuant des analyses *in situ* ou collectant des échantillons analysés en laboratoire. Ces observations depuis le sol et l'espace sont autant de défis en termes de complémentarité et de suivi, en particulier dans le cadre des relevés du ciel transitoire pour lesquels des méthodes efficaces de suivis d'alertes doivent être mises en place. Il s'agira dans les années à venir d'ouvrir de nouvelles fenêtres observationnelles et d'en ré-ouvrir d'autres, dans le domaine électromagnétique, de la gamme radio au domaine gamma, en passant par l'infrarouge lointain, tout en s'appuyant sur d'autres messagers incluant les ondes gravitationnelles, les neutrinos et les rayons cosmiques.

Ce défi couvre les recherches actives sur l'instrumentation innovante pour sonder les milieux astrophysiques extrêmes, intégrant des concepts d'éco-construction et mettant en œuvre une approche "système" visant à optimiser toute la chaîne d'acquisition des signaux astrophysiques. Par exemple, pour l'instrumentation à haute résolution angulaire, cette recherche a pour but d'obtenir des mesures avec une sensibilité, une dynamique, et une résolution maximales. Elle intègre toute la chaîne allant de l'observatoire et son environnement (incluant l'atmosphère) jusqu'au traitement des données et inclut ainsi la recherche en optique adaptative, interférométrie, imagerie très haute dynamique ainsi que le traitement du signal transverse. La recherche en instrumentation concerne également de nombreux autres domaines : l'observation à toutes les longueurs d'onde électromagnétiques – radio, (sub)millimétrique, X, gamma – mais aussi dans le domaine des ondes gravitationnelles depuis le sol et l'espace, ainsi que les missions d'exploration spatiale *in situ* et les expériences de laboratoire.

De très nombreux défis technologiques jalonnent ces domaines de recherche. Parmi ceux-ci, notons par exemple l'optique intégrée, la cryogénie sub-Kelvin, les horloges atomiques, l'électronique multiplexée, le développement de détecteurs submillimétrique et gamma, la miniaturisation des instruments spatiaux, la modélisation des conditions d'irradiation ou la microscopie couplée à la spectroscopie infrarouge pour les expériences de laboratoire. Ces défis nécessitent la formation et le recrutement de chercheuses et chercheurs et d'ingénieurs et ingénieurs, aux profils interdisciplinaires, entre l'astronomie et la recherche instrumentale d'une part, et entre astronomie et sciences expérimentales d'autre part.

Dans un contexte de crise climatique et environnementale, la communauté est consciente de devoir parvenir à combiner développement scientifique et décarbonation de ses activités, en particulier de ses infrastructures de recherche.

### **4- Méthodes numériques innovantes pour étudier l'Univers : données massives, de la haute performance à l'intelligence artificielle (IA)**

*Mots-clés* : analyse et visualisation de données complexes multidimensionnelles ; simulations numériques ; *data-mining* ; interopérabilité ; IA et HPC avec un impact environnemental réduit ; inférence...

L'évolution de la thématique Astronomie-Astrophysique est caractérisée par une augmentation constante des volumes de données, complexes et multidimensionnelles (300 pétaoctets par an pour le Square Kilometre Array Observatory – SKAO – par exemple). Cette évolution implique de nombreux défis pour la réduction, la visualisation, la manipulation et l'analyse d'un grand volume de données. Pour les relever, il est nécessaire de faire appel à des développements interdisciplinaires en sciences de l'information et des données comme la mathématique statistique (algorithmes d'apprentissage automatique, inférence, traitement du signal, etc.) et le numérique en calcul à haute performance (HPC). La gestion et l'interprétation de ces grands volumes de données impliqueront le recours massif aux outils d'IA. En effet, même les produits finaux (catalogues de sources, images, cubes multi-spectraux, etc.) des missions et instruments sont souvent trop importants pour être inspectés et analysés par les méthodes classiques. Outre les développements qui concernent l'inférence, la classification, la reconnaissance de formes, la régression symbolique, les grands jeux de données en astrophysique sont des bancs d'essai idéaux pour développer de nouveaux types de modèles de fondation multimodaux (tels des LMM). Le besoin croissant en modélisation numérique et simulations directes de plus en plus détaillées à toutes les échelles, de complexité physique croissante, s'appuie largement sur le HPC à l'ère de l'Exascale. Ce terme désigne l'avènement de nouveaux calculateurs avec une puissance de calcul supérieure à  $10^{18}$  flops (opérations flottantes par seconde). Cette transition repose sur la généralisation d'accélérateurs (comme les GPU), sur un parallélisme massif (>million de cœurs) avec une mémoire par cœur en diminution et possiblement sur de nouvelles architectures (processeurs ARM ou FPGA). Se pose donc le défi de développer des outils capables d'exploiter ces ressources, y compris sur le long terme (~15 à 20 ans), alors que les solutions techniques et méthodologiques ne sont pas complètement consolidées. Un effort important en portage, développement de codes et veille technologique doit être fourni par la communauté pour la modélisation numérique en astrophysique afin d'atteindre une description cohérente des processus complexes et multi-échelles qui la caractérise (**défis 1 et 2**), mais également pour le traitement massif et l'exploitation des grands volumes de données qui seront mis en œuvre sur ce nouveau type de matériel (par exemple avec les SKA regional centres, **défi 3**). La question de l'optimisation de l'ensemble des ressources numériques pour un impact environnemental réduit représente, dans ce cadre, un véritable défi à part entière.

Ce défi majeur impliquera le déploiement de ressources humaines, chercheuses et chercheurs, ingénieures et ingénieurs, aux profils interdisciplinaires entre l'astrophysique et la science des données.

Il nécessitera aussi, pour assurer la préservation et la valorisation des données, le renforcement des synergies, notamment à travers les Services Nationaux d'Observation (SNO), entre observatoires partageant des méthodes communes (interopérabilité). Dans ce cadre, les développements portés au niveau international par l'*International Virtual Observatory Alliance* (IVOA) sur la standardisation des méthodes de recherche et d'accès aux données continueront de jouer un rôle essentiel pour garantir l'exploitation optimale des différents types de données suivant des principes FAIR ("*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*", en français : "*Trouvable, Accessible, Interopérable, Réutilisable*").

## **B. Thématiques et interdisciplinarité : l'Astronomie-Astrophysique, une science holistique – couplages d'échelles et de processus physiques au cœur de notre recherche**

Astronomie-Astrophysique : cette double appellation témoigne de la nature à la fois observationnelle et interprétative d'un domaine particulier de la recherche scientifique, dont l'objectif n'est ni plus ni moins que la compréhension de l'Univers et de ses composants, sous tous leurs aspects. Les domaines couverts par la thématique Astronomie-Astrophysique portent, de ce fait, sur plus de 36 ordres de grandeur d'échelles spatiales, allant de la taille de l'Univers observable jusqu'à l'échelle subatomique (et encore plusieurs dizaines jusqu'à l'échelle de Planck)

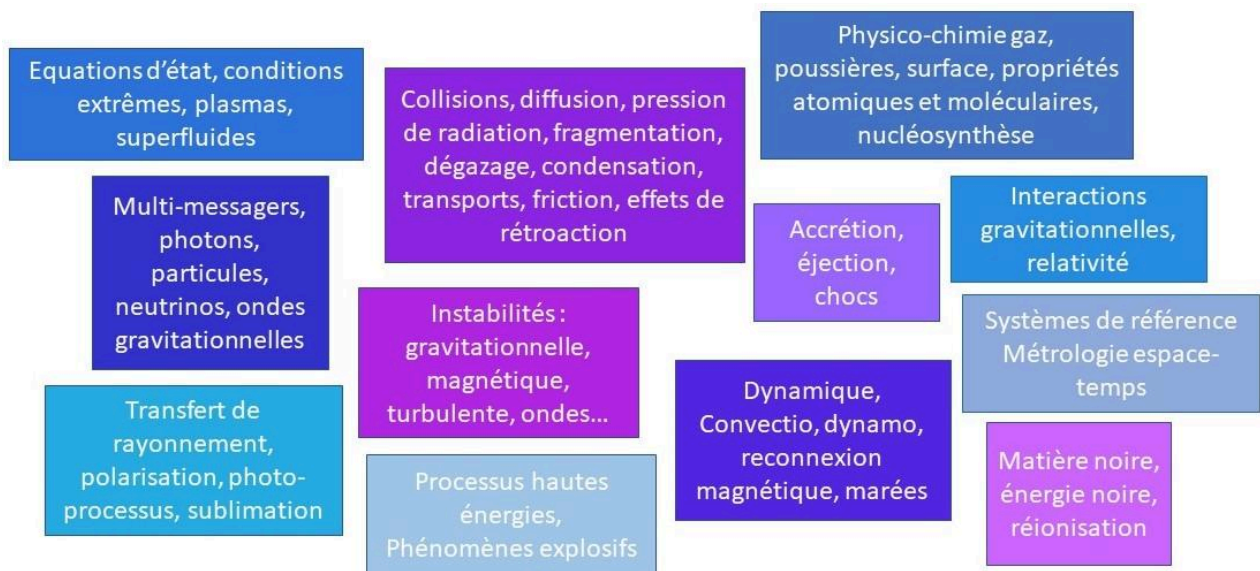
et 63 ordres de grandeur d'échelles de temps, de l'âge de l'Univers au temps de Planck. Une communauté très diverse d'expertes et d'experts des différents processus et objets peuplant un immense espace des paramètres se retrouve réunie dans cette thématique globale, développant et exploitant ensemble des moyens d'investigation variés : observation, exploration *in situ*, expérimentation, modélisation, théorie et simulation pour construire un socle de compréhension commune.

La spécificité des recherches menées dans cette thématique tient à la fois du lien étroit avec les observations et les observatoires, en tant que socle essentiel d'investigation et des interconnexions entre processus, objets et échelles étudiés. L'objectif est de comprendre les mécanismes à l'œuvre à chaque échelle, à la fois en tant que tels et en lien avec les autres échelles, de sorte que chaque objet d'étude est à la fois étudié en soi et en tant qu'élément essentiel à la compréhension des autres. Du fait de ce couplage omniprésent d'échelles spatiales et de durée, aucune classe d'objet (**Figure 1**) ou de processus (**Figure 2**) ne peut être complètement comprise en ignorant ses nombreuses interconnexions avec d'autres. Ainsi, **l'astrophysique englobe aussi des interfaces avec des domaines variés de la physique, tels que la chimie, la physique des fluides et des plasmas, les géosciences, la physique nucléaire et des particules et la physique théorique.** Elle s'appuie sur les **sciences de l'information** (IA et sciences des données, calcul haute performance, traitement et analyse des signaux et images, traitement massif des données) et sur la **recherche méthodologique et instrumentale** (optique, mécanique, électronique, etc.).

La **Figure 1** ci-dessous illustre la diversité de nos objets d'étude ainsi que les interconnexions entre ceux-ci, menant souvent à l'étude de systèmes constitués de plusieurs objets astrophysiques en interaction. La **Figure 2** illustre quant à elle la richesse et la complexité des états de la matière et les processus en jeu dans la formation et l'évolution des systèmes astrophysiques.



**Figure 1** : La diversité des objets d'étude en Astronomie-Astrophysique et leurs interactions via le couplage d'échelles, de temps et de processus. Les couleurs sont arbitraires et les tailles des boîtes ne représentent en rien les échelles d'espace et de temps associées aux objets AA.



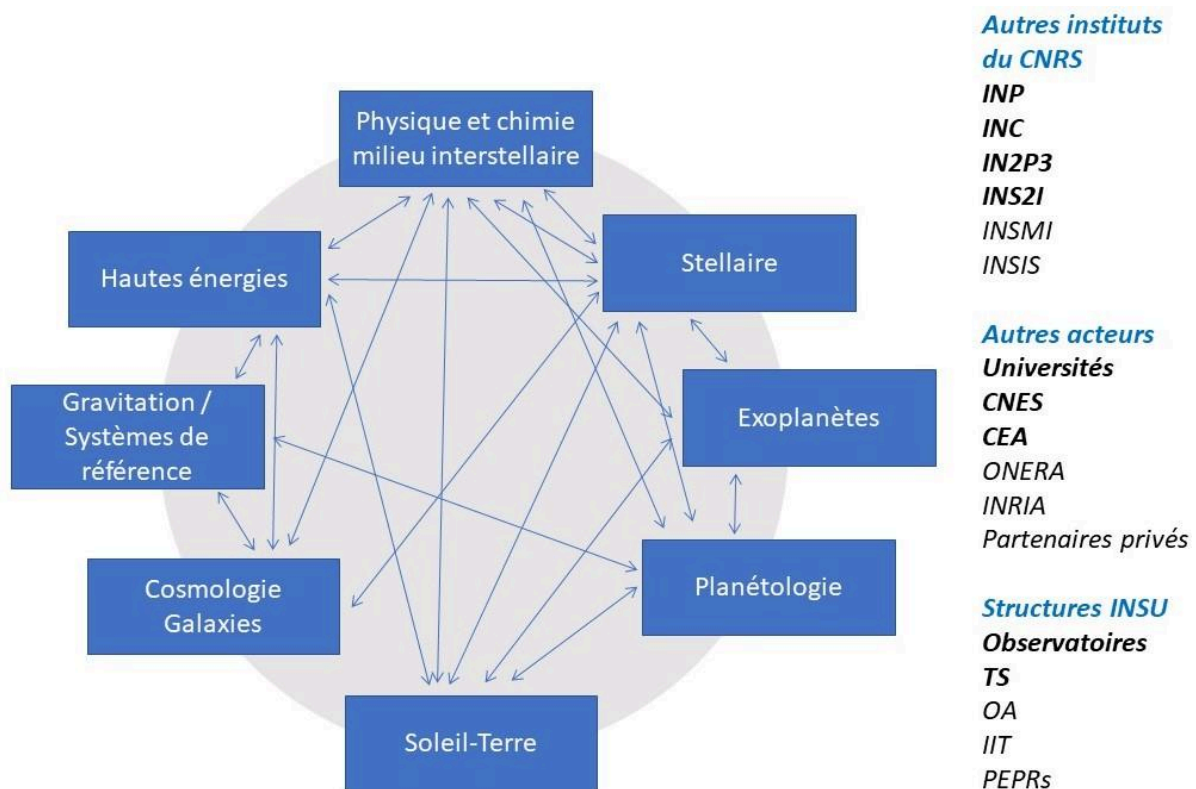
**Figure 2 :** La richesse et la complexité des processus et états de la matière étudiés en Astronomie-Astrophysique.

D'un point de vue organisationnel, les thématiques Astronomie-Astrophysique s'appuient sur sept Programmes Nationaux (PN) dont le rôle est essentiel pour paver la discipline, animer les communautés et accompagner leurs projets ; ils deviendront pour la plupart des Actions Thématiques (AT) au sein du PN AA (Astronomie-Astrophysique). Comme les études menées par la communauté Astronomie-Astrophysique sur les différents systèmes astrophysiques sont souvent transverses, de très nombreuses interfaces existent entre les différentes AT (voir la **Figure 3**) de ce futur PN AA et avec l'actuel et futur PNP (Programme National Planétologie). Nous en donnons quelques exemples ci-dessous : *[les noms des AT seront mis à jour après le colloque de Prospective.]*

- **Objets en commun par nature :** un même objet peut être étudié dans deux AT avec des approches différentes. Par exemple les supernovæ sont étudiées par l'AT Hautes Énergies du point de vue des processus physiques, et par l'AT Physique Stellaire dans le contexte de l'évolution stellaire ; les proto-étoiles et disques protoplanétaires sont étudiés au sein de l'AT Physique Stellaire dans le contexte de la formation stellaire et planétaire, dans l'AT Physique et Chimie du Milieu Interstellaire pour leur propriétés chimiques dans le contexte du milieu interstellaire, et de l'AT Exoplanètes pour leur lien avec la formation et les propriétés des exoplanètes ; les galaxies à noyaux actifs sont étudiées par l'AT Hautes Énergies du point de vue des processus physiques, et par l'AT Cosmologie et Galaxies dans le contexte de l'évolution des galaxies.
- **Types d'objet communs :** Les étoiles sont étudiées au sein de l'AT Physique Stellaire et le cas particulier du Soleil au sein de l'AT Soleil-Terre, avec une interface sur des processus communs comme le magnétisme ou la variabilité ; les planètes de notre système solaire sont étudiées en détail au sein du PNP, y compris par des missions *in situ*, tandis que les exoplanètes orbitant autour d'autres étoiles que le Soleil sont étudiées dans l'AT Exoplanètes ; l'étude des interactions soleil/planète et planète/satellite menée à l'interface des AT Soleil-Terre et du PNP se prolonge dans la recherche d'exoplanètes et l'étude de leur interaction avec leur étoile hôte dans le cadre des AT Exoplanètes et Physique Stellaire.
- **Connaissances sur des objets spécifiques utilisées dans une autre AT :** L'étude des étoiles (AT Physique Stellaire) et du milieu interstellaire (AT Physique et Chimie du Milieu Interstellaire) apporte des connaissances et contraintes essentielles pour l'étude des galaxies (AT Cosmologie et Galaxies), et réciproquement la cosmologie et l'étude des galaxies apportent des informations cruciales concernant la rétroaction sur le milieu interstellaire ; l'étude de la formation stellaire dans la Voie Lactée (ATs Physique Stellaire et Physique et Chimie du Milieu Interstellaire) permet de mieux quantifier celle des galaxies (AT Cosmologie et Galaxies), alors même que l'étude de la dynamique au sein des galaxies permet d'informer la formation des nuages et des étoiles de la Voie Lactée ;

l'étude de la gravitation (AT GRAM) et des processus à haute énergie (AT Hautes Énergies) fournissent des informations critiques pour l'étude de la cosmologie et des galaxies (AT Cosmologie et Galaxies), qui peut elle-même en retour apporter des contraintes sur la gravitation et les processus à haute énergie ; d'après les études de l'AT Physique Stellaire, la fin de vie des étoiles dépend de leurs propriétés, menant pour un grand nombre d'entre elles à des phénomènes explosifs différents, qui lorsqu'ils sont étudiés par l'AT Hautes Énergies donnent en retour des contraintes cruciales sur les modèles d'évolution stellaire.

Ces liens sont illustrés de façon non exhaustive par des flèches sur la **Figure 3** ci-dessous. Les interfaces ne se limitent pas aux AT du PN-AA et au PNP de l'INSU, mais concernent également plusieurs autres structures de l'INSU, plusieurs autres instituts du CNRS, et de nombreux autres acteurs institutionnels.



**Figure 3** : Principales interactions entre les sept Actions Thématiques (AT) AA et le PNP et interfaces avec de nombreux acteurs de la recherche scientifique nationale. La communauté INSU-AA s'appuie également sur quatre Actions Spécifiques (AS), transverses aux AT, et deux programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) : ASHRA, ASOV, ASNUM et AS SKA-LOFAR ainsi qu'Origines et NumPEX). [les noms des AT seront mis à jour après le colloque de Prospective]

La **Partie B** est structurée en trois axes dont le terme a été choisi pour souligner la transversalité de nos thématiques de recherche. L'**Axe 1** porte sur l'origine des structures de l'Univers, l'**Axe 2** décrit les transformations du milieu interstellaire jusqu'aux systèmes planétaires et l'**Axe 3** donne un aperçu des systèmes stellaires et planétaires, jusqu'à leur fin de vie. Chaque axe est constitué de plusieurs sections qui correspondent à des sous-thématiques et qui illustrent le caractère holistique et interdisciplinaire de chaque axe. Par construction, les sujets abordés par chaque axe passent des grandes aux petites échelles et vice versa, d'un processus physique à l'autre, d'une thématique développée par une AT à celle, connexe, portée par une autre AT.

Les outils méthodologiques utilisés par la communauté AA ou requis pour atteindre ses objectifs de Prospective sont indiqués en bleu. L'ensemble des moyens sol et espace identifiés comme Prioritaires par le groupe Moyen de la Prospective AA (P0, voir Tables xx et xx du GT II.2) est cité dans un, et plus généralement plusieurs, Axes ci-dessous.

## Axe 1 : Origine et évolution des structures de l'Univers

### 1.1. Le modèle cosmologique : l'énergie noire, la matière noire

Au cours des trois dernières décennies, un modèle cosmologique de concordance désigné par l'acronyme  $\Lambda$ CDM (lambda - matière noire froide), a été développé avec seulement six paramètres libres qui rendent compte de la plupart des observations de l'Univers aux plus grandes échelles (c'est-à-dire, le fond diffus cosmologique - CMB, les grandes structures - LSS, les supernovæ - SNIa). Néanmoins des questions fondamentales se posent quant aux hypothèses sous-jacentes à ce modèle (par ex., l'inflation, nature de l'énergie noire et de la matière noire) et par rapport à des tensions entre les valeurs issues de diverses sondes observationnelles.

Les contraintes fortes obtenues par le satellite **Planck/ESA** ont été insuffisantes pour déterminer les propriétés de la physique de l'ère d'inflation. Celle-ci est-elle décrite par un seul ou plusieurs champs scalaires ? Quelles sont les conséquences pour la présence de non-gaussianités locales dans les fluctuations primordiales aux différentes échelles (contraintes à venir avec la mission spatiale **Euclid/ESA**, par exemple) et pour les modes B de polarisation du CMB ? Peut-on favoriser un scénario inflationnaire et rejeter les alternatives grâce aux observations ? Le défi majeur pour répondre à ces questions réside en grande partie dans la maîtrise des effets systématiques des expériences CMB à venir, dans l'utilisation de la distribution de la matière aux grandes échelles (**en lien avec l'évolution des structures**, voir **Section 1.4**) et surtout dans la compréhension fine des avant-plans Galactiques (à l'interface avec la physique du milieu interstellaire, voir **Section 1.8**). Des progrès sont à attendre avec les observations du **Simons Observatory (SO)**, du **South Pole Telescope (SPT)**, et à moyen terme avec la mission **LiteBIRD/JAXA** dans laquelle la communauté INSU-AA s'implique. A plus long terme, la communauté commence à se structurer autour de possibles futures missions "Large" de l'ESA du rapport Voyage 2050 « New Physical Probes of the Early Universe » avec le but de sonder l'univers primordial avec de nouvelles sondes (pouvant être les ondes gravitationnelles, ou la structure spectrale détaillée du CMB, ce que prépare le ballon **BISOU/CNES**). A noter aussi la volonté de s'impliquer dans **CMB-S4** si ce projet voit le jour aux Etats-Unis. Tous ces projets permettront d'apporter des contraintes sur l'inflation, mais aussi par

exemple sur le nombre effectif de neutrinos et leur masse, tout en attendant des **retombées sur la physique Galactique**.

Au cours des dernières années, la mesure de paramètres cosmologiques est devenue de plus en plus fine, avec en corollaire la mise en évidence de différences selon les sondes cosmiques utilisées. C'est, par exemple, le cas pour la constante de Hubble,  $H_0$ , de façon significative, et dans une moindre mesure pour le paramètre  $S_8$  qui mesure l'amplitude du spectre des perturbations de la matière à l'échelle de  $8 h^{-1}\text{Mpc}$ . La mesure des ondes gravitationnelles, la cosmologie à 21 cm avec **SKAO** (l'avantage de l'observation du signal 21-cm par rapport au CMB étant qu'il dépend du *redshift*) et les mesures par *time delays* sur les quasars lentillés offriront un diagnostic indépendant sur la caractérisation et l'origine de la tension  $H_0$ . Plus généralement, ces sondes du modèle cosmologique permettront de s'affranchir de certains effets systématiques, dans l'avènement d'une "cosmologie multi-messagers" qui ne pourra néanmoins pas faire l'impasse sur la compréhension astrophysique des traceurs et de l'environnement. Ceci concerne par exemple les interactions du rayonnement et des particules provenant des objets extragalactiques étudiés **avec le milieu interstellaire Galactique** (voir **Section 1.8**). Dans les cinq années à venir, pour  $H_0$ , l'échelle des distances reposant sur les Céphéides, ou le sommet de la branche de géantes rouges (*RGB-tip*), sera améliorée grâce aux données de plus en plus précises de la mission **Gaia/ESA**, ainsi qu'à la modélisation de l'enveloppe circumstellaire des Céphéides (donc **en lien étroit avec la physique stellaire**). Pour la tension  $S_8$ , c'est la meilleure compréhension de la **physique des baryons** et de leur rétroaction dans les galaxies et groupes de galaxies qui fera le pendant aux hypothèses plus fondamentales. Ceci nécessite des simulations hydrodynamiques incluant un nombre croissant de processus physiques, notamment avec le code hydrodynamique **RAMSES** récemment labellisé dans le cadre de l'Action Nationale d'Observation 'Codes Communautaires' (ANO-CC). Aussi, plusieurs tensions existent également à l'échelle des galaxies (par ex. diversité des courbes de rotation des galaxies, plans de galaxies satellites, fraction de barres), mais il n'est pas clair à ce jour si elles sont liées aux hypothèses du modèle cosmologique (par ex. nature de la matière noire) ou à la physique des baryons. Les instruments à intégrale de champ (comme **MUSE/VLT**, puis **BlueMUSE/VLT** et **Harmoni/ELT**) permettront par exemple d'étudier le **lien entre la formation stellaire** (voir **Section 2.3**) et la présence/absence

de cœurs dans les halos de matière noire des galaxies, tandis que des tests de la gravitation (**voir Section 1.2**) pourront être effectués dans notre Galaxie grâce aux données toujours plus précises de la mission **Gaia/ESA**. Enfin **les candidats à la matière noire**, incluant axions, WIMPs ou trous noirs primordiaux, impliquent de potentielles signatures à **hautes énergies** détectables avec des instruments tels que **Fermi**, **HESS** ou, dans le futur, **CTAO**.

## 1.2. La gravitation et ses tests

La gravitation, en tant qu'archétype d'interaction à longue portée, joue un rôle fondamental dans l'ensemble des domaines de l'astrophysique et particulièrement en **cosmologie** (voir **Section 1.1**). Les questions de la matière noire et de l'énergie noire sont intimement liées à notre compréhension de la gravitation aux grandes échelles et en champ faible tandis que les objets compacts constituent des bancs de test naturels de la théorie en champ fort.

Ces dernières années, la chronométrie des pulsars (avec le **radiotélescope de Nançay - PTA**) a permis des tests de précision du principe d'équivalence, tandis que des mesures interférométriques de l'astrométrie au centre Galactique (avec **GRAVITY/VLT**) ont fourni des tests de grande précision de la relativité générale autour de SgrA\*. Les futures observations interférométriques (avec **SKAO** et **GRAVITY+VLT**), en synergie avec les ondes gravitationnelles (**LISA/ESA**), permettront d'étudier la coalescence de trous noirs binaires supermassifs en sondant ces objets à l'échelle du parsec depuis l'Univers local jusqu'à  $z \sim 2$  (et plus loin avec les ondes gravitationnelles), et de comprendre leur coévolution avec **leurs galaxies hôtes** et leur assemblage hiérarchique. Ceci implique aussi un lien entre l'astrométrie de très haute précision, complétée par l'imagerie à très haute résolution angulaire par le **VLBI**, et la géométrie et la physique des galaxies à noyaux actifs (AGN), dans le contexte de l'affinement du repère de référence céleste international radio (ICRF), et de son unification dans les années à venir avec le repère optique issu de la mission **Gaia/ESA** (Gaia-CRF). Les ondes gravitationnelles offrent en outre de nouvelles opportunités de tests de la gravitation (avec **LISA/ESA**, **Einstein Telescope**), qui peuvent être couplés à leur utilisation comme sondes cosmologiques (sirènes standards) de façon jointe, par exemple en prenant en compte la possible différence entre la "distance de luminosité" des ondes gravitationnelles et électromagnétiques.

Les tests de la gravitation sont intrinsèquement multi-messagers. Les mesures précises dans le Système Solaire en lien avec la **mécanique céleste** (voir **Section 3.7**), par exemple via les éphémérides **INPOP** ou avec les mesures de télémétrie laser sur la Lune, permettent des tests de la gravitation complémentaires. Le problème de la nature de la **matière noire** (voir **Section 1.1**) est également lié aux tests de la gravitation sur différents points. D'une part, la matière noire n'étant à ce jour détectée que

par ses effets gravitationnels, la nature de la gravitation en champ faible peut avoir des implications sur les quantités de matière noire déduites des observations dans les systèmes astrophysiques, telles les mesures de précision des mouvements stellaires dans la Voie Lactée, les mesures spectro-photométriques et de lentillage gravitationnel au-delà. De l'autre, la nature de la matière noire elle-même (par exemple, un champ scalaire d'axions) pourrait engendrer des modifications effectives de la gravitation via, par exemple, une brisure apparente du principe d'équivalence qui peut être testée en laboratoire ou dans l'espace. Parmi ceux-ci, citons les tests de l'universalité de la chute libre tels que celui obtenu récemment par la mission **MICROSCOPE/CNES**, dont plusieurs projets se proposent d'améliorer la mesure de deux ordres de grandeur (par ex. **MICROSCOPE 2/CNES**), de même que la mission **ACES/ISS** qui utilisera dès 2025 une horloge atomique pour tester le redshift gravitationnel. Plus généralement, des candidats légers à la matière noire pourraient être détectés en laboratoire avec des senseurs quantiques tels que les horloges et interféromètres atomiques et les liens optiques temps-fréquence sur fibre optique et en espace libre.

## 1.3. L'origine et la dynamique de notre Voie Lactée par l'archéologie Galactique

La distribution de **matière noire** (voir **Section 1.1**) ou les tests d'alternatives basées sur des modifications de la gravitation peuvent être également étudiés, dans des détails inégalés au sein de notre propre Galaxie, grâce aux données de la mission **Gaia/ESA**. Ainsi, les courants stellaires que cette mission a mis à jour permettent à la fois de sonder le potentiel gravitationnel tridimensionnel et de déchiffrer comment la Voie Lactée s'est assemblée. Remonter à ses origines par la combinaison d'informations cinématiques et chimiques des populations stellaires (des plus pauvres aux plus riches en métaux) du disque Galactique, de son halo et de ses galaxies satellites définit le domaine de l'archéologie Galactique. Ce domaine se donne comme objectif, outre le fait de contraindre les scénarios de formation de la Galaxie, de comprendre sa dynamique et son évolution séculaire, via notamment l'étude de ses bras spiraux et sa barre Galactique dont la nature reste débattue depuis plus de six décennies dans les communautés galaxiennes aussi bien que **milieu interstellaire et formation d'étoiles** (voir **Section 3.3**).

Une des perspectives de ces études concerne la **comparaison de notre Galaxie aux populations extra-galactiques**, et de combiner les contraintes sur l'histoire de l'accrétion de masse avec son impact sur la **formation stellaire** (voir **Section 3.3**). Les progrès qui sont à réaliser dans les années à venir se trouvent au niveau des **simulations** qui doivent pouvoir représenter le Groupe Local en détail dans son contexte cosmologique (simulations



contraintes), en prenant en compte les contraintes de la mission [Gaia/ESA](#). Par ailleurs, même si les données ne seront pas de même nature, une extension des méthodes de l'archéologie Galactique devrait avoir lieu au-delà du Groupe Local, connectant études galactiques et extragalactiques grâce à la mission [Euclid/ESA](#) en combinaison avec des observations de suivi multi-longueur d'ondes. Les spectrographes multi-objets joueront aussi un rôle dans cette nouvelle compréhension ([WEAVE](#), [MOONS](#), [4MOST](#), [PFS](#)). A plus long terme, la communauté commence déjà à se structurer autour d'une possible future mission "Large" de l'ESA du rapport Voyage 2050, "Galactic Ecosystem with Astrometry in the Near-infrared (un complément à Gaia dans l'infra-rouge proche est proposé avec [GaiaNIR](#)).

#### 1.4. Évolution des grandes structures et des populations de galaxies et au sein de la toile cosmique

Au cours de l'histoire de l'Univers, la toile cosmique se dessine progressivement. Les galaxies y évoluent, interagissent, s'agglutinent, fusionnent en son sein dans une interaction continue entre la physique des baryons et la distribution de la matière noire. Celle-ci impacte les grandes structures de l'Univers (filaments, vides, proto-amas, amas), et les propriétés des galaxies elles-mêmes dépendent de leur position dans la toile cosmique. Une cartographie 3D de l'Univers permet de retracer cette histoire et l'évolution des grandes structures sur une large gamme de redshifts et de masses stellaires. La détermination détaillée des propriétés des galaxies sera faite notamment grâce à la mission [Euclid/ESA](#), aux grands relevés spectroscopiques ([PFS/Subaru](#), [4MOST/VISTA](#), [WEAVE/WHT](#), [MOONS/VLT](#)) et, à l'avenir, avec un spectrographe multi-objets grand-champ dédié sur des télescopes de la classe des 10m ([WST/ESO](#), [MSE/CFHT](#)).

Un des défis majeurs dans le modèle d'évolution hiérarchique des halos de matière noire est de comprendre comment une partie de la population de galaxies massives cessent de former des étoiles pour devenir passives de manière précoce ( $z \gg 2$ ) et non tardive dans l'Univers. Un autre défi important pour comprendre la physique des baryons, en lien avec les études du **milieu intergalactique** (voir [Section 1.8](#)), est de détecter en émission ou en absorption le gaz dans ces très grandes structures de la toile cosmique. La phase chaude de ce gaz, dans les grands halos de matière, continuera à être caractérisée en rayons X grâce aux observations [XMM-Newton/ESA](#), ainsi qu'en et millimétrique via l'exploitation des données [Planck/ESA](#), [ACT](#), [SPT](#) ou encore [NIKA2/IRAM](#). En complément, les spectrographes multi-objets traceront la phase ionisée ([BlueMUSE/VLT](#)), [SKAO](#) donnera accès à la phase atomique et, [XRISM/JAXA](#) et [NewAthena/ESA](#) révéleront la complexité chimique de la phase chaude de ce milieu intergalactique.

L'interprétation de ces nouvelles observations nécessitera le développement de **simulations numériques** permettant une description, plus exhaustive et à toutes les échelles, des processus physiques à l'œuvre au sein de la phase diffuse (ionisée et neutre, à différentes températures) du milieu intergalactique. Les simulations Exascale à venir permettront de déterminer l'importance et le rôle de l'environnement aux grandes échelles sur l'évolution des galaxies. Par exemple, le code de simulation hydrodynamique à raffinement adaptatif de maillage (AMR) [Dyablo](#) est un code parallèle en développement qui pourra être déployé sur de nombreux cœurs dans des systèmes à mémoire distribuée et à mémoire partagée, bénéficiant également des dispositifs GPU. Aussi, ces simulations fourniront des prédictions cruciales, qui, comparées aux observations de galaxies et d'amas de galaxies, permettront de les utiliser comme sondes cosmologiques et de décrire l'impact des processus baryoniques non linéaires sur la mesure de la distribution de la **matière noire** (voir [Section 1.1](#)).

Aujourd'hui, les simulations de formation des galaxies, notamment avec le code [RAMSES](#), incluent différents processus comme la rétroaction stellaire des **supernovæ**, la rétroaction des **noyaux actifs de galaxies**, les **rayons cosmiques**, la **poussière** et le **champ magnétique** (voir [Sections 1.6, 2.1, 1.8](#) et [3.9](#)). Certains de ces processus sont **à l'interface avec la physique des hautes énergies et le milieu interstellaire** (voir [Sections 1.6](#) et [1.8](#)). L'influence, sur les grandes structures, des processus d'accrétion-éjection et des chocs représente un domaine de recherche essentiel, dont un des produits dérivés est une compréhension approfondie des effets de rétroaction et de leur impact sur l'évolution des propriétés des galaxies. Les preuves observationnelles directes des mécanismes de rétroaction restent néanmoins encore à trouver. Dans les années à venir, un travail approfondi couplant théorie et observations permettra de définir des diagnostics définitifs de ces rétroactions et de révéler enfin leur présence dans les observations à haute résolution spatiale et spectrale des nouveaux observatoires ([BlueMUSE/VLT](#), [HARMONI/VLT](#) à moyen terme, [NewAthena](#) à plus long terme).

#### 1.5. L'ère de réionisation et les populations primordiales d'étoiles et de galaxies

La sortie des âges sombres ( $z \sim 15-20$ ) est une des questions majeures de l'étude de l'évolution des galaxies aujourd'hui : quelles ont été les premières sources de photons ionisants dans des conditions physiques fondamentalement différentes de l'Univers actuel, en particulier en l'absence de métaux, et qui ont permis de passer d'un milieu neutre à un milieu ionisé. Cette période de réionisation se termine à  $z \sim 5$  pour l'hydrogène et  $z \sim 3$  pour l'hélium.

Aujourd'hui, à  $z > 5$ , les premières observations avec le télescope spatial **JWST/NASA** dévoilent un excès de galaxies massives/lumineuses, et de galaxies à disque par rapport aux prédictions (principalement basées sur notre connaissance de l'Univers à  $z < 5$ , combinées avec les incertitudes du contenu en poussière, de la métallicité, de la fraction d'échappement de Ly-alpha et LyC, de l'efficacité de la formation stellaire des galaxies et de la fragmentation du **milieu intergalactique** à  $z >> 5$ , voir **Section 1.8**). L'exploitation des données **JWST/NASA** et **ALMA** et **NOEMA/IRAM**, ainsi que le développement de nouveaux modèles, devraient nous permettre de résoudre cette tension. Ces études seront faites en synergie avec l'observation des lignes de visée des quasars, et avec les sursauts gamma détectés par **SVOM/CNSA**, utilisés comme sonde des composantes du gaz neutre du milieu interstellaire et de la poussière.

Dans le même temps, la découverte d'AGN à  $z > 6.3$  correspondant à des trous noirs supermassifs de  $10^{10} M_{\odot}$  n'est pas compatible avec les modèles basés sur l'accrétion de gaz sur des graines de trous noirs stellaires de masse inférieure à  $100 M_{\odot}$ . Cela remet en question l'hypothèse selon laquelle ils seraient nés d'une première génération d'étoiles dite de population III, car un milliard d'années est au moins nécessaire pour qu'elles se forment. Des scénarios alternatifs proposent que les trous noirs supermassifs se sont formés par l'effondrement direct de nuages de gaz ou la formation d'amas stellaires très denses, voire de façon primordiale en lien avec l'ère d'inflation. Un effort de modélisation et de simulation est nécessaire pour avancer dans ce domaine.

Les observations les plus récentes, interprétées avec nos modèles actuels, impliquent un excès de photons ionisants. Les instruments visible et proche-infrarouge à venir (**HARMONI/ELT** et **MOSAIC/ELT**) permettront d'étudier en détail les premières générations d'étoiles (popIII) et de galaxies ( $6 < z < 20$ , époque de la réionisation), et ainsi fait de caractériser les sources responsables de la réionisation de l'Univers. **MOSAIC/ELT** sera le seul MOS européen sur un télescope de 30m qui pourra obtenir la démographie des galaxies et AGNs de l'époque de réionisation. En complément, les instruments submillimétriques (**CONCERTO/APEX**, et dans le futur **CONCERTO2** et **CCAT-prime/FYST**) et radio (**LOFAR2.0**, **SKAO**) détecteront les galaxies primordiales grâce à leurs émissions en [CII], et à 21 cm, respectivement, en lien avec les études des **milieux interstellaire et intergalactique** (voir **Section 1.8**).

## 1.6. L'astrophysique multi-messagers

L'astrophysique multi-messagers combine tous les types de signaux astrophysiques, c'est-à-dire, les photons, ondes gravitationnelles, neutrinos, particules neutres et chargées. Ces messagers sont porteurs de multiples informations, intégrant les

interactions avec l'ensemble des structures et objets le long de leur propagation (les avant-plans) tout en fournissant de nouvelles connaissances sur l'objet astrophysique qui les produit. L'astrophysique multi-messagers concerne également l'étude des objets de l'héliosphère et de leurs interactions, à travers des mesures *in situ* simultanées de divers types (champs électriques et magnétiques, particules neutres et chargées, etc.).

C'est un domaine en plein essor grâce notamment aux progrès faits dans la détection de ces différents signaux. Les détecteurs d'ondes gravitationnelles actuels, tels que **LIGO-VIRGO-KAGRA (LVK)** et **PTA**, recherchent des fonds stochastiques **d'origine soit astrophysique soit cosmologique**. Cette recherche sera plus efficace avec l'avènement de la prochaine génération de détecteurs d'ondes gravitationnelles au sol (**Einstein Telescope**) et spatiaux (**LISA/ESA**) qui atteindront des sensibilités sans précédent et ouvriront de nouvelles fenêtres, aux fréquences allant du  $\mu\text{Hz}$  au Hz. Ces nouveaux détecteurs permettront notamment de contraindre, dans un même temps, la physique de l'Univers primordial (voir **Section 1.1**) et celle des trous noirs supermassifs, en lien avec les questions se posant sur l'ère de réionisation (voir **Section 1.5**). D'autres missions et instruments pour, ou utile à, l'astronomie multi-messagers sont en cours de développement (**CTAO**, **SKAO**, **KM3NeT**, **LSST**, **SOLAR-C/JAXA**, **HelioSwarm/NASA**, **GRAND**, **NewAthena/ESA**, **THESEUS/ESA**, etc.).

Cette discipline nécessite de nouvelles méthodes d'observation et d'analyse, des approches scientifiques complémentaires dans le cadre de riches collaborations aux interfaces. C'est la raison d'être du projet ACME (« Astrophysics Centre for Multi-messenger studies in Europe »), dirigé par le CNRS et financé par l'Europe (**HORIZON INFRA-SERV**) afin de permettre un accès plus large et simplifié aux meilleures infrastructures de recherche, à toutes les données et expertises dédiées. Les instruments concernés couvrent une fraction croissante du ciel, ou observent de manière répétée les mêmes zones du ciel. On retrouve à la fois des télescopes, des réseaux de télescopes ou des réseaux d'alertes dédiés au suivi (**ENGRAVE**, **GRANDMA**, **Colibri**, etc.), mais aussi les instruments qui génèrent ou généreront un grand nombre d'alertes (**LVK**, **HESS**, **Fermi**, **CTAO**, **SVOM/CNSA**, **KM3NeT**, **Rubin/LSST**, **ZTF**, etc.).

L'astrophysique multi-messagers est fortement liée à l'astrophysique des sources transitoires qui prend beaucoup d'ampleur avec le déploiement d'instruments dédiés à leur détection, qui reste difficile bien qu'importante, notamment dans le cadre du succès des observatoires d'ondes gravitationnelles, et dans une moindre mesure, de neutrinos. Les observations multi-messagers permettent, par exemple, et sans être exhaustif, d'étudier le processus de co-évolution entre un trou noir supermassif et sa galaxie hôte, de cerner les lois et mécanismes d'échelle entre trou noir stellaire et

trou noir supermassif, de sonder le couplage entre accrétion et éjection pour mieux appréhender l'évolution des systèmes binaires galactiques ou la croissance des galaxies (voir [Sections 1.4](#) et [2.3](#)), d'étudier l'impact des rayons cosmiques sur le milieu interstellaire (voir [Section 1.8](#)), de comprendre les étapes finales de l'évolution stellaire en étudiant les supernovæ, les sursauts radio rapides ou les sursauts gamma et les populations d'étoiles massives (voir [Section 3.9](#)), et enfin de comprendre le déclenchement impulsif des éruptions solaires et des orages géomagnétiques (voir [Sections 1.7](#) et [3.1](#)).

L'exemple type de sources transitoires concerne la fusion d'étoiles à neutrons, le lien établi avec les sursauts gamma courts, la production par processus  $r$  des noyaux atomiques lourds et la modélisation de la forme des ondes gravitationnelles. Ces études d'objets compacts fournissent également des tests de l'équation d'état de la matière dense (en lien avec la **physique nucléaire**) et des tests de la gravitation (voir [Section 1.2](#)). On insistera aussi sur les liens avec la physique des galaxies via le sondage des structures baryoniques présentes le long des lignes de visée des sursauts gamma ainsi que via les tests de modèles de **matière noire** par l'étude de leurs signatures (non-)observables ( $X$  et  $\gamma$ ), ou encore le flux de neutrinos ou de rayons cosmiques (voir [Section 1.1](#)).

### 1.7. Les processus énergétiques dans les plasmas astrophysiques

L'étude des plasmas est primordiale pour comprendre la dynamique de nombreux objets astrophysiques et leurs interactions. Les processus plasmas tels que les chocs, la dynamo, les mécanismes d'accrétion-éjection, les instabilités, la turbulence ou la reconnexion magnétique déterminent la dynamique des interactions, les échanges et conversions d'énergie et sont *in fine*, à l'origine de l'accélération des particules aux hautes énergies et leur transport, des émissions électromagnétiques les plus intenses et des phénomènes transitoires les plus énergétiques dans l'Univers. Les plasmas astrophysiques sont étudiés **dans un contexte cosmologique** avec la phase extrêmement chaude des baryons du milieu intra-amas (en spectroscopie X avec [XRISM/JAXA](#), et [NewAthena/ESA](#) à plus long terme, cf. [Section 1.4](#)) mais aussi **dans le contexte du Soleil, de l'héliosphère et des magnétosphères planétaires**, qui sont des laboratoires naturels accessibles par l'observation *in situ* (cf. [Section 3.1](#)). Dans ce domaine, l'avènement des missions multi-satellites avec des mesures d'une précision sans précédent a permis d'ouvrir une nouvelle ère dans la quantification des termes physiques à l'origine de l'accélération des particules et des instabilités plasma (gradients de pression, champs électriques, courants, etc.). Malgré cela, les questions liées à la dissipation de l'énergie aux plus petites échelles et

dans les plasmas peu collisionnels, ainsi qu'en termes de couplages d'échelles, restent mal comprises dans les plasmas héliosphériques. Ce sont les processus que l'on retrouve dans les phénomènes transitoires énergétiques tels que les flares et éjections de masse coronales au Soleil, et les "flux transfer events", sous-orages, courants ionosphériques et émissions aurorales à la magnétosphère terrestre. C'est l'étude de tels processus dans d'autres environnements qui fondent l'exploration pionnière des magnétosphères de Mercure ou des comètes (dominées par le forçage du vent solaire), de Jupiter (gouvernée par une rotation rapide et des interactions planète/satellite), de Ganymède (magnétosphère en régime sous-alfvénique) ou d'Uranus (magnétosphère asymétrique lointaine à rotation rapide). Pour les objets et milieux astrophysiques plus lointains, Galactiques et extragalactiques, la plupart des phénomènes transitoires mettent aussi en jeu des processus plasma tels que l'accrétion-éjection, le transport et d'accélération des particules, ainsi que des processus explosifs (supernovæ, GRB, etc.). Par ailleurs, de nouveaux signaux transitoires ont été découverts ces dernières années à différentes longueurs d'onde, comme les sursauts radio rapides, les éruptions quasi-périodiques et les événements de rupture par effet de marée. Ces signaux mettent à jour de nouveaux phénomènes astrophysiques que la communauté s'attache à étudier de façon à la fois théorique et observationnelle. Notre compréhension de ces phénomènes transitoires passe également par l'observation d'autres messagers comme les ondes gravitationnelles ou la détection de particules, tels les neutrinos qui apportent ainsi des informations complémentaires (voir [Section 1.6](#)).

Pour ces thématiques, trois missions sont en compétition dans l'appel M7 de l'ESA : [Plasma Observatory](#), qui étudiera les processus plasmas à partir de mesures multi-échelles ambitieuses ; [M-Matisse](#), qui permettra de comprendre l'influence du vent solaire sur l'atmosphère, l'ionosphère et la magnétosphère de Mars ; et [THESEUS](#), qui caractérisera les sources transitoires dans les domaines X et gamma. Par ailleurs, [HelioSwarm/NASA](#) (2029) étudiera la physique de la turbulence, un processus omniprésent dans l'Univers. Le réseau de missions héliosphériques et solaires actuelles ([Solar Orbiter/ESA](#), [Parker Solar Probe/NASA](#), [BepiColombo/ESA](#), et [SOLAR-C/JAXA](#) et [VIGIL/ESA](#) dans le futur) et les instruments sol ([THEMIS](#), [NRH](#), [NDA](#), [NenuFAR](#), [SuperDarn](#), et [EST](#) dans le futur) joueront aussi des rôles clé pour l'étude des phénomènes transitoires solaires et de leurs impacts sur Terre. En effet, un domaine en plein essor est la météorologie de l'espace, qui au-delà de ses impacts sociétaux importants, sous-tend des travaux de physique fondamentale concernant l'origine, la propagation et l'impact des structures solaires dans l'héliosphère. L'exploration d'une comète avec [Comet Interceptor](#) (2029), de Mercure avec [BepiColombo/ESA](#), de

Jupiter/Ganymède avec **JUICE/ESA** et à l'avenir d'Uranus permettra de compléter notre compréhension des mécanismes plasmas pour différents régimes dans le système solaire. Dans la galaxie, la détection d'émissions radio aurorales en provenance d'étoiles, de naines froides et de systèmes étoile-exoplanètes avec des radiotélescopes géants au sol ouvre la voie à l'étude comparée des exo-magnétosphères, avec **LOFAR 2.0**, la complétion de **NenuFAR** et bientôt **SKA**.

Les processus plasmas observés dans les transitoires et leurs aspects multi-messagers (voir **Section 1.6**) seront étudiés avec de nouveaux instruments de la mission **SVOM/CNSA** (accompagnée de ses télescopes au sol comme **Colibri**), des observatoires en cours de construction (**CTAO**, **SKAO**, **KM3NeT**, **LSST**, etc.), et des futures missions spatiales (**LISA/ESA**, **NewAthena/ESA**) et sol (comme **Einstein Telescope**, etc.).

## 1.8. Le milieu interstellaire dans le contexte Galactique et cosmologique

Le milieu interstellaire recouvre aussi bien des phases extrêmement diffuses (dans le milieu Galactique et intergalactique) que très denses (menant à la formation d'étoiles et de planètes). Sa physique est régie par une interaction complexe entre la gravité, la turbulence, les champs magnétiques, les rayons cosmiques et les processus thermodynamiques et chimiques. La poussière interstellaire s'y forme, participe à la chimie du milieu, et au rayonnement des galaxies dans l'infrarouge lointain. Le milieu interstellaire est indissociable de l'évolution des galaxies à grande échelle, via les mécanismes de rétroaction, et de la formation des étoiles et des systèmes planétaires à petite échelle.

Les nuages moléculaires se forment à partir de flots de gaz neutre et chaud qui entrent en collision et concentrent la matière dans des zones dont la localisation est dictée par la dynamique galactique ou les interactions avec les galaxies satellites. C'est ainsi que les structures galactiques telles que les barres, bras spiraux et queues de marée concentrent la plupart des étoiles et du gaz des galaxies, avec une corrélation spatiale étoiles-gaz cependant imparfaite. La combinaison de multiples chocs, en lien avec des études de **mécanique des fluides**, guidés par le champ magnétique et la gravité mènent à la formation de structures filamentaires qui se concentrent et forment, par instabilités gravo-turbulentes, les cœurs qui seront le réservoir de masse pour la formation des étoiles (voir aussi **Section 2.3**). Dans les régions qui forment des amas d'étoiles massives, les effets de rétroaction stellaire les plus efficaces pour disperser les nuages moléculaires sont associés au développement de régions d'hydrogène ionisé (régions HII).

Ce scénario a été établi grâce à des études traçant les nuages de gaz HI (chaud et froid), de gaz moléculaire, de gaz ionisé et de chocs, sur des

échelles de 10 kpc à 0.01 pc. Il a bénéficié de la confrontation d'observations avec les radiotélescopes **IRAM 30m** (notamment avec les caméras **NIKA2** et bientôt **NIKA3**), **APEX**, **Planck/ESA**, les observatoires spatiaux en infrarouge lointain **Herschel/ESA**, **SOFIA/NASA** et des **simulations numériques** AMR de bras Galactique et ses re-simulations (avec une physique plus complète à plus petite échelle), notamment avec le code **RAMSES**. L'exploration des phases ionisées et magnétisées avec **LOFAR** et **NenuFAR**, et de l'interaction des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire avec **CTAO**, donneront également à court terme de nouvelles contraintes sur la physique interstellaire Galactique. A noter le développement de grilles de modèles explorables en ligne hébergeant des résultats de simulations lourdes, de modèles de choc (bases de données **Galactica** et "**MIS et jets**"). Grâce à l'avènement d'observatoires à plus haute résolution angulaire, le milieu interstellaire des galaxies de l'amas local est étudié avec **NOEMA/IRAM**, **ALMA**, **LOFAR** et **JWST/NASA** et le sera bientôt avec **SKAO** et à plus long terme **PRIMA/NASA**, **FIRSST/NASA**, **HWO/NASA** et **NewAthena/ESA**. Pour ces galaxies, et encore davantage pour les galaxies plus lointaines, les observations sont incapables de résoudre les régions froides et neutres ou chaudes et ionisées individuellement. Des **modèles de poussière** particuliers et la modélisation de leur transfert radiatif, voire des modèles physico-chimique adaptés, sont alors nécessaires pour qualifier la distribution spectrale d'énergie du mélange de phases interstellaires observées dans un élément de résolution angulaire (voir aussi **Section 2.1**).

Il est tentant de considérer que le modèle gravo-turbulent MHD établi pour les nuages de la Voie Lactée est généralisable **aux galaxies externes, tant dans notre voisinage qu'aux échelles cosmologiques** (voir aussi **Section 1.4**). Mais l'environnement des galaxies, comme leurs interactions gravitationnelles, leur métallicité et les rayons cosmiques qui les traversent, pourrait quantitativement changer le couplage gravité-turbulence-champ magnétique observé dans la Voie Lactée. Il est notamment attendu que les flots de gaz soient moins bien couplés aux champs magnétiques dans les environnements de faible métallicité des nuages de Magellan, les galaxies naines et les galaxies primordiales. Une étude détaillée de la structure, la dynamique et la poussière (composition, polarisation) de ces galaxies, notamment avec **ALMA**, l'**ELT**, **SKAO** et **PRIMA/NASA**, devrait à terme permettre de répondre à cette question de généralisation. L'extrapolation semble encore plus risquée lorsqu'il s'agit d'utiliser les recettes du milieu Galactique pour le milieu intergalactique intra-amas.

## Axe 2 : Du milieu interstellaire aux systèmes stellaires et planétaires

### 2.1. La poussière : du milieu interstellaire au système solaire

Les grains de poussière interstellaires jouent un rôle clé dans l'évolution physique, chimique et dynamique du gaz depuis les **régions diffuses** jusqu'aux nuages de **formation d'étoiles et aux disques protoplanétaires** (voir **Sections 1.8, 2.3 et 2.4**). Des avancées récentes, fondées notamment sur des travaux en laboratoire, montrent que la composition de la poussière est beaucoup plus complexe que le modèle silicate/graphite souvent utilisé et qu'elle évolue rapidement en réponse aux conditions locales. Les principales questions sont liées aux caractéristiques des poussières (températures, tailles et compositions) dans les différents environnements interstellaires ainsi qu'à leur formation. Par exemple, un premier résultat sur le rôle potentiel des métaux dans la formation des poussières et des hydrocarbures dans les enveloppes d'étoiles carbonées ouvre de nombreuses perspectives. Aussi, le rôle des plus petits grains, les nanograins, reste assez peu connu, malgré son importance présumée dans le couplage avec le gaz dans certains environnements comme les régions photo-dominées (PDR) ou les disques protoplanétaires.

L'analyse des données du **JWST/NASA** joue actuellement un rôle central pour répondre à ces questions. La communauté est impliquée dans plusieurs programmes d'observation qui permettent de résoudre spatialement l'émission de la poussière, y compris dans des **galaxies externes** (voir **Section 1.8**), et donc de comprendre l'évolution de leurs caractéristiques avec l'environnement, notamment à faible métallicité. Elle a également été motrice dans l'analyse à grande échelle de l'émission polarisée des grains dans le sub-millimétrique avec l'analyse des données **Planck-HFI/ESA** et du ballon stratosphérique **PILOT/CNES**. Ces résultats ont permis de développer un nouveau modèle de grains, remettant en question le modèle classique. La polarisation à petite échelle, observée grâce à **ALMA** et **NIKA2/IRAM 30m** (et dans le futur **NIKA3/IRAM 30m**) dans les régions denses de notre Galaxie et plus particulièrement dans les cœurs protostellaires a permis de mettre en évidence une croissance très précoce des grains dans ces sources.

Par ailleurs, la détection de grains de poussière à partir d'instruments *in situ* dans le milieu interplanétaire de notre système solaire apporte des contraintes sur la dynamique de ces poussières. Dans l'héliosphère, les études récentes de leurs impacts sur les sondes spatiales (**Parker Solar Probe/NASA**, **Solar Orbiter/ESA**, etc.) ouvrent une nouvelle fenêtre d'observation sur une large gamme (nanomètre au micromètre), complétée par un travail de modélisation. Enfin, plusieurs concepts de

missions spatiales sont en cours d'étude (Etats-Unis, Chine) pour l'exploration *in situ* de l'héliosphère externe et du milieu interstellaire proche, avec des capacités de mesure très au-delà de celles des sondes *Voyager*. Ces mesures ouvriraient de nouveaux horizons sur la nature du milieu interstellaire proche et son interaction avec notre astrosphère (bulle magnétique de vents).

Depuis peu, les observations des disques protoplanétaires (voir **Sections 2.3-2.4**) fournissent le chaînon qui a longtemps manqué pour constituer un lien observationnel concret entre les poussières et les glaces observées dans le milieu interstellaire et celles que l'on imagine être à l'origine de la formation des planétésimaux du système solaire et de leurs vestiges les moins évolués actuels, les petits corps (astéroïdes, comètes, transneptuniens, centaures, etc.). Les observations et caractérisations des poussières de ces trois types de milieux/objets astrophysiques (MIS, disques, petits corps) se répondent et s'enrichissent mutuellement maintenant plus que jamais, grâce aux avancées obtenues via **ALMA** et le **JWST/NASA** tout particulièrement. La contribution scientifique française aux retours scientifiques des toutes dernières missions spatiales explorant des petits corps du système solaire (**Rosetta/ESA**, **Hayabusa 2/JAXA**) est également déterminante, grâce notamment aux analyses de poussières extraterrestres d'origine cométaire ou astéroïdale collectées (météorites, micro-météorites et poussières interplanétaires (IDP)) ou ramenées sur Terre. Ces **mesures en laboratoire** ou *in situ* via des instruments spatiaux, permettent une caractérisation chimique et minéralogique bien plus approfondie que les mesures spectroscopiques seules, et aident à faire évoluer les modèles de grains vers un niveau de réalisme plus pertinent. Elles ont permis également de montrer à quel point la structuration physique (porosité, degré et échelle de désordre/cristallinité) de cette poussière était spécifique et bien différente des matériaux terrestres naturels ou synthétisés. En retour, les travaux sur les grains interstellaires pointent depuis plusieurs années vers l'idée que l'hétérogénéité chimique et minéralogique de ces poussières devait se situer à l'échelle sub-micrométrique, voire nanométrique. C'est l'échelle sur laquelle une grande partie des efforts expérimentaux, **en lien avec des laboratoires de l'INC et des infrastructures de l'INP**, se sont concentrés ces dernières années afin de développer des protocoles et techniques d'analyse (par exemple, la microscopie à force atomique couplée à la spectroscopie infrarouge, ou la micro-tomographie à rayons X) qui permettent de sonder et caractériser cette matière extraterrestre au niveau de ses composants nanométriques.

Pour interpréter toutes ces mesures (obtenues via télescopes, instruments spatiaux et analyses de laboratoire), les **expériences de laboratoire** permettant soit de synthétiser des analogues aux phases solides extraterrestres (minéraux, glaces, matières carbonées, et leurs mélanges), soit de

reproduire des processus physico-chimiques qui les forment ou les affectent (différents types de rayonnements, physico-chimie de surface, chocs, etc.), sont un pilier incontournable. Comme pour les modélisations numériques, les simulations expérimentales ont besoin d'évoluer vers des niveaux de complexité et de réalisme qui nécessitent un fort investissement technique, une grande interdisciplinarité, et un dialogue étroit et permanent avec les résultats observationnels, théoriques et numériques.

## 2.2. Formation et évolution de la matière organique : ouverture vers l'exobiologie

Les environnements **interstellaires** et **protoplanétaires** (voir **Sections 1.8, 2.3** et **2.4**) présentent une large diversité chimique, avec plus de 300 molécules détectées, dont un tiers lors des cinq dernières années. L'identification de ces espèces et la détermination de leurs abondances reposent quasi-entièrement sur la spectroscopie millimétrique et dans une moindre mesure infrarouge (**ALMA, NOEMA/IRAM, IRAM-30m, Yebes, JWST/NASA, SOFIA/NASA**). Ces molécules peuvent évoluer sous l'action de collisions, inélastiques ou réactives, ou d'interaction avec des photons ou des **rayons cosmiques** (voir **Section 1.6**), conduisant à leur dissociation ou ionisation. Elles peuvent également se former à la surface des grains, notamment au sein des manteaux de glaces, pour être désorbées sous l'effet du rayonnement (X, UV) et des cosmiques.

Dans les régions de formation d'étoiles massives, de nombreuses molécules organiques complexes (COMs) sont observées. Par ailleurs, les observations de COMs dans les cœurs préstellaires froids, premières étapes du processus de formation des étoiles de faible masse, et dans les régions de choc (de flot protostellaire ou d'accrétion) soulèvent de nombreuses questions : quelle est l'influence de l'environnement externe sur la complexité moléculaire dans ces cœurs ? Quelle est l'intensité d'un choc qui permettrait de désorber les COMs des grains, tout aussi efficacement que le fait le rayonnement UV d'une protoétoile ? Ces récentes détections de COMs dans des milieux où la chimie standard en phase gazeuse et à la surface des grains n'expliquent pas les abondances observées, montrent la nécessité d'améliorer les modèles astrochimiques et le besoin de nouvelles données de laboratoire. Les efforts dans cette voie se développent autour de la spectroscopie de rotation (méthodes expérimentales permettent de caractériser les espèces pendant le chauffage ou l'irradiation des analogues de glaces interstellaires), de la synthèse chimique de différentes familles de molécules candidates, de la détermination des taux de collision de molécules et des produits de réaction à basse température, avec les rapports de branchement entre différentes voies de sortie. Ces efforts combinés, **effectués en collaboration étroite**

**avec des chimistes**, doivent permettre d'améliorer les modèles astrochimiques. Le couplage de ces modèles avec des **modèles MHD** d'évolution de la matière interstellaire et d'effondrement pour former des **protoétoiles et des disques protoplanétaires** (voir **Sections 2.3** et **2.4**) est un axe de développement majeur.

Tout comme pour les phases minérales, se pose la question du lien chimique direct ou indirect entre molécules organiques et matière carbonée observées dans les phases gaz et solides de différentes régions du milieu interstellaire et en particulier les nuages moléculaires denses, et celles constitutives des **petits corps du système solaire** ; comètes et transneptuniens en tête (voir **Section 2.5**). Ainsi, les **études physico-chimiques en laboratoire** montrent que des mélanges de glaces simples reproduisant celles prédominant dans le milieu interstellaire ou dans le système solaire externe ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_3OH$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ) peuvent générer une très grande diversité et complexité moléculaire et macromoléculaire lorsqu'elles sont soumises à des processus d'irradiation (UV, X), ou au bombardement par des électrons, ions ou rayons cosmiques.

Ces expériences sont combinées à l'analyse *in situ* des gaz et poussières de la comète 67P (**Rosetta**), aux observations à distance des comètes de différentes sortes, et à la détection toute récente d'une diversité chimique inattendue des surfaces de transneptuniens (**JWST/NASA**). L'ensemble de ces résultats suggèrent des différences, parfois subtiles, en termes de composition et d'abondances relatives qui poussent à affiner les scénarios de formation et d'évolution. L'objectif final est de mieux évaluer ce qui relève de l'héritage interstellaire, ce qui relève de processus se produisant très tôt dans le disque protoplanétaire (c'est-à-dire avant la formation des planétésimaux) et ce qui relève de processus secondaires (altération aqueuse, métamorphisme, chocs, altérations de surface, etc.) ayant affecté le corps parent et sa chimie. Ces derniers processus sont tout particulièrement connus et étudiés dans le cas des astéroïdes et des météorites (chondrites carbonées en particulier). Toutefois, la manière dont ils font évoluer chimiquement la matière organique constituant ces objets est loin d'être élucidée. Deux types d'obstacles (au moins) restent à franchir pour y arriver : d'un côté la nécessité d'une caractérisation chimique et structurale toujours plus complète et plus fine de cette matière sur un nombre d'objets aussi large que possible, et de l'autre, une meilleure compréhension des interactions physico-chimiques qu'elle a avec la matière minérale à laquelle elle est intimement mélangée. La difficulté de ces deux aspects est d'abord liée à la grande complexité et hétérogénéité chimique et structurale de cette matière organique. Sa composante macromoléculaire en particulier n'a pas d'équivalent naturel terrestre. Seules des **synthèses en laboratoire** permettent de s'en approcher en

reproduisant justement les processus astrophysiques précités.

Cette chimie du carbone est nécessaire mais non suffisante à l'apparition de la vie telle que nous la connaissons. Les résultats de toutes les observations astrophysiques faites à ce jour indiquent que cette chimie peut être riche et particulièrement complexe et que sur certains objets, le carbone et la matière organique y sont même bien plus abondants que dans la croûte terrestre. On ne peut alors s'empêcher de comparer cette chimie extraterrestre à la chimie du vivant pour tenter de comprendre si un apport exogène à la Terre primitive (via des bombardements de petits corps, voir [Section 2.5](#)) a pu aider à amorcer cette chimie organique terrestre. Ce type de questionnements se nourrit aussi de l'étude de la chimie du carbone et de la recherche de signatures organiques sur d'autres planètes ou satellites du système solaire qui ont une large diversité d'environnements et de conditions physiques, comme un gigantesque laboratoire à l'échelle du système solaire. Avec le développement des moyens de détection et de caractérisation des exoplanètes (voir [Section 3.5](#)) et de leurs atmosphères, ce laboratoire va pouvoir s'élargir encore, et permettra de tester jusqu'à quel point la chimie organique terrestre est unique (ou pas) et si oui, pourquoi elle l'est.

### 2.3. La formation des étoiles, des disques circumstellaires et protoplanétaires

Les processus physiques et les propriétés du milieu interstellaire qui permettent de transformer le gaz du milieu interstellaire en proto-étoiles puis en étoiles sont au cœur de l'étude de la formation stellaire et planétaire. Les propriétés de l'environnement des proto-étoiles et les interactions entre ses différentes composantes (enveloppe, disque, jet) via le processus d'accrétion-éjection ont un impact majeur sur les propriétés de l'étoile sur la séquence principale (sa masse, sa multiplicité, son moment angulaire, son champ magnétique, etc.), celles de son disque protoplanétaire et donc la formation des planètes.

Parmi les questions fondamentales de la formation stellaire, encore sans réponse aujourd'hui, se trouvent l'origine de la masse des étoiles, et son universalité, en lien avec la formation des nuages et des galaxies (voir [Sections 1.4](#) et [1.8](#)). Les études des proto-amas d'étoiles proches de notre Soleil, effectuées avec [Herschel/ESA](#) pendant la dernière décennie ont suggéré que la distribution de masse des étoiles (l'IMF dite canonique) était héritée de celle des cœurs, toutes deux ayant une forme universelle. Cependant, les études récentes menées avec les interféromètres submillimétriques ([ALMA](#) et [NOEMA/IRAM](#)) et les caméras grand-champ optiques et infrarouges ([CFHT](#) et [JWST/NASA](#), dans certains cas [SPHERE/VLT](#), et à l'avenir les caméras [MICADO/ELT](#) et [MORFEO/ELT](#)), sur des proto-amas plus massifs et amas stellaires jeunes et massifs (et

donc à des échelles de 100 000 à 100 UA) ont mis à mal cette idée d'universalité. Les distributions de masse des cœurs et des étoiles varient toutes deux, et dépendent en particulier du mode de formation de leurs nuages moléculaires parents qui est soit quasi-statique soit dynamique (sous forme d'un burst). Un effort de simulations numériques de ces proto-amas et de leur évolution en amas stellaire est nécessaire sur ce sujet.

Les propriétés des enveloppes protostellaires telles que la distribution de leur moment angulaire, la topologie et l'intensité du champ magnétique et leur couplage semblent quant à elles impacter la formation du disque circumstellaire qui deviendra disque protoplanétaire. Des études statistiques devront être menées, notamment avec les interféromètres [ALMA](#) et [NOEMA/IRAM](#), afin de mieux appréhender l'étude des disques circumstellaires et protoplanétaires en apportant des contraintes (aux échelles de 100 à 1 UA) sur leur structure, leur dynamique, leur composition chimique et le champ magnétique. Une question majeure porte sur la complexité chimique du milieu interstellaire et sa propagation dans le disque protoplanétaire jusqu'à la formation des planètes. Comme détaillé en [Section 2.2](#), cette question est abordée par le biais d'une approche pluridisciplinaire, associant [astrophysique de laboratoire](#) (réactivité et spectroscopie), y compris sur des échantillons prélevés *in situ* en lien avec les études du [système solaire](#), observations (identification et distribution des molécules) et [modélisation astrochimique](#) (prédictions et interprétation d'observations). L'obtention d'une vision globale de la formation des disques circumstellaires et protoplanétaires (formation des planétésimaux, composition chimique du gaz accrété par les planètes gazeuses) est permise grâce à des observations de l'UV jusqu'au domaine radio, par la conjonction de techniques observationnelles avec l'interférométrie ([GRAVITY](#) et [GRAVITY+VLT](#), [MATISSE/VLT](#), [ALMA](#) et à terme [ANDES/ELT](#)) et le couplage haute résolution angulaire / haute dynamique ([JWST/NASA](#), et à terme [METIS/ELT](#)), tout en s'appuyant sur des travaux de simulations, pour lesquelles une compréhension fine des processus microphysiques est indispensable, par exemple avec le code hydrodynamique [RAMSES](#).

### 2.4. Caractérisation et évolution des disques protoplanétaires

En dépit de la quantité et de la qualité de données observationnelles sur les systèmes planétaires, il est difficile d'avoir une théorie générale de la formation et l'évolution planétaires dans les disques protoplanétaires. Une raison est que les processus d'évolution planétaire agissent sur des échelles de temps très variées, de quelques millions d'années lorsque les planètes initient leur formation dans le disque protoplanétaire, à plusieurs milliards d'années dans la phase disque de débris. Une autre raison est

la diversité et la complexité des mécanismes physiques régissant la dynamique du gaz et de la poussière dans les disques circumstellaires, tels que la sédimentation, la migration et la fragmentation des grains et planétésimaux, l'accrétion de gaz, etc.

Grâce aux instruments du VLT comme **SPHERE**, **MATISSE** ou **GRAVITY** et aux interféromètres submillimétriques **ALMA** et **NOEMA/IRAM**, les observations de disques circumstellaires atteignent aujourd'hui une sensibilité et une résolution angulaire permettant de sonder les grandes propriétés physiques des disques comme leur taille et leur masse, de caractériser leurs mécanismes d'évolution (accrétion, vents, interaction avec l'étoile binaire compagnon) et aussi de résoudre l'émission de leur contenu en gaz et poussière y compris en planètes, d'accéder à la structure thermique et de détecter de nouvelles molécules dans les disques. Ces observations ont montré que l'émission des disques protoplanétaires, à la fois concernant les grains et le gaz, est très structurée : sont-elles dues à des planètes et, si oui, que nous apprennent-elles sur les premières étapes de la formation planétaire? Quels sont le processus régissant l'évolution des grains, de l'enveloppe protostellaire aux disques ? Quel est le rôle de l'accrétion de l'enveloppe sur le disque, notamment observée sous forme de « streamers » ? Depuis 2021, le domaine des disques connaît une évolution importante avec l'arrivée du **JWST/NASA**, qui donne accès aux bandes des glaces dans les régions externes et aux transitions des principales molécules en phase gazeuse dans les régions internes, révélant une grande diversité chimique. Ces observations appellent une **modélisation détaillée** de l'atmosphère irradiée des disques. Ces travaux s'appuient sur des simulations numériques hydrodynamiques, par exemple avec les codes **RAMSES** et **IDEFIX**.

Une meilleure synergie multi-longueur d'onde, tout en allant vers une vision statistique, sera la clé pour comprendre les disques dans leur globalité avec deux voies de développement, à savoir obtenir des diagnostics à la fois sur la phase gazeuse et solide (grains+glaces), et faire le lien entre les régions internes (< quelques UA; **JWST/NASA**, **VLT-CRILES+**, **VLT/IRIS**), et les régions externes (>50 UA; **ALMA**, **SPHERE/VLT**, spectro-imagerie **JWST/NASA**). Par ailleurs, on a aussi découvert qu'il existait une composante gazeuse qui subsiste bien après la dissipation du disque protoplanétaire, pendant la phase disque de débris, qui pourrait avoir une influence à long terme sur l'évolution des atmosphères des planètes.

Récemment, **TESS** a permis une percée dans la confirmation de la présence des exocomètes en résolvant des transits de ces dernières. Les observations interférométriques (e.g. **VLT/IRIS**, **LBT/IRIS**, **CHARA**) permettent aussi de sonder les exozodis, équivalent de la poussière zodiacale autour d'autres étoiles, qui pourraient gêner la détection directe d'exo-Terres dans le futur. Les modèles s'attachent à essayer de comprendre la formation et l'évolution de

ces exozodis mais de grandes difficultés demeurent pour le moment pour expliquer l'ensemble des observations. A plus long terme, l'**ELT** (en particulier **METIS**) puis la mission **PRIMA/NASA** et **SKAO**, permettront respectivement d'accéder à une excellente résolution spatiale et spectrale, à l'émission dans des régions intermédiaires, et aux poussières optiquement épaisses des disques.

## 2.5. La formation de notre système solaire et l'étude des petits corps

L'étude des petits corps du système solaire est inséparable de l'étude de la formation du système solaire. En effet, les petits corps restent les meilleurs témoins des premiers instants du système solaire, et l'étude de leur composition chimique et isotopique est essentielle pour notre compréhension et datation des différents processus qui se sont produits dans la nébuleuse proto-planétaire. Les méthodes d'analyse mises en œuvre sont variées, à commencer par des analyses physico-chimiques et minéralogiques d'échantillons collectés (météorites, micro-météorites et poussière interplanétaires) ou ramenés sur Terre par des missions de retour d'échantillon (**Stardust/NASA**, **Hayabusa 1 et 2/JAXA**, **Osiris-Rex/NASA**) et des mesures *in situ* par des instruments spatiaux (**Rosetta/ESA**, **New Horizons/NASA**) évoqués plus haut (voir **Sections 2.1 et 2.2**). En outre, l'observation à distance et la classification dynamique des différentes populations de petits corps (astéroïdes de la ceinture principale, comètes, transneptuniens, centaures, astéroïdes troyens, etc.) aident à déterminer quels objets sont des planétésimaux ou des produits de collisions, et à comprendre comment leur distribution en taille et en composition nous informe sur la formation du système et son évolution dynamique. Il faut souligner que l'étude de la formation planétaire nécessite également une meilleure connaissance des constituants des planètes telluriques et des processus de différenciation et l'évolution élémentaire et isotopique associée. Dans ce domaine la **coopération entre les domaines Terre-Solide et AA** est essentielle, tandis que les observations télescopiques restent indispensables pour caractériser l'immense diversité des objets de chaque classe. Enfin, les **simulations numériques, nourries de données expérimentales** sur la fragmentation des corps, le collage des particules, ou le vieillissement des analogues, confrontent théorie et observations pour construire un scénario auto-cohérent de formation du Système Solaire.

Depuis la formation du système solaire, l'architecture et les populations des petits corps ont évolué séculairement sous l'influence de nombreux effets physiques non-linéaires : gravitation, effets de marée, pression de radiation, impacts et fragmentation, sublimation et dégazage, etc. Dans ce cadre, les questions qui se posent sont celles des liens dynamiques entre les différentes populations d'objets, de l'origine des familles d'astéroïdes



au-delà de  $10^9$  années, de la magnitude et de l'évolution séculaire du flux d'impacteurs. Déterminer ces dernières variables est nécessaire à la datation et la compréhension de l'évolution des surfaces planétaires, et permet d'évaluer le flux de matière organique et l'évolution de l'habitabilité des objets. Les grands relevés spatiaux ou sol jouent un rôle crucial pour établir les propriétés dynamiques, physiques, et compositionnelles d'un grand échantillon d'objets. Ces études s'appuient également sur les **simulations numériques N-corps**, permettant de paramétrer un grand nombre d'autres processus physiques non-gravitationnels, intégrés sur l'échelle de temps du système solaire. Enfin, l'étude des objets s'intéresse à la **physico-chimie** des objets eux-mêmes pour comprendre leur formation et leur évolution. Il est ainsi important de comprendre la réponse des petits corps aux impacts, à la fatigue thermique, aux marées, **au vent et rayonnement solaires**, aux radiations galactiques, à la sublimation, condensation et dégazage (voir **Sections 2.1, 2.2 et 3.1**). Les systèmes multiples peuvent évoluer différemment en raison de leurs interactions mutuelles. Il est donc important de déterminer la fraction et l'incidence des systèmes multiples dans toutes les populations, comment leur densité et leur structure internes nous renseignent sur le lieu et l'époque d'accrétion des populations, et quels sont leurs processus de formation et d'évolution. Par ailleurs, l'étude des petits corps bénéficie de nos jours d'observations combinées à différentes échelles : l'échelle de l'objet lui-même (du  $\sim$ km à quelques centaines de km) via les observations télescopiques, l'échelle allant du mètre à parfois le centimètre, voire la dizaine de microns, via des instruments de mesure *in situ*, et l'échelle micrométrique et nanométrique grâce aux **analyses en laboratoire d'échantillons** collectés ou ramenés sur Terre. Il s'agit là d'un véritable atout pour mieux comprendre la structuration de la matière à toutes les échelles (de 100 km au micron) et de modéliser de manière plus complète la formation et l'évolution de ces objets.

### **Axe 3 : Caractérisation et évolution des systèmes stellaires et planétaires**

#### **3.1. Le soleil, son activité éruptive, son déploiement dans l'héliosphère**

La proximité et la variabilité rapide de notre étoile permettent de l'étudier de façon détaillée, et nécessitent de l'observer dans un mode de surveillance, de façon plus ou moins similaire à ce qui se fait pour l'étude de la Terre. Les champs magnétiques issus de l'émergence des couches profondes du Soleil se déploient au niveau de la couronne solaire, sous la forme de protubérances et de grandes boucles. Ces champs magnétiques

coronaux produisent tous les phénomènes énergétiques de l'activité solaire. Parmi eux, les flares et les éjections de masse coronales (CME) sont les événements principaux liés à la **météorologie de l'espace**. Aussi, le chauffage de la couronne conduit à l'expansion de l'atmosphère du Soleil dans tout le milieu interplanétaire, sous la forme d'un vent solaire dynamique qui structure toute l'héliosphère. Le déploiement du vent solaire est également étudié jusque dans l'héliosphère externe, avec de nombreuses questions ouvertes concernant l'interaction avec le **milieu interstellaire** local, le rôle de la reconnexion et de la turbulence, les propriétés du choc terminal, et son lien avec la présence d'une population ionique nouvelle qui semble primordiale dans les équilibres de pression. Plusieurs concepts de mission sont actuellement étudiés dans divers pays afin d'étudier les confins de notre héliosphère. Au Soleil, la dynamique du champ magnétique engendre une pléthore de phénomènes actifs moins spectaculaires (jets coronaux, les spicules chromosphériques, les boucles thermiquement cycliques, les « streamers et pseudo-streamers »...). Toutes ces manifestations en apparence secondaires de l'activité solaire sont, comme en météorologie atmosphérique terrestre où il existe bien d'autres phénomènes que les ouragans majeurs, tout aussi importants que les phénomènes principaux. En effet, leur compréhension permet de mieux cerner les processus physiques que le Soleil met à l'œuvre à plus grande échelle. Par exemple, selon certaines idées récentes, les *switchbacks* (c'est-à-dire structures de champ magnétique en lacet), que **Parker Solar Probe/NASA** a découvert comme occupant tout le vent solaire en dessous de 0.7 UA, auraient pour source les petits jets coronaux. Leurs liens possibles avec la granulation et/ou la supergranulation solaire sont activement étudiés. On peut également dire qu'à ce jour plus personne ne pose la simple question de résoudre le chauffage de la couronne solaire. Les vraies questions qui se posent sont du type : comment caractériser le rôle des chocs et de la reconnexion magnétique pour chauffer la chromosphère, quel est le rôle de l'instabilité thermique dans le cycle des boucles coronales, quelles sont les sources du vent solaire ou encore quelle est la nature de la cascade turbulente dans le vent solaire ? La poursuite des travaux sur les événements éruptifs à petite échelle permettra de tester l'hypothèse d'Eugene Parker selon laquelle la reconnexion magnétique serait à l'origine du chauffage des couronnes d'étoiles de type solaire, et pourrait aussi être un contributeur majeur du chauffage de la chromosphère solaire à l'interface entre l'intérieur solaire et sa couronne. La combinaison des observations des nouvelles missions (**Solar Orbiter/ESA**, permettant par exemple l'accès à des événements éruptifs les plus localisés jamais observés grâce à une résolution spatiale inédite de 100 km par pixel dans l'extrême ultraviolet, **Parker Solar Probe/NASA**, qui va explorer l'atmosphère de notre étoile à moins de 10

rayons solaires, et à plus long terme **VIGIL/ESA**, portant sur la surveillance des CMEs) avec un réseau de missions en vol depuis de nombreuses années comme **WIND/NASA**, **SoHO/ESA-NASA**, **STEREO/NASA**, **SDO/NASA**, et des instruments au sol comme **THEMIS** et le **NRH**, a permis de développer les analyses multipoints et multi-longueurs d'onde des événements éruptifs solaires. Le couplage avec des simulations numériques 3D (par exemple la toute première description auto-cohérente du déclenchement d'une CME rapide, enjeu majeur de la météorologie de l'espace) permet d'apporter des contraintes fortes sur le déclenchement et la propagation de ces événements. Ces questions coronales et chromosphériques s'inscrivent respectivement dans le contexte des projets **SOLAR-C/JAXA** et **EST (European Solar Telescope)**. La communauté travaille aussi au développement de plusieurs grands codes ayant vocation à devenir communautaire, notamment **Dyablo** et **PHARE**.

### 3.2. Les étoiles : leur structure et leur évolution

Au cours des dernières années, l'étude de la structure et de l'évolution des étoiles a connu des évolutions importantes et a donné lieu à des résultats de premier plan qui ont été portés par de nouveaux instruments structurants. Parmi les questions centrales, deux se dégagent pour la prochaine période. La première : comment les processus dynamiques et leurs interactions (ondes, turbulence, champ magnétique, etc.) influencent et façonnent la rotation et la composition chimique des étoiles ? En effet, notre mauvaise compréhension des processus magnéto-hydrodynamiques dans les régions avec une stratification stable constitue actuellement une pierre d'achoppement qui sera sans aucun doute au centre des préoccupations de la communauté française dans les années à venir. Dans ce contexte, l'étude du **Soleil** peut apporter un point de référence, avec le sondage de son cœur et notamment la recherche des modes de gravité. La seconde question : comment prédire les paramètres fondamentaux des étoiles (et l'âge en particulier) de façon précise et exacte ?

Des progrès considérables ont été faits mais les défis restent importants tant du point de vue de la **modélisation des processus dynamiques** discutés ci-dessus que du point de vue observationnel. Sur ce dernier aspect, la prochaine période verra l'émergence de la mise en synergies de différentes techniques (photométrie de haute précision, spectroscopie, interférométrie et astrométrie). Cela ouvrira par exemple des perspectives sans précédent sur notre capacité à reconstruire l'histoire dynamique et chimique des étoiles de notre Galaxie (voir **Section 1.3**). L'arrivée prochaine des données issues de la mission **PLATO/ESA** couplées aux publications de données **Gaia/ESA**, aux grands relevés spectroscopiques (par ex. **WEAVE**, **4MOST**),

ainsi qu'aux relevés d'interférométrie (par ex. **SPICA/CHARA**) et l'ELT avec **ANDES** promet un bond à la fois quantitatif et qualitatif sur notre connaissance des intérieurs et atmosphères stellaires. Les interprétations de ces données s'appuieront sur des **simulations numériques** (par exemple **Cesam2k20**) et des **expériences en laboratoire**. Cette perspective guidera une grande partie de la communauté à l'horizon d'une dizaine d'années et nécessitera en amont et aval des développements théoriques et numériques importants. Au-delà de cet exemple, l'étude de la structure et de l'évolution des étoiles est une thématique qui est très transverse avec des questionnements sur les vents stellaires et la perte de masse qui pointent vers les stades ultimes de l'évolution (**Section 3.9**). Cette thématique est également à l'interface de l'**exo-planétologie** avec des questions qui prendront de l'ampleur dans la prochaine période (voir **Section 3.5**).

### 3.3 Les populations stellaires de la Voie Lactée

Les étoiles sont au carrefour des processus physiques baryoniques à toutes les échelles. Elles jouent un rôle fondamental dans l'**évolution des galaxies**, par le biais du cycle gaz-étoile-gaz, de la rétroaction stellaire, de la production de poussières et des interactions dynamiques (voir **Sections 1.3, 1.4, et 1.8**). Les populations stellaires galactiques présentent une diversité que nous commençons à peine à dévoiler. Cette diversité stellaire est un produit direct de l'évolution des baryons dans différentes conditions, imposant des contraintes cruciales aux modèles.

Les  $\sim 10^{11}$  étoiles de la Voie lactée, notre propre écosystème stellaire, couvrent un immense espace de paramètres largement inconnu. Moins de 0,005% des étoiles Galactiques ont des paramètres physico-chimiques établis (avec différents degrés de précision). Par conséquent, de nombreux objets astrophysiques clés échappent à notre connaissance et donc à nos théories, ou bien sont trop rares pour fournir des contraintes suffisantes aux modèles. Les efforts de paramétrisation et caractérisation des étoiles réalisés par les différents relevés (spectroscopiques, photométriques, astérosismologiques et interférométriques) au sol ou dans l'espace permettent d'appréhender cette complexité et d'ancrer nos **modèles** à des observables de plus en plus précises.

En particulier, l'étude des populations stellaires fournit des contraintes aux processus astrophysiques dans un espace à cinq dimensions : 1) la masse, allant de l'étude des naines de type M aux étoiles massives, les trous noirs stellaires et les contraintes sur l'IMF (voir **Section 2.3**) ; 2) la luminosité, nécessitant des estimations précises de distance ; 3) la composition chimique, incluant les éléments lourds et l'étude de leur nucléosynthèse ; 4) l'âge, qui repose sur les progrès des modèles d'évolution

stellaire et 5) l'environnement galactique (e.g. bras spiraux, amas stellaires, halo galactique, etc., voir **Sections 1.3 et 1.8**).

Dans ce contexte, les données astrométriques, photométriques et spectroscopiques de la mission spatiale **Gaia/ESA**, offrent des contraintes précises d'une grande robustesse statistique. La mission Gaia arrive à maturité avec les prochaines publications de données en 2026 et 2032, correspondant à 5 et 10 ans d'observations respectivement. La synergie de cette mission avec les relevés **WEAVE** et **4MOST**, mais aussi avec la prochaine mission spatiale **PLATO/ESA** sera fondamentale dans les années à venir.

Enfin, l'étude des populations stellaires de la Voie Lactée et de ses satellites offre des informations cruciales pour les études d'archéologie galactique (voir **Section 1.3**). Les amas globulaires du halo stellaire constituent ainsi notamment des fossiles vivants des phases précoces de formation des étoiles et des structures, mais l'origine de ces systèmes stellaires omniprésents dans notre Voie Lactée comme dans les galaxies extérieures reste encore totalement inconnue.

De plus, et de façon générale, la compréhension des propriétés stellaires doit être mise en relation avec l'étude du milieu interstellaire et de la formation stellaire (voir **Sections 1.8 et 2.3**). En particulier, la cartographie de l'absorption interstellaire par la **poussière** et les **molécules plus complexes** responsables des bandes d'absorption interstellaire sont liées d'un point de vue observationnel et méthodologique (voir **Sections 2.1 et 2.2**). L'étude simultanée des populations stellaires et de cœurs dans le milieu interstellaire est également nécessaire afin de mieux comprendre leurs interactions.

### **3.4 L'origine du magnétisme solaire et stellaire**

Les champs magnétiques sont présents sur l'ensemble du diagramme HR, et la communauté s'intéresse au magnétisme produit par les mécanismes dynamo, tant pour le Soleil que des étoiles de type solaire, mais également aux champs magnétiques fossiles présents dans certains types d'étoiles. Plusieurs modèles de dynamo ont été proposés, et le lieu d'amplification du champ magnétique du Soleil et des étoiles de type solaire, dans la tachocline ou de manière plus distribuée dans la zone convective, reste encore à identifier.

Dans le cas solaire, il est possible de mener des études permettant d'aborder des processus à une échelle très fine, par exemple pour comprendre la magnéto-chronologie de la dynamo, son couplage avec la rotation, la façon dont sont couplés ou non les deux hémisphères, ou bien les processus impactant l'émergence du flux magnétique. La compréhension de son cycle magnétique impacte naturellement l'étude des **phénomènes éruptifs** et **la météorologie de l'espace** détaillées en **Sections 3.1 et 3.8**.

Au-delà du Soleil, qui constitue également un point de référence pour l'étude du magnétisme stellaire du fait de sa proximité, il est crucial de comprendre l'origine du magnétisme stellaire en fonction des paramètres stellaires, en étudiant ses propriétés (topologie, évolution temporelle, cycles, etc.) et son impact (rotation, rotation différentielle) dans les zones radiatives et convectives des étoiles pour différents types spectraux. Outre l'activité photosphérique et chromosphérique, qui présente aussi un intérêt pour l'étude des **exoplanètes** (voir **Sections 3.5 et 3.6**), le champ magnétique dans les intérieurs stellaires devient également accessible aux observations et simulations numériques, et il sera donc possible d'interroger l'origine et l'évolution de ces champs magnétiques mais également leurs impacts sur la structure et la dynamique interne des étoiles. Ces travaux s'appuient d'une part sur des **simulations numériques MHD lourdes** (3D, globale), avec une très forte expertise de la communauté **solaire et stellaire**, et d'autre part sur les observations spectroscopiques et surtout spectropolarimétriques (**SDO**, **SPIRou**, **ESPaDOnS**, **NeoNarval**, **NIRPS**, bientôt **SPIP**) associées à l'hélio- et astérosismologie, et qui apportent des contraintes fortes. Les résultats récents en radio (avec **LOFAR** et les perspectives **NenuFAR** et **SKAO**) couplés à la spectropolarimétrie et photométrie de précision (dans la perspective **PLATO/ESA**) ouvrent en outre des perspectives très prometteuses pour la détection de phénomènes éruptifs stellaires, mais aussi potentiellement pour la recherche de signature des champs magnétiques d'exoplanètes.

### **3.5 Les exoplanètes : populations et caractérisation des atmosphères**

Sur ces cinq dernières années, plus de 1100 exoplanètes ont été découvertes et confirmées, amenant un total de plus de 5600 objets. Ces mises à jour permettent de multiplier les études statistiques, examinant les caractéristiques globales de ces systèmes. Les deux dernières décennies nous ont montré l'existence d'une grande variété des systèmes planétaires, la découverte et la caractérisation de systèmes particuliers restent des enjeux majeurs, les études de systèmes particuliers et de population se répondant afin de contraindre des études théoriques.

Les recherches en cours se penchent en particulier sur les points suivants : quels sont les processus qui façonnent le « radius gap », le déficit de planètes ayant un rayon entre 1.5 et 2 fois le rayon de la Terre ? Quels mécanismes gouvernent l'architecture des systèmes planétaires (peas in the pod, dépendance à la masse de l'étoile, multiplicité et âge de l'étoile, environnement) ? Quelle est la multiplicité des exoplanètes et la fréquence des exo-lunes ? Quelle est la fréquence des planètes rocheuses dans la Zone Habitable autour d'étoiles M, K et G, ainsi que

la statistique des populations des planètes à longue période ?

De plus, il est essentiel d'identifier les exoplanètes de notre voisinage immédiat (grâce aux relevés en vitesse radiale **SPIRou** et **SOPHIE**, en photométrie **TESS** et bientôt **PLATO/ESA**, ou en astrométrie avec **Gaia/ESA**) car c'est parmi celles-ci que l'on va sélectionner les meilleures cibles pour la caractérisation de leurs atmosphères avec les instruments des télescopes **JWST/NASA** et les **ELT** (particulièrement avec **ANDES** et **PCS**). En effet, la connaissance seule de la masse et du rayon d'une planète ne suffit pas à contraindre sa structure interne, son évolution individuelle ou même la présence d'une atmosphère pour les planètes telluriques. Les études sur la caractérisation physique et chimique des atmosphères ont ainsi connu un réel essor comme moyen de lever des dégénérescences. Observationnellement, la communauté s'est concentrée sur trois angles principaux : la spectroscopie basse résolution spatiale combiné à l'imagerie directe ou à l'astrométrie depuis l'espace (**JWST/NASA**) ou le sol (**GRAVITY** et **GRAVITY+VLT**, **SPHERE** et **SPHERE+VLT**), la spectroscopie haute résolution au sol (**SPIRou**, **HiRise**) et l'étude des courbes de phase en photométrie (**CHEOPS**). Ces observations ont permis d'identifier un nombre grandissant d'espèces moléculaires et atomiques dans les atmosphères de planètes géantes, permettant d'étudier une large gamme de processus physico-chimiques (la photochimie avec la détection de SO<sub>2</sub>, l'échappement avec la détection d'hélium, etc.). Ces observations ont également permis d'étudier plus largement la climatologie des exoplanètes (mesures de vents, redistribution de chaleur, structure verticale de la température, brumes et nuages, etc.).

En termes de modélisation, une hiérarchie d'approches a été employée allant de **modèles atmosphériques 1D jusqu'aux modèles de climats 3D** (GCM), avec d'importants efforts pour rendre ces modèles de plus en plus réalistes, et capables de simuler une gamme de plus en plus large d'exoplanètes (des telluriques froides aux Jupiters ultra-chauds). La communauté a également développé des outils pour connecter ces modèles au plus près des observations. L'étude des effets 3D et de la variabilité temporelle dans les atmosphères (par la modélisation et les observations) apparaissent comme des pistes prometteuses de recherche sur les prochaines années. Par ailleurs, les instruments de plus en plus performants (le **JWST/NASA** en tête d'affiche, et à terme **ARIEL/ESA** ainsi que **Life/NASA** et **HWO/NASA**, tous dédiés à cette thématique qui permettra une analyse statistique) nous permettent de réaliser la caractérisation physico-chimique de planètes de plus en plus petites et froides. Les super-Terres/mini-Neptunes apparaissent ainsi comme une population d'étude clé dans les prochaines années.

### 3.6 Les exoplanètes et leur étoile hôte

L'étude des exoplanètes dans le contexte des propriétés des étoiles hôtes recouvre deux approches distinctes à l'interface entre la **physique stellaire** et les **exoplanètes** (voir **Sections 3.3** et **3.4**) : d'une part la question des interactions physiques entre étoile et planète, et d'autre part l'impact des propriétés de l'étoile, en général la variabilité, sur les performances de détection et de caractérisation des exoplanètes.

Tout d'abord, les étoiles jouent un rôle déterminant dans la formation des planètes, influençant leur masse, leur orbite et leur composition. Les interactions radiatives, gravitationnelles, et magnétiques entre une étoile et ses planètes peuvent induire des phénomènes tels que la migration planétaire, la résonance orbitale, l'éjection de planètes du système, et peuvent même parfois induire une activité stellaire accrue. De plus, ces interactions jouent un rôle également important pour la structuration, la dynamique et la rétention des atmosphères exoplanétaires. Comprendre les processus qui impactent les propriétés orbitales ou atmosphériques est donc crucial pour modéliser l'évolution et la stabilité des systèmes planétaires, et ainsi comprendre leur formation et leur évolution.

D'un autre côté, dans un contexte où nous poussons les limites vers la détection de planètes de plus en plus petites et à longue période, les observations des exoplanètes par les méthodes indirectes (transits, vitesses radiales) se trouvent entravées par la variabilité intrinsèque des étoiles. Comprendre l'impact de cette variabilité stellaire, qui résulte de phénomènes tels que les taches stellaires, la convection, ou les pulsations, introduit un bruit significatif dans les observations qui peut mimer ou masquer les signatures d'exoplanètes, et qui complique également la caractérisation des exoplanètes, tant pour la mesure précise de leurs paramètres (masse et rayon), et de la caractérisation de leur atmosphère. Les études de l'impact de l'activité stellaire sur la caractérisation d'exoplanètes et de leurs atmosphères vont s'intensifier avec l'arrivée des missions spatiales dédiées aux exoplanètes de l'ESA.

Les **simulations numériques** et les observations vont être massivement utilisées pour ces études. L'utilisation conjointe de moyens sol (spectroscopiques et spectropolarimétriques, tel que **SPIRou**, **SPiP** ou **SOPHIE**) et espace (photométriques, avec **CHEOPS**, **TESS**, et **PLATO**, et spectroscopiques pour la caractérisation des atmosphères, avec **JWST/NASA** et **ARIEL**) sera employée afin d'obtenir des observations en simultané ou de suivi.

### 3.7 Les planètes du système solaire et les systèmes anneaux-satellites- magnétosphère

L'étude des surfaces planétaires, **en lien avec les domaines ST et OA de l'INSU**, recèlent de

nombreuses informations sur les premiers âges du système solaire. Elle nous permet de comprendre la formation des objets telluriques du système solaire et leur différenciation entre croûte, manteau et noyau. Les quatre objets telluriques, Mercure, Vénus, Lune et Mars, sont des cibles prioritaires pour les missions **BepiColombo/ESA** et **Envision/ESA, MMX/JAXA** et les sondes **Chang'e/CNSA**, avec comme principal objectif la datation des processus. Parmi les questions majeures : à quelle époque se sont arrêtés les volcanismes sur Mercure, Vénus, la Lune et Mars ? Quel est l'âge des hauts plateaux lunaires, vestiges de la première croûte, et leur équivalents herméens ? Quelle fut l'histoire de l'eau et de son interaction avec la surface sur Vénus et Mars ? Les questions sur les dynamos anciennes, qui ont dû, avec l'histoire de l'eau, jouer un rôle majeur dans l'évolution des atmosphères des planètes telluriques, restent également ouvertes. Les retours d'échantillons de **MMX/JAXA** et **Chang'e/CNSA** et leur **analyse en laboratoire** apporteront dans le futur de nouvelles contraintes.

Dans le système solaire externe, ce sont les systèmes planète-satellites-anneaux-magnétosphère qui sont étudiés dans leur ensemble (en lien avec la **Section 3.1** et le **domaine OA de l'INSU**). En effet, les couplages, gravitationnels, magnétiques, radiatifs, et de matière, entre chacune des parties des systèmes jouent un rôle majeur dans l'évolution individuelle et collective de ces objets. Deux missions, **JUICE/ESA** et **Europa Clipper/NASA**, étudieront simultanément le système jovien, avec une emphase sur Ganymède et Europe respectivement, tandis que la CNSA envisage une mission vers Callisto. L'exploration du système kronien n'est pas en reste puisque la mission **DragonFly/NASA**, explorera atmosphère et surface de Titan, tandis qu'une mission vers Encelade est à l'étude à la NASA et l'ESA. Les données de navigation de ces missions, comme les données **Gaia/ESA** pour des centaines de milliers de petits corps, seront utilisées pour affiner les éphémérides planétaires, apportant ainsi de nouvelles connaissances sur la dynamique du système solaire et la structure interne des objets concernés.

L'étude de l'habitabilité des objets du système solaire continue d'être une motivation de premier plan dans leur étude. Il s'agit en particulier de comprendre quelle fut l'histoire hydrologique de Mars (paléo-océan, pluie/neige, rivière) et de savoir si Vénus eut un jour des océans et comment a évolué son atmosphère, mais également d'étudier les caractéristiques des océans internes dans les satellites glacés et leur couplage avec le noyau et la surface. Il s'agit aussi d'étudier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, et d'y rechercher les traces de complexification moléculaire et d'éventuelles biosignatures (voir **Section 2.2**). Les missions d'exploration *in situ* et l'analyse d'échantillons avec des **expériences de laboratoire** dédiées jouent ici un rôle essentiel. Les missions d'exploration des systèmes de planètes géantes

joueront également un rôle essentiel pour l'étude des océans et de l'habitabilité des satellites glacés, en lien avec les études des atmosphères des exoplanètes (voir **Section 3.5**).

### **3.8 Couplages Terre - Magnétosphère - Ionosphère et météorologie de l'espace**

Parmi les planètes du système solaire, la planète Terre reste l'objet le plus accessible, le plus observé et ainsi le plus étudié sur le long terme (ce dernier point est critique en vue d'une surveillance continue, de type « climatique »). La **géodésie spatiale** contribue à la réalisation des référentiels célestes, mais aussi du référentiel terrestre, dont la précision et la fiabilité sont essentielles, par exemple, pour le suivi de l'élévation du niveau de la mer, la cible des prochaines années étant d'atteindre le millimètre d'incertitude. La géodésie spatiale via notamment le suivi continu et ultra-précis de la rotation de la planète Terre donne aussi accès à des signaux liés à la **géophysique interne** ou aux **enveloppes fluides de la Terre, en lien avec les domaines ST et OA de l'INSU**. Le développement de senseurs quantiques et de réseaux les reliant apporte de nouvelles perspectives de mesures géophysiques, au sol et depuis l'espace.

La planète Terre reste aussi l'objet le plus étudié pour comprendre l'impact du vent solaire et de ses perturbations dans l'héliosphère (voir **Section 3.1**). La dynamique de la magnétosphère terrestre, ses ceintures de radiation, et les enveloppes ionisées de la Terre (ionosphère, thermosphère, etc.) restent un sujet majeur d'étude avec de nombreuses questions fondamentales non-résolues. De nombreuses missions spatiales (par ex. **SWARM/ESA, Cluster/ESA, MMS/NASA, HelioSwarm/NASA**) et observatoires au sol (**SuperDARN**, ionosondes, magnétomètres, etc.) lui sont dédiés. Notre compréhension reste très parcellaire, en particulier concernant le rôle relatif des différents processus plasmas à l'œuvre dans ces environnements (chocs, reconnexion magnétique, turbulence, transports, instabilités, interaction ondes-particules, etc.), et leurs couplages dans le système complexe Terre-Magnétosphère-Ionosphère.

Au-delà des questions de **physique fondamentale** liées à cette thématique, un domaine d'activité en plein essor est la **météorologie de l'espace**, qui consiste en la capacité à prédire les impacts de l'activité solaire sur Terre et sur les activités humaines. Les outils d'investigation dans ce domaine sont nombreux, et vont du couplage de codes numériques (du Soleil jusqu'aux ceintures de radiation et l'ionosphère) à la mise en place de systèmes d'observations spatiaux et terrestres (missions dédiées du **Space Safety Program de l'ESA**, instrumentation en « piggy-back » sur des satellites commerciaux, et instrumentation sol solaire ou ionosphérique). Notre compréhension des interactions à la planète Terre reste très partielle, impliquant évidemment que la compréhension de

ces interactions aux autres planètes est encore bien plus incomplète (présence d'orages et sous-orages magnétosphériques, évaporation et érosion atmosphérique, etc.). Un domaine émergent, en conséquence, concerne l'étude des interactions vent stellaire-**exoplanètes** (voir [Section 3.6](#)), qui nécessite des développements dédiés à mieux définir.

### 3.9 La fin de vie des étoiles : supernovæ et objets compacts

La question des stades ultimes de l'évolution stellaire, **en lien avec les processus de hautes énergies** (voir [Section 1.6](#)), aura également vocation à continuer à se développer. Les questions centrales sont : comment les étoiles évoluent-elles pour donner les objets compacts et phénomènes transitoires que l'on observe ? Quelles sont les origines et les propriétés de la perte de masse lors des stades finaux des étoiles de toute masse ? Comment l'énergie considérable mise en jeu dans l'environnement des objets compacts (via l'énergie d'accrétion, de rotation et/ou magnétique) est-elle transportée (vents, jets, rayonnement) et dissipée (accélération de particules) ?

Ces questions continueront d'être abondamment investiguées par des études à hautes énergies (avec [XMM-Newton/ESA](#), [Integral/ESA](#), etc.), [XRISM/JAXA](#) et plus tard [NewAthena/ESA](#) donneront accès via leur haute résolution spectrale aux détails de la physique des objets compacts et de leur environnement proche (des étoiles à neutrons aux trous noirs super-massifs). En complément, les échantillons à notre disposition augmenteront aussi dans la décennie à venir grâce notamment aux trous noirs qui seront détectés par [Gaia/ESA](#), et confirmés par les relevés dédiés [4MOST/VISTA](#), [WEAVE/WHT](#), [MOONS/VLT](#) (voir [Section 1.4](#)). Cela permettra de commencer à acquérir une compréhension cohérente des populations. L'étude détaillée d'objets, pour lesquels de nombreuses contraintes auront été obtenues, permettra également de décrire la physique des étoiles évoluées. Pour la perte de masse, importante pour **l'évolution stellaire** (perte de masse, moment

cinétique, lien supernovæ) et **l'évolution cosmique** (enrichissement chimique, production de poussières, (voir [Sections 1.3](#) et [1.8](#)), la compréhension des mécanismes de génération des vents stellaires sera sans aucun doute fondamentale, avec en particulier la nécessité d'apporter une vision globale qui fait actuellement défaut. Le feedback sur la **formation des galaxies** devant faire appel à la rétroaction stellaire (SNe) est en effet essentiel (voir [Section 1.4](#)). Les outflows, la dynamique du gaz, pourront être en particulier étudiés en détail grâce aux interféromètres [NOEMA/IRAM](#) et [ALMA](#).

Notre compréhension des objets compacts a connu quant à elle des évolutions majeures ces dernières années, notamment par la détection des **ondes gravitationnelles** de coalescence de trous noirs stellaires ou d'étoiles à neutrons par [LVK](#). Ces observations ont permis de poser des contraintes fortes sur les distributions de masse et de rotation des trous noirs. Les coalescences d'étoiles à neutrons, à l'origine des kilonovæ et produisant des éléments lourds, ont, quant à elles, ouvert la voie de **l'astrophysique multi-messagers** (voir [Section 1.6](#)). Une meilleure compréhension des étoiles à neutrons est aussi à mettre au compte de la mission [NICER](#) (« Neutron Star Interior Composition Explorer ») de la NASA, installée sur l'ISS et qui permet de mesurer avec des précisions inégalées la masse et la taille de ces astres et donc de mieux connaître les lois physiques qui régissent leur structure interne (pression, température, densité, etc.). Le lancement du satellite de polarimétrie X, [IXPE/NASA](#) (« Imaging X-ray Polarimetry Explorer ») a également apporté de nouvelles contraintes sur les régions d'émission X dans les binaires X ou les pulsars (voir [Section 1.6](#)).

L'étude des stades ultimes de l'évolution stellaire s'appuie ainsi fortement sur l'astrophysique multi-messagers et les suivis d'alertes associés, deux approches en plein développement, impliquant actuellement et dans les années futures, de nombreux instruments sol comme spatiaux (voir [Section 1.6](#)).

## Recommandations

Les recommandations seront rédigées à la suite du retour de la communauté AA à nos questions, sur le forum aussi bien qu'au sein des ateliers de la Prospective INSU-AA. Voici les questions sur lesquelles nous souhaitons émettre des recommandations dans le document final :

1. Comment faire vivre nos activités scientifiques aux interfaces ?
  - a. En particulier, nous devons renforcer les collaborations inter-instituts (IN2P3, INP, INC, INSIS...) et valoriser les profils multidisciplinaires, souvent multi-instituts. Comment le faire ? Notamment, quelle organisation institutionnelle et quelle animation scientifique seraient à mettre en place dans le cadre des grands observatoires sol et missions spatiales (CTAO,

Euclid,...) en lien avec l'IN2P3 ? (Cette question est en lien avec les GT III.1 et II.3)

- b. Notre communauté doit s'organiser dans le cadre de la nouvelle structuration INSU-AA comprenant la CSAA, le PN AA, ses AT & AS, et le PNP et l'IIT. Quelle animation scientifique et organisation institutionnelle souhaiteriez-vous ? (Cette question est en lien avec le GT III.4)
- c. En particulier, la future AT Exosystèmes devra conserver des liens forts avec d'un côté physique stellaire et milieu interstellaire et de l'autre les sciences de la Terre et la planétologie. Comment envisagez-vous la place d'une nouvelle AT Exosystèmes ? son périmètre, son interface entre PN-AA et PNP, son lien avec le PEPR Origines, etc. ? (Cette question est en lien avec le GT III.4)
- d. Il est nécessaire de mieux structurer nos activités d'astrophysique de laboratoire et de conserver un lien fort avec celles qui sont effectuées dans des laboratoires INP et INC. Quelle structure institutionnelle, quelle animation scientifique et quels moyens RH seraient à mettre en place ? Approuvez-vous la proposition de création d'un GDR à "large spectre" dédié ? (Cette question est en lien avec le GT III.1)

## 2. Comment mieux gérer et financer nos recherches ?

- a. En particulier, nous sommes témoins de la chute des effectifs en Astronomie-Astrophysique et de la perte d'expertises sur des domaines forts et reconnus de la communauté française. Quelles pourraient être les stratégies pour les enrayer ? (Cette question est en lien avec le GT III.3)
- b. Nous peinons à assurer l'exploitation scientifique de nos infrastructures de recherche et grands projets existants. Comment s'assurer qu'elle soit au niveau des moyens mis dans la préparation de grands projets futurs ? En particulier, seriez-vous favorable, à budget constant, à un financement de postdocs (via la CSAA ou l'INSU) pour l'exploitation de nos grands instruments ? Et comment organiser, optimiser et accompagner l'utilisation de nos instruments, y compris le suivi sol des grandes missions spatiales ? Ou encore comment mieux préparer la communauté au passage à l'exascale ? (Cette question est en lien avec les GT III.1 et III.3)
- c. En particulier, les financements nationaux et européens sont cruciaux pour nos projets. Quels sont les freins au dépôt de projets ? Quel soutien institutionnel souhaiteriez-vous avoir pour optimiser la préparation de vos projets et pour les gérer une fois qu'ils sont acceptés ? Et puis, comment gérer sur fonds nationaux les équipements financés par l'Europe qui ont ensuite besoin de maintenance ? (Cette question est en lien avec les GT III.1 et III.4)

## 3. Faut-il mieux mettre en valeur les priorités de notre communauté Astronomie-Astrophysique ?

Seriez-vous prêts à ce que soient définies des priorités beaucoup plus ciblées que ce qui est actuellement présenté dans le document du groupe thématique ? Si oui, sur quel type de critères ? (Cette question est en lien avec le GT III.1)