

# SYSTÈME SOLAIRE ET UNIVERS LOINTAIN

*Président de la section*

Yves LANGEVIN

*Membres de la section*

Michel ARMENGAUD

Jean BALLE

Cyril BLANPAIN

Daniel GAMBIS

Martin GIARD

Éric JOSSE

Rosine LALLEMENT

François LEFEUVRE

Roger MALINA

Jean-Michel MARTIN

François MÉNARD

Nadège MEUNIER

Jean-Pierre MICHEL

François MIGNARD

Claire MOUTOU

Laurent PAGANI

Guy PERRIN

Patrick PETITJEAN

Évelyne ROUEFF

Christophe SOTIN

Ce rapport de conjoncture et de prospective élaboré par la section 17 est structuré en quatre sections principales : une première section présente les grands enjeux de l'astrophysique et résume les principales conclusions de notre contribution. Vient ensuite une présentation par grandes thématiques scientifiques de la problématique, des principales avancées, des points forts et des points faibles et des perspectives spécifiques à chacune de nos communautés. La 3<sup>e</sup> section donne un état des lieux pour les principaux outils de l'astrophysique. Dans une 4<sup>e</sup> section, enfin, nous présentons une analyse du contexte national et international en évolution rapide dans lequel se situe l'action du CNRS dans nos disciplines.

## 1 – LES GRANDS ENJEUX DE L'ASTROPHYSIQUE

L'astrophysique a pour objet l'étude de l'Univers et de tous les objets qui le composent, avec trois objectifs essentiels :

- les origines : formation et premières étapes de l'évolution de l'univers, des galaxies, des étoiles, des planètes et *in fine* de la vie ;
- l'étude comparative des objets des différentes classes et de leur évolution ;

– l'univers en tant que laboratoire pour un très large spectre de thématiques scientifiques : physique fondamentale, physique des particules, physique des milieux hyperdenses, chimie homogène et hétérogène à basse pression et température, physique des plasmas, etc.

La liste des grandes questions auxquelles les astrophysiciens tentent de répondre peut être reprise du rapport de prospective précédent :

– quelles sont l'identité et la densité de l'énergie sombre ? de la matière sombre ?

– comment se sont formées les grandes structures et notamment les galaxies et amas ?

– quelles sont l'origine et la physique des phénomènes les plus énergétiques de l'Univers ?

– que peut nous apprendre l'observation des environnements circumstellaires sur les conditions de formation des systèmes planétaires ?

– quelle est l'histoire de la formation des étoiles dans l'Univers ?

– la chimie spécifique au milieu interstellaire a-t-elle contribué à la chimie du vivant ?

– pourquoi les exoplanètes géantes découvertes sont-elles différentes des planètes géantes du système solaire ? Y a-t-il des « exoterras » susceptibles d'abriter la vie ?

– quelle est l'histoire de Mars et notamment de ses composants volatils ? La vie a-t-elle pu apparaître ?

– quel est le rôle du magnétisme dans la couronne solaire et la magnétosphère terrestre, et dans le couplage entre les systèmes Soleil et Planètes ?

– comment repousser les limites de la mesure du temps ?

Ces questions restent en effet tout à fait pertinentes. L'analyse par thématique démontrera que de grandes avancées ont été réalisées depuis quatre ans sur ces questions. Pour ne citer que la plus récente, la découverte en avril 2007 par une équipe à forte participation fran-

çaise d'une planète de 3 à 5 masses terrestres ouvre de nouvelles perspectives à l'exobiologie. Les outils d'observation prochainement disponibles tant au sol que dans l'espace vont sans aucun doute apporter de nouvelles moissons de découvertes. Nos disciplines font donc preuve d'un remarquable dynamisme. La communauté française se situe en très bon rang dans un contexte international extrêmement compétitif. Au-delà de la part dans les publications mondiales (supérieure à la moyenne, avec plus de 5%), nous soulignons la visibilité remarquable de la communauté française sur les grands programmes internationaux au sol et dans l'espace, avec plus de 20% des responsabilités scientifiques et techniques assurées par des ressortissants de l'Union Européenne.

L'origine de l'univers (cosmologie), l'origine du système solaire (cosmogonie) ou la possible pluralité des mondes habités suscitent un grand intérêt bien au-delà de nos communautés, car ces questions ont un impact philosophique et culturel évident. L'univers en tant que laboratoire, avec son extraordinaire diversité de conditions extrêmes (températures, pressions, énergies, échelles de temps, etc.), est devenu un enjeu important pour nos collègues de physique théorique et de physique des particules, comme en témoigne le bilan extrêmement positif de la Commission Interdisciplinaire « Astroparticules ». C'est également le cas pour la chimie, la physique des plasmas, les sciences de la Terre et peut-être demain l'exobiologie. Les thématiques astrophysiques ont également un très fort impact en terme de diffusion des connaissances, qui dépasse de loin le simple prorata des chercheurs CNRS rattachés à la section 17 (300/11500). Pallier le plus rapidement possible la désaffection croissante pour les filières scientifiques et techniques est un enjeu vital pour une société développée comme la nôtre. Les thématiques astrophysiques représentent l'un des vecteurs d'attractivité les plus efficaces en direction des jeunes dès le lycée. Cet élément mériterait d'être mieux reconnu lors des arbitrages qui attribuent à notre section (et ce depuis des années) l'un des taux de recrutement parmi les plus faibles du CNRS. Sans prétendre au même degré d'urgence sociétale que l'étude

du climat ou des pathologies, la recherche en astrophysique présente des relations qui se renforcent avec le monde dans lequel nous vivons. Le rôle de plus en plus grand des systèmes spatiaux (télécommunications, positionnement par satellite, sans même mentionner les problématiques liées à la défense, etc.) renforce l'intérêt des recherches en amont sur les références spatiales et temporelles et sur le système Soleil-Terre, qui contrôle notre environnement proche (rayonnements ionisants, perturbations électro-magnétiques). La communauté européenne se préoccupe de plus en plus activement des risques liés aux impacts d'astéroïdes géocroiseurs. Les missions planétaires européennes vers Mars et Vénus en orbite depuis 2004 et 2005 respectivement permettent d'étudier les aérosols, les composants mineurs et les interactions surface-atmosphère dans un contexte très différent de celui de notre planète, avec un intérêt évident pour la climatologie comparée.

Pour le prochain mandat (2008-2011) le faible niveau de recrutement en section 17 (9 en 2007 dont 1 via la CID 47) et le renouvellement du potentiel ITA sont particulièrement préoccupants. En effet, nos thématiques se caractérisent par un apport essentiel des observations avec des moyens lourds, au sol (téléscopes, interféromètres, grands équipements de physique) et dans l'espace (observatoires spatiaux et missions d'exploration du système solaire). L'interprétation des données obtenues est soutenue par un effort théorique important, par la simulation numérique qui fait appel, comme la modélisation, à des moyens «lourds» de calcul et par des expériences de laboratoire. La période 1996-2006 a été exceptionnelle pour les communautés françaises et européennes, avec la mise en service du plus grand télescope mondial (le VLT, au Chili, et ses télescopes secondaires pour l'interférométrie, le VLTI, sous la responsabilité de l'ESO), la mise en service par l'ESA d'observatoires en orbite couvrant une grande partie du spectre électromagnétique (ISO, XMM-Newton, INTEGRAL), de deux missions leader pour les relations Soleil-Terre (Soho et Cluster) et le lancement de quatre missions majeures d'exploration du système solaire :

Cassini/Huygens (en partenariat avec la NASA), Mars Express, ROSETTA et Venus Express (la mission SMART-1 vers la Lune, lancée fin 2003, était principalement un test technologique de la propulsion ionique) la première mission dédiée à la détection d'exoplanètes et l'astérosismologie (COROT) a été lancée avec succès par le CNES fin 2006, avec déjà une première exoplanète découverte. À l'exception d'ISO (limité en durée de vie par son système cryogénique) et de SMART-1 (impact programmé sur la surface lunaire), TOUS ces grands équipements récents qui ont déjà apporté des résultats remarquables sont encore aujourd'hui en opération. Ils vont être rejoints dès 2008 par une mission majeure d'observation du fond cosmologique (PLANCK) et un grand observatoire spatial dans le submillimétrique (Herschel), puis d'ici 2010 par les instruments de 2<sup>e</sup> génération du VLT/VLTI et l'interféromètre millimétrique ALMA (en collaboration mondiale). Les perspectives d'utilisation de la station Concordia pour l'astrophysique sont également prometteuses, et une première expérience dédiée à la recherche d'exoplanètes est prévue pour 2009. Il faut ajouter à ce plan de charge déjà impressionnant les collaborations avec la NASA (mission solaire STEREO lancée en 2006, Mars Science Laboratory » prévu pour 2009...). La montée en puissance des collaborations avec le Japon (SELENE), la Chine (SVOM, SMES, K'uafu, Chang'e), mais aussi l'Inde (Chandrayan) est remarquable. Au-delà de 2010, la communauté française s'est déjà très bien positionnée sur les grands enjeux que représentent les «Extremely Large Telescopes» et le «Square Kilometer Array» (ESO), la mission d'astrométrie GAIA puis la mission BepiColombo vers Mercure, le véhicule martien «ExoMars» (ESA) et la collaboration sur le grand télescope spatial «JWST» (NASA/ESA).

L'ensemble de ces équipements a déjà représenté en coût consolidé un investissement de plus de 2 milliards d'euros sur 15 ans pour la communauté nationale, et la France s'est engagée à poursuivre cet effort à un niveau comparable jusqu'en 2015. Il serait irresponsable de ne pas participer pleinement à leur exploitation scientifique, faute de moyens

humains et matériels. La communauté scientifique française s'y emploie avec succès jusqu'à présent, mais elle est proche de la limite de rupture, car il lui faut également s'impliquer dans les nouveaux programmes dont dépend l'avenir de notre communauté à moyen terme. La période 2002-2006 a permis d'atteindre une situation équilibrée entre exploitation scientifique et préparation de programmes, mais la forte croissance des tâches s'est accompagnée d'une diminution des moyens humains. La progression des recrutements de Maîtres de Conférences en astrophysique depuis quelques années et les possibilités nouvelles en terme de post-doc ont en partie (mais en partie seulement) compensé le déficit de recrutement par rapport au départs pour les chercheurs CNRS : 320 chercheurs étaient évalués par la section 14 en 2003 (dont 5 qui se sont depuis rattachés à la section 19), 300 chercheurs sont évalués par la section 17 en 2007. La situation IT est tout aussi critique car il faut assurer en parallèle le suivi et l'exploitation des équipements déjà en service tout en poursuivant le développement des expériences futures et en maintenant un effort en R&D avec des moyens humains constitués pour l'essentiel d'IT CNRS. Les effectifs IT ont baissé de 10% entre début 2003 et début 2007, cette évolution correspondant à des départs massifs (près de 30% des effectifs) non totalement compensés. Ces flux importants ont permis de faire évoluer les métiers en renforçant en particulier la mise en réseau, la mise à disposition et le traitement des données. La proportion de postes niveau IR a augmenté. Le nombre de départs ne va commencer à diminuer qu'en 2009, de nombreux agents ayant prolongé leur activité compte tenu de la réforme des retraites. Il faut impérativement remplacer ces départs, tout en continuant à faire évoluer les métiers, pour permettre aux unités d'assumer leurs engagements nationaux et internationaux.

Compte tenu de l'importance des enjeux et de la pression sur les ressources humaines, il était essentiel de se structurer de manière efficace et d'envisager des redéploiements. La période 2002-2006 a permis de finaliser un schéma performant dans le contexte de l'INSU, avec six programmes nationaux (voir Tableau 1)

couvrant l'ensemble des thématiques à l'exception des hautes énergies (GDR) et des systèmes de référence (ce champ est couvert par des structures plus larges comme le GRGS). C'est sur la base de cette structuration que seront présentés le bilan et les perspectives des différentes thématiques scientifiques de notre discipline dans la section suivante. Pendant cette période, deux actions spécifiques dédiées aux outils de l'astrophysique ont rejoint l'action spécifique « haute résolution angulaire » (l'un des domaines de pointe pour l'astrophysique française) et l'action spécifique consacrée à la simulation numérique (créée en 2001). L'une est consacrée au développement de l'observatoire virtuel et l'autre à la préparation de l'interféromètre millimétrique ALMA au Chili. Les moyens internationaux étant de plus en plus performants, le colloque de prospective de 2003 avait identifié pour les sites nationaux une phase d'exploitation avec de nouveaux instruments (FORT à Nancay, SOPHIE à l'OHP, NARVAL au TBL). La mise en place de cette génération d'instruments vient de se conclure avec succès avec la première lumière de SOPHIE (détection d'exoplanètes). Au-delà de l'exploitation de ces trois instruments, la prospective à mi-parcours de l'INSU en 2006 confirme la mise en place d'une nouvelle logique pour ces sites, maintenant un accès au ciel sur le territoire national en associant plus étroitement les régions et en élargissant les missions.

**Tableau 1 : Programmes nationaux et GDR pilotés par la division « Astronomie et Astrophysique » de l'INSU**

PNC : Programme National de Cosmologie
<b>PNG : Programme National Galaxies</b>
<b>PCHE : GDR « Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie »</b>
<b>PCMI : Programme National Physique et Chimie du Milieu Interstellaire</b>
PNPS : Programme National de Physique Stellaire
PNST : Programme National Soleil Terre
<b>PNP : Programme National de Planétologie</b>
Exobio : GDR « Exobiologie »

Le nouveau contexte de la recherche française qui résulte de la mise en place de la Loi de Programme pour la Recherche n'est pas particulièrement favorable à l'astrophysique. En effet, nos thématiques relèvent pour l'essentiel d'efforts sur le long terme, ce qui se prête mal à un financement exclusif par projets de 3 ans (ANR). On peut d'ailleurs noter que seul le thème blanc permet à nos communautés d'émerger à l'ANR. Les succès enregistrés depuis deux ans ont cependant permis d'augmenter de manière non négligeable les possibilités d'accueil de post-doctorants. L'Astrophysique, bien représentée dans les PRES, est très peu concernée par les 13 RTRA déjà sélectionnés, même si on peut penser que le réseau « physique des deux infinis » actuellement soutenu par le CNRS pourrait prochainement les rejoindre. Les sections par thématiques et celle consacrée à la dimension européenne démontrent l'implication croissante de notre communauté dans les réseaux européens et dans la mise en place de l'Espace Européen de la Recherche. La gestion de tels réseaux requiert des efforts considérables compte tenu du soutien insuffisant en terme de personnels administratifs. Si l'on prend également en compte la complexification du paysage (PRES, RTRA, etc.), c'est une charge de plus en plus lourde qui pèse sur les directeurs d'unités (qui ont de plus en plus d'interlocuteurs et de dossiers à remplir) et les services administratifs.

La situation de l'astrophysique française est donc paradoxale. Bien structurée, sa visibilité n'a probablement jamais été aussi grande au niveau international depuis l'âge d'or de l'observatoire de Paris sous la direction des Cassini. L'intérêt porté par les grands médias est croissant et l'accueil très favorable au niveau du grand public. Le bilan scientifique est indiscutable, et les perspectives à moyen terme tout aussi exaltantes. Cette dynamique risque cependant d'être brisée si l'on continue à paupériser cette communauté en terme de moyens humains.

## 2 – ANALYSE PAR THÉMATIQUES

### 2.1 LA COSMOLOGIE

Cette thématique se consacre aux premières étapes de l'évolution de l'Univers, depuis le big bang jusqu'au découplage entre les photons et la matière baryonique, à partir duquel l'univers devient observable par l'ensemble des moyens de l'astronomie. Cette phase de l'évolution de l'univers constitue un laboratoire incomparable au niveau des échelles de temps, d'espace et d'énergie spécifique. Les nouveaux concepts issus des observations des dernières années (matière sombre, énergie noire) représentent des enjeux majeurs pour la physique théorique et la physique des particules. Le lien entre les anisotropies lors des premières phases de l'expansion et la formation des grandes structures de l'univers est également un sujet d'étude important, présentant des synergies avec la physique des galaxies, présentée dans la section suivante.

#### Faits marquants

Toutes les mesures récentes dans le domaine de la cosmologie observationnelle (fond diffus, cisaillement, supernovae lointaines, lentilles gravitationnelles, amas de galaxies et forêt Lyman-alpha), convergent vers le fameux modèle dit de « concordance ». Celui-ci rend compte de la courbure géométrique nulle de l'Univers à l'aide d'ingrédients pratiquement inconnus de la physique du « modèle standard » : la matière sombre pour environ 30 % et l'énergie noire pour environ 70 % de la masse totale (la matière connue, les baryons, ne représentant que quelques pourcents de la densité totale).

Sur le plan instrumental, les derniers mois ont été marqués par l'achèvement, l'étalonnage et la livraison de l'instrument bolométrique Français HFI qui sera embarqué sur le satellite

Européen Planck (lancement prévu en 2008). Cet instrument répond à des défis technologiques considérables. Il embarque 52 bolomètres refroidis à 0,1 Kelvin. La sensibilité de ces détecteurs est jusqu'à deux fois meilleure que ce que prévoyait le plan de charge. L'ensemble de cette mission permettra de dresser la carte du ciel micro-onde au micro-Kelvin près.

## Bilan des quatre dernières années

La cosmologie a connu des avancées considérables au cours des dernières années. Une des raisons principales en est le regroupement des moyens autant matériels qu'humains au niveau européen. Parmi les grandes avancées dans ce domaine, on peut retenir, d'une part la connaissance de plus en plus précise du fond diffus cosmologique et, d'autre part, les progrès majeurs faits dans l'observation et l'interprétation de l'évolution de l'Univers dans son ensemble (galaxies et gaz intergalactique).

Le fond diffus cosmologique (CMB) est le bain de radiation qui remplit l'Univers entièrement et qui a été émis quand celui-ci avait à peine 300 000 ans d'âge. Il se caractérise actuellement par un rayonnement de corps noir de température 2,7 K. Dans l'attente de la détection d'autres messagers comme les neutrinos ou bien les ondes gravitationnelles, ce bain de photons est pour l'instant le seul témoin encore intact des tous premiers instants de l'Univers. Les derniers résultats sur le CMB ont été fournis en 2003 par le satellite américain WMAP lancé en 2001, mais les français ont été déterminants dans ce domaine avec l'expérience ballon Archéops. Ces mesures démontrent la courbure nulle de l'Univers prédite par l'Inflation, et compte tenu de la densité insuffisante de la matière connue (les baryons), elles corroborent la mesure de l'accélération de l'expansion cosmique mise en évidence par l'observation de supernovae lointaines. Dans l'avenir proche, le satellite européen Planck-Surveyor devrait révolutionner le domaine. Il sera lancé en 2008 et la France participe de façon prépondérante aux réalisations de l'un des deux instruments focaux et de son centre de contrôle associé.

L'astronomie optique a été grandement favorisée par l'entrée en phase opérationnelle du Very Large Telescope européen installé au Chili et qui est venu concurrencer de façon convaincante les télescopes américains. Il a permis en particulier de repousser jusqu'à des époques de plus en plus précoces notre connaissance de l'évolution de l'Univers. Les Français sont partie prenante de la plupart des découvertes importantes. L'observation des premiers objets qui se sont formés dans l'Univers est l'une des priorités de la communauté internationale mais l'étude de l'évolution de l'Univers dans son ensemble est la question qui mobilise le plus d'astrophysiciens dans ce domaine. Tous les instruments du VLT sont utilisés pour l'étude des objets de l'Univers et de leur évolution (galaxies proches, amas de galaxies, milieu intergalactique, proto-galaxies, etc.) et, en particulier l'instrument franco-italien VIMOS. Par certains aspects, l'univers lointain est plus facilement accessible dans l'infrarouge et le sub-millimétrique. En particulier des études importantes ont été menées sur des objets lointains avec l'interféromètre du Plateau de Bure et le satellite américain Spitzer lancé en 2003, mais ce domaine appartient principalement à l'avenir avec l'avènement prochain de nouveaux instruments comme l'interféromètre international ALMA et le satellite européen Herschel, projets dans lesquels les français jouent un rôle de premier plan.

L'astronomie extra-galactique s'appuie de plus en plus sur de grands relevés de milliers voir de millions d'objets. Ils sont faits en particulier en imagerie optique et infrarouge. Le CFHT a été équipé de caméras grand champ optique et infrarouge et la France a installé un centre de traitement des données, Terapix, pour prendre en charge la quantité colossale de données produites. En particulier, des contraintes fortes sur les modèles cosmologiques ont été obtenues à partir des grands relevés de supernovae et de weak-lensing utilisant les données du Legacy survey mis en place sur le CFHT avec un total de 500 nuits dédiées à ces observations. Ce relevé mobilise une part importante de la communauté. Notons en outre que les astronomes participent aux expériences qui tentent de trouver une réponse

à l'énigme de la matière noire en essayant de détecter les particules correspondantes. L'expérience française *Edelweiss* est ainsi une des expériences phare dans ce domaine.

À l'appui de toutes ces observations, des simulations numériques lourdes sont développées qui modélisent les structures de l'Univers dans un contexte cosmologique. La compétition internationale est rude et nécessite des moyens de calcul considérables mais les français tirent bien leur épingle du jeu. Il est important de noter qu'actuellement la majorité des projets bénéficient du support des simulations numériques que ce soit au niveau de la préparation que de l'analyse. Le développement de simulations numériques lourdes est donc une priorité du domaine.

### Forces et faiblesses de la communauté

Avec une entrée en service prévue début 2009, le projet *Planck* est sans nul doute l'un des principaux atouts de notre communauté dans le domaine de la cosmologie pour les années à venir. Il fédère maintenant une communauté française et européenne nombreuse (plusieurs centaines de personnes). Toutefois, après un investissement massif et malgré un leadership clair de la France sur la partie instrumentale, il existe pour notre communauté un risque de ne pas obtenir le retour qu'elle mérite au moment de l'exploitation scientifique si nous n'y sommes pas vigilants. Il est donc important d'investir dans la partie théorie, simulation et modélisation de ce domaine scientifique. On peut mentionner en particulier les modélisations lourdes sur l'évolution des grandes structures de l'Univers. D'autre part, la communauté française est très impliquée dans les projets de grands relevés à venir (*Cosmos*, *DUNE/SNAP*, etc.) qui correspondent à la nécessité d'étudier et de comprendre l'Univers dans son ensemble.

De plus, avant même le lancement de la mission, la communauté mondiale se mobilise pour concevoir la mission suivante qui permettrait de mesurer les modes polarisés de type «B» du CMB, image directe du bain d'ondes

de gravitation primordiales. Même si cela semble précoce, la France doit mettre des forces importantes dans cette préparation afin d'être de la partie au-delà de *Planck*.

### Grandes questions et perspectives

Pour résumer on peut dire que les résultats des dernières années ont ouvert plus de questions qu'ils n'ont donnés de réponses. Du moins ils ont permis d'asseoir comme réalité intangible une incompatibilité de fond entre les observations de l'Univers aux échelles cosmiques et les lois de la physique établies au laboratoire et dans notre système solaire. En effet, tant qu'aucune particule de matière noire n'a été détectée, ou que les effets de l'énergie du vide ne se traduisent pas par autre chose qu'une expansion accélérée de l'Univers, alors toutes les hypothèses théoriques sont permises, comme par exemple celle qui consiste à remettre en question la validité de la loi de Newton aux grandes échelles. Tous les cosmologistes sont aujourd'hui bien conscients des contraintes posées par les observations, et l'enjeu des années à venir sera de répondre à ces questions par un travail qui ne peut se concevoir que dans une approche interdisciplinaire entre l'astrophysique, la physique fondamentale et la physique des particules. C'est bien l'approche qu'a choisie la communauté des «Astroparticules» avec la CID 47 et le Programme InterDisciplinaire du même nom (*voir* § 4.1).

## 2.2 PHYSIQUE DES GALAXIES

La thématique «Galaxies» se structure autour de deux problématiques majeures : comprendre les mécanismes de formation des galaxies et reconstruire leur évolution au cours du temps, de l'apparition des premiers objets dans l'univers jusqu'à l'époque actuelle. Ce double questionnement se décline de manière plus détaillée en :

– la recherche et l'étude des premiers objets dans l'univers ;

– l'histoire de la formation stellaire : comprendre la physique et l'évolution du taux de formation d'étoiles au cours du temps, comprendre comment s'est assemblée la masse dans l'univers ;

– l'histoire de la formation des éléments : comprendre l'enrichissement du milieu inter-stellaire et la synthèse des éléments dans les étoiles ;

– l'évolution dynamique des galaxies : comprendre la formation des sous-structures, et, dans les amas, les interactions entre galaxies et l'interaction avec le milieu intra-amas ;

– l'interaction entre les galaxies et leur noyau actif : comprendre la formation des trous noirs centraux et leur alimentation en gaz ;

– les échanges entre les galaxies et le milieu inter-galactique : comprendre la pollution du milieu inter-galactique en métaux et l'alimentation en gaz des galaxies.

## Faits marquants

La mise en évidence de l'augmentation soudaine de la profondeur optique du milieu intergalactique au-delà de décalages spectraux supérieurs à six grâce à des observations de quasars lointains montre que la réionisation de l'univers se termine tardivement dans l'histoire de l'univers. La détection d'objets à des décalages spectraux supérieurs à 6 ne saurait tarder et plusieurs équipes françaises sont bien placées dans ce domaine. Plusieurs grands relevés profonds du ciel sont bien avancés ou ont été achevés (SDSS, GALEX, VLT/VIMOS, CFHT-LS). La découverte de nouvelles populations de galaxies remet en cause les scénarii de formation et d'évolution. Les modèles spectrophotométriques comparés aux données des grands relevés permettent de déterminer statistiquement les caractéristiques physiques des galaxies et leur évolution.

## Bilan des quatre dernières années

Un des points saillants de l'activité de cette thématique au cours des récentes années est la croissance de la qualité et de la quantité des données avec l'apparition d'instruments nouveaux, la multiplication d'observations multi longueur d'onde et, surtout, la mise en place de grands relevés (SDSS, GALEX, VIMOS, CFHT-LS, Spitzer, etc.). Un autre point saillant est l'extension de la modélisation et des simulations numériques qui permettent, d'une part de préparer les grands relevés pour une optimisation de l'utilisation du temps de télescope, et d'autre part, d'interpréter la quantité considérable d'information que ces relevés contiennent. Les simulations permettent d'aborder la dynamique et l'évolution séculaire des galaxies ainsi que l'évolution chimique détaillée et la synthèse des populations stellaires. Associé aux progrès des simulations numériques, le développement et la plus grande sophistication des modèles semi-analytiques font que l'on peut s'intéresser à un grand nombre de propriétés des galaxies. Ces modèles sont devenus des outils puissants pour l'interprétation des observations multi-longueur d'onde qui tendent à se généraliser. Quelques résultats sont à ajouter aux faits marquants cités précédemment :

– des sondages grand champ et profonds de galaxies (CFHT-LS, VIMOS, GALEX, etc.), à forte participation française, ont mis en évidence l'évolution considérable au cours du temps de l'activité stellaire des galaxies, et de leur morphologie en général. Une nouvelle détermination du taux de formation d'étoiles à partir d'observations millimétriques montre que celui-ci est très élevé à  $z > 2$  ;

– l'histoire de la formation d'étoiles et de l'assemblage de la masse dans les galaxies a commencé à prendre forme grâce aux relevés profonds effectués par le satellite infra-rouge de la NASA, Spitzer, ainsi qu'à l'interprétation (mais pour des périodes plus récentes) du grand relevé du ciel SDSS ;

– l'utilisation de la spectroscopie 3D au Very Large Telescope et en particulier de l'instrument GIRAFFE, a permis de faire des études



détaillées de galaxies (courbes de rotation, gradients de métallicité, ionisation) à grand décalage spectral, jusqu'à  $z = 1$  ;

- de nombreuses études ont été menées sur le milieu intergalactique grâce à la pleine utilisation du spectrographe UVES au VLT. Elles ont en particulier démontré pour la première fois l'existence de structures plus grandes que 5 Mpc dans l'univers lointain ( $z > 2$ ) et amené la détection d'hydrogène moléculaire à grand  $z$  ;

- les progrès en haute résolution spatiale et spectrale ont permis la spectroscopie des étoiles individuelles dans les galaxies du Groupe Local et le halo de notre Galaxie. Plusieurs membres du groupe local ont été découverts et les interactions de galaxies naines avec les deux grandes galaxies spirales, M31 et Voie Lactée, ont été révélées et modélisées ;

- de nombreuses études se sont penchées sur la détermination de l'excès de masse dans le centre des galaxies, très probablement lié à la présence d'un trou noir massif. L'impact de tels trous noirs sur les différentes étapes de la formation et de l'évolution des galaxies reste à préciser. Enfin, la controverse sur les profils de densité des halos de matière noire associés aux galaxies n'est toujours pas résolue ;

- l'étude des noyaux actifs de galaxies a bénéficié du développement des techniques de haute résolution angulaire dans le proche infrarouge. En optique adaptative avec l'instrument PUEO du CFHT et la mise en service de NAOS au VLT. Puis en interférométrie avec les premiers résultats sur des sources extragalactiques obtenus avec VINCI et MIDI au VLTi.

## **Forces et faiblesses de la communauté**

L'existence d'un Programme National est une force pour cette communauté. Ce regroupement lui a permis d'accroître sa cohésion et de définir clairement ses priorités en particulier sur le plan instrumental. Cette thématique est, et sera de plus en plus, à l'interface d'autres disciplines comme la Cosmologie, la Physique Stellaire, la Physique du Milieu Interstellaire.

Cet atout doit être exploité en accentuant les relations avec les Programmes concernés (PNC, PNPS, PCMI) et en menant des actions de grande visibilité. Plusieurs autres facteurs positifs sont en émergence :

- la montée en puissance sur tous les télescopes de la spectrographie 3D, outil privilégié pour l'étude des galaxies et domaine dans lequel la France a été pionnière. La haute résolution spatiale et spectrale devient un outil clé pour la communauté ;

- l'arrivée à court et moyen termes de nouveaux instruments dans l'IR (Herschell, JWST, ELT) et le sub-mm (Alma) ;

- la montée en puissance et la « démocratisation » des moyens de calculs puissants centralisés (IDRIS : 3 machines dans les Top500 mondiaux) et autonomes (Grappes/fermes de PC, etc.) permettant des progrès quantitatifs (résolution, etc.) et qualitatifs (inclusion de phénomènes physiques complexes, etc.). Il faut aussi noter le succès des efforts de regroupement des forces en « simulations numériques » au travers de l'Action Spécifique (ASSNA) ;

- le regroupement des efforts autour des bases de données (Lyon-Strasbourg-Paris) qui devrait permettre une visibilité internationale plus forte et permettre l'orientation résolue vers le concept d'Observatoire Virtuel.

Comme pour toutes les autres disciplines, on doit noter la difficulté d'obtenir un volant de post-docs adéquat apportant un soutien, soit à la phase de définition des campagnes d'observation, soit à la phase d'exploitation des données. Il n'est pas sûr que l'ANR offre toutes les garanties d'une répartition efficace et pertinente des moyens de la communauté. Il est notable que la communauté française AGN s'affaiblit par rapport à une communauté internationale dynamique. La communauté a quelques difficultés à se positionner de manière optimale sur certains grands projets du futur, compte tenu du spectre très large de projets instrumentaux nouveaux.

## Grandes questions et perspectives

Les deux principaux thèmes de recherche de la communauté pour les années à venir seront :

1. galaxies résolues en étoiles : Formation d'étoiles à petite échelle en relation avec le milieu interstellaire présent ; Populations stellaires ; Dynamique et histoire des différents composants des galaxies ;

2. formation et évolution des galaxies, en fonction de l'environnement et au sein du milieu intergalactique ; Physique des galaxies en fonction du décalage spectral ; Formation des premiers objets (AGN, Starbursts).

Avec les progrès de l'astrophysique moderne, les frontières du domaine évoluent ; notre univers local s'agrandit. L'ensemble des galaxies résolues en étoiles, qui se limitait autrefois à la seule Voie Lactée, s'est étendu ces dernières années aux galaxies du Groupe Local grâce au HST, et s'étendra bientôt jusqu'à inclure l'amas de Virgo lorsque le JWST et les ELTs seront en service. Les détails de la structure de notre galaxie en tant qu'ensemble d'étoiles seront également accessibles grâce à la mission GAIA.

La physique des galaxies est un domaine en pleine expansion, et il est remarquable par exemple que deux des quatre thèmes majeurs motivant la construction des ELTs soient en étroite relation avec les thèmes prioritaires de cette discipline (thèmes discutés lors de la réunion Opticon-ELT de Marseille ; <http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~imh/ELT/>). En particulier, la physique des galaxies peut être étudiée de plus en plus tôt dans l'Univers.

Les projets instrumentaux nouveaux se conçoivent de plus en plus autour de grands relevés (CFHT, VLT 2<sup>e</sup> génération). Le multiplage se généralise (grand nombre d'objets observés simultanément, spectroscopie 3D, grand champ et haute résolution spatiale ou spectrale), les projets scientifiques sont multi-longueur d'ondes (formation d'étoiles : Spitzer/Galex/Iram) ; les bases de données prennent une importance capitale (Hyperleda, Migale, VVDS, Denis, Goldmine, etc.) aussi bien pour

les observations que dans la modélisation (Gissel, Pegase) ou les simulations (Galics, Horizon).

La qualité des simulations numériques tant du point de vue de la dynamique que de l'évolution chimique ne cessant d'augmenter, on s'attend à une description de plus en plus fine des différents processus physiques en action. Enfin, si la nature de la matière noire est élucidée dans la décennie à venir, les difficultés de compréhension de la dynamique des galaxies seront définitivement levées.

## 2.3 ASTROPHYSIQUE DES HAUTES ÉNERGIES

Sites de maints phénomènes cosmiques de haute énergie, mais aussi laboratoires de l'extrême, où règnent des conditions physiques hors de portée de l'expérimentation directe, les objets compacts suscitent désormais l'intérêt d'une communauté grandissante de physiciens. Leur inventaire fait apparaître d'une part les étoiles à neutrons et les trous noirs de masse stellaire et d'autre part les trous noirs ultra-massifs nichés au cœur des noyaux actifs de galaxie. Ces objets ne se manifestent que lorsqu'ils absorbent la matière environnante, et ce phénomène d'accrétion est fréquemment associé à des éjections de plasma à des vitesses relativistes. L'autre grand sujet d'étude porte sur les processus d'accélération des rayons cosmiques, dans un champ magnétique en rotation de plusieurs millions de teslas (pulsars et leurs vents), ou dans des chocs très forts non collisionnels (explosions de supernovae, jets provenant des objets compacts).

Les phénomènes cosmiques de haute énergie produisent un rayonnement non-thermique intense dans un très vaste domaine spectral. Même si les observations en photons X et gamma restent le moyen privilégié pour étudier les processus physiques qui sont à l'œuvre, il convient de les observer sur la plus large gamme spectrale possible (études multi-longueurs d'onde, en particulier dans le domaine

radio). Leur capacité à accélérer des particules ouvre également la possibilité de détecter ces mêmes particules et les neutrinos de haute énergie qu'elles produisent. Enfin leurs champs de gravitation intenses doivent se manifester comme sources d'ondes gravitationnelles.

## Faits marquants

**La révolution de l'astronomie gamma au TeV:** Le télescope HESS, installé en Namibie pour voir le Centre Galactique, est pleinement opérationnel depuis début 2004. Il s'agit d'un ensemble de quatre télescopes Cerenkov, qui étudient les gerbes créées dans l'atmosphère par les rayons gamma autour du TeV. Cet instrument conjugue deux techniques mises en œuvre (séparément) dans la génération précédente : la stéréoscopie (voir la même gerbe avec plusieurs télescopes) et l'utilisation de caméras rapides ( $< 100$  ns) comprenant un millier de photomultiplicateurs. HESS a ainsi permis d'améliorer la résolution spatiale et de baisser d'un facteur 10 la limite de détection, dépassant le mode pionnier pour atteindre le mode exploratoire. Le résultat le plus frappant est la découverte de plus de 20 sources accélératrices de particules dans le plan galactique, dont la majorité sont étendues (nébuleuses synchrotron et restes de supernovae). Une extension de HESS est en cours avec un 5<sup>e</sup> télescope, et des instruments comparables sont en cours d'installation dans l'hémisphère Nord. On peut donc s'attendre à de nouvelles découvertes.

**La mise en service de l'observatoire spatial INTEGRAL de l'ESA en 2002:** Les deux instruments principaux, qui couvrent les rayons X durs et gamma de 20 keV à 10 MeV, ont obtenu des résultats majeurs. La carte des positons obtenue par le spectromètre SPI montre que l'émission est dominée par le bulbe galactique, avec une faible contribution du disque. Le niveau de cette émission est plus important que ce qu'on pouvait attendre des sources astrophysiques, ce qui a suscité l'intérêt des physiciens qui recherchent la nature de la matière noire. L'imageur IBIS a montré que

l'essentiel de l'émission X dure Galactique est due à des sources ponctuelles, dont la plupart sont des sources binaires qui sont masquées par la poussière et le gaz interstellaires à plus grande longueur d'onde. Leur très forte variabilité est attribuée à une instabilité de l'accrétion du vent du compagnon supergéant par l'étoile à neutrons.

## Bilan des quatre dernières années

Les deux grands observatoires en rayons X, Chandra (américain, qui met l'accent sur l'imagerie) et XMM Newton (européen, qui met l'accent sur la spectroscopie) restent les piliers de l'étude des sources de haute énergie. Le satellite américain Rossi XTE s'est révélé précieux pour caractériser la variabilité des sources X compactes. Le satellite japonais Suzaku a été lancé en 2005. Le bolomètre qu'il portait, qui devait révolutionner l'étude spectrale des sources de rayons X, n'a malheureusement pas fonctionné mais Suzaku reste intéressant pour étudier l'accrétion car il associe un détecteur en X durs ( $> 10$  keV) au télescope X.

Le lancement des satellites américains HETE 2 en 2000 puis Swift en 2004 a permis de nouvelles avancées dans la compréhension des sursauts gamma, les événements les plus énergétiques de l'Univers (énergie rayonnée en gamma  $\sim 10^{51}$  ergs). L'explication la plus plausible pour les sursauts « longs » ( $> 2$  s) met en jeu l'effondrement d'un cœur d'étoile massive qui produit un trou noir et une brutale éjection relativiste, sans doute focalisée. Quelques sursauts courts ( $< 2$  s) ont maintenant été localisés, et pourraient être dus à la coalescence d'étoiles à neutrons. Les émissions observées résultent dans les deux cas de chocs induits d'abord au sein de l'éjection puis lorsque l'éjection rencontre le milieu environnant. Les sursauts gammas, qui permettent de sonder la formation stellaire dans l'Univers lointain, suscitent désormais l'intérêt d'une communauté qui s'étend bien au-delà de l'astrophysique des hautes énergies. La France vient d'engager un programme spatial dédié à

la détection de sursauts gamma, SVOM/Éclairs (avec la Chine) pour 2011-2012.

On s'attend dans le futur immédiat à de grandes avancées dans le domaine de l'astronomie gamma au GeV, avec le lancement d'AGILE (italien) en avril 2007, qui comporte un détecteur en X durs associé, et surtout de GLAST (américain) en décembre 2007, qui améliorera la limite de détection d'un facteur 20 par rapport à son prédécesseur EGRET. Le nombre de sources accessibles atteindra plusieurs milliers, ce qui permettra d'initier des études de populations.

Les dernières années ont été aussi riches en projets d'astronomie « non-photonique », qui commencent maintenant à fonctionner. C'est le cas des détecteurs de neutrinos cosmiques de très haute énergie (AMANDA dans la glace du pôle sud est opérationnel et son successeur IceCube en construction, ANTARES en Méditerranée est en cours de déploiement). L'observatoire Pierre Auger devrait déterminer précisément le spectre et la composition des rayons cosmiques d'énergies extrêmes ( $> 10^{19}$  eV). Partiellement opérationnel, il a déjà atteint les performances de ses prédécesseurs. Enfin les interféromètres LIGO, VIRGO et GEO pour la détection d'ondes gravitationnelles en provenance des objets compacts galactiques commencent à obtenir des données. Le détecteur spatial de rayons cosmiques d'antimatière (AMS) est prêt mais en attente d'une opportunité de lancement vers la station spatiale.

## Forces et faiblesses de la communauté

Par rapport à ses voisins (Angleterre, Allemagne, Italie), la France reste en retrait en astronomie X classique ( $< 10$  keV). Des équipes du CEA à Saclay, du CESR à Toulouse et de l'Observatoire de Strasbourg ont cependant participé à XMM-Newton (EPIC et SSC) et contribuent à la préparation du futur observatoire européen en rayons X (XEUS) à l'échéance 2020. En revanche, la France est un acteur majeur en rayons X durs et gamma, les deux laboratoires spatiaux d'astrophysique

des hautes énergies (CESR à Toulouse et CEA/SAP à Saclay) étant respectivement PI (investigateur principal) et co-PI des deux instruments d'INTEGRAL (SPI et IBIS). Cette communauté très dynamique a poursuivi les développements technologiques réalisés pour INTEGRAL, en particulier autour des détecteurs à base de CdTe qui allient une bonne sensibilité et une bonne résolution spectrale à température ambiante. Ces détecteurs sont au cœur des programmes SVOM/Éclairs pour les sursauts gamma et SIMBOL-X (avec l'Italie) pour les objets compacts. Le nouveau laboratoire APC à Paris y participe, et plusieurs autres laboratoires s'impliquent dans la préparation scientifique, en particulier l'Observatoire de Strasbourg, le LUTH à Meudon et le LAOG à Grenoble.

La France est également très présente en gammas de plus haute énergie (GeV et TeV). Les laboratoires d'astrophysique cités plus haut sont associés à ces programmes, mais la force de frappe pour le développement instrumental est maintenant apportée par des équipes de physique des particules. En effet les techniques de détection en astronomie gamma sont largement inspirées de celles mises en œuvre auprès des grands accélérateurs comme ceux du CERN. Grâce à ces initiatives, les équipes françaises bénéficieront dès 2008 avec GLAST et HESS 2 d'un accès au ciel gamma sur 5 décades (100 MeV à 10 TeV avec une sensibilité sans précédent.

Les projets non photoniques sont menés entièrement par les laboratoires de physique des particules. Les astrophysiciens n'interviennent que dans les aspects théoriques. L'observatoire Pierre Auger en Argentine est un projet mondial dans lequel la France tient toute sa place. Après avoir lancé ANTARES, les équipes françaises sont entrées dans le réseau KM3NeT, qui fédère toute la communauté européenne autour d'une étude d'un détecteur de neutrinos beaucoup plus gros, toujours en Méditerranée. La technologie est concurrente de l'américain IceCube mais l'exploitation ne l'est pas puisque les zones du ciel couvertes sont complémentaires. Dans le domaine des ondes gravitationnelles, la France est associée avec l'Italie

pour l'interféromètre VIRGO. À moyen terme, ce projet devrait s'associer à ses concurrents LIGO (américain) et GEO (anglo-allemand). À plus long terme, la France est présente, à travers le laboratoire APC, dans les développements spatiaux pour le projet LISA à très grande ligne de base. Un soutien théorique important est fourni par le LUTH, pour le calcul en relativité générale des modèles de signal utilisés par ces observatoires.

La communauté française est organisée autour du groupement de recherche sur les phénomènes cosmiques de haute énergie, le GdR PCHE, regroupant des astrophysiciens, des physiciens des particules et des théoriciens du CNRS, des universités et du CEA. Les liens sont étroits avec le programme interdisciplinaire « Astroparticules » du CNRS. Tous les projets instrumentaux sont associés à un gros effort de simulation, de dépouillement, de traitement et d'observations multi-longueurs d'onde, afin d'interpréter les données. En parallèle, la communauté française est également active dans la théorie, la simulation numérique et la modélisation, de la production des rayons cosmiques dans les chocs de supernovae, aux sursauts gammas et aux mécanismes d'accrétion et d'éjection.

En résumé, la thématique des hautes énergies est très active en France, avec un dynamisme particulier ces dernières années grâce à l'implication grandissante des physiciens des particules dans l'étude de l'Univers lointain.

## Grandes questions et perspectives

***Einstein a-t-il eu le dernier mot sur la gravité?*** Jusqu'à présent, la théorie de la relativité générale d'Einstein n'a été vérifiée que dans des cas (système solaire, pulsar binaire) où les champs de gravité sont relativement faibles (vitesses caractéristiques  $< 10^{-3} c$ ). Il faut mettre cette théorie à l'épreuve dans les champs de gravité les plus intenses, en détectant les ondes gravitationnelles suscitées par la coalescence d'objets compacts. À plus court terme, la mise en œuvre de moyens aptes à

focaliser les rayons X durs permettra déjà d'étudier au maximum d'émission les phénomènes d'accrétion et d'éjection suscités par les trous noirs. C'est ce que propose le projet SIMBOL-X du CNES, qui devrait être engagé rapidement.

***Comment fonctionnent les accélérateurs cosmiques et quelles particules y sont accélérées?*** Des sources cosmiques extrêmement puissantes bien que relativement locales, éventuellement identifiées avec des galaxies actives ou des sites de sursaut gamma, seraient-elles en mesure d'accélérer les rayons cosmiques d'ultra haute énergie? Ces derniers ne seraient-ils pas plutôt la manifestation de nouveaux domaines de la physique? Pour trancher entre ces deux possibilités, il convient de collecter beaucoup plus de ces particules (ce que va faire l'observatoire Pierre Auger), tout en observant d'éventuelles émissions corrélées de rayons gamma, de neutrinos de haute énergie et d'ondes gravitationnelles.

## 2.4 PHYSICO-CHIMIE DU MILIEU INTERSTELLAIRE

Le milieu interstellaire est l'environnement à partir duquel les étoiles et leurs planètes se forment. Les vents stellaires et les explosions de supernovae referment le cycle avec des modifications importantes de la composition (nucléosynthèse). La formation et l'évolution des molécules et des poussières dans le milieu interstellaire joue donc un rôle déterminant dans la structuration de l'Univers dès la formation des premières étoiles. Les moyens d'observation dans l'infrarouge lointain et le millimétrique, indispensables pour observer les milieux froids, permettent de découvrir des molécules de plus en plus complexes, souvent inconnues dans les conditions des laboratoires terrestres, qui pourraient avoir joué un rôle dans la genèse de molécules prébiotiques. Ces découvertes ont dynamisé une communauté transversale à l'astrophysique, la physique atomique et moléculaire, la chimie et

l'exobiologie. Les poussières jouent un rôle important tant dans l'équilibre radiatif du milieu que pour la chimie du gaz. Les ions moléculaires et les grains chargés couplent la matière neutre au champ magnétique. Le milieu interstellaire présente ainsi une vaste palette de processus physico-chimiques à l'équilibre et hors équilibre (par exemple, la chimie catalytique impliquant des nanograins isolés). Les outils déjà mis en place et ceux qui vont devenir opérationnels dans les prochaines années vont permettre d'exploiter pleinement le potentiel de diagnostic de l'imagerie et la spectroscopie des émissions des gaz et des poussières interstellaires.

## Faits marquants

Mise en évidence avec le télescope spatial infrarouge Spitzer de la composition et de l'évolution de la composante constituée de très petits grains carbonés, avec une contribution importante des expériences de laboratoire. Caractérisation de la vapeur d'eau dans des nuages interstellaires et détection incontestable de l'oxygène moléculaire (nuage « Rho Oph ») avec le satellite Odin. Découverte d'ions moléculaires négatifs dans les observations IRAM et introduction d'une nouvelle chimie dans les modèles. Mise en évidence d'une chimie multideutérée efficace en l'absence d'éléments lourds en phase gazeuse, piégés dans les manteaux des glaces interstellaires. Détection de l'émission infrarouge de poussières interstellaires et de raies d'émission de différentes molécules CO, HCN dans des quasars à grands décalages vers le rouge. Cette découverte démontre une formation rapide de poussières qui obscurcissent les étapes les plus actives de l'évolution des galaxies. On peut noter que la contribution des expériences de laboratoire a été essentielle pour les études portant sur les glaces et les grains.

## Bilan des quatre dernières années

Les développements récents de la thématique ont été stimulés par les succès obtenus avec l'IRAM et Spitzer. Les données spectros-

copiques fournies par le VLT ont révolutionné la recherche sur la nature des poussières interstellaires et leur contribution à l'évolution chimique de la matière. La nature précise des nano-particules carbonées et leur rôle de catalyseur pour la chimie interstellaire en particulier pour la formation de H<sub>2</sub> font l'objet de projets expérimentaux et théoriques étroitement liés aux résultats observationnels. Les premières étapes de la synthèse de ces nano-particules ont été observées dans les enveloppes circumstellaires. Les observations hétérodynes à haute résolution spectrale de raies atomiques et moléculaires ont permis de grandement augmenter la statistique et la dynamique spatiale sur la structure multi-échelle et turbulente du milieu interstellaire, révélant le rôle majeur de la turbulence dans la formation d'étoiles et la chimie interstellaire. Spitzer a permis de cartographier avec précision le gaz moléculaire chaud dans le milieu diffus observé par ISO (en émission) et FUSE (en absorption). De nombreuses molécules interstellaires nouvelles ont été découvertes par spectroscopie millimétrique en absorption en direction de radio-sources. Le rôle du champ magnétique dans la structuration du milieu interstellaire et la formation des étoiles a pu être mieux identifié grâce aux premières observations (très « pointues ») donnant accès à l'intensité et l'orientation du champ dans les nuages interstellaires.

Les années 2003-2006 ont été marquées par la préparation de deux observatoires majeurs : le télescope submillimétrique Herschel (ESA, lancement mi-2008), qui ouvrira tout le domaine sub-millimétrique à l'exploration spectroscopique, et l'interféromètre millimétrique ALMA (mise en service à partir de 2010) qui permettra un gain en sensibilité et résolution angulaire de 10 à 100 par rapport à l'IRAM. Les équipes Françaises se sont fortement impliquées sur les instruments d'Herschel dans un contexte de forte compétition internationale. Le rôle majeur joué dans l'IRAM a permis à la France d'être très bien positionnée dans la préparation d'ALMA. La communauté a réussi à conserver une activité scientifique de premier plan (observations avec l'IRAM, Spitzer, Odin, poursuite de l'exploitation des don-

nées d'ISO, expériences de laboratoire, etc.) pendant cette phase intense de préparation de programme.

## Forces et faiblesses de la communauté

La thématique PCMI est par essence interdisciplinaire et transverse aux disciplines de l'astrophysique (PCMI a des interfaces actives avec plusieurs programmes nationaux : PNP, PNPS, PNG, PNC et GdR Exobiologie) mais également au-delà de l'Astrophysique (Physique et Chimie). Le Programme National PCMI joue un rôle structurant indispensable compte tenu de la diversité de cette communauté, qui est bien reconnue au niveau international. La communauté française a joué un rôle moteur dans le réseau européen «Molecular Universe». La mise en service prochaine d'Herschel et ALMA est une grande opportunité, mais aussi un défi auquel la communauté se prépare, avec en particulier la mise en place en 2006 de l'action spécifique «ALMA» de l'INSU.

Les équipes constituant la communauté PCMI sont cependant petites et dispersées, tant au sein des labos d'astrophysique que dans les labos de Physique et Chimie. Elles ont de ce fait du mal à y imposer leurs priorités scientifiques, en particulier en termes de recrutements et d'équipement. La nature le plus souvent pluridisciplinaire de ces priorités est une difficulté supplémentaire. Le niveau de financement requis (> 200 k€) s'est révélé bien adapté au contexte «ANR», qui a soutenu plusieurs projets en 2005 et 2006. La communauté est actuellement sous dimensionnée pour exploiter de manière optimale les outils déjà en service et les nouveaux observatoires, Herschel et ALMA. Il faut en effet combiner les observations, la modélisation, la théorie mais également les expériences de laboratoire qui permettent des simulations et la détermination des caractéristiques spectroscopiques des différentes molécules. L'effort entrepris par le département PU avec des coloriations dédiés doit donc être poursuivi.

## Grandes questions

L'étude de la matière interstellaire et circumstellaire est liée à de nombreuses grandes questions de l'astrophysique : la formation et l'évolution des galaxies, la formation des étoiles et des planètes, et l'exploration de la chimie dans l'espace. La physique et la chimie de la matière jouent un rôle clé dans chacune de ces étapes de l'évolution de l'Univers. La caractérisation de l'état physique et chimique de la matière au cours de cette évolution et l'identification des processus physico-chimiques qui y contribuent sont donc naturellement des axes forts de cette thématique. Le milieu interstellaire est un système hors équilibre, non linéaire, turbulent, hétérogène à toutes les échelles, et aucune échelle ne peut y être considérée comme isolée ou fermée. L'émergence de structures dans ce milieu et plus généralement dans les milieux dilués de l'Univers doit être abordée dans cette perspective.

## Perspectives

L'élargissement du domaine de recherche de PCMI, résultant du gain en sensibilité et résolution angulaire des grands instruments, va accentuer la nature transverse et interdisciplinaire de cette thématique. L'évolution physico-chimique de la matière lors des phases proto-stellaires et dans les disques proto-planétaires est un sujet phare qui va se développer fortement avec l'objectif de faire le lien avec la matière primitive dans le système solaire. Un enjeu majeur de ce point de vue est la recherche de molécules pré-biotiques hors du système solaire.

Herschel et ALMA représentent les perspectives observationnelles majeures de la discipline pour les années qui viennent. Ces observatoires vont permettre de déterminer la structure en densité et en vitesse de la matière du milieu diffus aux condensations proto-stellaires sur une large gamme d'échelles angulaires avec une statistique significative. Il s'agit là d'un enjeu essentiel car le milieu interstellaire se révèle structuré à toutes les échelles déjà

accessibles à l'observation. L'interprétation de ces données devra s'appuyer sur un développement de notre compréhension des propriétés de la turbulence MHD supersonique. ALMA devrait permettre de localiser les régions de dissipation de l'énergie turbulente, d'étudier la physique de cette dissipation et son impact sur l'évolution du milieu interstellaire. Le rôle du champ magnétique dans la structuration du milieu interstellaire et dans la formation des étoiles va pouvoir être étudié à travers la mesure de la polarisation de raies du gaz et de l'émission sub-mm des poussières. Herschel donnera accès à de nouveaux diagnostics spectroscopiques des conditions physiques particulièrement précieux pour l'étude de la formation des étoiles ( $H_2O$ ) et les transitions de phase dans le milieu diffus (CII). Herschel et ALMA créeront une nouvelle dynamique dans la recherche de nouvelles molécules. L'analyse spectroscopique du gaz là où les glaces se subliment permettra de mieux caractériser les interactions gaz-grains. La spectroscopie des poussières par Spitzer puis Herschel servira enfin à caractériser les poussières interstellaires et leur cycle de vie. Un effort important est engagé dans l'exploration des signatures spectroscopiques dans les nouveaux domaines de longueur d'onde qui seront ouverts. Il est en effet critique de connaître avec précision les transitions des molécules déjà observées afin de détecter de nouvelles espèces. Herschel permettra également de mieux identifier les composés organiques complexes (aliphatiques et aromatiques) grâce aux modes de vibration globaux, ce qui nécessitera des études dédiées en laboratoire. Le gain en sensibilité et résolution angulaire apporté par ALMA et Herschel permettra enfin d'étendre l'observation de la matière interstellaire aux autres galaxies. Cela permettra d'apporter des éléments essentiels pour comprendre le rôle de la formation stellaire dans l'évolution des galaxies. À l'horizon 2013-2014, le télescope JWST avec ses possibilités d'observation dans l'infrarouge moyen représentera la prochaine grande étape.

Le développement des techniques de détection cohérente et incohérente du rayonnement interstellaire dans l'infrarouge lointain et le sub-millimétrique doit être soutenu pour

préparer les instruments du futur. Le développement des méthodes hétérodynes, essentielles pour la spectroscopie à très haute résolution spectrale, va se poursuivre au-delà du Téra-Hertz. Les caméras bolométriques vont révolutionner les capacités présentes d'imagerie grand champ dans le domaine sub-millimétrique.

La suite logique de tous ces travaux est la mise à disposition des données de physique atomique et moléculaire dans des formats compatibles à une insertion dans l'observatoire virtuel. Des outils d'interprétation des spectres sont également mis en chantier. Les échanges interdisciplinaires doivent être renforcés suivant deux axes :

1. avec les physico-chimistes et spectroscopistes pour obtenir les données et caractériser les processus physico-chimiques (spectroscopie, excitation, réactivité chimique pour les molécules et poussières interstellaires) ;

2. avec les physiciens pour comprendre l'évolution dynamique de la matière résultant des couplages entre processus et échelles spatiales et temporelles (turbulence MHD en particulier).

## 2.5 PHYSIQUE STELLAIRE

Les recherches en cours mettent l'accent sur quelques axes thématiques forts proposés par le Programme National de Physique Stellaire. Pour la période 2007-2010, quatre thématiques prioritaires et deux thèmes transversaux émergent. Les thèmes prioritaires sont :

- la formation et l'évolution stellaire et planétaire ;
- les efforts de développement d'une nouvelle génération de modèles stellaires ;
- le magnétisme stellaire (détection et mécanismes de génération) ;
- l'interaction de l'étoile avec son environnement.



Les thèmes transversaux concernent la physique fondamentale pour l'astrophysique et la mesure des paramètres fondamentaux des étoiles. Outre le développement d'instruments (haute résolution angulaire, spectropolarimétrie, photométrie dans l'espace, etc.), de nombreux observatoires au sol ou dans l'espace sont utilisés et ouvrent une large gamme de longueurs d'onde. L'accent est mis aussi sur des méthodes de simulations numériques pour la dynamique des fluides stellaires, et du transfert de rayonnement à l'équilibre et hors équilibre.

### Faits marquants

La montée en puissance des grands interféromètres au sol opérant dans l'infrarouge a permis récemment de mesurer de façon précise les rayons stellaires d'étoiles proches. Des aplatissements plus importants que prévus furent ainsi mesurés pour des étoiles en rotation rapide comme *Altair* et *Achernar* indiquant, si besoin était, la forte nécessité de développer en parallèle les modèles adaptés d'évolution et de structure stellaire multidimensionnels. Par ailleurs, les grands interféromètres infrarouges (IOTA, VLTI), en offrant une mesure directe du rayon des étoiles pulsantes de types céphéides, permettent une meilleure calibration de leur relation période-luminosité et donc une meilleure mesure des distances dans l'Univers local.

Des avancées dans la modélisation des processus de transport ont permis de réconcilier modèles et observations des abondances du Lithium et d'autres éléments légers dans les étoiles évoluées d'amas globulaires. L'abondance primordiale du Lithium ainsi obtenue est maintenant en accord avec la détermination récente obtenue à partir des paramètres cosmologiques issus des données du satellite WMAP.

Grâce à des développements instrumentaux sans égal en spectro-polarimétrie (TCFH/ESPADONS et TBL/NARVAL), le module et la topologie du champ magnétique a pu être mesuré pour la première fois dans les parties internes d'un disque d'accrétion entourant une

étoile jeune. Les mesures sont en accord avec les topologies magnétiques utilisées par les modèles MHD pour accélérer les jets issus d'étoiles jeunes. La présence d'un champ magnétique dans les disques, qui modifie leur structure, remettrait en cause les modèles actuels de formation et de migration de planètes. La détection et la mesure de la topologie du champ magnétique dans les étoiles froides complètement convectives a des implications sur la génération du champ magnétique par les mécanismes de type dynamo.

Les grands relevés des zones de formation stellaire, rendus possibles grâce aux caméras grands champs, permettent maintenant de confirmer l'universalité de la fonction de masse des étoiles observées dans le voisinage solaire. Ils ont aussi permis de mettre en évidence une masse de l'ordre de 30 % de la masse solaire qui correspondrait à la masse typique des cœurs protostellaires avant leur effondrement. Cette évaluation est en bon accord avec les mesures effectuées à l'IRAM.

Pour terminer, on ne saurait oublier de mentionner le lancement réussi du satellite COROT (CNES/ESA), avec des performances en vol dépassant les spécifications. Outre les détections d'exoplanètes par transit, COROT est une mission pionnière en astérosismologie, dont on attend des avancées importantes pour la structure interne des étoiles.

### Bilan des quatre dernières années

Concernant les moyens d'observation au sol, les dernières années furent marquées par la mise en service d'instruments majeurs au VLT pour la spectroscopie et l'imagerie haute résolution (angulaire et spectrale) et dans l'infrarouge thermique. On note aussi la mise en service des télescopes auxiliaires (AT) du VLTI et le lancement des programmes instrumentaux de nouvelle génération à l'ESO (par exemple SPHERE, VSI, MATISSE). Sur le sol français, on note le lancement des spectrographes Narval au TBL et Sophie à l'OHP. Narval, ainsi que son « jumeau » Espadons pour le TCFH, sont dédiés à l'étude du magnétisme

stellaire. Sophie est dédié à la recherche d'exoplanètes et aux études sismologiques. Ce dernier volet s'appuie bien sûr très fortement sur le lancement réussi, fin 2006, du satellite COROT et sur le développement intensif des modèles stellaires.

Outre les faits marquants déjà mis en avant, de nombreuses autres avancées sont également dignes de mention. Citons par exemple les interféromètres infrarouges (IOTA et VLTI) qui permettent maintenant de résoudre la structure des atmosphères d'étoiles évoluées comme les supergéantes rouges et les étoiles de types Mira. Citons aussi, en complément de la mesure de la fonction de masse stellaire mentionnée plus haut, l'observation et la caractérisation de la structure à petite échelle des condensations moléculaires préstellaires qui apporte une contribution significative à la compréhension du processus de formation des étoiles. Par ailleurs, l'observation des environnements des objets jeunes (disques protoplanétaires) mais aussi ceux des étoiles évoluées de diverses familles (Variables à Longue Période, Supergéantes, Be, et vents stellaires associés au phénomène de perte de masse responsable du recyclage de la matière dans les galaxies) a fortement bénéficié de l'essor des méthodes d'observation de la haute résolution angulaire (HST, Optique Adaptative VLT-NAOS, interférométrie longue base (IOTA et VLTI), et aussi des observations radio (NRT et IRAM). Grâce à la mise en place de codes de transfert de rayonnement performants par des groupes français, ces résultats permettent déjà de mieux comprendre la chronologie d'évolution des disques avec celle de la formation des planètes. Un lien fort avec le programme national de planétologie est ici à noter, qui est appelé à se renforcer avec la mise du programme interdisciplinaire « Origine des Planètes et de la Vie ». Ces observations vont permettre d'étudier les mécanismes de génération des vents stellaires. L'obtention de ces nouvelles données d'une richesse exceptionnelle stimule le développement de nouveaux modèles pour l'astrophysique stellaire ainsi que d'expériences de laboratoire permettant d'accéder aux conditions physiques des intérieurs stellaires et des chocs dans les jets

supersoniques stellaires avec les grandes installations Laser.

## Forces et faiblesses de la communauté

La physique stellaire, domaine traditionnel d'excellence de la France, regroupe une grande variété de thèmes de recherche. La création du Programme National de Physique Stellaire (PNPS) en 1999 a été un élément important de structuration et d'animation. Il constitue maintenant un interlocuteur incontournable vis-à-vis des instances et des autres domaines de l'astrophysique et de la physique. Le PNPS participe au pilotage de la recherche en physique stellaire par la sélection et le soutien de projets théoriques, observationnels, et instrumentaux. Il organise de nombreux ateliers, colloques et écoles et favorise les échanges avec les autres programmes nationaux (PNG, PNP, ASHRA, etc.). Le vieillissement de la communauté « stellaire » pose cependant la question de son renouvellement et des choix thématiques à faire pour favoriser la mise en place de nouvelles équipes formées aux grands instruments, aux traitements massifs des données, aux simulations numériques lourdes et à l'instrumentation de pointe.

Les premiers effets de structuration sont déjà visibles à travers la forte activité de la communauté dans les réseaux européens (FP-5: *Planets, Clusters*; FP-6: *JETSET, CONSTELLATION, Molecular Universe*) et l'augmentation rapide du nombre de projets ANR acceptés (« blancs » et « jeunes chercheurs ») concernant les thèmes du PNPS. Nous sommes cependant obligés de constater la faiblesse récurrente des moyens de calculs nationaux. Cette faiblesse limite largement le développement de « gros » codes d'évolution stellaire, complexes et gourmands en besoins informatiques. Il retarde le calcul de grilles de modèles nécessaires tant pour l'exploitation des données des grands TGE que pour la préparation des nouvelles missions comme COROT et GAIA.

Il faut aussi noter la perte (temporaire?) des capacités spatiales d'imagerie dans le visible (STIS et ACS en panne sur HST) et de spec-

troscopie dans l'UV avec le ralentissement du programme FUSE. En contrepartie, on note l'ouverture de la fenêtre infrarouge thermique 10-20 microns au sol et dans l'espace, et surtout celle entre 30 et 300 microns avec le lancement de la mission Spitzer (NASA) en 2003 et celui de la mission Herschel (ESA) prévu pour mi 2008.

Plus prospectifs, les projets de très grands télescopes se multiplient avec, en particulier, la volonté affirmée de l'ESO de définir à court terme les caractéristiques d'un télescope de la classe des 40 mètres. Un positionnement rapide de la communauté stellaire sur l'intérêt de ces «ELT» (Extremely Large Telescopes) est nécessaire pour intervenir sur le choix des solutions techniques ainsi que les premiers instruments.

## Grandes questions

Dans le contexte international, notre communauté est positionnée de manière satisfaisante sur un spectre large d'avancées théoriques, observationnelles et instrumentales. Les domaines qui sont appelés à se renforcer sont l'astérosismologie ainsi que l'étude des atmosphères et des environnements circumstellaires des étoiles jeunes et évoluées. La thématique des disques d'accrétion crée des liens avec les théories de formation planétaire, qui pourront être testées par la mesure des conditions physico-chimiques à divers stades d'évolution. À l'horizon de trois ou quatre ans, les autres grandes questions identifiées par la communauté stellaire concernent les processus de transports et les effets de la rotation dans les intérieurs stellaires, en liaison avec le problème de la génération des champs magnétique et l'astérosismologie.

## Perspectives

La France a une expertise reconnue dans divers domaines dont ceux de la haute résolution angulaire, de l'hélio- et de l'astérosismologie, de la spectrométrie, des grands relevés.

Les instruments d'observation auxquels nous avons accès aujourd'hui (VLT, COROT) et à moyen terme (Herschel, ALMA puis JWST) vont faire progresser la compréhension des étoiles depuis leur structure interne jusqu'aux régions les plus étendues, en connexion avec le milieu interstellaire. Il est important de cibler l'étude des propriétés des étoiles hôtes d'exoplanètes (métallicité, binarité) afin de mieux cerner leur impact sur la formation planétaire. Cet ensemble de projets nécessite la continuité d'un soutien en personnel et en moyens afin de conserver un rôle mondial de premier plan. Il est en effet essentiel de poursuivre les développements instrumentaux (en particulier l'interférométrie au VLT) tout en exploitant de manière optimale les outils en phase d'exploitation comme COROT et bientôt Herschel. La mission GAIA (lancée en 2012) doit aussi être préparée dans de bonnes conditions. Afin aussi de renforcer le retour scientifique des instruments d'observation mais aussi celui d'expériences de laboratoire (type Laser MégaJoule), il convient sans aucun doute de continuer le renforcement des capacités de simulations numériques lourdes.

## 2.6 RELATIONS SOLEIL-TERRE

La thématique est centrée sur le couplage d'une étoile relativement stable : le Soleil, avec l'environnement spatial d'une planète particulière, la Terre, en particulier l'environnement ionisé. Les outils théoriques sont le plus souvent les mêmes alors que les techniques instrumentales permettant d'étudier le Soleil et l'environnement de la Terre sont très différentes. Les observations sol/espace simultanées des principales régions du système Soleil-Terre (couronne solaire, vent solaire, magnétosphère, ionosphère, mais aussi atmosphère) permettent aujourd'hui de donner autant de poids aux échanges entre parties du système qu'à l'analyse de chacune d'elles. Cette approche ouvre la voie à des études comparatives de systèmes similaires (planétologie) et plus généralement de systèmes astrophysiques. Cette

approche systémique est nécessaire au développement d'applications comme la « météorologie de l'espace ».

L'accessibilité du système Soleil-Terre en tant qu'objet d'étude permet une étude multidisciplinaire approfondie de mécanismes physiques fondamentaux. Les travaux conduits dans ce laboratoire naturel permettent ainsi de progresser aussi bien dans l'étude des environnements d'autres planètes que dans ceux d'autres objets astrophysiques, avec des liens forts avec la planétologie (processus d'échappement) et la physique stellaire (génération du champ magnétique, origine des vents stellaires).

## Faits marquants et bilan des quatre dernières années

**Mesure de champ magnétique dans les protubérances solaires avec THEMIS:** Ces observations conduisent à privilégier les modèles de filament faisant appel à des creux magnétiques localisés dans des tubes de flux faiblement torsadés.

**Différentiation des sites d'accélération des ions et des électrons lors des éruptions:** Les premières observations de RHESSI (observatoire gamma) ont remis en cause l'idée bien établie selon laquelle les électrons et les ions étaient accélérés ensemble lors des éruptions solaires.

**Observation d'injections impulsives du plasma d'origine solaire dans le cornet polaire:** les observations multipoints des satellites CLUSTER ont permis d'identifier et de caractériser ces injections et de suivre leurs effets dans l'ionosphère grâce à des mesures coordonnées au sol (radars SuperDARN).

**Rôle des ondes et des processus turbulents dans la pénétration du vent solaire dans la magnétosphère:** les mesures de spectres par les quatre satellites CLUSTER a permis de montrer que des émissions considérées jusqu'ici comme la signature de processus turbulents sont en fait des ondes

dont on peut déterminer les modes de propagation, ce qui remet en cause la compréhension des régions frontières de la magnétosphère.

**Premières observations d'une influence de la surface et les basses couches de l'atmosphère sur les ceintures de radiation:** Les observations faites à partir du satellite DEMETER ont montré que les émissions électromagnétiques provenant du sol (émetteurs TBF) ou des basses couches de l'atmosphère (rayonnement associé aux éclairs atmosphériques) déstabilisent les ceintures de radiation à grande échelle.

Parmi les découvertes majeures récentes, on peut également noter :

- l'organisation du champ magnétique aux différentes échelles spatiales (Lunette Jean Rösch, MDI/SOHO) ;

- l'étude de la déstabilisation des structures à grande échelle lors des phénomènes éruptifs de type CME (SOHO, TRACE, THEMIS, modélisations) ;

- la première détermination de l'intermittence des champs de vitesse dans la couronne par des mesures dans l'UV, avec des implications sur le chauffage de la couronne ;

- l'estimation de la vitesse d'écoulement du plasma dans les trous coronaux polaires (SOHO/UVCS) ;

- la détermination du flux du vent solaire moyen à toutes les latitudes et toutes les phases du cycle (SWAN/SOHO) ;

- la détermination des profils de vitesse du vent solaire qui montrent que le vent rapide, contrairement au vent solaire lent, a atteint sa vitesse finale à 6 rayons solaires ;

- l'importance des petites échelles dans la physique des structures de l'environnement terrestre (CLUSTER).

Le couplage entre les observations au sol (radars SuperDARN et EISCAT, ionosonde, stations GPS) et par satellites (en particulier SOHO, CLUSTER et DEMETER) a permis d'améliorer la modélisation de la réponse

du système magnétosphérique aux variations de l'activité solaire et des incidences de ces variations sur l'ionosphère. Les observations conjointes faites sur satellites (CLUSTER, DEMETER, ENVISAT) et au sol (radars, antennes TBF) ainsi que les travaux en cours sur le flux UV solaire mettent en évidence l'importance des couplages via l'accélération et la précipitation de particules et via les ondes électromagnétiques.

### Forces et faiblesses de la communauté

Avec ses grands instruments sols (TGE THEMIS, radiohéliographe Nançay, radars SuperDARN sous responsabilité française, lunette Jean Rösch, etc.), ses fortes contributions aux missions satellitaires internationales (SOHO, CLUSTER, RHESSI, STEREO et THEMIS) et nationales (DEMETER), et les bases de données qu'elle a su mettre en place (BASS2000, CDP, MEDOC), la communauté dispose d'un ensemble de données exceptionnelles qu'elle exploite ou va exploiter dans un futur proche.

Compte tenu de sa forte implication dans les projets futurs au sol (FASR, radar LOIS associé à LOFAR, SuperDARN, Dôme C) et dans l'espace (missions ESA et ESA/NASA : PROBA-2, SDO, MMS, Cross-scale ; missions CNES : PICARD, SMESE, TARANIS), et de sa contribution aux projets d'observatoires virtuels européens, elle joue un rôle moteur dans la communauté Soleil-Terre internationale.

La synergie observation/théorie est forte. Les approches multi-longueurs d'onde et multi-points, ainsi que les campagnes coordonnées au niveau international font, depuis plus de 20 ans, partie des méthodes de travail en permettant la modélisation spatio-temporelle des phénomènes. Le PNST, programme national de l'INSU, coordonne l'ensemble des recherches au niveau national depuis 1997, avec le soutien du CNES et regroupe environ 200 personnes, permanents et étudiants. La collaboration des communautés «Soleil» et «magnétosphère» s'est construite autour de processus physiques

d'intérêt commun et aujourd'hui autour de la «météorologie de l'espace».

L'aspect pluridisciplinaire de la thématique, où le système Soleil-Terre joue le rôle d'objet «prototype», a conduit à développer de nombreux liens et collaborations avec d'autres thématiques de l'astrophysique et au-delà :

- les physiciens stellaires (connexion solaire/stellaire, magnétisme et formation des vents stellaires) ;

- les planétologues (étude comparative des objets du système solaire et de leur interaction avec le vent solaire) ;

- les physiciens des plasmas (aspects théoriques, diagnostics performants via la spectroscopie et la spectropolarimétrie) ;

- les physiciens des astroparticules (détection de gerbes cosmiques ; rôle dans les émissions terrestres) ;

- les astrophysiciens des hautes énergies (diagnostics spectroscopiques X basés sur ceux de la physique solaire).

L'absence d'un affichage clair de ces liens nuit à la reconnaissance des activités de la communauté PNST par la communauté Astronomie-Astrophysique (et plus généralement Sciences de l'Univers) et donc au recrutement de jeunes chercheurs. La pyramide des âges est caractérisée par une proportion importante de chercheurs et ingénieurs de plus de 55 ans. Alors que ce domaine relève avant tout des sciences observationnelles, il est difficile de remplacer les expérimentateurs qui partent en retraite. Cette situation justifierait la définition de priorités pour les recrutements, au-delà du fléchage obtenu en 2007. Un enjeu majeur est le recentrage de la communauté autour des projets internationaux du futur et de l'exploitation de THEMIS.

### Grandes questions et perspectives

**Le champ magnétique :** Le champ magnétique est au cœur des phénomènes solaires (et stellaires) : chauffage de la cou-

ronne, accélération du vent, éruptions, CME, variations de luminosité, etc. L'accès au magnétisme interne grâce à la sismologie locale sera essentiel pour comprendre la dynamo solaire interne, la relier aux phénomènes de surface, et commencer à bâtir une histoire magnétique de notre étoile. L'accès au magnétisme externe grâce à des mesures du champ magnétique dans la couronne reste également une approche essentielle pour comprendre la diffusion du champ magnétique à la surface du Soleil (dynamo) et les phénomènes éruptifs tels que les éruptions et éjections de masse coronale. Au sol : THEMIS puis dans le futur ATST et FASR ; spatial : SOLAR-B, STEREO, Solar Dynamic Observatory (SDO), PICARD, SMESE, Solar Orbiter, Sonde Solaire. En outre, les études comparatives entre magnétisme solaire et stellaire, en collaboration avec le PNPS, seront essentielles pour comprendre l'interaction convection-rotation-champ magnétique. Au sol : ESPADONS (CFHT), NARVAL (TBL) ; spatial : COROT.

**Les processus de chauffage des ions :**

En ce qui concerne la couronne solaire, les questions essentielles portent sur le rôle des processus micro-échelles et leur hiérarchie, les mécanismes de chauffage des ions et des électrons et leurs liens avec l'accélération du vent solaire. En ce qui concerne les environnements planétaires les questions essentielles portent sur les mécanismes d'injection et d'échappement et leurs évolutions sur des grandes échelles de temps. Dans les deux cas, il est important d'obtenir des informations statistiques sur les processus micro-échelles et de combiner des mesures en télédétection et *in situ*. Au sol : ATST et FASR ; Spatial : CLUSTER, SDO, Solar Orbiter, Sonde solaire.

**La reconnexion magnétique :** Pour la magnétosphère terrestre, il faut poursuivre l'étude des processus de reconnexion à toutes les échelles avec des observations multipoints : à méso-échelle (CLUSTER), puis à petite échelle (MMS) et à grande échelle (THEMIS), en attendant le projet CROSS-SCALE. Pour la couronne solaire, il faudra disposer à terme de mesures *in situ*. Au sol :

LOFAR et FASR ; Spatial : CLUSTER puis THEMIS, MMS, Sonde Solaire et Cross-Scale.

**Le transport :** Les questions relatives au transport du plasma concernent aussi bien le transport à travers des frontières non connectées magnétiquement, que le transport dans l'héliosphère et dans les environnements planétaires (dont la magnétosphère terrestre). Comment s'effectue, en l'absence de collisions, le transport à travers les frontières magnétiques ? Quel est le rôle des courants parallèles dans le couplage avec l'ionosphère ? Que se passe-t-il lorsqu'il n'y a pas d'ionosphère (Mercure) ? Comment se ferment les courants ? Au sol : Super-DARN ; Spatial : CLUSTER puis THEMIS, MMS, Bepi-Colombo, Cross-Scale.

**L'accélération de particules :** L'identification des mécanismes d'accélération des particules est un enjeu majeur pour tout ce qui concerne les couplages entre des parties différentes du système Soleil-Terre. Les régions dans lesquels les investigations doivent être améliorées en terme de résolution temporelle, spatiale et angulaire, ou, pour certaines d'entre elles initiées, sont : la couronne solaire, le vent solaire, les régions de choc interplanétaires, la périphérie de l'héliosphère, les régions frontières de la magnétosphère, la magnétosphère elle-même, les basses couches de l'atmosphère. Au sol : RH Nancay, puis FASR et LOFAR. Spatial : CLUSTER, THEMIS, TARANIS, SMESE, MMS, Sonde solaire.

**La composante environnementale :**

L'environnement dans son sens le plus général (effet direct ou indirect sur les activités humaines) englobe l'atmosphère, l'ionosphère et la magnétosphère. En matière de couplage entre les basses couches de l'atmosphère et la magnétosphère les enjeux majeurs pour les années futures seront la compréhension des mécanismes physique à l'origine des TLEs (« Transient Luminous Events »), des TGFs (« Terrestrial Gamma ray flashes ») et des faisceaux d'électrons montants qui semblent leur être associés, ainsi que l'identification des effets sur l'atmosphère des particules précipitées. Au sol : antennes de réception TBF ; Spatial : DEMETER puis TARANIS. En ce qui concerne la réponse de l'ionosphère et de la

magnétosphère aux variations de l'activité solaire (« météorologie de l'espace »), l'enjeu principal sera de proposer une modélisation globale de l'ensemble de la chaîne qui s'étend de la surface du Soleil à l'atmosphère des planètes. Au sol : Super-DARN ; Spatial : CLUSTER, puis SDO, PROBA-2 et 3, KuaFu.

## 2.7 PLANÉTOLOGIE

Les thèmes fédérateurs de la discipline se regroupent autour de la formation des systèmes planétaires, avec le système solaire comme objet de référence, et de l'étude comparative des processus planétaires (structure et évolution), avec comme objets de référence principaux (mais non uniques) Mars et Titan. A ces deux thèmes s'ajoute un troisième thème transversal qui concerne les conditions d'émergence de la matière vivante dans les environnements planétaires primitifs avec les études sur la Terre primitive, Mars, les océans des satellites des planètes géantes, et les planètes extrasolaires.

### Faits marquants

La période 2004-2007 représente une étape essentielle pour la planétologie européenne, avec un rôle majeur de la communauté française. Les succès des missions de l'agence spatiale européenne (ESA) Mars-Express, Vénus-Express, Cassini/Huygens (NASA/ESA) et (dans une moindre mesure) SMART-1 permettent à notre communauté de disposer d'un ensemble de données d'une richesse sans précédent, qui a déjà permis de nombreuses découvertes présentées dans la partie « bilan ». En parallèle, la thématique « exoplanètes » a connu un fort développement, avec aujourd'hui près de 200 planètes recensées. Le lancement réussi de la mission ROSETTA début 2004 (rendez-vous prévu avec une comète en 2014), celui de la mission COROT (CNES/ESA, mission pionnière pour la détection d'exoplanètes), l'engagement par l'ESA de la mission Bepi-

Colombo vers Mercure ainsi que de la mission martienne EXOMARS et les collaborations internationales ouvrent des perspectives extrêmement prometteuses. Il faut rappeler qu'avant 2004, les seules contributions de l'Europe aux missions de planétologie avaient été le remarquable succès du survol de la comète de Halley par GIOTTO en 1986 et quelques participations instrumentales. L'Europe est aujourd'hui après la NASA le 2<sup>e</sup> acteur majeur dans ce domaine.

### Bilan des quatre dernières années

**L'eau sur Mars :** La mission européenne MarsExpress a réalisé les premières cartes minéralogiques de Mars (instrument OMEGA à PI français). La détection des différents minéraux mise dans son contexte géologique (instrument HRSC avec de nombreux Co-I français) a permis de montrer que l'eau aurait été abondante au début de l'histoire de Mars avant de disparaître presque totalement en même temps que le champ magnétique s'arrêtait. Cette thématique permet une interaction fructueuse entre spécialistes de la dynamique interne et ceux des processus externes. Ces résultats conduisent à préconiser les terrains anciens où des marqueurs de l'eau (argiles) ont été détectés comme sites d'atterrissage des missions comme Mars Science Laboratory (mission NASA avec des expériences à forte participation française) et la mission européenne ExoMars. La mission Mars-Express a aussi permis de quantifier les réserves en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O des calottes polaires ainsi que les échanges entre l'atmosphère et les calottes polaires.

**Les composants mineurs des atmosphères planétaires :** Les instruments embarqués (infrarouge proche et moyen : PFS, OMEGA, occultations solaires et stellaires : SPICAM) ont considérablement fait progresser les connaissances sur les composants mineurs des atmosphères de Mars et Vénus (O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, composés soufrés pour Vénus). Des instruments similaires sur CASSINI (VIMS, CIRS) ont permis de nouvelles détections de molécules dans les atmosphères de Saturne et

Titan. Si la quantité de méthane dans la haute atmosphère de Titan était connue (2,3%), la sonde Huygens a montré un enrichissement important près de la surface (5%). L'absence d'océan global conduit à postuler une source interne (méthane primordial lors de l'accrétion ou produit par altération aqueuse des silicates). La détection de méthane dans l'atmosphère de Mars (PFS) aurait des implications majeures (exobiologie), mais ces résultats sont très contestés, en particulier par les Col français.

**La géologie de Titan:** En Janvier 2005, la sonde européenne Huygens se posait sur Titan et révélait une surface incisée par des rivières et des lignes de côtes. La surface est recouverte de matériaux organiques de nature encore inconnue et des blocs de glace d'H<sub>2</sub>O. Les instruments VIMS (imageur hyperspectral) et radar ont révélé la présence de rivières, dunes, lacs, petites mers, cratères d'impacts, cryovolcans, coulées de cryolaves, chaînes de montagnes. Cette géologie surprenante est en cours d'étude et permet de comparer les processus géologiques entre planètes telluriques et satellites de glace.

**Les geysers d'Encelade:** La mission Cassini a découvert des geysers d'eau et de CO<sub>2</sub> émis par les régions Sud d'Encelade en combinant les images de la caméra (ISS) et du spectromètre imageur (VIMS), les spectres de masse obtenus lors du survol (INMS) et le spectromètre IR thermique (CIRS) qui a révélé des points chauds. La glace éjectée est la source de l'un des anneaux de Saturne. La source d'énergie responsable de cette activité cryovolcanique est l'énergie de marée tout comme pour le volcanisme silicaté d'Io (l'un des satellites de Jupiter).

**L'explosion de la thématique «exoplanètes»:** la communauté française y occupe une place de premier plan depuis la découverte du premier «Jupiter chaud» en 1995 à l'Observatoire de Haute Provence. La France a fortement contribué à la mise en service de deux des instruments les plus performants actuellement pour la méthode des vitesses radiales: HARPS (2002, ESO) et

SOPHIE (2006, OHP). Le rythme des découvertes s'accélère (plus de 200 planètes recensées aujourd'hui), ce qui a révélé la diversité et la complexité des systèmes exoplanétaires. Après une phase dominée par les Jupiters chauds, les progrès instrumentaux permettent aujourd'hui de détecter des planètes plus petites, avec en point d'orgue la découverte par HARPS début 2007 de la première «exoterre» (planète de 3 à 5 masses terrestres avec une température de surface qui devrait permettre la présence d'eau liquide). Les chercheurs français ont largement contribué à la détection des planètes par transit, et une équipe française a également réalisé en 2005 la première détection d'une exoplanète par la méthode des lentilles gravitationnelles. Le succès du lancement de COROT (CNES avec le soutien de l'ESA) fin 2006 renforce encore le dynamisme de cette thématique en France, avec déjà une première planète détectée par transit et un potentiel démontré pour les planètes de moins de 10 masses terrestres. Les observations combinées d'exoplanètes par vitesse radiale et par transit vont donner accès à la densité, paramètre essentiel pour distinguer les objets rocheux des objets gazeux.

**La dynamique du système solaire et la formation planétaire:** Les progrès réalisés dans le domaine de la simulation numérique ont permis d'améliorer très sensiblement la modélisation de l'évolution dynamique des petits corps du système solaire et la formation des planètes. Il apparaît que la formation de planètes de type terrestre passe par la formation de proto-planètes dont la taille maximale est celle de Mars. Les contraintes nouvelles issues des observations d'exoplanètes permettent de tester les idées récemment apparues sur les processus de migration dans les disques protoplanétaires, qui permettent d'expliquer la présence de planètes de la taille de Jupiter très près de leur étoile. On peut également citer le problème des interactions entre plusieurs planètes sur des orbites fortement elliptiques et celui de la formation planétaire dans les systèmes stellaires multiples. La communauté française en dynamique céleste s'est très bien positionnée sur ces problématiques.



## Forces et faiblesses de la Communauté

En 2003, lors du colloque de prospective de l'INSU, la planétologie était reconnue comme l'un des points forts de l'astrophysique française, se situant au 2<sup>e</sup> rang derrière les États-Unis dans les bilans bibliométriques. Les responsabilités importantes prises dans les missions planétaires, la mission COROT et les programmes d'observation au sol (planètes et exoplanètes) ont renforcé cette position entre 2003 et 2006. Ces données nouvelles ont considérablement amélioré les possibilités de formation de jeunes chercheurs. La structuration de cette communauté est assurée par le Programme National de Planétologie (PNP) avec le soutien du CNES. Il est important de mentionner les interactions fortes avec le PNPS et PCMI (formation des disques protoplanétaires et des systèmes planétaires), ainsi que des collaborations Astrophysique/Sciences de la Terre/Chimie/Biologie qui vont s'élargissant dans une perspective exobiologique. La communauté possède une expertise reconnue en cosmochimie, en structure interne, en télédétection des atmosphères et des surfaces, en modélisation climatique, en simulation numérique de la dynamique du système solaire, en magnétosphères planétaires. Elle est fortement impliquée dans les programmes spatiaux en cours (Cassini, Mars Express, Rosetta, Venus Express, Corot) ou en préparation (Bepi Colombo, ExoMars, MSL) ainsi que dans les programmes d'observation sol (HRA, haute résolution spectrale en IR et millimétrique, recherche d'exoplanètes). La communauté française joue un rôle moteur dans le réseau européen EUROPLANET, appelé à se développer dans le contexte du 7<sup>e</sup> PCRD. Elle participe très activement à la préparation des réponses à l'appel à propositions 2016-2025 de l'ESA.

Les personnels sont cependant en nombre insuffisant dans certains domaines, notamment avec l'exploitation simultanée de Cassini, Mars Express et Venus Express. Il est vital de pouvoir assurer le relais et de recruter la génération qui devra assurer l'exploitation scientifique de Rosetta, ExoMars et Bepi-Colombo à l'horizon 2015-2020.

## Grandes questions et perspectives

Les grandes questions en planétologie se préoccupent des origines de la vie, de la formation des systèmes planétaires et de l'unicité de la Terre. En analysant les données des missions spatiales en cours et prévues, on pourra mieux appréhender les processus physico-chimiques qui gouvernent l'évolution de chaque planète et de la Terre en particulier. Les découvertes récentes montrent le lien entre les processus internes et externes. Mars est de ce point de vue un objet très intéressant. La détermination de la structure interne de cette planète est une priorité reconnue mais une mission dédiée n'est pas encore identifiée. Les perspectives programmatiques en planétologie sont assurées jusqu'en 2015 avec ROSETTA, ExoMars et BepiColombo, avec une exploitation scientifique jusqu'en 2020. Au-delà, il faut attendre les résultats de la sélection « Cosmic Vision » de l'ESA (2016-2025). En parallèle, on peut noter tant aux USA qu'en Europe le rôle de plus en plus important de la préparation des vols habités vers les planètes (programme « exploration » de l'ESA), avec une étape lunaire comportant des missions automatiques jusqu'en 2020.

La caractérisation des systèmes exoplanétaires au sol, (projet SPHERE au VLT, PI français, perspectives nouvelles au Dôme C) et dans l'espace (COROT, puis la mission NASA Kepler en 2008) représente une perspective majeure pour la formation des systèmes planétaires et leur comparaison avec la référence solaire. En ce qui concerne l'exobiologie, la principale perspective est constituée par la mission ExoMars (ESA, 2013, programme « exploration »). Les découvertes de planètes de type terrestre autour d'autres étoiles représentent également une étape clé avant leur caractérisation spectroscopique qui pourrait intervenir à partir de 2020. Les synergies entre formation planétaire et exobiologie ont été reconnues par le CNRS avec la création en 2006 du programme interdisciplinaire « Origines des planètes et de la vie » qui permettra de renforcer les liens avec la biologie, les sciences de la Terre, la chimie et la physique.

## 2.8 LES RÉFÉRENCES D'ESPACE ET DE TEMPS

L'astronomie fondamentale et la géodynamique globale se construisent par combinaison d'observations de différentes natures, d'expériences et de modèles théoriques. Les travaux les plus fins permis par les techniques de mesure au sol ou dans l'espace s'appuient sur l'existence de repères de référence d'espace, célestes ou terrestres, et sur des repères temporels. Les techniques mises en œuvre sont la télémétrie Laser sur la Lune (LLR) et sur satellites artificiels (SLR), l'interférométrie à très longue base sur radio-sources extra galactiques (VLBI), le Global Positioning System (GPS) et DORIS et dans le futur le système GALILEO.

### Faits marquants et bilan des quatre dernières années

Des changements et des ruptures de nature historiques ont marqué ces dernières années ce thème de recherche, avec dans chaque cas une forte implication française.

**Systèmes célestes :** L'année 1997 a vu l'adoption par l'Union Astronomique Internationale d'un système de référence céleste totalement nouveau dans son principe, puisqu'il mettait fin à des siècles de tradition. Jusqu'alors le système de référence fondamental avait été construit à partir d'observations d'un petit nombre d'étoiles brillantes rattachées au mouvement du Soleil avec l'équinoxe pour origine des ascensions droites. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1998, le système est réalisé à partir d'un ensemble de radiosources observées par l'interférométrie à très longue base (VLBI) pendant près de 20 ans. Dans la nouvelle définition, les axes du système restent fixes par rapport à l'univers lointain, et ils ne sont plus associés aux plans de l'équateur ni de l'écliptique. Une extension de la réalisation primaire du système céleste (ICRF) a été faite en 2000 et une nouvelle extension est en préparation en 2007. Les résolutions adoptées par

l'UAI en 2000 concernent de nouveaux modèles de précession et de nutation ainsi que de nouvelles définitions du Pôle de référence et du temps dynamique barycentrique (TDB). Dans le visible, un système secondaire est disponible au travers des 40 000 étoiles primaires du Catalogue Hipparcos après le rattachement de ce dernier aux sources de l'ICRF et des 80 000 étoiles restantes.

**Systèmes terrestres :** Dans ce domaine on a assisté également à une transformation fondamentale de l'activité, avec le passage d'un système relevant du positionnement astrométrique à une combinaison de solutions relevant toutes des mesures de géodésie spatiale ou du VLBI. On recherche dans ce cas un système d'axes tel que la croûte terrestre n'ait ni translation (origine) ni rotation d'ensemble (directions) par rapport à ce système, en prenant en compte les déformations. Le système est réalisé par le choix d'un certain nombre de stations pouvant être localisées les unes par rapport aux autres par des techniques d'astro-géodésie 3D que sont le VLBI, LLR (Laser Lune), SLR (laser sur satellites), GPS et DORIS (positionnement doppler par satellites). L'année 2006 a vu l'achèvement du repère ITRF 2005 (International Terrestrial Reference Frame) qui est la version officielle de l'ITRF. Il est le résultat de la combinaison des solutions de systèmes de référence terrestre basés sur les mesures laser sur satellite et la Lune, GPS, VLBI, DORIS.

**Rotation de la Terre :** Les activités dans les domaines de la navigation, l'Astronomie et la Géodésie spatiale exigent la connaissance précise des variations de l'orientation de la Terre (nutations, mouvement du pôle, temps universel). La connaissance de la variabilité terrestre permet d'appréhender les phénomènes géophysiques qui en sont la cause (avec l'attraction luni-solaire), en particulier les mouvements atmosphériques, océaniques ou glaciaires et les interactions entre le noyau de la terre et le manteau.

**Références temporelles :** Les années 2000 laisseront leur marque avec la mise en fonctionnement régulier des horloges à fontaine à atomes froids (Cs et Rb) avec des exac-

titudes de 10-15 qui ont permis d'estimer la variation temporelle de la constante de structure fine. Même si les travaux ont débuté il y a une dizaine d'années, ce n'est que récemment que cette nouvelle technologie est passée au stade de la réalisation pratique, avec une régularité de fonctionnement qui permet de l'utiliser comme étalon primaire de fréquence. En parallèle, cette métrologie, couplée au laser femto-seconde, a permis de réaliser des chaînes de mesures des fréquences optiques directement rattachées aux étalons fondamentaux de temps. Les mesures de longueur d'onde atteignent alors une précision de près de 10<sup>-14</sup>.

### Forces et faiblesses de la communauté

Les équipes françaises du MPU, du GRGS, de l'IGN et du groupement de recherche Géodésie et Géophysique (G2) sont très présentes dans l'ensemble des problèmes touchant aux systèmes de référence, tant dans l'acquisition des données de base et la modélisation que dans la présence au niveau des instances internationales coordonnant l'ensemble de ces activités. Plusieurs équipes situées dans les observatoires (Paris, Nice, Bordeaux) ont une contribution importante dans les activités des grands services internationaux (IERS, IVS, IGS, ILRS) relatifs aux techniques d'observation astro-géodésique, VLBI, télémétrie satellitaire et sur la Lune, systèmes GPS, DORIS et GALILEO dans le futur. La métrologie du temps est une activité interdisciplinaire typique impliquant des chercheurs des différents secteurs du CNRS.

**Système céleste :** Le rôle des équipes françaises dans les travaux ayant conduit aux nouveaux systèmes et dans leur maintenance est majeur. Le Groupe de Travail UAI sur le système céleste comprend en premier lieu des chercheurs américains et français, dont l'un assurait la présidence de la division I de l'UAI (astrométrie et mécanique céleste) jusqu'en 2006. Cette position privilégiée résulte d'une longue tradition de l'astronomie française dans ce domaine et du succès de la mission Hipparcos. Les équipes françaises ont eu un rôle moteur dans la définition et la réa-

lisation du système de référence céleste. Elles sont très impliquées dans les services et organismes internationaux : Centre d'analyse de l'IVS à Paris et Bordeaux ; centre de produit de l'ICRF à Paris (en partage avec l'US Naval Observatory) ; centre de produit des paramètres de rotation de la Terre à l'Observatoire de Paris (site <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>).

**Système terrestre :** L'IGN et le GRGS se sont impliqués très tôt autour des possibilités des systèmes spatiaux pour la réalisation du système de référence terrestre, ce qui a conduit à une structuration sur le plan international dans le cadre de l'IERS. La France est représentée au plus haut niveau dans la nouvelle architecture mise en place en 2001 : Centre de produit de l'IERS pour le système terrestre (ITRF) à l'IGN ; Trois stations du réseau ILRS (International Laser Ranging Service) de l'IERS à l'OCA ; Centres d'analyse de l'IERS pour diverses techniques (CNES, OCA, Obs. Paris, IGN) ; Centre de coordination international de l'IDS (DORIS) à l'IGN.

**Références temporelles :** Les équipes du LPTF, aujourd'hui LNE/SYRTE ont été des précurseurs dans le domaine des horloges à atomes froids, grâce à des échanges fructueux opérés entre le monde de la physique atomique (Laboratoire Kastler-Brossel) et les physiciens et astronomes de la métrologie du temps à Paris et Orsay. Même si d'autres équipes sont maintenant très présentes sur ce thème, la position des équipes parisiennes demeure très forte. Les trois laboratoires astronomiques Paris, Besançon et OCA participent à la réalisation du TAF et du TAI et développent des horloges, des méthodes d'étalonnage ou des techniques de transfert de temps.

### Les enjeux majeurs à court terme

**La maintenance des systèmes :** Le système céleste repose sur un petit nombre de sources primaires (212 très précisément) et de sources complémentaires, régulièrement observées et susceptibles de rentrer dans l'ensemble de définition. Un tel système doit être maintenu et mis à jour, selon une procédure

parfaitement définie. Certaines sources vont se révéler instables et devront être déclassées, alors que d'autres rentreront. Les méthodes de traitements évoluent, et conduisent à des révisions des positions, alors qu'il est essentiel de conserver l'orientation des axes, même si certaines positions sont altérées. Ce travail suppose donc une continuité des observations VLBI et des retraitements permanents incluant les observations les plus récentes (site : <http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc>). La situation est comparable pour le système terrestre, qui fait l'objet d'une remise à jour beaucoup plus fréquente, et qui bénéficie des observations multi-techniques de précision comparable les unes aux autres (site : <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF>).

**Les moyens :** Au sol, les seules observations contribuant au système céleste proviennent de l'interférométrie à très longue base. Bien que la France ne participe pas au niveau d'une antenne, elle est très présente dans l'exploitation des données et en terme d'influence sur les décisions. Les réseaux GPS et DORIS sont bien organisés en France. La télémétrie laser (station du Calern, en cours de rénovation avec le projet T2000) assure la stabilité du système terrestre à long terme. Elle est la seule à donner accès au géocentre et sert de référence pour les autres systèmes. Les mesures de géodésie par laser ne sont pas automatiques et exigent donc des moyens en personnel, dont le renouvellement lors des départs en retraite pose problème. Pour la métrologie du temps, la partie recherche est très développée à Paris avec un potentiel considérable et une restructuration récente du laboratoire qui permet de voir l'avenir avec optimisme. La situation est beaucoup plus critique à Grasse (personnels, R&D transfert de temps). Sur le plan budgétaire, le fonctionnement du mode service (TAF/TAI), est assuré en grande partie par des soutiens récurrents INSU et des soutiens spécifiques du BNM.

## Perspectives

L'évolution du système céleste a été très rapide et spectaculaire ces dernières années avec un changement de paradigme historique,

et la situation devrait se stabiliser dans les dix ans qui viennent. L'effort portera donc en premier lieu sur la consolidation et la maintenance. Une nouvelle réalisation de l'ICRF devrait voir le jour en 2007/2008. Plus loin dans le temps on retrouve l'astrométrie spatiale qui sera le prochain jalon marquant, avec la possibilité d'obtenir un ICRF directement dans le visible par l'observation des sources extragalactiques avec Gaia. Pour les références temporelles, les yeux sont rivés vers l'espace avec l'expérience PHARAO (horloge à atomes froids dans l'espace) et le développement des étalons optiques au sol avec un fort potentiel dans les laboratoires du LNE/SYRTE. La technique de transfert de temps par lien laser (T2L2), qui sera expérimenté avec Jason-2, constitue la voie la plus sûre pour les comparaisons d'horloges avec une très grande exactitude. Plus loin il faut envisager l'utilisation des horloges spatiales ultrastables pour des expériences de physique dans le système solaire (projet TIPO). Les conséquences en matière scientifique du programme GALILEO ne sont pas encore claires (ce n'est pas le but premier de ce programme), mais on voit déjà se mettre en place des groupes pour aborder ces questions.

## 3 – LES PRINCIPAUX OUTILS DE L'ASTROPHYSIQUE

### 3.1 L'INSTRUMENTATION

Les développements instrumentaux de la communauté française couvrent une très grande fraction du spectre électromagnétique. Ces développements se font sur fonds nationaux, européens, provenant d'agences spatiales (CNES, ESA, NASA) ou sol (ESO, IRAM). Ils reposent sur les personnels des laboratoires rattachés à la section 17 ainsi que sur des personnels de laboratoires d'autres sections. Ils se font en interne au CNRS ou en collabora-

tion avec d'autres laboratoires de recherche publique (CEA, ONERA) et des industriels. Les efforts portent sur les détecteurs (matrices de bolomètres, détecteurs visibles), sur les moyens d'observation (interféromètres optiques, réseaux de télescopes gamma) et sur des techniques d'observation (coronographie, optique adaptative, spectroscopie). Des modes opératoires nouveaux s'imposent pour l'exploitation des missions spatiales et pourraient être envisagés pour les futurs ELT.

Le domaine des hautes énergies est en pleine expansion. Le projet HESS – INSU et IN2P3 – de détection de sources gamma au sol, réalisé en collaboration avec l'Allemagne, rencontre un succès considérable avec une extension remarquable de la liste de sources détectées. Un projet au sol de plus grande sensibilité et de plus grande précision est en cours d'étude, le Cherenkov Telescope Array. Ces projets s'accompagnent du développement de détecteurs ultra-rapides (nanoseconde) dans une gamme d'énergies très large : de 100 eV à 1 014 eV. Ces développements intéressent également des projets spatiaux comme GLAST et SIMBOL-X.

Dans le domaine optique, la communauté française est traditionnellement très active. On peut distinguer deux grandes classes de développements : les instruments pour la haute résolution angulaire (HRA) et ceux pour la spectroscopie. Les développements HRA se font sur plusieurs fronts : l'optique adaptative, l'étoile laser, l'interférométrie et l'imagerie à très haute dynamique. Les recherches en optique adaptative sont entreprises dans la perspective des futurs très grands télescopes («ELT») car le bénéfice attendu des grands diamètres en dépend. Elles portent aussi bien sur le niveau systèmes (grands nombres d'actionneurs) que sur leurs composants (miroirs déformables). Par ailleurs, la technique d'optique adaptative développée pour l'astronomie est en cours d'application clinique à l'ophtalmologie (projet Œil avec l'INSERM). La France est à la pointe de la recherche sur l'étoile laser polychromatique qui permettra une couverture totale du ciel pour de très grands systèmes. La France est également en

pointe pour l'imagerie à très haute dynamique qui marie optique adaptative et coronographie avec les projets SPHERE (VLT) et MIRI (JWST). L'interférométrie longue base est également un domaine d'excellence avec une présence forte en Europe et aux USA. Les équipes françaises se sont en particulier distinguées dans le domaine de l'interférométrie monomode par fibre ou optique intégrée avec des collaborations fortes avec l'industrie et des laboratoires hors section 17 (XLIM, CEA, etc.).

La communauté est également active sur le front de l'interférométrie annulante pour la préparation de la mission DARWIN. Une autre branche d'excellence française est la spectroscopie. La communauté a été impliquée dans de grands projets spatiaux (e.g. GALEX) et sol (e.g. VIRMOS). Des recherches sont menées pour combiner spectroscopie multi-objets et optique adaptative dans le proche infrarouge sur les futurs ELT. Elles étendent le concept de spectroscopie multi-objets avec soit l'utilisation d'une optique adaptative par champ analysé nécessitant la multiplication de systèmes miniaturisés soit la réalisation d'optiques adaptatives très grand champ (techniques tomographiques). Sur un autre front, la spectro-polarimétrie connaît un développement spectaculaire avec les résultats récents en physique stellaire de mesure de champs magnétiques avec les instruments NARVAL et ESPADONS. Les futurs projets envisagent l'extension vers l'infrarouge proche.

À plus grande longueur d'onde, les développements visent à améliorer les capacités d'imagerie des détecteurs en réalisant des matrices de bolomètres. Dans le domaine sub-millimétrique avec le développement des matrices PACS pour Herschel au CEA. Dans les domaines millimétrique et sub-millimétriques, deux projets importants fédèrent un grand nombre de laboratoires pour la mesure de la polarisation du fond cosmologique micro-onde : la collaboration DCMB (Développement Concerté de Matrices de Bolomètres) pour la réalisation de matrices de grandes dimensions (semi-conducteurs et supra-conducteurs) financé par le CNES et le CNRS (Astroparticules) et le programme Européen BRAIN (B mode

RADIATION INTERferometer) auquel collaborent des laboratoires astro et astroparticules pour le développement de l'interférométrie bolométrique (test prévu au Dôme C).

Les instruments nouveaux nécessitent des modes d'opération nouveaux de type « observatoire » (mise en place de comités d'attribution de temps et exécution des observations sans que l'astronome ait à se déplacer). Compte tenu du petit nombre des futurs instruments de type ELT et de leur coût, on peut penser qu'une exploitation par consortium comme c'est le cas en physique des particules se mettra en place. Le mode d'opération des observatoires spatiaux ou des missions spatiales est également en évolution avec la mise en place d'une approche de type « Science Operation Working Group » où les équipes préparent pour chaque période (typiquement une semaine) une proposition d'opérations qui doit être rendue compatible au niveau ressources avec les autres demandes. Compte tenu du nombre de missions en opération cela représente une charge de travail très substantielle pour les équipes scientifiques et techniques impliquées, en plus de la préparation des missions à venir et de la mise en forme des données pour mise à disposition de la communauté. De nouvelles méthodes d'exploitation des instruments sont donc appelées à se développer, utilisant l'augmentation considérable des capacités de stockage à bord : pour la mission BepiColombo, le volume de données disponible sera réparti par périodes de trois mois.

Les conditions observationnelles extrêmes propres aux très grands télescopes conduisent les astronomes à développer des solutions inventives dans le domaine du traitement du signal et des images (problèmes inverses, entropie et information, reconnaissance de formes) avec des applications en imagerie médicale ou spatiale. Ces travaux se traduisent souvent par des collaborations approfondies avec des laboratoires ou écoles d'ingénieur et la réalisation de nombreux stages. Les évolutions prévisibles portent sur la modélisation (qui prend en compte l'insuffisance de l'information), la classification (approche cognitive) et l'architecture (afin de produire des outils

« clés en mains »). L'analyse des résultats de simulations numériques lourdes pose des problèmes similaires.

### 3.2 BASES DE DONNÉES ET ARCHIVAGE MASSIF

L'objectif des Observatoires Virtuels est de fournir un accès transparent à toutes les données de la discipline (données d'observations, résultats de traitement ou de simulations) ainsi que des outils pour les exploiter (visualisation, réduction de données, modélisation). Ils visent à mettre en place des liens entre services existants via le développement de l'interopérabilité entre bases de données.

Afin de coordonner la participation de la communauté française aux OV, une Action Spécifique *Observatoires Virtuels France* (AS OV) a été créée en janvier 2004 suite à une recommandation du Colloque de Prospective de la Colle sur Loup. L'AS OV a joué un rôle essentiellement incitatif, en soutenant de nombreux projets et en organisant des réunions (tutoriels notamment). La diversité des projets proposés (45 en 2006) et le grand nombre de laboratoires concernés nécessitent également une forte coordination des efforts, notamment en terme de développements, que ce soit au niveau national ou international. Il faut en particulier veiller à ne pas multiplier les actions sous critiques. L'AS OV doit donc également jouer un rôle de consolidation des projets, en établissant des priorités (en concertation avec les Programmes Nationaux et Laboratoires) et en suscitant des collaborations. Au vu du très fort développement de ces outils, essentiels pour assurer le retour scientifique de nombreux projets fournissant des volumes de données de plus en plus gros, il faudra veiller à ce que le personnel, tant en chercheurs qu'en ingénieurs et techniciens soit maintenu voire consolidé sur les grands centres.

La mise en place d'Observatoires Virtuels se base naturellement sur l'expertise existante en bases de données. Cette activité est très

bien développée en France, avec une expertise reconnue internationalement. Le Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS) est en effet un centre de référence au niveau international depuis de nombreuses années. Il joue donc naturellement un rôle crucial dans le développement des Observatoires Virtuels. Outre l'implication au niveau du CDS dans les actions de l'AS OV, le CDS est actuellement très impliqué dans le programme européen Euro-VO dans le contexte FP-7, avec un rôle très important sur la définition des standards et la responsabilité de l'un des trois éléments de Euro-VO, le Data Centre Alliance. Dans le domaine des relations Soleil-Terre, trois bases de données sont opérationnelles depuis de nombreuses années : BASS2000 (données solaires sol), MEDOC (données solaires spatiales) et le CDPP (données plasmas). Ces bases de données se sont investies dans des projets internationaux (EGSO et SPASE), en phase de consolidation. L'évolution de ces centres de données vers une interopérabilité, y compris avec les données planétologie, est actuellement en discussion au sein d'un groupe de travail «OV système solaire» de l'AS OV. Un groupe de travail VO-France Planetology a également été créé au sein du projet EuroPlanet. Plusieurs projets pluridisciplinaires ont été mis en place avec des laboratoires STIC, et ce travail d'interface devra être poursuivi. Dans le cas de certains grands projets (grands relevés, expériences spatiales, etc.) des collaborations existent également avec d'autres départements ou organismes (IN2P3, CEA, CNES, ESA).

### 3.3 LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Les simulations numériques sont devenues un outil essentiel dans l'ensemble des thématiques de l'astrophysique. Elles permettent de définir les spécifications d'expériences lourdes et de valider la chaîne de traitement. L'expérimentation numérique constitue un domaine en plein développement. Depuis plusieurs années, la simulation numérique est

reconnue comme une thématique prioritaire, bénéficiant d'un coloriage pour les recrutements. On peut relever de nombreuses synergies avec d'autres secteurs du CNRS tant au niveau de la physique (équations d'état, hydrodynamique, MHD, transfert de rayonnement, physicochimie, etc.) que des méthodes, avec un fort développement des codes à grilles adaptatives.

L'action spécifique «Simulations numériques en astrophysique» (ASSNA) a été mise en place en 2001. Les premières années de fonctionnement de l'ASSNA permettent de dresser un bilan très positif vis-à-vis des objectifs affichés : lancement et structuration de grands projets, animation scientifique de la communauté, reconnaissance par les diverses instances concernées des besoins spécifiques à cette activité.

L'ASSNA a joué un rôle majeur dans le démarrage du programme «Horizon». Horizon est un programme consacré à la simulation numérique de la formation des galaxies dans un contexte cosmologique. Un autre objectif concerne le développement de techniques avancées de calcul parallèle et de mathématiques appliquées à l'astrophysique. Horizon a réussi son pari de fédérer les équipes au niveau national. Il a obtenu un soutien par l'ANR. Le succès d'Horizon est clairement lié à l'importance des simulations numériques lourdes pour les thématiques «cosmologie» et «galaxies», qui représentent la grande majorité des utilisateurs de moyens nationaux de calcul vectoriels comme l'IDRISS. De nouveaux projets sont en phase de démarrage (ESTER : simulation 2D des étoiles en rotation) ou en cours de développement pour la physique des plasmas spatiaux, la MHD ou la physico-chimie.

Le niveau modeste d'équipement de la France en supercalculateurs constitue un problème de plus en plus important pour le développement de la simulation numérique. En terme de puissance installée, la France se situe en effet loin derrière l'Allemagne et la Grande-Bretagne, ce qui pénalise notre communauté.

### **3.4 L'ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE**

Il s'agit de l'ensemble des expériences qui permettent de simuler les milieux astrophysiques en laboratoire, afin de contribuer à l'interprétation des observations et compléter les simulations numériques. Un autre aspect concerne la caractérisation des performances des instruments de pointe développés pour l'astrophysique avant leur mise en service. Une date importante pour cette thématique a été l'inauguration du synchrotron « Soleil » en décembre 2006. Ce nouvel outil permettra d'accéder d'ici quelques mois à l'ensemble des longueurs d'onde de l'IR aux rayons X avec des flux extrêmement intenses et aux caractéristiques spectrales bien définies. Outre l'intérêt pour l'étalonnage des expériences, ces faisceaux intenses permettront de simuler les processus d'interaction photons – matière dans les milieux astrophysiques.

L'autre grand équipement de physique qui va intéresser les astrophysiciens est le laser mégajoule, dont la mise en service est prévue en 2010. Ce type d'expériences (réalisées aujourd'hui avec la chaîne laser du LULI) permet d'étudier la physique des milieux extrêmes rencontrés en astrophysique (très hautes pressions, chocs radiatifs, explosions de supernovae, plasmas astrophysiques, champs magnétiques très intenses, etc.). Le succès très récent de la simulation en laboratoire de l'effet dynamo ouvre des perspectives intéressantes pour l'astrophysique, compte tenu de la très grande diversité des objets (des corps planétaires aux objets compacts) pour lesquels le champ magnétique a joué ou joue encore un rôle important.

Compte tenu du rôle majeur de la télédétection, les différentes thématiques de l'astrophysique doivent s'appuyer sur des bases de données spectroscopiques couvrant une gamme de longueurs d'onde extrêmement étendue, avec une très grande diversité de composés observés (minéraux pour les grains interstellaires ou les surfaces planétaires,

atomes, molécules, radicaux, etc.). Des expériences dédiées sont donc indispensables en collaboration avec les communautés concernées en physique et en chimie.

## **4 – L'ASTROPHYSIQUE DANS LE CONTEXTE NATIONAL ET INTERNATIONAL**

### **4.1 LES RELATIONS AVEC LES AUTRES DISCIPLINES**

#### **Introduction**

Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction, l'extraordinaire diversité des objets constitutifs de l'univers rend indispensable des liens forts entre l'astrophysique et les différents domaines de la physique et de la chimie. Les programmes nationaux de l'INSU sont particulièrement attentifs à promouvoir des collaborations qui ne se résument pas à une simple prestation de service pour nos thématiques, mais qui permettent aux deux partenaires de développer une véritable démarche scientifique. Pour cet exercice de prospective, nous avons choisi de développer deux aspects particulièrement d'actualité : les astroparticules, avec le non renouvellement de la CID 47 pour le prochain mandat (2008-2011), et les problématiques liées à l'origine des planètes et de la vie, suite à la création de ce Programme Interdisciplinaire fin 2006.

#### **Les astroparticules (CID 47 et PID)**

Ce secteur interdisciplinaire aux frontières de l'astrophysique, de la physique des particules et de la physique théorique s'est établi sur des fondations solides grâce à la mise en place d'un programme interdisciplinaire



cofinancé par l'IN2P3, l'INSU, SPM, le CNES et le CEA en 2001 puis d'une CID « Astroparticules » en 2003, avec 3 recrutements par an.

Les grands thèmes concernent l'étude des sources de particules de très haute énergie, l'utilisation de l'Univers comme laboratoire d'étude des interactions fondamentales et la cosmologie, c'est-à-dire l'étude de l'évolution de l'Univers depuis le Big Bang jusqu'au temps présent. Les questions abordées sont nombreuses et diverses, et souvent de nature fondamentale : le Big Bang, l'inflation, l'asymétrie matière-antimatière, la matière noire, l'expansion accélérée et la possible énergie noire, la nouvelle physique et les dimensions supplémentaires (théorie des cordes), les tests de la relativité générale, les premiers objets lumineux, les particules de très haute énergie, les trous noirs, les sursauts gamma, les supernovae, les états extrêmes de la matière, la masse des neutrinos. L'implication en forte croissance des physiciens des particules, des physiciens théoriciens et des astrophysiciens sur ces thématiques témoigne du succès de cette démarche interdisciplinaire, dont les résultats les plus marquants sont présentés dans les § 2.1, 2.2 et 2.3.

Le non renouvellement de la CID 47 pour le prochain mandat pose la question du maintien de cette dynamique. Le prolongement pour 4 ans du PID « Astroparticules » apporte un élément de réponse, mais il faut trouver d'autres moyens de renforcer les contacts entre les trois communautés concernées (astrophysique, physique théorique, physique des particules) dont les cultures s'enrichissent mutuellement. Il faut également veiller à ce que la dimension interdisciplinaire de cette thématique soit bien reconnue lors de la définition du nombre de postes ouverts au concours dans les trois sections concernées.

### **L'origine des planètes et de la vie (PID)**

Le thème des Origines, et plus précisément celui de l'origine des planètes et de la Vie figure parmi les questions astrophysiques les plus brûlantes d'aujourd'hui. Un pro-

gramme interdisciplinaire sur cette thématique a été mis en place fin 2006 par le CNRS. Son colloque de démarrage a permis de mettre en valeur la grande diversité des thématiques concernées : planétologie, étude de la terre primitive, biologie, mais aussi chimie prébiotique ou sciences de l'homme.

Cette question, formulée de manières très différentes selon les époques et les contextes, est déclinée aujourd'hui par les scientifiques de façon précise : comment les systèmes planétaires se forment-ils et évoluent-ils ? Quelles sont les caractéristiques des systèmes planétaires extra-solaires ? Quels sont les conditions physico-chimiques et les processus à l'origine de la vie ? Existe-t-il des traces de vie extraterrestre fossile sur des planètes du système solaire ? Pourra-t-on à terme détecter des signatures d'activité biologique sur une exoplanète ?

La progression rapide et continue des outils d'investigation (observations astrophysiques, étude des disques protoplanétaires et du milieu interplanétaire, recherche d'exoplanètes, exploration de la Terre, du Système Solaire et du milieu interstellaire, expériences de physico-chimie et de biologie en laboratoire, modélisation) permet de penser que ces questions trouveront des réponses ou au moins d'importants éléments de réponse, dans les années à venir. Etant donnés les enjeux, qu'ils soient scientifiques ou simplement liés à la curiosité humaine, les « origines des planètes et de la vie » représentent aujourd'hui un thème prioritaire dans la plupart des communautés scientifiques et constituent un domaine particulièrement concurrentiel au niveau mondial, dans lequel la communauté française est bien placée (6% des publications mondiales).

## **4.2 LE CONTEXTE UNIVERSITAIRE**

Les universités jouent un rôle important dans le fonctionnement des laboratoires de recherche par l'affectation des postes d'enseignants-chercheurs et de personnels IATOS, par la dotation en financements spécifiques, par

l'affectation de locaux et par la mise en commun de ressources comme les moyens informatiques lourds dont le réseau. Les universités sont très proches des collectivités territoriales qui fournissent aussi une aide importante via des allocations doctorales et postdoctorales, des participations à des équipements et des constructions de locaux (Contrat de Plan État Région). Les laboratoires d'astrophysique et les observatoires sont rattachés à la section 34 du Comité National des Universités, l'une des quatre sections du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (STU alias DS3, Direction Scientifique 3). Les possibilités de recrutement, longtemps faibles, ont augmenté depuis quelques années avec une meilleure intégration des thématiques de la section 17 dans les filières relevant des UFR « physique » ou « sciences de la Terre ». On peut d'ailleurs noter plusieurs recrutements depuis quatre ans par d'autres sections du CNU (35, 37).

Il y a une complémentarité évidente entre le métier de chercheur et celui d'enseignant et les passerelles entre les deux métiers devraient être plus nombreuses. De ce point de vue, l'augmentation du nombre de délégations CNRS partielles ou totales sur des périodes de un ou deux ans est à encourager. Elle permet à un enseignant-chercheur de pouvoir consacrer ponctuellement plus de temps à son travail de recherche et participer à des campagnes de mesures (temps télescope) ou partir travailler quelques semaines avec des collègues d'un laboratoire associé à une mission spatiale.

Il faut noter qu'après sa thèse et un stage post-doctoral, la plupart des jeunes chercheurs préfèrent un poste CNRS à un poste de MdC, ce qui va poser problème vu l'évolution des possibilités. Pour être plus attractives, les universités devraient pouvoir proposer à leurs nouveaux MdC des horaires allégés (140 h au lieu de 192 h) car les deux premières années d'enseignement sont extrêmement gourmandes en temps. Il n'est pas rare de voir de jeunes MdC perdre complètement le fil de leur activité de recherche au cours des deux ou trois premières années. Il faudrait donc trouver le moyen d'assurer la poursuite d'une

activité scientifique de qualité lors de la transition entre la période postdoctorale et le poste de MdC.

### **4.3 LES RELATIONS AVEC LA SOCIÉTÉ : DIFFUSION DES CONNAISSANCES ET VALORISATION**

Comme nous l'avons indiqué dans la première section, les thématiques de l'astrophysique sont particulièrement présentes en terme de diffusion des connaissances. Une récente enquête menée par le CNRS sur la base des CRAC a révélé que les chercheurs rattachés à la section 17 se situaient de ce point de vue à un niveau 4 fois supérieur à la moyenne des sciences « dures ». L'astronomie et l'exploration du système solaire représentent plus de 15% des interventions sur des thèmes scientifiques dans les grands médias (journaux télévisés et radios d'information). L'intérêt du grand public (en particulier les jeunes) pour les conférences ou des manifestations comme la « nuit des étoiles » ne se dément pas. Les thématiques couvertes par la section 17 ont donc une responsabilité particulière dans l'attractivité de l'activité scientifique, sujet d'actualité compte tenu de la baisse continue des inscriptions dans les disciplines scientifiques à l'Université.

La situation est beaucoup plus contrastée en terme de relation avec l'industrie. Les thématiques de l'astrophysique interagissent en effet d'une manière spécifique avec le monde industriel. La valorisation directe est encore peu développée, même si quelques succès ont été obtenus vers des applications médicales. Par contre, les contrats attribués par l'INSU, le CNES, l'ESA ou l'ESO à des industriels constituent un vecteur essentiel de développement technologique pour atteindre les spécifications définies par les scientifiques et ingénieurs responsables des projets instrumentaux. Astrium ou Alcatel reconnaissent sans aucune difficulté que ce sont les missions spatiales scientifiques qui sont à l'origine de l'essentiel de l'innovation pour les satellites.

Ce mode d'interaction purement contractuel ne met pas en valeur la contribution essentielle des unités associées au CNRS. Il faut développer des partenariats avec mise en commun de moyens vers un objectif. Le pôle de compétitivité « photonique : systèmes complexes d'optique et d'imagerie » en région PACA, dans lequel les personnels CNRS jouent un rôle majeur, est un exemple intéressant de ce type de démarche.

#### **4.4 L'ASTROPHYSIQUE DANS LE NOUVEAU CONTEXTE FRANÇAIS ET EUROPÉEN**

Le paysage de la recherche en France a été profondément modifié par la mise en place de la Loi de Programme pour la Recherche et les structures qui lui sont associées (ANR, AII, AERES, PRES, RTRA, fondations, etc.). De 2004 à 2007, la part des crédits attribués sur projets a fortement augmenté par rapport aux moyens d'intervention des opérateurs (EPST, Universités, EPIC). La définition des sujets prioritaires est tributaire des objectifs sociétaux et économiques. L'astrophysique n'émerge pas sur ces thèmes prioritaires : l'ensemble des projets soutenus par l'ANR en 2005 et 2006 l'a été sur le thème « blanc » qui ne représente que 20 % du budget total. Les astrophysiciens sont bien impliqués dans les PRES (dont le rôle dans la distribution des moyens reste à préciser, mais qui devraient permettre un renforcement des liens entre les thématiques de recherche et les modules d'enseignements), mais pas (ou du moins pas encore) dans les RTRA, qui concentrent des moyens budgétaires importants. Les chercheurs et les ingénieurs en astrophysique ont l'expérience du financement sur projet à des niveaux modestes (programmes nationaux de l'INSU) ou plus importants (CNES, INSU, ESO, ESA). Cela leur a permis d'obtenir des attributions sur le thème blanc de l'ANR en 2005 et 2006. Cette évolution crée cependant des tensions dans la gestion des unités, car l'ANR ne dispose pas aujourd'hui d'un méca-

nisme qui permette de prendre en compte les coûts induits pour l'unité d'accueil (infrastructure, personnels). Le financement sur contrat étant par nature à durée limitée (3 ans pour l'ANR), ce type de soutien n'est pas adapté au suivi d'outils ayant des cycles de 10 à 30 ans entre préparation, mise en œuvre et exploitation scientifique.

Un autre grand enjeu de la période en cours est la construction de l'Espace Européen de la Recherche, dans le contexte du 7<sup>e</sup> programme cadre (2007-2013). La mise en place d'un « Conseil Européen de la Recherche » avec un Conseil Scientifique est une étape importante. Par rapport aux programmes cadre précédents, on note une ouverture vers la recherche non finalisée (« placer la recherche européenne à l'avant-garde du progrès scientifique »).

L'implication de la communauté française dans les programmes européens était encore très inhomogène en 1999-2002, avec des thématiques déjà fortement impliquées et d'autres qui l'étaient moins. Cet état de fait tenait à la prééminence d'autres vecteurs de collaboration internationale, en particulier l'observatoire européen austral (ESO), l'Agence Spatiale Européenne ou les structures internationales responsables des références de temps et d'espace. L'intérêt des réseaux européens tant pour la préparation des grands programmes du futur que pour les échanges entre laboratoires (bourses Marie-Curie en particulier) est aujourd'hui reconnu par tous. La période du 6<sup>e</sup> PCRD (2003-2006) a vu une montée en puissance de la communauté française tant là où elle était bien implantée que dans de nouvelles thématiques. On peut citer les deux réseaux *OPTICON* et *RADIONET*, mais aussi *CMBnet*, *Molecular Universe*, *JETSET*, *CONSTELLATION*, *EGSO*, *Turbulence in Space Plasma*, ou *Europlanet*. La communauté française s'est impliquée dans la préparation du 7<sup>e</sup> PCRD avec le soutien du CNRS et de l'INSU, qui ont organisé des colloques et des écoles sur ce thème. Cela devrait permettre d'élargir et de renforcer encore ces participations aux réseaux européens, avec pour objectif de soutenir l'exploitation scientifique de l'ensemble des grands outils de la dis-

cipline, y compris les missions spatiales. Le soutien administratif difficile à obtenir pour la gestion très lourde qui caractérise ces réseaux est l'un des principaux handicaps de la communauté française pour s'assurer un rôle dans le pilotage des réseaux européens.

En 2006, le CNRS a pris l'initiative de la constitution d'un ERANET en astronomie, «ASTRONET», dont il assure aujourd'hui la res-

ponsabilité principale. Ce type de réseaux permet de coordonner les politiques scientifiques des organismes européens avec un soutien de la commission (2,5 M€), mais avec des moyens issus pour l'essentiel des organismes partenaires. La section 17 considère qu'il s'agit d'un développement extrêmement positif qui devrait encore renforcer la visibilité de notre communauté au niveau européen.

## ANNEXE

### ANNEXE 1 : LISTE DES ACRONYMES

AGILE	Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero
AGN	Active Galactic Nuclei
A I I	Agence de l'Innovation Industrielle
AMANDA	Antarctic Muon And Neutrino Detector Array
ANTARES	Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss RESearch
ALMA	Atacama Large Millimeter Array
ANR	Agence National de la Recherche
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CFHT	Canada-France-Hawaii Telescope
CFHT-LS	CFHT – Legacy Survey
CID	Commission InterDisciplinaire
CME	Coronal Mass Ejection
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique

COROT	CONvection, ROTation et Transits planétaires
DUNE	Dark UNiverse Explorer
EDELWEISS	Expérience Détection Wimps En Site Souterrain
ELT	Extremely Large Telescope
ESA	European Space Agency
ESO	European Southern Observatory
FASR	Frequency Agile Solar Radiotelescope
FORT	Foyer Optimisé du RadioTélescope décimétrique
FUSE	Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer
GAIA	Global Astrometric Inteferometer for Astrophysics
GALEX	Galaxy Evolution EXplorer
GLAST	Gamma ray Large Area Space Telescope
HARPS	High Accuracy Radial velocity Planet Searcher
HETE	High Energy Transient Explorer
HESS	High Energy Stereoscopic System
HST	Hubble Space Telescope

INSU	Institut National des Sciences de l'Univers	SKA	Square Kilometer Array
INTEGRAL	INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory	SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
IOTA	Infrared Optical Telescope Array	SDSS	Sloan Digital Sky Survey
IRAM	Institut de Recherche en Astronomie Millimétrique	SMESE	Small Explorer for Studying solar Eruptions
ISO	Infrared Space Observatory	SNAP	SuperNovae Acceleration Probe
JWST	James Webb Space Telescope	SPHERE	Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet Research
LIGO	Laser Interferometer Gravity Wave Observatory	SVOM	Space based multi-band Variable Object Monitor
LOFAR	LOW Frequency ARray	TBL	Télescope Bernard Lyot
MHD	MagnetoHydroDynamique	THEMIS	Télescope Héliographique pour l'Étude du Magnétisme et des Instabilités Solaires
MUSE	Multi Unit Spectroscopic Explorer	T2L2	Transfer de Temps Lien Laser
NRT	Nancay Radio Télescope	VLT	Very Large Telescope
PCRD	Programme Commun de Recherche et Développement	VLTi	Very Large Telescope Interferometry
PHARAO	Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite	WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
PRES	Pôle de Recherche et d'Enseignement Supérieur	XEUS	X-ray Evolving Universe Spectroscopy mission
R&D	Recherche et Développement	XTE	X-ray Timing Explorer
RTRA	Réseau de Technologie et de Recherche Avancées		

