

## SECTION 17

---

# SYSTÈME SOLAIRE ET UNIVERS LOINTAIN

### Composition de la section

Benoît MOSSER (président de section), Marie-Christine ANGINON, Aurore BACMANN, Sylvie BRAU NOGUÉ, Laurent CAMBRÉSY, Nathalie CARRASCO, Andrea CHIAVASSA, Marc FERRARI, Kenneth GANGA, Marie-Christine GONTHIER, Aurélie GUILBERT-LEPOUTRE, Pierre HENRI, Gilles KACZMAREK, Kumiko KOTERA, Bertrand LEFLOCH, Sophie MASSON, Jihane MOULTAKA, Jérôme NOVAK, Roser PELLO, Fouad SAHRAOUI, François-Xavier SCHMIDER.

### Résumé

La participation de la Section 17 au travail de prospective de l'astrophysique mené par l'INSU a complété l'analyse conjoncturelle. Il en découle un certain nombre de recommandations à destination de la communauté, de l'INSU et du CNRS.

La pratique de l'astrophysique évolue, avec un poids toujours croissant des projets de toutes tailles et un besoin toujours plus fort d'expertises connexes ; ceci modifie notre pratique collective de recherche et doit se retrouver durablement dans les critères d'évaluation pour juger d'une recherche de qualité ; la question du genre doit aussi être débattue collectivement.

La Section 17 souhaite que l'INSU défende vigoureusement le rôle sociétal de l'astrophysique dans la R&D industrielle en haute technologie ; une éventuelle CID traitant des thématiques « astronomie multimessagère et

cosmologie » doit être considérée pour répondre aux enjeux émergents de ce champ disciplinaire commun à l'INSU et à l'IN2P3 ; l'évolution des pratiques de recherche et la montée en puissance de la science des données méritent d'être accompagnées ; l'état d'équilibre des programmes nationaux doit être considéré comme évolutif et non permanent, entre autres pour une bonne gestion des thématiques pluridisciplinaires.

La création d'un poste de DAS thématique pour les champs scientifiques à l'intersection de l'INSU et de l'IN2P3 devrait être envisagée pour que le CNRS parle d'une seule voix dans ce domaine ; l'emploi doit être revu à la hausse, la baisse du nombre de postes de chercheurs et ingénieurs impactant directement la part française dans les projets internationaux cruciaux pour la discipline ; la revalorisation de la recherche passe aussi par un accompagnement des projets des jeunes chercheurs ; pour préparer l'astrophysique de demain, la R&D et l'innovation au CNRS doivent être favorisées par l'ANR.

---

## Introduction

---

L'astrophysique est une discipline organisée depuis longtemps au niveau national (l'INSU existe comme institut national depuis 1985), structurée par des TGIR nationaux et internationaux, tributaire de grands programmes d'observation au sol ou dans l'espace. Ces éléments motivent un pilotage serré, assuré par l'INSU, et éclairé par un exercice de prospective nationale de l'astrophysique qui réunit de nombreux partenaires dont la Section 17. Des pans entiers de ce rapport de conjoncture bénéficient donc de la prospective nationale menée en 2019 mais l'éclairage apporté à ce rapport est clairement celui de la Section 17, nourri par l'expérience de Section, par l'évaluation des chercheurs et des unités, ou encore par les concours.

La prospective nationale est un exercice pratiqué en moyenne tous les cinq ans, et qui s'est déroulé en parallèle du rapport de conjoncture, de l'automne 2018 à l'automne 2019. Le travail mené par la Section 17 justifie le pilotage par le comité national de la partie de l'exercice de prospective concernant les thématiques scientifiques. Mais comme les travaux détaillés de ces thématiques par les programmes nationaux font l'objet de documents exhaustifs rapportant leur prospective individuelle, ils sont repris essentiellement dans l'exercice de prospective nationale et non dans ce document. Ce choix a pour but d'optimiser les efforts de chaque partie et, surtout, la portée des recommandations. Du travail d'analyse menée par la section sur les thématiques, seule est rapportée ici une synthèse globalement organisée selon les éléments du canevas de l'exercice de conjoncture.

---

## 1. Thématiques de la Section 17

---

La section 17, intitulée « système solaire et univers lointain », couvre tous les domaines de

l'astrophysique. Pour simplifier, toute recherche scientifique qui va des frontières de l'ionosphère terrestre concerne la section 17, exclusivement ou principalement. Les interactions interdisciplinaires sont nombreuses tant à l'INSU qu'en dehors : la Terre, principal objet d'étude des Sections 18, 19 et 30 de l'INSU est une planète, et comme telle se compare aux planètes telluriques ou magnétisées du système solaire ou aux autres planètes des systèmes extrasolaires. Si l'Univers est l'objet d'étude de la Section 17, la physico-chimie qui y est à l'œuvre peut se traiter à l'interface de nombreuses sections de l'IN2P3, l'INP et l'INC. Ce point est plus particulièrement illustré par l'aspect des recrutements et les besoins interdisciplinaires.

## A. Thématiques de recherche et évolution

### 1. Structuration en programmes nationaux

Les enjeux des projets de l'astrophysique et la nécessité d'y apporter des réponses cohérentes à l'échelle appropriée, qui est souvent nationale ou internationale, a conduit à faire évoluer les structures de la discipline en programmes nationaux (PN) qui ont pour mission d'animer et structurer la discipline. Les sept PN de l'astrophysique sont présentés en Table 1 : leur activité est motivée par la réponse à des grandes questions scientifiques ; les observations récentes ont conduit à des ruptures majeures ; les projets futurs laissent envisager des évolutions marquantes.

### 2. Les grands projets

Les activités des sept PN qui structurent la discipline sont toutes portées par les grands projets. Les PN ont priorisé les projets de la discipline (le plus souvent internationaux) : on note 91 projets d'observations au sol (74 en P0 – la priorité plus haute – 14 en P1 et 3

en P2) et 91 projets spatiaux (71 en P0, 18 en P1 et 2 en P2). L'abondance des projets est à renormaliser à leur durée moyenne longue (plus de 10 ans) et au fait que la précision de ces projets induit une granularité fine, à l'échelle d'un instrument ou d'un sous-système d'une mission plus vaste.

Pour tous les programmes, l'importance des missions s'apprécie par les résultats et avancées passées. On peut citer, sans souci d'exhaustivité, le projet européen *Planck* pour la cosmologie et le milieu interstellaire ; les interféromètres LIGO et Virgo pour le domaine des hautes énergies, le projet *Gaia* de l'ESA pour quasiment tous les secteurs et qui va irriguer la discipline de longues années encore.

### 3. Évolutions

Différentes thématiques de l'astrophysique ont une activité très visible, avec des champs nouveaux (p.ex. les ondes gravitationnelles), ou en pleine effervescence (p.ex. l'exoplanétologie). D'autres mènent un travail de fond récurrent sur des objets bien connus qui nécessitent et méritent une étude physique très détaillée (p.ex. la physique solaire ou magnétosphérique). Tous les domaines évoluent, comme le montre la Table 1, avec de grands projets depuis le sol ou l'espace amenés à répondre à des défis toujours plus ambitieux.

La tentation est toujours grande de voir l'évolution des domaines à la seule aune de leur visibilité. Le nombre de grands projets fédérant toutes les thématiques, et pas seulement les thématiques visibles, doit corriger cet aspect réducteur.

#### ***Thématiques émergentes ou sur le déclin***

De nombreux sujets de recherche émergent par l'ouverture de nouveaux horizons essentiellement ouverts par de nouveaux observatoires. On peut ainsi mentionner l'astrophysique multimessagère maintenant envisageable avec le suivi des observations d'ondes gravitation-

nelles, ou encore les nombreux champs disciplinaires vivifiés par le succès de la mission *Gaia*. Les observations *in situ*, tel *Rosetta*, jouent un rôle incomparable en planétologie et se profilent les retours d'échantillons. Les techniques de photométrie ou mesures de vitesse radiale, l'interférométrie, l'imagerie à haute résolution angulaire continuent à élargir les horizons.

L'exemple de la physique stellaire illustre le fait que de nouvelles disciplines poussent de plus anciennes à évoluer : la spectroscopie stellaire n'occupe plus une grande place, mais c'est au profit de nouvelles disciplines telle la spectro-polarimétrie ; les besoins en spectroscopie « classique » sont obtenus par de grandes collaborations internationales, et il existe un besoin de plus en plus pressant de spectrométrie 3D.

Un domaine historique pour l'ouverture aux observations spatiales telle la physique ionosphérique occupe aujourd'hui peu de chercheurs, mais de nouveaux projets spatiaux pourraient inverser cette tendance.

## B. Thématiques à l'interface

Les interactions interdisciplinaires de la section 17 sont fortes au sein de l'INSU avec les sections 18 (thématiques relevant de la Terre interne), un peu moins avec la 19 (enveloppes superficielles de la Terre), mais comme le montrent entre autres les concours via le vivier des candidats, les interactions sont très fortes aussi avec les sections 1 (IN2P3), 2 et 4 (INP) du CNRS. Ceci rappelle le double ancrage de la section 17 entre d'une part les Sciences de l'Univers et d'autre part la physique. Les interactions interdisciplinaires avec la chimie sont également importantes car il s'agit de modéliser en laboratoire de multiples réactions que l'on observe dans des conditions particulières dans l'espace, ce qui n'est qu'un exemple parmi d'autres points.

Cette richesse interdisciplinaire concerne aussi de nouvelles disciplines telle l'exobiolo-

gie, impliquant des interactions avec la chimie, bien sûr la biologie, mais aussi les SHS.

## 1. Exobiologie

L'exobiologie est un domaine en plein essor, qui a besoin de se structurer. Le domaine dépasse très largement le périmètre de l'astrophysique, mais l'INSU a clairement un rôle à jouer pour la discipline. Dans un premier temps, et en l'absence de grands projets engagés aujourd'hui, cette organisation structurelle est à engager dans le cadre ad hoc, avec les interfaces nécessaires à l'INB et l'INC. Ensuite, une feuille de route construite avec les acteurs concernés devra permettre de dégager les priorités du domaine en termes de projets.

## 2. À l'interface INSU – IN2P3

Plusieurs thématiques de l'astrophysique aux interfaces relèvent conjointement de l'INSU et de l'IN2P3 : la matière noire, l'énergie noire, l'astrophysique des neutrinos et les ondes gravitationnelles. Pour fixer rapidement les idées, la physique de ces objets concerne l'IN2P3 quand leur contextualisation relève de l'INSU. Ceci fut illustré par un recrutement CRCN interdisciplinaire en 2019, fléché vers la thématique des ondes gravitationnelles, demandé par l'IN2P3 pour un laboratoire purement IN2P3, mais instruit par la section 17 et donc l'INSU.

On peut noter que les objectifs et façons de travailler de l'IN2P3 et de l'INSU diffèrent notablement : l'IN2P3 travaille essentiellement par projets et avec des collaborations massives ; l'INSU reste organisé en thématiques. Pour ces raisons, le profil des chercheurs recrutés en 17 est différent de ceux de la section 1. Cette différence de vues, à prendre en compte, renforce la richesse de l'approche interdisciplinaire.

Alors que le travail des communautés concernées par les thématiques communes se fait en bonne entente, l'organisation entre les

instituts concernés ne semble pas être à la hauteur des enjeux : les projets sols et spatiaux nécessaires et engagés pour faire avancer ce domaine nécessitent des moyens financiers et humains non négligeables. Le partage des rôles de chacun gagnerait à être mis à plat et précisé. L'enjeu est d'importance : il s'agit de ne pas rater le train des ondes gravitationnelles et de l'astronomie multi-messagers, domaines montant exponentiellement en ce moment. Aujourd'hui, il faut construire une communauté française solide pour pouvoir contribuer aux découvertes imminentes qui feront l'astronomie de demain.

## C. Cohérence du périmètre de la section

En lien avec le paragraphe qui précède pour les problématiques à l'interface IN2P3 – INP – INSU, la section 17 suggère la création d'une CID qui traiterait des thématiques « *astronomie multimessagère et cosmologie* ». La création d'un poste d'un DAS thématique rendant compte aux instituts devrait être étudiée : ceci aurait pour avantage que le CNRS parle d'une seule voix dans ce domaine, pour optimiser le choix et la gestion des projets de la thématique, ainsi que les efforts humains et financiers qu'ils requièrent.

## D. Astrophysique et société

Par ses thématiques, l'astrophysique est souvent perçue comme une discipline fondamentalement décorrélée des questions sociétales. Cette perception se doit d'être corrigée, tant par le rôle de la discipline dans la formation des jeunes et la diffusion du savoir (l'astrophysique est un vecteur efficace d'apprentissage des sciences ; elle participe fortement au succès de l'édition scientifique), que par le rôle qu'elle joue dans le secteur de la haute technologie (les missions spatiales de

l'astrophysique participent au soutien en R&D de l'État pour l'industrie de haute technologie). Si une appréciation quantitative de l'implication de l'astrophysique dans la société est difficile, il reste clair que les budgets pour l'astrophysique spatiale percolent dans l'industrie avec un effet multiplicatif largement supérieur à 1.

Par ailleurs, le secteur AA gère plusieurs SO de l'INSU essentiels pour la société : la surveillance de l'espace, la météorologie spatiale, les systèmes de références temporels et spatiaux. Ces aspects sociétaux, cruciaux vu le poids de la haute technologie dans l'industrie française, doivent être défendus par l'INSU. L'astrophysique joue là un rôle unique au sein de l'INSU, à valoriser à la hauteur des enjeux.

**Tableau 1 :** Les thématiques de l'astrophysique organisées en programmes nationaux, déclinées en grandes questions, ruptures récentes et évolutions actuellement identifiées.

PN	Grandes questions	Ruptures	Évolutions
PCMI : milieu interstellaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- formation des structures à grande échelle dans la Galaxie ; lien avec la formation des étoiles et des planètes ?</li> <li>- rôle du milieu interstellaire dans l'évolution des galaxies.</li> <li>- cycle de la matière entre les différentes phases et accroissement de la complexité moléculaire ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- premières cartes tridimensionnelles du milieu interstellaire.</li> <li>- mesure routinière du champ magnétique, des échelles galactiques à la formation stellaire.</li> <li>- irradiation des glaces, poussières et molécules, puissant levier d'évolution du milieu interstellaire.</li> <li>- interprétation de la physique des milieux lointains grâce aux molécules et poussières.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- étude des milieux interstellaires extrêmes des galaxies externes.</li> <li>- propriétés de la poussière et du champ magnétique Galactique.</li> <li>- formation stellaire et planétaire détaillée : structure et propriétés des cœurs, des disques et des jets.</li> <li>- astrochimie de précision et inventaire de la complexité moléculaire : l'astrochimie comme prémices de l'exobiologie.</li> <li>- simulation expérimentale de la formation des nanograins dans les enveloppes d'étoiles.</li> </ul>
PNCG : cosmologie, galaxies	<ul style="list-style-type: none"> <li>- modèle cosmologique, physique de l'Univers primordial, nature de la matière noire et de l'énergie noire, théories de la gravitation ?</li> <li>- formation et évolution des grandes structures de l'Univers : toile cosmique, distribution des baryons et de la matière noire à grande échelle, milieu intergalactique, groupes et amas de galaxies, réionisation ?</li> <li>- formation et évolution des galaxies : premières galaxies, physique de la croissance et de l'évolution des galaxies en lien avec leur environnement ?</li> <li>- formation et évolution des galaxies aux petites échelles : liens de la formation stellaire avec le milieu interstellaire</li> <li>- populations stellaires, enrichissement chimique, dynamique galactique et matière noire ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- contraintes <i>Planck</i> sur les paramètres cosmologiques.</li> <li>- diversification des sondes permettant de mieux comprendre l'histoire de la réionisation.</li> <li>- les grandes structures comme sonde de la distribution de la matière (noire et baryonique) aux grandes échelles.</li> <li>- traces d'accrétions en émission et en absorption avec le gaz diffus autour de galaxies à <math>z=1</math> et <math>z=3</math>.</li> <li>- contenu en gaz des galaxies jusqu'à <math>z\sim 3-4</math> clef de l'histoire cosmique de la formation d'étoiles.</li> <li>- la Galaxie en 3D ; étude des populations galactiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- physique de l'inflation (énergie et la forme du potentiel) et propriétés de l'énergie noire</li> <li>- distributions de matière noire.</li> <li>- somme des masses des neutrinos et détermination de leur hiérarchie.</li> <li>- contraintes fortes sur les modèles de gravité modifiée.</li> <li>- recherche et étude des sources de la réionisation.</li> <li>- recherche et caractérisation physique des baryons</li> <li>- les baryons dans l'évolution des galaxies : co-évolution baryons / matière noire, quantification des processus internes/ externes de la transformation morphologique des galaxies.</li> <li>- évolution Galactique aux petites échelles : l'archéologie galactique avec la révolution <i>Gaia</i>.</li> </ul>

PN	Grandes questions	Ruptures	Évolutions
PNGRAM : gravitation	<ul style="list-style-type: none"> <li>– repousser les limites de la mesure de l'espace et du temps.</li> <li>– vers une compréhension fine de la forme, du mouvement et des propriétés gravitationnelles de la Terre et des corps du système solaire.</li> <li>– jusqu'où les lois fondamentales de la gravitation sont-elles valables?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– repère de référence céleste en optique grâce à <i>Gaia</i> ; repère de référence céleste ICRF3 adopté.</li> <li>– détection directe des ondes gravitationnelles.</li> <li>– première détection du rougissement gravitationnel au voisinage d'un trou noir.</li> <li>– concept de détection des ondes gravitationnelles dans l'espace valide.</li> <li>– universalité de la chute libre vérifiée à <math>10^{-14}</math> près ; <i>redshift</i> gravitationnel vérifié à <math>10^{-5}</math> ; comparaison d'horloges optiques à <math>5 \cdot 10^{-17}</math> près.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– repères célestes multi-longueurs d'onde et ultra-précis pour l'astrophysique.</li> <li>– l'univers gravitationnel dévoilé avec les observations multi-messagers et la mission LISA.</li> <li>– de nouveaux tests du principe d'équivalence.</li> <li>– la Terre et le système solaire au peigne fin grâce à la géodésie spatiale et aux données <i>Gaia</i>.</li> <li>– vers une définition optique de l'unité du temps.</li> </ul>
PNHE : hautes énergies	<ul style="list-style-type: none"> <li>– phénomènes explosifs : physique des supernovae et des coalescences, nucléosynthèse associée?</li> <li>– rayonnement cosmique : origine, accélération, propagation et impact sur le MIS?</li> <li>– objets compacts : formation, physique de l'accrétion et de l'éjection, pulsars?</li> <li>– nature de la matière noire non-baryonique et les signatures de nouvelle physique?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– naissance de l'astrophysique multi-messagère,</li> <li>– premières détections d'ondes gravitationnelles issues de la coalescence de systèmes binaires de trous noirs.</li> <li>– détection d'une contrepartie électromagnétique à un signal en ondes gravitationnelles émis lors de la coalescence d'étoiles à neutrons.</li> <li>– neutrino de haute énergie en provenance d'un blazar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– physique des objets compacts et des phénomènes à hautes énergie observée par les ondes gravitationnelles et les neutrinos.</li> <li>– étude des accélérateurs cosmiques grâce à un sondage profond du ciel jusqu'à des énergies extrêmes.</li> <li>– compréhension des mécanismes d'explosions et de coalescence et l'étude des objets compacts par le sondage du ciel transitoire.</li> <li>– synergie entre les instruments de haute énergie et les nouveaux instruments sol.</li> </ul>
PNP : planétologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>– quels processus physico-chimique gouvernent la formation planétaire, œuvrent à la diversité des objets et sculptent l'architecture des systèmes planétaires?</li> <li>– évolution des objets et des systèmes planétaires : différenciation interne, échanges surface-atmosphère, régimes de circulation atmosphérique, chimie atmosphérique, dynamique gravitationnelle, évolution des objets et systèmes planétaires?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– structure des disques protoplanétaires et de débris (ondes, sillons planétaires...).</li> <li>– découverte de Jupiters chauds et migration des planètes géantes dans les systèmes en formation.</li> <li>– exoplanètes telluriques dans des systèmes proches de la Terre.</li> <li>– activité cométaire, apport des matériaux cométaires, et formation des objets du système solaire.</li> <li>– redéfinition de la zone habitable dans le système solaire.</li> <li>– mesure de la profondeur de la rotation différentielle dans Jupiter et Saturne.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– synergie des méthodes de transits et vitesses radiales permettra de cartographier la diversité des densités planétaires.</li> <li>– caractérisation des atmosphères exoplanétaires.</li> <li>– grands relevés astrométriques et spectrophotométriques des petits corps du système solaire.</li> <li>– retour d'échantillons de comètes, d'astéroïdes et planètes.</li> </ul>

PN	Grandes questions	Ruptures	Évolutions
PNPS : physique stellaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>– formation stellaire : processus physiques en jeu ?</li> <li>– origine de la fonction de masse initiale des étoiles : est-elle universelle ?</li> <li>– origine évolution du magnétisme de différentes classes d'étoiles ; impact du champ magnétique sur l'évolution stellaire ?</li> <li>– effets de la rotation, du champ magnétique, de la perte de masse... sur la structure et l'évolution stellaire ?</li> <li>– paramètres clefs des interactions étoiles/disques/exoplanètes ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– au-delà de la seule détection, caractérisation d'exoplanètes de tout type (des Jupiters chauds aux exo-Terres, et aux exoplanètes en zone habitable).</li> <li>– caractérisation des étoiles hôtes.</li> <li>– mesure sismique des paramètres fondamentaux des étoiles (masse, âge, rayon).</li> <li>– populations stellaires et archéologie Galactique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– caractérisation du magnétisme stellaire par spectropolarimétrie.</li> <li>– imagerie interférométrique des surfaces et des environnements stellaires sur un nombre accru de cibles.</li> <li>– contraintes astérosismiques sur les processus dynamiques dans les étoiles.</li> <li>– raffinement des modèles de formation, d'évolution, de structure et d'atmosphère stellaire.</li> <li>– interactions entre l'étoile et son environnement circumstellaire/planétaire/magnétique.</li> </ul>
PNST : Soleil - Terre	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Impact environnemental des relations Soleil-Terre : mécanismes de transfert de matière et d'énergie depuis le Soleil jusqu'à la Terre et les planètes ?</li> <li>– Génération et transport du champ magnétique solaire : processus en jeu dans l'accélération du vent solaire ?</li> <li>– Mécanismes de couplages dans les plasmas naturels de l'héliosphère : rôle des interactions champs / particules ?</li> <li>– Mécanismes d'accélération et de chauffage : rôle de la turbulence plasma et modes à l'origine de ces processus d'énergisation ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– la reconnexion magnétique, mécanisme clé dans les couplages au sein de l'héliosphère ainsi que dans les environnements astrophysiques, notamment lors des processus d'accrétion.</li> <li>– simulations MHD 3D : évolution de la topologie magnétique et des processus de conversion d'énergie lors des éruptions solaires.</li> <li>– turbulence plasma : rôle des petites échelles dans les processus de chauffage et d'accélération des particules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– génération et d'accélération du vent solaire, l'une des composantes clé des couplages dans l'héliosphère, et des processus d'accélération et de transport de particules.</li> <li>– besoin sociétal : étude de la dynamique des interactions entre l'environnement externe, magnétisé, et l'atmosphère de la Terre.</li> <li>– diversité des interactions autour d'autres environnements planétaires ; synergie entre le système Soleil-Terre et l'exoplanétologie</li> </ul>

## II. Organisation et pratiques de la recherche

### A. Organisation et structures

#### 1. Différents niveaux d'organisation

Le paysage local des laboratoires doit évoluer avec la mise en place de nouvelles struc-

tures dans les universités : fusion des universités, COMUE, IDEX, EUR... Cette réorganisation locale fait peu de cas de la logique à d'autres échelles. La communauté astrophysique est en effet bien organisée et structurée au niveau national, qui est le cadre naturel d'activité des équipes dans les laboratoires. Les recherches s'organisent autour de moyens nationaux et des TGIR. Cette structuration nationale est importante et nécessaire pour agir efficacement sur la scène internationale.

Comme la communauté n'est pas très nombreuse, par rapport à d'autres, le cadre national

est le plus pertinent pour discuter les problématiques scientifiques, et la recherche effective se fait de plus en plus via de nombreuses collaborations entre équipes, cette tendance se renforçant avec l'émergence de thématiques inter- ou pluridisciplinaires.

## 2. UMR

Si la discipline fonctionne avec des PN qui ont pour mission de gérer au niveau national les diverses thématiques, c'est bien sûr dans les UMR que le travail et les projets sont menés. Les unités du domaine de l'astrophysique se caractérisent par un ensemble de mots-clés : pluridisciplinarité ; interdisciplinarité ; recherche instrumentale ; grands projets, infrastructures de recherche et TGIR ; services d'observation ; données ; simulations...

L'attractivité relative des unités est illustrée par les candidatures au concours et le recrutement. De manière générale, les unités qui se sont récemment restructurées autour de projets scientifiques porteurs apparaissent plus attractives que les autres. Ces restructurations ont pu accompagner des regroupements dans de nouveaux sites. La section note le rôle positif d'une restructuration basée sur des projets scientifiques autour des grandes questions de nos disciplines, des missions clairement exprimées, et bénéficiant d'un accompagnement des tutelles à la hauteur des enjeux.

Le regroupement d'UMR apparaît positif avec des projets scientifiques communs, favorisant synergie, stimulation, renouveau, ouvertures, élargissement des compétences, visibilité accrue vis à vis des instances, et en évitant la dilution des équipes techniques et la perte d'expertises.

La taille des unités n'apparaît pas comme facteur déterminant pour la restructuration et l'organisation interne importe moins que les projets. Les unités de la thématique connaissent différents moyens d'organisation : un nombre très limité de grosses équipes ou une multitude de petites équipes ; un directeur seul, ou avec un adjoint, ou avec un comité de direc-

tion. Tous ces différents modèles sont opérationnels, mais mettent en évidence une réalité commune : la fonction de direction mérite d'être valorisée d'une part, et facilitée par des mesures d'accompagnement et de soutien de la part des tutelles des UMR.

## 3. Programmes nationaux

Les PN jouent un rôle essentiel pour l'animation scientifique autour des grands projets de la discipline, mais ils ont une tendance naturelle à poursuivre les lignes de recherche existantes, et peuvent parfois manquer de la souplesse nécessaire pour favoriser l'émergence de nouvelles thématiques.

La structuration des PN peut montrer un manque de réactivité face à l'évolution rapide de la thématique. Il est clair que les contenus des programmes doivent évoluer régulièrement et s'ouvrir aux interfaces. C'est un enjeu que les exercices de prospective de la discipline ne doivent pas manquer. Ces programmes ont par ailleurs besoin de plus de coordination entre eux et de plus de coordination avec les thématiques en dehors du périmètre de la Section 17. Ces interactions hors de l'INSU gagnent à s'appuyer aux structures usuelles du CNRS telles les GDR.

La communauté gagnerait aussi à avoir une idée plus précise des forces vives impliquées dans les différents programmes. Ce décompte doit être organisé par l'INSU de manière la plus uniforme possible, prenant en compte la participation (pondérée) des chercheurs et enseignants-chercheurs aux différents programmes, et mesurant aussi les services d'observations et le poids des projets.

## 4. Le poids des projets

Pour faire avancer les enjeux scientifiques, il apparaît un besoin contradictoire entre plus de projets et des projets plus lourds, et de plus d'espace entre les projets. Alors même que la communauté est organisée pour choisir et prio-

riser ses projets, la section ressent le besoin de faire plus de choix et plus de priorités lors de l'exercice de prospective nationale de l'astrophysique. En un certain sens, on note une évolution pilotée par les projets.

## B. Recrutements et carrières

### 1. Méthodes

La réflexion en début de mandat sur notre pratique de travail en section, pour définir les critères d'une recherche de qualité, a conduit à quelques grands principes :

- prise en compte de tous les types de production scientifique (réalisations instrumentales et numériques, très spécifiques de nos projets) et pas seulement les publications ; c'est particulièrement important pour notre discipline dépendant de l'observation, du besoin d'instruments performants que seuls les chercheurs peuvent imaginer et développer, et des données observationnelles ;

- évaluation qualitative et non quantitative du travail de recherche, nécessaire en soi et indispensable pour éviter de nombreux biais.

### 2. Besoins d'expertise

Notre discipline évolue avec le besoin croissant de profils avec des expertises très pointues (physique de laboratoire, instrumentation, traitement du signal, simulations numériques, science des données). Comme le haut niveau d'expertise nécessaire n'est alors pas forcément directement compatible avec un fort investissement sur le volet astrophysique, il ne permet pas de publier dans le champ thématique. Quand bien même cette situation est prise en compte dans les critères de qualité définis pas la section, la communauté doit aussi en prendre la mesure, et être inclusive dans ses pratiques de publications par exemple, afin de ne pas laisser sur la touche les experts sans lesquels l'efficacité du travail scientifique n'est pas possible.

### 3. Équilibres

La compétition entre les différents PN se voit sur les recrutements. L'importance des projets dans tous les PN conduit à préserver le poids relatif des communautés des divers PN dans les recrutements CRCN, ce qui rend plus difficile le recrutement de profils sur des thématiques émergentes et des profils interdisciplinaires.

La communauté se dirige de plus en plus vers des projets de grande envergure et à grandes collaborations. L'évaluation de l'individu devient difficile dans ce contexte. Il est donc important de pouvoir valoriser, aussi bien les travaux d'un chercheur travaillant dans une grande collaboration que ceux d'un chercheur travaillant en petit comité.

Les concours éclairent un aspect négatif de certains grands projets, qui utilisent les forces vives de nombreux doctorants et post-docs, mais ne leur donnent pas les moyens de développer efficacement les qualités requises pour un recrutement (impact de la production scientifique au sens large ; autonomie avérée ; pertinence du projet de recherche). Cet écueil est d'autant plus marqué que les disciplines concernées bénéficient d'un engouement lié à l'attractivité des sujets.

### 4. La question du genre

#### *Biais avérés*

Différents indicateurs étudiés en début de mandat ont démontré les forts biais de genre. Le bilan social du CNRS établit que la proportion de femmes est moindre chez les CR (~ 20%) par rapport au DR (~ 23%) ; par ailleurs, cette proportion est très inférieure à la proportion de candidates (~ 35%). Ceci signe le fait que la compétition pour les postes qui s'est fortement accrue ces vingt dernières années d'une part, avec la montée en puissance des indices bibliométriques d'autre part<sup>(1)</sup>, a conduit à décimer le recrutement féminin. Le recrutement à l'ancien niveau CR1 était particulièrement biaisé en termes de

genre, pour partie en raison du déficit de candidatures féminines à un âge de thèse avancé.

### **Recrutements**

Ce constat étant clairement posé, la section a analysé ses différentes pratiques d'évaluation en termes de genre, pour évaluer les biais et les corriger. Une correction indispensable consiste à constater que, par rétroaction avérée des biais, la proportion de candidates est minorée et ne constitue donc pas un indicateur pertinent pour estimer la proportion de recrutées.

En pratique, ces éléments étant intégrés dans le processus de recrutement, comme de nombreux autres, ce n'est plus la question du genre qui se pose plus durant les concours, mais celle de l'excellence scientifique, qui n'est pas genrée. À l'issue de trois concours, sur la base des critères affichés pour une candidature de qualité (impact, autonomie, projets), on constate un recrutement à parité.

### **Promotions**

Un exemple éclaire particulièrement les biais de genre au cours de la carrière : le nombre de candidatures de femmes CR à la PEDR est le plus souvent nul ou voisin de zéro, pour typiquement une vingtaine de candidatures masculines. Les biais de genre dans les carrières sont si prégnants que leur correction devrait commencer bien avant les âges de pratique de la recherche.

À tous les niveaux, les biais de genre doivent être corrigés. Comme pour les concours, une correction simple à apporter est de sortir d'un système où la proportion de femmes candidates est respectée dans l'évaluation, car ce système reproduit les biais. Comme la section ne peut pas corriger l'absence de dossiers féminins, la communauté doit se mobiliser pour agir contre l'autocensure des candidates.

La correction des biais de genre ne se fera ni rapidement ni sans frottement, et donc elle

nécessite un suivi au très long terme de l'évolution de la parité dans la discipline.

## **5. Début de carrière**

On observe un hiatus entre les critères de recrutement, où l'on demande à un jeune chercheur d'avoir acquis de l'autonomie, et les conditions de début de carrière, où les jeunes recrutés sont le plus souvent happés par un projet ou n'ont pas les moyens d'exprimer leur autonomie. Il serait pertinent d'associer à chaque recrutement une enveloppe financière "tremplin" dont le montant annuel pourrait correspondre au montant moyen alloué par les PN (environ 5k€) et le financement d'un stagiaire au niveau M2 (environ 3 k€).

## **6. Personnels d'appui**

L'importance des projets dans la discipline renforce l'importance des personnels d'appui. La section 17 fait sienne la recommandation émise en janvier 2016 par le CSI de l'INSU au sujet du recrutement des ITA : *« Une recherche de qualité avec un impact fort à l'international nécessite un équilibre des forces entre les personnels chercheurs, ingénieurs et techniciens. Cet équilibre est critique pour de nombreuses disciplines du CNRS et en particulier pour celles dans le périmètre de l'INSU. »*

La baisse continue des moyens humains IT dans les laboratoires crée souvent des tensions entre les équipes. De plus, les jeunes chercheurs recrutés avec une vocation instrumentale se retrouvent souvent sans le soutien nécessaire par les équipes techniques pour démarrer et porter de nouveaux projets.

## **7. Démographie**

### **Baisse du nombre de chercheurs**

Le nombre de chercheurs en section 17 a baissé de plus de 15% en 12 ans. La section 17 bénéficie pourtant d'un grand pouvoir d'at-

tractivité, avec un taux de pression sur les candidatures parmi les plus forts dans le domaine des sciences dites dures. Parmi les sections relevant de l'INSU, la section 17 se caractérise par une attraction beaucoup plus forte, avec un taux de pression moyen sur les postes CRCN de l'ordre de 30, contre 12 en sections 18 et 19 (soit le taux le plus bas sur l'ensemble du CNRS) le nombre de postes étant par ailleurs égal.

### ***La bonne santé de l'astrophysique française dans la compétition mondiale***

Les différentes enquêtes sur le poids mondial des disciplines montrent également que l'astrophysique française est rayonnante<sup>(2)</sup>. Pourtant, la baisse des effectifs impacte les projets et donc le rayonnement international. Le choix de la communauté est actuellement de pérenniser l'emploi tant pour les chercheurs que pour les personnels d'appui à la recherche.

### ***Projets et R&D***

Le manque de recrutement dans le corps du CNAP dans certains labos à forte implication dans les missions spatiales fait que le travail de suivi à long terme de ces projets (développements hardware/software, bases de données...) repose donc également sur les chercheurs CNRS qui se retrouvent aspirés par ces responsabilités semblables aux tâches de service du CNAP : comme cela impacte directement leur productivité scientifique, cette activité doit être prise en compte dans leur mission.

Par ailleurs, la baisse des effectifs et la part plus importante des projets a un impact lourd sur le plan de charge des laboratoires. Avec un recrutement en net déclin, il n'y a plus la place ni le temps pour la R&D, les projets émergents, la mise au point de démonstrateurs.

### ***Le cas de l'Île-de-France***

Un autre fait démographique préoccupant consiste en l'évaporation des jeunes cher-

cheurs de l'Île-de-France vers les régions. Ce phénomène serait positif s'il signalait une forte attractivité en régions ; il signe plus clairement une situation francilienne dégradée, avec des salaires pour les jeunes chercheurs tout simplement trop bas pour des conditions de vie à la hauteur d'un métier nécessitant un grand investissement temporel, de nombreux déplacements... Le même phénomène est observé pour les personnels de soutien à la recherche.

### ***Pression sur les chercheurs***

Enfin, il faut noter que, via les rapports d'activités, la section peut se rendre compte de l'impact de la baisse des ressources sur le travail des chercheurs, la quantité de travail requise par les projets ne baissant pas et la recherche de financement prenant de plus en plus de temps. De nombreux chercheurs brillants et talentueux mentionnent le découragement vis-à-vis de conditions de travail se dégradant pour eux, leurs équipes ou leurs collègues.

## **8. Bonnes pratiques**

### ***Réponse à l'urgence climatique***

De par son rôle pour le recrutement et l'évaluation des chercheurs, la section est particulièrement concernée par l'impact climatique de l'activité de recherche. Comme l'a montré une enquête interne, la grande majorité des acteurs de la recherche relevant de la section 17 se sent concernée par cette urgence et souhaite minimiser l'impact des pratiques professionnelles. En ce sens, la section rappelle que ses critères d'évaluation sont avant tout qualitatifs, et non quantitatifs. Si les jeunes chercheurs ont besoin de faire connaître leur recherche et si certains projets nécessitent des réunions régulières des acteurs, il n'est ni sain ni nécessaire de multiplier les déplacements et la qualité des dossiers ne s'apprécie pas au nombre de conférences invitées.

## C. Financement

De manière générale, il y a orthogonalité entre les sources de financement de la recherche et la structuration thématique de la recherche. Les programmes se développent en effet sur des échelles de temps longues. Si l'INSU et le CNES accompagnent les projets en apportant des financements respectant ces échelles, les autres sources de financement restent limitées sur des échelles de temps courtes. L'ANR par exemple ne connaît qu'une échelle de temps, n'accompagne pas les grands projets et soutient trop peu les priorités thématiques de la prospective au niveau national. L'ANR devrait jouer un rôle accru vers la R&D et l'innovation, pour faire émerger des projets nouveaux.

Au niveau national, le manque flagrant de financements constitue une menace pour l'activité des équipes/laboratoires, par exemple pour subvenir aux besoins d'équipement des laboratoires, soutenir la R&D et les projets émergents. Vu l'organisation avec les PN, on pourrait imaginer qu'ils irriguent la discipline dans le cadre de coordination qu'ils assurent, mais ils n'ont pas la dotation nécessaire pour un accompagnement scientifique suffisant des grands projets, et irriguer les laboratoires. Ceci impacte la vie scientifique organisée en collaborations d'équipes au niveau national.

Avec un faible taux de succès des ANR blanches, une décorrélation observée entre les choix des comités et les priorités scientifiques des instituts apparaît finalement une source de démotivation profonde, alors que la multiplication des appels d'offres d'initiatives d'excellence (au niveau local ou non), sans aucune cohérence avec les priorités de la discipline, définies au niveau national, ne joue aucun rôle structurant. Les financements de type ERC ont un faible taux de succès et sont accordés à des individus. Pour ces raisons, on ne peut pas compter sur eux pour apporter une meilleure gestion des ressources humaines ou améliorer le travail collectif dans les projets.

L'inflation administrative liée au saupoudrage des demandes de financements, impac-

tant l'activité des demandeurs de financement tout comme celle des *reviewers*, pourrait être fortement diminuée en minimisant l'existence des financements partiels (par exemple : demi-bourses de thèse, demi-financement de congrès...) pour favoriser des financements complets. A budget constant, le temps de rédaction, d'évaluation et de traitement des dossiers de financement serait ainsi optimisé.

## D. Évolutions méthodologiques

### 1. Méthodes

Les précédents rapports de prospectives notent de manière récurrente le poids important des techniques observationnelles. On peut notamment citer l'importance actuelle des techniques d'interférométrie, sismologie, astrométrie, spectropolarimétrie, vélocimétrie, spectroscopie à haute capacité multiplex et à intégrale de champ (cf. Table 1). Les expériences de laboratoires continuent également à jouer un rôle crucial.

### 2. Science des données

#### *Données massives*

Le poids des sciences des données, tant observées qu'issues de simulations, va croissant. En astrophysique, ceci peut être illustré par la taille du catalogue du projet *Gaia* (1.7 milliard d'objets) ou par la production de données d'un grand télescope au sol chaque nuit, pouvant se chiffrer en téraoctets, ou encore par les téraoctets de données simulées. Ceci confirme la pertinence des efforts positifs déployés dans le passé pour une mise en place efficace des outils et l'archivage (rassemblés sous le sigle OV = observatoire virtuel). Ces efforts doivent être poursuivis et ceci passe par :

– un nombre croissant de chercheurs avec un profil numérique, "*data scientist*", sur le

modèle de la fonction “*instrument scientist*” usuelle dans la discipline ;

– des financements en soutien à des programmes liés à l’exploitation de données (que typiquement l’ANR ne sait pas financer).

La taille des projets motive des liens plus forts à établir avec les Sections 6 et 7 de l’Institut des sciences de l’information et de leurs interactions (INS2I), les grands projets de la discipline fournissant un champ d’application pour les sciences de l’information, que ce soit en termes de calculs, algorithmes, représentations, exploitations (section 6), ou de signaux, images, systèmes intégrés matériel-logiciel (section 7).

L’évolution vers les données massives est réelle, anticipée par la communauté, prête par des pratiques telles la valorisation des données par les méthodes d’observatoire virtuel, l’investissement dans les domaines émergents d’intelligence artificielle et d’apprentissage automatique. Les enjeux sont d’autant plus importants que de fortes ruptures sont attendues, et qu’il s’agit d’une terra incognita propre à la démarche de recherche.

### **Moyens numériques**

Les simulations numériques ont un rôle essentiel dans la recherche en astrophysique, tant par les concepts théoriques qu’elles permettent d’explorer et de comprendre que dans l’interprétation des observations. À cet effet, l’utilisation des simulations numériques HPC (High Performance Computing) est en plein essor et les moyens humains et matériels actuels ne permettent pas de répondre aux enjeux futurs, tel le développement de la modélisation multi-échelle ou le passage à l’*exascale*. En effet, l’ajout de physique dans les codes numériques pour modéliser des systèmes de plus en plus complexe relève des chercheurs, tandis que la parallélisation, l’optimisation, la mise à jour et le portage des codes sur les nouvelles machines (en constante évolution) nécessitent les compétences et expertises spécifiques des ingénieurs en calculs scientifiques. Afin de poursuivre les dévelop-

pements à la pointe en simulation numérique, la communauté AA a besoin :

– d’être soutenue techniquement par des ingénieurs en calcul scientifique qui sont à l’heure actuel quasi-inexistants dans le paysage des laboratoires. Ceci passe par le recrutement de ces profils d’ingénieurs dans les laboratoires ;

– de valoriser les pratiques collectives permettant de développer et maintenir les codes numériques communautaires (par ex : SNO).

---

## CONCLUSION

---

De l’analyse de la section ressortent les points marquants :

– l’astrophysique est une thématique avec de nombreux projets, forte sur la scène internationale, se structurant toujours plus en projets de toutes tailles, nécessitant des expertises pointues, ayant déjà abordé le virage vers le traitement massif de données ;

– comme les grands projets prennent une part croissante, notre pratique collective de recherche doit évoluer, et les critères d’évaluation pour juger d’une recherche de qualité doivent évoluer de concert ;

– la question du genre doit aussi être débattue collectivement ;

– le rôle sociétal de l’astrophysique dans la R&D industrielle en haute technologie doit être défendue plus fermement ;

– une éventuelle CID traitant des thématiques « *astronomie multimessagère et cosmologie* » améliorerait les interactions entre l’INSU et l’IN2P3 ; la création d’un poste de DAS thématique pour les champs scientifiques à l’intersection de l’INSU et de l’IN2P3 (la physique et l’astrophysique des objets émetteurs d’ondes gravitationnelles) devrait être envisagée pour que le CNRS parle d’une seule voix dans ce domaine ;

– l’évolution des pratiques de recherche et la montée en puissance de la science des don-

nées méritent d'être accompagnées; l'état d'équilibre des programmes nationaux doit être considéré comme évolutif et non permanent; la section constate un fort besoin de restructuration pour certaines thématiques, dont l'exoplanétologie;

– la baisse du nombre de postes de chercheurs et ITA en astrophysique impacte direc-

tement la part française dans les projets internationaux cruciaux pour la discipline;

– la revalorisation de la recherche passe aussi par un accompagnement des projets des jeunes chercheurs;

– pour préparer l'astrophysique de demain, la R&D et l'innovation au CNRS doivent être favorisées par l'ANR.

---

## ANNEXE 1

---

### Sigles

CNAP : conseil national des astronomes et physiciens

IN2P3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

INC : institut de chimie du CNRS

INP : institut de physique du CNRS

INSU : institut national des sciences de l'Univers

PN : programme national

PCMI : programme national physique et chimie du milieu interstellaire

PNCG : programme national de cosmologie et galaxies

PNGRAM : programme national gravitation références astronomie métrologie

PNHE : programme national hautes énergies

PNP : programme national de planétologie

PNPS : programme national de physique stellaire

PNST : programme national Soleil-Terre

SNO : service national d'observation

TGIR : très grandes infrastructures de recherche

---

### Notes

(1) Que ces deux phénomènes soient liés ou non n'a aucune importance.

(2) Cf. rapport de l'OST : *La position scientifique de la France dans le monde 2000-2015*, dont les graphes 17a et 17b illus-

trient la plus forte position française en Sciences de l'Univers par rapport aux USA, à l'Angleterre et l'Allemagne; le graphe 25 illustre la forte internationalisation des publications, plus forte que dans tous les autres secteurs.