

14

SYSTÈME SOLAIRE ET UNIVERS LOINTAIN

Jean-Claude VIAL
Président

Émile-Michel Armengaud
Olivier Bienayme
Jean Borsenberger
François Boulanger
Fabienne Casoli

Nicole Cornilleau-Wehrlin
Florence Durrel

Daniel Égret (2000-2003)

Thérèse Encrenaz
Daniel Gambis
Bernard Gelly
Denis Gillet

Wlodek Kofman
Danielle le Contel

Michel Marcelin
Alain Mazure

François Mignard
Guy Pelletier

Daniel Rouan
Sylvie Sahal

Chantal Stehle
Michel Tagger

Philip Tuckey
Hervé Wozniak

Le texte qui suit résulte d'une synthèse de documents élaborés par la section 14 à l'occasion de l'exercice de conjoncture/prospective de **2001** et des textes élaborés dans le cadre plus large de la préparation du Colloque de Prospective « Astronomie et Astrophysique » (mars 2003 à la Colle-sur-loup). Les textes de ce dernier Colloque sont disponibles sur le site <http://www.oamp.fr/section14/>.

L'Astronomie a pour objet l'étude de l'origine, de la structure et de l'évolution de l'Univers et de tous les objets qui le composent. Elle essaie de déchiffrer l'énigme de l'Univers primordial, de comprendre comment se sont formés les étoiles, galaxies, amas et grandes structures de l'Univers. Elle cherche à connaître l'origine toujours incertaine des rayons cosmiques et à détecter les objets ultra-denses et ultra-énergétiques. Enfin, elle essaie de comprendre la formation étroitement couplée des étoiles et des systèmes planétaires.

De nouvelles observations permettent de détecter des planètes orbitant autour d'étoiles autres que le Soleil (exoplanètes) et ces observations posent la question d'une vie possible sur ces planètes et de son apparition à partir d'une chimie particulière à mettre à jour. L'évolution stellaire et notamment le magnétisme permettent de replacer les recherches solaires sur le chauffage coronal

et la formation de vent dans un contexte plus général. Le système solaire, y compris la Terre, dont l'exploration se poursuit, est perçu comme un système global où rayonnements, particules et matière interagissent. L'étude comparative des planètes et des satellites de type terrestre (planètes telluriques, satellites extérieurs) nous apporte des contraintes sur l'histoire et l'évolution de ces objets, y compris celles de notre propre planète.

Les relations entre la recherche astronomique et le monde dans lequel nous vivons méritent également d'être notées. La compréhension des événements solaires et de leur impact sur notre environnement (la « Météorologie de l'Espace ») est d'un intérêt socio-économique grandissant et concerne les effets sur l'homme dans l'espace, les systèmes satellites, la navigation, les communications, l'orbitographie, les systèmes sols, etc. L'astronomie prise au sens strict du terme permet d'établir des références spatiales et temporelles dont les constantes améliorations servent autant les activités terrestres, y compris la préparation des missions spatiales, que l'astrophysique. Enfin, un dernier exemple est donné par les astéroïdes géocroiseurs qui, compte-tenu de leur danger potentiel, font l'objet d'observations et d'études dynamiques afin d'estimer les fréquences d'impacts et les risques posés. Et puis, « cette obscure clarté qui tombe des étoiles » ne cesse de faire rêver l'humanité.

De par ses échelles spatiales et temporelles, sa gamme très étendue de conditions physiques, l'Univers constitue un laboratoire naturel d'une extrême richesse. À l'exception de l'exploration *in situ* du système solaire et la collecte des neutrinos, les observations sont effectuées à l'aide de techniques d'imagerie, de spectrographie, de polarimétrie qui sont mises en œuvre dans une zone aujourd'hui très étendue du spectre électromagnétique à partir du sol et de l'espace. L'astronome a donc développé des outils de collection et focalisation de lumière de plus en plus larges ; des interféromètres, des spectrographes et des polarimètres de performances accrues en terme de résolution spectrale de sensibilité et de couverture du spectre électromagnétique.

Il n'a cessé d'élargir son champ avec de grands relevés polychromatiques, de rechercher les objets de plus en plus faibles et lointains. En conséquence, la taille et le coût des projets imposent évidemment un partage croissant des tâches à l'échelle internationale ; ils induisent aussi des temps de réalisation (et d'exploitation) dont la longueur impose une cohérence programmatique forte.

Le volume (en croissance exponentielle) des données à acquérir, traiter, stocker, archiver et interpréter résulte des performances accrues des systèmes optiques, des détecteurs et des moyens de traitement et d'archivage. Les outils prévus pour le traitement et l'archivage intelligent des données font maintenant **partie intégrale** de l'instrument proposé puis utilisé. Dans un contexte de compétition internationale forte, l'astronome contemporain est donc face à un formidable enjeu : des moyens sans commune mesure avec ceux employés par ses collègues du passé et des problèmes plus difficiles issus de la complexité et de la quantité des données.

La rude compétition internationale n'exclut d'ailleurs pas l'établissement de solides coopérations et dans certains domaines, notamment spatial, une politique ouverte d'accès rapidement libre aux données d'observations.

Le besoin d'établir des diagnostics physiques sûrs, ou de séparer des objets divers le long de la ligne de visée, ou encore de suivre un événement dans toute son histoire imposent à l'astronome de travailler sur des données de natures (multi-longueurs d'onde) et d'origines (télescopes) très diverses, auxquelles il importe d'accéder avec des outils simples et performants. C'est le sens de l'Observatoire Virtuel à la mise en œuvre duquel la communauté française contribue éminemment.

L'interprétation des données d'observation est soutenue par un effort théorique important et par la simulation numérique qui fait appel, comme la modélisation, à des moyens « lourds » de calcul. Ces travaux portent certes sur des objets très divers, mais présentent des bases physiques communes (problèmes N corps, transfert de rayonnement, hydrodynamique, magnétohydro-

dynamique, physique atomique et moléculaire, chimie quantique, etc.). L'existence de méthodes et d'outils communs justifie le développement de gros codes généralistes, si possible en collaboration avec d'autres disciplines.

– 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 ?

1 – LES « GRANDES QUESTIONS » AUXQUELLES LES ASTRONOMES TENTENT DE RÉPONDRE

(Voir annexe I)

– 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 ? ;

– l'exploration de la chimie interstellaire qui porte sur l'originalité des processus et des espèces va-t-elle mettre aussi en évidence une possible contribution interstellaire à la chimie du vivant ? ;

– pourquoi les exoplanètes géantes découvertes sont-elles différentes des planètes géantes du système solaire ? Combien y a-t-il d'« exoterras » ? Sont-elles susceptibles d'abriter la vie et comment la détecter ? ;

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

2 – QUELQUES RÉSULTATS MARQUANTS

(Voir annexe 1)

La mesure des anisotropies du corps noir cosmologique (Boomerang/Maxima-Archeops-WMAP) a permis de conclure à une courbure spatiale de l'Univers proche de zéro (Univers « plat ») et de confirmer l'accélération de l'expansion de l'Univers mise en évidence par le comptage de chandelles cosmologiques (supernovae de type Ia). Ainsi la densité d'énergie de l'Univers serait largement dominée par une « énergie noire », celle du vide, que la physique théorique peine à expliquer. La cartographie définitive des anisotropies du corps noir par le satellite Planck fixera avec précision les paramètres cosmologiques et la physique des fluctuations primordiales ayant conduit aux grandes structures de l'Univers.

« Pourquoi donc ne voyons-nous pas ces autres corps lumineux qui sont des terres tournant autour de ces corps lumineux qui sont des soleils ? » se demandait Giordano Bruno, il y a plus de quatre siècles. C'est au cours des sept dernières années que les astronomes ont détecté une centaine d'exoplanètes géantes autour d'étoiles proches de la séquence principale. La plupart de ces exoplanètes, bien que très massives (au moins la moitié de la masse de Jupiter) sont situées à proximité immédiate de leur étoile (0,05 UA). Le mécanisme de formation de ces systèmes planétaires reste à élucider. La prochaine étape consiste à rechercher des exoplanètes de type terrestre (mission COROT), ce qui permettra de préparer les missions plus ambitieuses

visant à imager et analyser leurs surfaces et y rechercher les signes et conditions d'apparition de la vie.

Le problème du déficit de détection des neutrinos solaires, d'importance cosmologique, est résolu, grâce à une vingtaine d'années d'effort conjoint de la communauté d'héliosismologie internationale, notamment française, et de celle de la physique des particules. Un remarquable accord entre le chiffre émanant des deux communautés, publié séparément la même année, a permis de prouver que les neutrinos ont une masse et de confirmer la qualité de ces expériences très difficiles (aussi bien côté astrophysique que physique des particules).

D'autres résultats remarquables participation française ont été obtenus dans les domaines les plus divers. Citons ici :

- la découverte en bande X de l'émission rémanente des sursauts gamma et la preuve qu'ils se produisent des distances cosmologiques ;

- la caractérisation des trous noirs centraux, y compris celui de notre Galaxie ;

- les premières explorations avec les instruments de l'IRAM de la structure et la chimie du gaz dans les condensations proto-stellaires et les disques proto-planétaires ; la mise en évidence d'un important fractionnement en deutérium dans les enveloppes proto-stellaires, interprété comme le résultat de la déplétion des éléments lourds sous forme de molécules condensées sur les grains ;

- la détection de l'uranium dans une étoile du halo galactique et la déduction d'une limite inférieure l'âge de l'Univers ;

- la détection systématique des Éjections de Masse Coronale, leur source, la surface du Soleil, grâce la mission SOHO ;

- l'adoption du Système de Référence Celeste International (ICRS) proposé par les équipes françaises.

3 – BILAN PROGRAMMATIQUE

(Voir annexe 1)

La communauté astronomique a assuré un soutien scientifique à l'exploitation des grandes missions spatiales et des instruments au sol (CFHT, VLT, VLTI, IRAM, THEMIS, SUPERDARN, EISCAT, ISO, HST, SOHO, ULYSSE, CLUSTER, CASSINI, PLUS RÉCEMENT INTEGRAL, XMM, GALEX, Mars Express, Rosetta) et préparé les grands projets (VLTI2, CFHT-NG, ALMA, PLANCK, HERSCHEL, JWST, GAIA, COROT, Eddington, Venus Express, BepiColombo, Stereo, Solar Orbiter). Elle a notamment beaucoup investi dans les missions martiennes.

Le besoin de regroupement des forces autour de moyens et sur des objectifs scientifiques bien ciblés a abouti à la mise sur pied de Programmes, GdR, Actions spécifiques, qui « pavent » à peu près tout le champ disciplinaire (tableau 1). Rappelons ici que la discipline est structurée en plus de 40 formations, plus de 320 chercheurs CNRS (pour un total d'environ 900 chercheurs et 1100 ITA/IATOS).

Ces structures résultent des besoins exprimés par les communautés concernées, besoins de coordination, mutualisation et soutien à des initiatives d'opérations scientifiques de nature modeste. Elles permettent aussi une réflexion sur les grands moyens et les grandes missions nécessaires, même si ces opérations de taille égale ou supérieure à la moyenne sont traitées par les Comités *ad hoc* de l'INSU (CSA) et du CNES.

Notons la participation du CNES à tous ces programmes et GdR.

Tableau 1 : Programmes et GdR intéressant la discipline

Sigle	Thématique	Nombre total de chercheurs	Nombre Astronomes	Autres communautés
PNC	Cosmologie	200	100	PNC, SPM et CEA
GdR PCHE	Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie	150	50	PNC, SPM et CEA
PNG	Galaxies	200	200	
PCMI	Physique et Chimie du Milieu Interstellaire	150	80	SPM, SC, CEA
PNPS	Physique Stellaire	200	200	
PNP	Planétologie	200	140	SDU
PNST	Soleil-Terre	200	200	
GdR Exobio	Exo/Astrobio-logie	150	40	SDU, SDV, SC

NB Un chercheur appartient le plus souvent à plus d'un Programme ou GdR.

Le GdR astrométrie, géodynamique et systèmes de référence (AGRET) regroupait près d'une centaine de chercheurs relevant des thématiques des sections 11, 13 et 14. Le GdR qui prend la relève est plus ciblé sur l'interface astronomie–géodésie–géophysique.

D'autres structures complètent le dispositif, en ce qui concerne notamment les outils employés : Action Spécifique Haute Résolution Angulaire (ASHARA) ou Action Spécifique sur la Simulation Numérique en Astrophysique (ASSNA).

4 – FORCES ET FAIBLESSES DE LA COMMUNAUTÉ

(Voir annexe 1)

4.1 FORCES

La communauté est impliquée dans un ou plusieurs programmes ou GdR véritablement **pluridisciplinaires, pluridépartmentaux** (SC, INSU, IN2P3, SPM, STIC) et **multi-agences** (CNRS, CEA, CNES, etc.).

Les interfaces entre disciplines se sont multipliées, comme on le voit avec la mise en place de groupes de travail communs aux programmes.

Certaines équipes assument des responsabilités essentielles dans de grands projets, sol ou spatiaux (INTEGRAL, PLANCK) ou assurent des services uniques sur le plan international (CDS, ILRS, LPTF).

L'approche multi-longueurs d'onde et la mise sur pied de campagnes coordonnées internationales n'ont cessé de progresser.

Les outils de diagnostic deviennent incomparablement puissants et complémentaires ; pour les observations : spectrographie à 3 dimensions (3D), haute résolution spatiale et spectrale, nouveaux instruments de l'UV à l'IR et sub-mm, combinaison de mesures *in situ* et remote sensing dans le système solaire ; pour les modélisations, accès à des moyens de calculs centralisés (IDRIS) et autonomes (grappes/fermes de PC, etc.).

À noter l'effort de regroupement en « simulations numériques » au travers de l'action spécifique ASSNA.

Enfin, le regroupement des efforts autour des bases de données (certaines étant liées à des opérations d'instruments) et l'orientation vers le concept d'Observatoire Virtuel (dans lequel la communauté française joue un

rôle majeur, grâce en particulier au CDS à Strasbourg) ont nécessité la mise en place de méthodologies nouvelles.

4.2 FAIBLESSES OU INQUIÉTUDES

La faiblesse en ressources humaines (particulièrement ITA) et la rigidité des structures peuvent se révéler pénalisantes pour des projets instrumentaux et aussi de simulation numérique.

Une politique de post-doctorants inadaptée aux besoins et menée au détriment de l'emploi permanent pénalise notamment les activités d'analyse de données et leur exploitation. Afin de compenser le départ de nos post-docs à l'étranger, il est important d'avoir les moyens d'attirer de jeunes chercheurs (notamment étrangers) de talent.

La chaîne de traitement de l'information depuis la conception d'une expérience jusqu'à la mise à disposition de ses résultats pour le non-spécialiste n'est pas toujours prise en compte dans sa globalité ; une action spécifique est sans doute nécessaire pour organiser les synergies et articuler une politique nationale dans un contexte européen très actif.

Certaines communautés (solaire, stellaire, mécanique céleste, etc.) ont une distribution des âges inquiétante et des profils (tels ceux de certains instrumentalistes) risquent de disparaître sans relêve. Il y a là un besoin clair de recrutements.

Il faut veiller aux besoins d'une exploitation scientifique complète des grands programmes observationnels, par exemple à l'horizon 2007-2010 pour la mission PLANCK et à l'horizon 2012 pour certaines missions du système solaire.

5 - PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES THÉMATIQUES

(Voir annexe 1)

Qu'il s'agisse de la détermination des paramètres cosmologiques (énergie sombre, matière sombre) ou de la formation des structures (galaxies, amas), il importe de réussir les opérations engagées (PLANCK, VIMOS, MEGACAM, etc.). À moyen terme, le choix entre diverses stratégies (cartographie du cisaillement gravitationnel, recherche de supernovae), choix qui implique des missions telles que SNAP, reste à faire. À long terme, la meilleure méthode de mesure de la partie polarisée des anisotropies du CMB reste à définir.

La création, la focalisation, l'accélération des jets relativistes autour des trous noirs constituent des questions de physique que XMM, INTEGRAL, GLAST vont contribuer à résoudre. Il devrait être possible de tester la validité de la relativité générale dans des champs de gravité intense.

En ce qui concerne les sources candidates aux accélérations cosmiques produisant les rayons cosmiques ou les sursauts gamma, leur étude repose sur des traceurs dans l'environnement des trous noirs, traceurs en X détectables avec des missions comme XEUS, SIMBOL-X, MAXIM, etc. L'astronomie non-photonique, neutrinos et ondes gravitationnelles, devrait apporter l'information directe sur les sources avec des missions telles que IceCube et LISA, respectivement.

L'exploitation des grands relevés va jouer un rôle décisif grâce la couverture multi-longueurs d'onde, à l'amélioration de la résolution angulaire et au passage au domaine submillimétrique qui permet un accès à des redshifts élevés. Citons ici DENIS, VIRMOS/GIRAFFE sur le VLT, HST, GALEX, XMM, SIRTF, etc. puis le JWST, ALMA, VLT2, GAIA, SNAP. Notons que le besoin de haute résolution angulaire sera satisfait par ALMA, VLT2.

Avec la détermination précise des paramètres cosmologiques, la dégénérescence « modèle cosmologique/évolution » sera levée et l'accent sera alors placé sur l'évolution des galaxies elles-mêmes.

Il sera possible de détecter des objets à des z de plus en plus élevés, de mieux mesurer les taux de formation d'étoiles, d'étudier l'évolution morphologique des galaxies.

Avec SIRTf, ALMA, HERSCHEL et JWST, l'étude de l'évolution physico-chimique et dynamique de la matière froide dans l'espace va s'intégrer à plusieurs des grandes questions sur l'évolution de l'Univers : la formation et évolution des galaxies et la formation des étoiles et des planètes. De nouveaux aspects de la complexité moléculaire de la matière dans l'espace vont être découverts ; de nouvelles perspectives vont s'ouvrir sur la structuration du milieu interstellaire et la formation de condensations proto-stellaires. L'étude physico-chimique des nuages moléculaires et enveloppes d'étoiles va s'étendre aux condensations proto-stellaires et aux disques proto-planétaires et faire le lien avec la matière primitive dans le système solaire. L'étude de la matière interstellaire va sortir de la Galaxie pour s'étendre aux galaxies le long de leur évolution jusqu'à l'éventuelle détection de l'émission H_2 du gaz primordial lié à la formation des premières étoiles et des galaxies.

Les mesures astérosismologiques, où les équipes françaises jouent un rôle leader, vont apporter une connaissance unique de la structure d'étoiles autres que le Soleil (notamment sur les processus de transport). Elles permettront de comprendre les processus physiques qui gouvernent leur évolution. Les âges des étoiles pourront être connus avec une précision suffisante pour leur intégration dans les modèles cosmologiques. L'observation des environnements circumstellaires permettra de tester les théories de formation des planètes. Les énormes progrès des techniques de haute résolution angulaire, permettront de mesurer directement les rayons d'étoiles et bientôt d'en faire des images. Les outils privilégiés seront COROT, HERSCHEL, VLT, ALMA, JWST,

Eddington. Enfin GAIA permettra de mesurer des paramètres stellaires fondamentaux pour presque toutes les étoiles de notre Galaxie et même de quelques galaxies voisines.

Les questions de formation des systèmes planétaires et d'étude comparative des processus planétaires vont connaître des progrès majeurs avec notamment les missions de recherche d'exoplanètes (au sol HARPS ; dans l'espace COROT, Eddington, GAIA, et à un horizon plus lointain DARWIN). L'étude de Mars et de Vénus est l'objet de collaborations interdisciplinaires avec les Sciences de la Terre sur les surfaces et atmosphères planétaires (Mars Express, Venus Express). Enfin, l'exobiologie, qui se donne comme objectif de mieux cerner les conditions d'émergence de la vie, offre un terrain très prometteur d'interdisciplinarité.

Il devient possible de mesurer le magnétisme externe et interne du Soleil, comprendre sa génération, son émergence dans l'atmosphère externe et aussi ses interactions sous forme notamment de reconnections qui interviennent aussi bien dans les milieux solaires (collisionnels) que magnétosphériques (non collisionnels). La théorie du système Soleil-Terre (un système multi-échelles où intervient la physique non-linéaire) est à faire. Il conviendra d'exploiter THEMIS, construire FASr puis ATST. Les nanosatellites permettront d'effectuer des mesures multipoints et multiéchelles à 3D. Le couplage des mesures *in situ* -imagerie (Sonde Solaire, Solar Orbiter) permettra d'accéder à la microphysique des processus. La météorologie spatiale (du moins ses étapes scientifiques préliminaires) reposera sur Solar Dynamics Observatory et des missions microsatellites.

S'il est primordial d'assurer la maintenance des systèmes de référence célestes et terrestres (observations VLBI et retraitements de données), la télémétrie laser va jouer un rôle important pour les systèmes terrestres. Avec GAIA, c'est l'astrométrie spatiale qui va introduire des progrès majeurs dans les systèmes de référence célestes. Les transferts de temps accéderont à une précision inégalée avec les horloges à atomes refroidis de type PHARAO et les possibilités de transfert laser de type T2L2.

On trouvera dans le tableau 2 une liste des missions majeures permettant d'atteindre les objectifs ci-dessus.

Tableau 2. Thématiques prioritaires en astronomie et grands équipements associés

Thème prioritaire	Programme ou GdR	TGE (en cours)	Projet futur (accepté)
Cosmologie	PNC PNG	Vlt, Hst, Xmm	Planck, Cfht, Jwst, Alma, Edelweiss
Hautes énergies	GdR PCHE	Hess, Integral, Xmm	Glast, Antares, Auger, Lisa
Galaxies	PNG, PNC	Cfht, Vlt, Iram, Hst, Integral, Xmm GaleX	Cfht, Alma, Glast, Gaia, Planck, Herschel, Jwst
Milieu interstellaire	PCMI GdR Exobiologie	Iso, Iram, Vlt, Vlti, Fuse	Sirtf, Herschel, Planck, Alma, Jwst
Formation et évolution stellaire	PNPS	Cfht, Vlt, Vlti, Iram, Hst, Integral, Xmm, Soho	Cfht, Corot, Glast, Gaia, Eddington, Herschel, Jwst, Alma
Planétologie	PNP PNPS PCMI GdR Exobiologie	Iram, Cfht, Vlt, Vlti, Hst, Cassini, Fuse, Mars Express, Rosetta	Cfht, Alma, Herschel, Jwst, Gaia, Corot, Venus, Express, BepiColombo
Système Soleil-Terre	PNST	Eiscat, SuperDarn, Themis, Soho, Cluster, Ulysse, Trace	Stereo, Solar Dynamics Observatory, Solar Orbiter
Références d'espace et de temps	GdR AGRET (et successeur)	Pharao	Gaia

PNC : Programme National de Cosmologie.
 PCHE : Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie.
 PCMI : Programme National Physique et Chimie du Milieu Interstellaire.
 PNPS : Programme National de Physique Stellaire.
 PNST : Programme National Soleil Terre.
 AGRET : Astronomie Géodynamique et Systèmes de Référence.

6 – LES INTERDISCIPLINARITÉS

L'astrophysique est, par nature, interdisciplinaire. D'une part, pour comprendre toute la variété des phénomènes naturels à l'œuvre dans les sites astrophysiques, le recours à une vaste gamme de spécialistes d'autres disciplines est une nécessité absolue. Mais d'autre part, en permettant l'étude de sites où règnent des conditions physiques qui ne sont pas à la portée des laboratoires terrestres, l'astrophysique offre des opportunités de recherche des plus originales aux chercheurs des autres disciplines. De plus, tout au long de la chaîne qui conduit de l'instrumentation à la modélisation théorique, en passant par le traitement des données et leur archivage, l'astrophysique retrouve là encore des approches et des méthodes partagées par nombre d'autres disciplines.

Le pouvoir attractif de l'astrophysique est tel que les thèmes de recherche propres à cette discipline sont désormais partagés par une communauté beaucoup plus vaste dont les contours vont bien au-delà des secteurs traditionnellement dévolus à l'astrophysique.

Nous avons choisi de décliner l'interdisciplinarité de l'astrophysique en sept thèmes, détaillés en **Annexe 2 : « Interdisciplinarités »**, à savoir :

- repousser les limites de la mesure du temps et de l'espace ;
- astroparticule et cosmologie ;
- physique des processus de transport dans les objets astrophysiques ;
- évolution physico-chimique et dynamique des milieux inter et circum-stellaires ;
- évolution comparée des planètes telluriques ;
- conditions d'évolution vers la matière vivante.

On trouvera également en annexe une réflexion sur la recherche interdisciplinaire, ses outils et méthodes couramment utilisés

(**Voir annexe 3 « Outils et méthodes pluridisciplinaires transversaux »**) ses spécificités au point de vue de l'évaluation et du recrutement (**Voir annexe 4 « Spécificités de l'évaluation et du recrutement en recherche interdisciplinaire »**). Nous insistons sur l'intérêt de mettre en œuvre cette interdisciplinarité assez tôt dans la carrière des chercheurs. Nous relevons la difficulté d'évaluation du chercheur à l'interface, tant du point de vue de son recrutement que de celui de sa carrière. Nous dressons un tableau des recrutements croisés entre la section 14 et les autres sections (tableau 3). Nous proposons la constitution de jurys véritablement pluridisciplinaires constitués de façon souple à base d'experts du Comité National.

De ce point de vue, les Commissions Interdisciplinaires paraissent constituer une réponse bien lourde à un besoin bien réel. La Commission Astroparticules offre toutefois la possibilité d'enrichir les laboratoires des trois communautés concernées de compétences nouvelles et complémentaires.

Nous demandons une réflexion spécifique sur l'évaluation des chercheurs interdisciplinaires.

On ne peut également ignorer les réflexions portant sur les responsabilités respectives des sections SDU en ce qui concerne la planétologie. Ces réflexions tiennent compte du développement rapide de cette discipline et notamment, celui de la thématique « Formation du système solaire », l'intégration des diverses régions planétaires (solide, liquide, gaz, particules ionisées) dans une même démarche scientifique, l'exploration spatiale combinant *in situ* et remote sensing, le rôle particulier de Mars, la découverte d'exotiques exoplanètes, et la naissance d'une nouvelle discipline : l'exobiologie.

À ce jour, le redécoupage du Comité National place la planétologie de la façon suivante :

– *section 17* Système Solaire et Univers Lointain :

– origine, structure et évolution des étoiles et des systèmes planétaires,

– planétologie : origine, dynamique et évolution du système solaire, de ses objets et de leurs enveloppes ;

– *section 18* Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles :

– planétologie : origine, structure et composition de l'intérieur des planètes telluriques, de leur surface et des astro-matériaux ; cosmochimie ;

– *section 19* Système Terre : enveloppes superficielles :

– physique, dynamique et chimie de l'atmosphère de la Terre et des planètes telluriques.

On notera donc que la planétologie est de plus en plus intégrée dans les thèmes de recherche des Sciences de la Terre.

7 – RELATIONS ASTRONOMIE-UNIVERSITÉS

(*Voir annexe 5*)

On notera que malgré la baisse du nombre d'étudiants en physique, l'Astronomie a gardé son pouvoir d'attraction au niveau des DEA et des thèses. Malheureusement, c'est la section 34 (Astro) qui a vu l'évolution la plus plate depuis 1987 du nombre d'enseignants-chercheurs au sein de la DS3. Le creux du nombre d'enseignants-chercheurs et astronomes CNAP vers l'âge de 45-50 ans est particulièrement inquiétant en termes de relève des responsables de formations. Est réaffirmé le rôle attractif de l'Astronomie dans l'enseignement de la physique. Tous enseignants confondus, un allègement des charges d'administration et d'enseignement est impératif pour préserver l'activité de recherche. Au niveau DEA et thèses, une formation moins académique et une plus grande fluidité entre écoles doctorales est recommandée. Et bien sûr, la revalorisation

des allocations de recherche devrait être vraiment substantielle. Quant à la HDR, on peut poser la question de son utilité.

8 – L'ASTRONOMIE ET L'EUROPE

(Voir annexe 6)

L'Astronomie est depuis longtemps **euro-péenne** : des organismes tels que l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et l'European Southern Observatory (ESO) jouent un rôle déterminant dans la construction de grands instruments dans l'espace et au sol. Par contre, au niveau de l'Union Européenne, les astronomes français ont du mal à trouver toute leur place, même s'ils sont présents dans la plupart des 16 réseaux européens « astro ». Le 6^e programme-cadre devrait lui offrir de meilleures conditions, via notamment le support à des programmes nationaux ou la participation à des programmes technologiques, grands équipements ou du type « météo spatiale ».

La nécessité de construire une Astronomie Européenne ne doit pas non plus occulter l'existence et la richesse de nombreuses collaborations internationales avec des pays n'appartenant pas à la Communauté Européenne, en particulier les coopérations bilatérales de l'Astronomie spatiale.

9 – L'ASTRONOMIE ET LA VALORISATION

(Voir annexe 7)

Pour l'Astronomie, la **valorisation** porte sur différents aspects : diffusion des sciences

mais aussi brevets, logiciels, consultance, expertise et enseignement. Elle est prise en compte dans les critères d'évaluation de la section 14 et sans doute faudrait-il augmenter le nombre de postes qui lui sont dédiés. Direction, Administrations, Sections ont un grand rôle à jouer dans le domaine de la valorisation « marchande » aussi bien qu'intellectuelle : toutes initiatives (publications techniques, réseaux de métiers, ateliers et colloques) sont à encourager.

10 – QUELQUES PISTES DE RÉFLEXIONS

On note une très forte continuité thématique depuis l'origine de l'Univers jusqu'à, par exemple, la planétologie, les systèmes de référence ou les relations Soleil-Terre : zones de physique et méthodes (observations, simulations) communes.

N'est-ce pas une raison fondamentale pour garder le caractère « un et indivisible » de notre discipline ?

En même temps, le besoin de franchir les frontières disciplinaires (avec la physique, la chimie, les techniques de traitement du signal, l'instrumentation, etc.) est de plus en plus fort.

Nous semble posée la question de l'évaluation des chercheurs interdisciplinaires (ou non) que la diversité des profils (qui résulte de la diversification des missions : chercheur-valorisateur, chercheur-communicateur, chercheur-manager, chercheur-communicateur, etc.) rend de plus en plus ardue.

L'absence de cadre institutionnel pour leur financement est un frein au développement de projets de laboratoires ambitieux.

Une coordination scientifique et programmatique plus forte entre CNRS et Ministère serait la bienvenue.

Il convient de renforcer les équipes et les compétences en traitement des données pour les missions futures.

Le problème d'un recrutement de chercheurs et ITA anticipant les départs en retraite est critique.

Comment s'assurer aussi que notre pays et la « vieille » Europe gardent les moyens pour produire « leurs » propres données ?

La question des moyens (CNRS, CNES) se pose aujourd'hui avec une acuité accrue. Il

est capital pour une discipline comme l'astronomie utilisant des moyens lourds et engagée dans des programmes internationaux, de disposer de garanties de moyens **pluriannuels** stables.

S'il est clair que les Programmes européens ne peuvent se substituer aux agences nationales, il est non moins évident que les astronomes doivent réfléchir à une meilleure utilisation des moyens offerts par les programmes de la Communauté Européenne.

ANNEXES

ANNEXE 1 : THÉMATIQUES : FAITS MARQUANTS, BILAN PROGRAMMATIQUE, GRANDES QUESTIONS, CHANTIERS À OUVRIR

1 LA COSMOLOGIE

On peut identifier dans la cosmologie d'aujourd'hui *deux grands thèmes fédérateurs* :

– la détermination des paramètres cosmologiques, notamment la densité d'énergie des diverses composantes de l'Univers, et leur identification, ainsi que son taux d'expansion et son accélération ;

– la compréhension de l'origine et du développement des structures de l'Univers, en utilisant aussi bien les raies d'absorption sur la ligne de visée des quasars, que la distribution des galaxies, des amas, les anisotropies du corps noir cosmologique, ou les simulations numériques.

Faits Marquants

Détermination d'une courbure spatiale de l'Univers proche de zéro grâce aux caractéristiques mesurées des anisotropies du corps noir cosmologique et, en utilisant les contraintes dues aux supernovae de type Ia qui montrent une *expansion en accélération* s'expliquant par une constante cosmologique non nulle, déduction que la densité d'énergie de l'Univers serait largement dominée par une « énergie noire », celle du vide.

Première détection du cisaillement gravitationnel par déformation de la forme des galaxies lointaines par les structures plus proches (relevé DESCART), et exploitation scientifique (contrainte sur l'amplitude des fluctuations primordiales, densité de matière) ;

Contraintes fortes sur les propriétés de la matière sombre : exclusion de l'hypothèse d'une matière noire baryonique sous forme de naines brunes (expérience EROS), et meilleures courbes d'exclusion actuelles pour la matière noire sous forme de particules n'interagissant que faiblement (EDELWEISS).

Bilan des 4 Dernières Années

Parmi les points forts des quatre années passées depuis le colloque d'Arcachon, on doit mentionner :

– préparation des programmes scientifiques des instruments VIRMOS sur le VLT (et première lumière) et MEGACAM au CFHT (accompagné par la montée en puissance du centre de traitement des données TERAPIX) ;

– mise en chantier et lancement réussi de l'expérience ballon ARCHEOPS pour la mesure des anisotropies à grande échelle des anisotropies du fond diffus cosmologique permettant le développement d'un savoir faire préparatoire à Planck, et développement du programme scientifique et du centre de traitement de données Planck (POSDAC). Les données ont permis d'imposer la meilleure contrainte actuelle sur la courbure spatiale de l'Univers ;

– choix d'un soutien fort à EDELWEISS pour les recherches directes de matière noire, choix dont le bien fondé s'est avéré par la publication récente de leur courbes d'exclusion.

Outre les 3 faits particulièrement marquants mentionnés précédemment, il convient de citer encore :

– la détection des galaxies à grand décalage vers le rouge, dans les catalogues infrarouges du satellite ISO, qui contribuent fortement au fond diffus infrarouge et submillimétrique du à la lumière intégrée de toutes les galaxies et noyaux actifs ; ce fond avait d'ailleurs été découvert précédemment par une équipe française dans les données des expériences FIRAS et DIRBE du satellite COBE ;

– la première détection (qui ne soit pas simplement une limite supérieure cohérente avec le modèle standard) d'une température du fond cosmologique supérieure d'un facteur $1+z$ à la température actuelle de 2,7 K, grâce à l'étude avec le VLT du spectre détaillé d'un quasar lointain ;

– l'émergence rapide d'une communauté de théoriciens cosmologues, et dont les spécificités demandent à être reconnues par le PNC. Ces théoriciens ont notamment fortement contribué à la construction de modèles de cosmologie primordiale, comme la cosmologie branaria inspirée des théories des (super-) cordes, ou les études topologiques.

Forces et Faiblesses de la Communauté

Forces

Communauté véritablement pluridisciplinaire (issue des sections 02, 03, et 14) largement rassemblée au sein d'un programme national **pluri-départemental** (INSU, IN2P3, SPM) et **multi-agences** (CNRS, CEA, CNES), le PNC a permis quand cela était nécessaire d'arbitrer entre différentes options techniques ou scientifique, tout en permettant d'engager très rapidement une action ambitieuse comme ARCHEOPS avant que ne soit trouvés d'autres relais institutionnels. Il convient de souligner l'émergence rapide d'une communauté de théoriciens de l'Univers primordial.

Pilotage de projets phares de la cosmologie au niveau international, comme l'expérience HFI du satellite Planck de l'ESA (plus grande expérience de cosmologie observationnelle d'Europe) qui est préparée par l'expérience ballon ARCHEOPS dont les résultats viennent d'être publiés, celui du consortium VIRMOS dont le spectrographe multi-objets dans le visible a récemment vu sa première lumière sur le VLT, relevés grands champs sur le CFHT (MEGACAM/TERAPIX, WIRCAM), expérience EDELWEISS de détection bolométrique cryogénique de la matière sombre. Ces grandes expériences sont un levier puissant pour aider à la structuration de la communauté et au développement ciblé de ses compétences.

Développement d'outils numériques puissants, portables et prenant en compte une physique de plus en plus large. Initiatives prises à l'échelle européenne pour l'augmentation de la puissance de calcul.

Faiblesses

Dans la perspective de la montée en puissance de ces projets de grande ampleur, aussi bien par le nombre de collaborateurs que par la masse des données à traiter (situation quelque peu nouvelle pour la communauté astrophysique), un certain nombre de faiblesses se dessinent :

L'activité de simulation numérique souffre d'un manque de ressources humaines (particulièrement ITA), et elle risque donc de ne pas être à même de répondre aux besoins d'une exploitation scientifique complète des grands programmes observationnels engagés. Cela risque aussi de nous affaiblir pour préparer notre participation en bonne place dans les projets futurs. L'émergence récente du groupe INC (Investigation Numérique en Cosmologie) qui rassemble la plupart des scientifiques concernés permet cependant d'envisager maintenant une action ciblée efficace ;

La difficulté à financer un volant récurrent suffisant de post-doctorants pour soutenir les activités d'analyse de données et leur exploitation dans un contexte de compétition forte avec les autres partenaires de ces expériences qui sont en général internationales.

En bref, les forces scientifiques et techniques seront-elles présentes pour assurer l'exploitation scientifique optimale de PLANCK, VIRMOS, des futurs relevés d'imagerie grands champs, etc. ?

Grandes Questions

- Elles sont connectées aux deux grands thèmes fédérateurs (paramètres cosmologiques, structuration de l'Univers), et aux faits marquants (*Voir* ci-dessus) :

Quelles sont l'identité (équation d'état) et la densité de l'énergie sombre ? Quelles sont l'identité, la densité, et la distribution spatiale de la matière sombre ?

Comment se sont formés les structures et notamment les galaxies et les amas ? Corrélativement, quand et comment l'Univers est-il sorti de l'âge sombre et re-ionisé ?

Il existe de multiples pistes instrumentales pour répondre à ces questions fondamentales. Certaines sont dorénavant bien définies (comme MIRIM sur le JWST, le déploiement de EDELWEISS-II, etc.), tandis que d'autres demandent encore à être arbitrées rapidement.

- En ce qui concerne les projets à court et moyen terme, les projets prioritaires sont :

Participer à un satellite d'imagerie grand champ. Mais faut-il privilégier la cartographie du cisaillement gravitationnel, la recherche de supernovae, ou une combinaison des deux (projets de satellite SNAP à dominante US, ou bien DEP-« Dark Energy Probe », plus petit et centré sur le cisaillement), ou bien encore s'orienter vers une résolution moindre sur une grande partie du ciel et permettant de préparer les observations JWST ? Les incertitudes actuelles sur le contexte programmatique ne permettent pas encore de se prononcer.

Développer l'outil simulations numériques, aussi bien pour permettre des progrès théoriques que pour préparer, optimiser le concept, puis exploiter scientifiquement les expériences lourdes, aussi bien sol que satellitaires. Un changement d'échelle des projets semble nécessaire.

Parmi les projets d'instrumentation de seconde génération du VLT, KMOS et MUSE seront deux instruments de choix.

À plus long terme, la **mesure fine de la partie polarisée des anisotropies primordiales** du fond à 2,7 K apparaît incontournable même si la meilleure stratégie expérimentale reste à établir.

Proposition Thématique d'Évolution

L'activité en cosmologie est interdisciplinaire et très dynamique au niveau mondial, avec de nombreux résultats de grandes importances acquis à un rythme très rapide. Cependant les deux grandes thématiques rappelées au début demeurent, les priorités qui consistent à réussir les actions engagées (PLANCK, VIRMOS, MEGACAM, etc.). Enfin, si les meilleurs compromis pour les projets futurs (qui doivent se préparer aujourd'hui) ne sont pas encore établis, en revanche les grandes directions et le type de moyen semblent en revanche assez clairs (simulations numériques, et d'un point de vue observationnel imagerie sub-mm d'une part, grand champ d'autre part).

2 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 certains objets résultant de l'évolution stellaire, tels 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. Cette population apparemment disparate de sites cosmiques partage une capacité unique à produire des éjections relativistes. Contrairement à la majorité des astres, qui rayonnent dans une étroite bande spectrale, les sites des phénomènes cosmiques de haute énergie produisent un abondant rayonnement non-thermique dans un très vaste domaine spectral. Même si les observations dans les seules bandes des photons de haute énergie restent le moyen privilégié – parfois le seul – 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). Leur capacité à accélérer des particules ouvre également la possibilité de les étudier par le truchement de ces mêmes particules et des neutrinos de haute énergie qu'elles produisent, tant à la source que lors de leur propagation. Souvent façonnés par les champs de gravitation les plus intenses, bien des sites de phénomènes cosmiques de haute énergie doivent enfin se manifester comme sources d'ondes gravitationnelles.

Faits Marquants

Une avancée décisive dans la compréhension des sursauts gamma

Pendant un quart de siècle, ils ne furent rien d'autre que de soudaines bouffées d'énergie qui, à raison d'une par jour en

moyenne, illuminent brièvement (durée 10^{-3} à 10^3 s) le ciel d'un éclat intense. Seules deux de leurs propriétés nous étaient alors connues : une distribution isotrope sur la voûte céleste et un déficit en spécimens de faible intensité par rapport à une population remplissant un espace Euclidien. À partir de 1997, en découvrant l'aptitude des sursauts gamma à produire une émission X rémanente, le satellite italien BEppo-SAX a ouvert la voie à la recherche de leurs éventuelles contreparties dans le visible et à l'identification de leurs galaxies hôtes. Les mesures du décalage vers le rouge cosmologique z d'une vingtaine d'entre elles ($0,8 < z < 4,5$) impliquent que les sursauts gamma sont bien les événements les plus énergétiques de l'Univers (énergie rayonnée en gamma $\sim 10^{51}$ ergs). L'explication la plus plausible met en jeu un trou noir de masse stellaire résultant de l'effondrement d'un cœur d'étoile massive qui, par accréation des débris voisins, produit une brutale éjection relativiste, sans doute focalisée. Les émissions observées résultent alors de chocs induits tant au sein de l'éjection (émission prompte) que lorsque l'éjection rencontre le milieu environnant (émission rémanente). Aptes à tracer la formation stellaire dans l'Univers lointain, tout en permettant de sonder l'Univers à grand z , les sursauts gamma suscitent désormais l'intérêt d'une communauté qui s'étend bien au-delà de l'astrophysique des hautes énergies.

Autres faits marquants

Outre cette avancée décisive, il faut porter au crédit de l'astrophysique des hautes énergies d'avoir fourni l'une des preuves décisives qui attestent la présence d'un trou noir ultra massif au cœur de notre galaxie, à savoir les observations avec Chandra et XMM-Newton de sursauts d'émission X, brefs mais intenses, en provenance de la source X identifiée avec Sgr A*, la radiosource localisée au centre dynamique de la Galaxie. À noter également la découverte que l'émission gamma des noyaux actifs de galaxie de type blazars (dont les jets sont proches de la ligne de visée) s'étend bien au-delà du TeV.

Bilan

Au cours de ces dernières années, les résultats sont surtout venus des missions spatiales dans le domaine des rayons X des rayons gamma d'énergie inférieure à 20 GeV (BEPPOSAX, Chandra, Compton-GRO, GRANAT, HETE-2, ROSSI-XTE, XMM-Newton), tandis que s'affirmaient les techniques d'observation à partir du sol des rayons gamma d'énergie supérieure à 50 GeV (CANGAROO, CAT, CELESTE, HEGRA, WHIPPLE) en identifiant une dizaine de sources gamma actives bien au-delà du TeV. Toutes ces observations ont élargi notre connaissance des processus d'accrétion au voisinage des trous noirs où ils sont souvent associés à des éjections de plasma à des vitesses relativistes. Avec la découverte d'une soixantaine de noyaux actifs de galaxie de type blazars, l'astronomie gamma s'est définitivement ancrée dans le domaine extra-galactique.

S'agissant des moyens d'observation, les dernières années se caractérisent par la préparation d'une série de nouveaux observatoires spatiaux : INTEGRAL (Agence Spatiale Européenne ESA), lancé avec succès en octobre 2002, SWIFT (NASA) lancement prévu à la fin de 2003, AGILE (Agence Spatiale Italienne) en 2004 et enfin GLAST (NASA) en 2006. Ces nouvelles missions spatiales seront utilement complétées à plus haute énergie par de nouvelles expériences au sol : CANGAROO-III, HESS, MAGIC, VERITAS. Les dernières années ont été aussi riches en projets « non-photoniques », actuellement en cours de développement ou sur le point d'aboutir : c'est le cas des détecteurs de neutrinos cosmiques de très haute énergie (AMANDA, ANTARES), du projet d'observatoire Pierre Auger dévolu aux rayons cosmiques d'énergies extrêmes ($\geq 10^{19}$ eV) et enfin des interféromètres LIGO et VIRGO pour la détection d'ondes gravitationnelles.

Forces et Faiblesses de la Communauté

Au cours des dernières années, l'investissement des équipes françaises s'est fortement accru. Dans le domaine spatial, après le succès

du télescope SIGMA à bord du satellite russe GRANAT, les groupes français ont concentré leurs efforts sur deux observatoires de l'Agence Spatiale Européenne : XMM-Newton, lancé en décembre 1999 et INTEGRAL, lancé en octobre 2002. Le domaine gamma de haute énergie, avec le projet de satellite GLAST de la NASA, est aussi l'objet d'un engagement fort des équipes françaises. Dans le domaine en émergence de l'astronomie gamma au sol, le télescope à effet Tcherenkov atmosphérique CAT, installé sur le site de la centrale solaire Thémis dans les Pyrénées Orientales, a détecté la nébuleuse du Crabe, quatre blazars, et en a mesuré le spectre de 300 GeV à 20 TeV. Sur le même site, le détecteur CELESTE a le premier abordé la gamme d'énergie de 50 à 200 GeV restée inexplorée jusqu'à ces dernières années. Profitant de l'expérience acquise avec ces deux détecteurs construits et exploités par leurs seuls instituts, les équipes françaises dans ce domaine se sont investies dans le projet essentiellement franco-allemand HESS comportant quatre grands télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique installés en Namibie, en vue de l'étude du ciel gamma austral avec une sensibilité accrue. Une autre initiative française, le projet ANTARES de détecteur de neutrinos de très haute énergie, a pris une dimension européenne après sa phase de développement et est actuellement en construction en Méditerranée, au large de Toulon. Sa surface efficace de détection, ($\sim 0,1$ km²) sera comparable à celle de l'expérience AMANDA qui observe l'hémisphère opposé depuis le pôle sud. Dans l'étude des rayons cosmiques chargés, la France participe à deux projets internationaux : l'un spatial, l'expérience AMS sur la Station Spatiale Internationale, dans le domaine du GeV au TeV, l'accent étant mis sur l'identification des particules et particulièrement des antiprotons et des anti-noyaux ; l'autre au sol, l'observatoire Pierre Auger, en Argentine, destiné à accroître considérablement la statistique de rayons cosmiques d'énergie extrême. Enfin, c'est une collaboration franco-italienne qui achève actuellement en Italie la construction de l'interféromètre VIRGO pour la détection d'ondes gravitationnelles. Le développement rapide de ces activités expérimentales a été accompagné par d'importants efforts sur le plan théorique tant

pour la préparation des projets que pour l'analyse des nouvelles données, en particulier celles des observations multi-longueurs d'onde.

Le domaine a pris très vite une extension dépassant les frontières culturelles et administratives des communautés impliquées. C'est pourquoi il est apparu indispensable de mettre sur pied au début de 2000 un groupement de recherche sur les phénomènes cosmiques de haute énergie, le GdR PCHE, regroupant des astrophysiciens et des physiciens de trois départements et/ou instituts du CNRS (IN2P3, INSU, SPM) et de deux services du DAPNIA du CEA. Pour peu que les équipes scientifiques impliquées soient de taille à mener à bien les lourdes tâches de dépouillement, de traitement et d'interprétation des données, le retour sur investissement devrait atteindre un niveau des plus satisfaisants.

Grandes Questions et Propositions Thématiques d'Évolution

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 reste désormais à mettre cette théorie à l'épreuve dans les champs de gravité les plus intenses, par exemple en étudiant le rayonnement X et gamma que les phénomènes d'accrétion et d'éjection produisent à l'horizon des trous noirs et en détectant les ondes gravitationnelles suscitées par la coalescence d'objets compacts.

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, tout en observant d'éventuelles émissions corrélées de rayons gamma, de neutrinos de haute énergie et d'ondes gravitationnelles.

Pour répondre entre autres à ce type de questions, des projets ambitieux, déjà à l'étude, pourraient voir le jour au cours de la prochaine décennie, comme la mission XEUS, un projet de l'Agence Spatiale Européenne destiné à mener des observations à très haute sensibilité dans le domaine des rayons X afin, par exemple, de traquer les noyaux actifs de galaxie à grand z . Dans le même ordre d'idée, la mise en œuvre de moyens aptes à focaliser les rayons X durs et les rayons gamma de basse énergie offrirait la possibilité de mieux étudier les phénomènes d'accrétion et d'éjection suscités par les trous noirs, comme le propose le projet SIMBOL-X, à l'étude au CNES. Par le truchement de l'interférométrie X, des missions plus futuristes, comme le projet américain MAXIM, laissent entrevoir la possibilité d'arpenter l'horizon des trous noirs ultra massifs avec une résolution angulaire de l'ordre de la microseconde d'angle. L'évolution de la thématique passera également par l'accroissement des performances des observatoires gamma au sol, comme par exemple l'extension de HESS, et par les successeurs des premiers observatoires non-photoniques, avec au premier rang, les détecteurs de neutrinos de haute énergie de 1 km^3 , les seuls susceptibles de pratiquer une véritable astronomie des sources cosmiques, et l'interféromètre spatial LISA, un projet en coopération NASA / AGENCE SPATIALE EUROPEENNE, destiné à ouvrir le très riche domaine des ondes gravitationnelles de basse fréquence, là où peuvent être étudiées les coalescences de trous noirs ultra massifs au cœur des galaxies.

3 PHYSIQUE DES GALAXIES

La question centrale de la thématique « Galaxies » comporte 2 volets majeurs :

- comprendre les mécanismes de formation de ces systèmes ;

– comprendre et reconstruire leur évolution jusqu'à l'époque actuelle.

Ce double questionnement se décline de manière plus détaillée en l'étude de :

– l'histoire de la formation stellaire : comprendre la physique et l'évolution du taux de formation d'étoiles à toute époque ;

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

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

– l'interaction entre les galaxies et leurs noyaux actifs : comprendre l'alimentation des noyaux.

Faits Marquants

La découverte de courants géants de gaz et d'étoiles dans le voisinage de notre Galaxie, mais aussi dans celui de la galaxie d'Andromède, prouve que les galaxies continuent de se former aujourd'hui (à un rythme modeste toutefois) et que les traînées de marée pourraient bien être le constituant générique des halos stellaires galactiques.

La découverte de la relation entre la masse des bulbes des galaxies et celles des trous noirs supermassifs, attestent de l'universalité de la présence de trous noirs dans tous les noyaux de galaxies qui doivent traverser des phases d'activité intermittentes.

Bilan des 4 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-longueurs d'onde et la mise en place de grands relevés (DENIS, 2MASS, SDSS, etc.)

qui ont permis par exemple l'exploration des galaxies à grands redshifts (CFRS, HST, IRAM, SCUBA, etc.).

Un autre point saillant est l'extension de la modélisation et des simulations numériques.

Elles permettent maintenant d'aborder la dynamique et l'évolution séculaire des galaxies et l'évolution chimique détaillée ainsi que la synthèse des populations stellaires.

Associée aux progrès des simulations numériques, une étape majeure dans le domaine est l'élaboration et l'exploitation des modèles semi-analytiques. Ceux-ci sont capables d'expliquer un grand nombre de propriétés des galaxies et sont surtout devenus des outils puissants pour la définition des grands sondages multi-longueur d'onde et des instruments futurs.

Outre les faits marquants mentionnés plus haut, on peut encore citer :

- Dans le domaine observationnel :

– la mise en évidence des galaxies à sursauts d'étoiles enfouies dans la poussière, et la contribution de ces galaxies au fond diffus infra-rouge, avec ISO,

– la première détermination directe de l'âge de la Galaxie à partir de la mesure de l'abondance de l'Uranium (élément radioactif) dans une des plus vieilles étoiles de la Galaxie : $12,5 + 3$ Gans. Ce résultat a été obtenu par une équipe française à l'aide d'une instrumentation nouvelle (UVES) installée sur le VLT.

• Des sondages profonds de galaxies (CFRS, HST, etc. à participation française) ont mis en évidence l'évolution considérable dans l'activité stellaire des galaxies, et dans la morphologie des galaxies en général. Une nouvelle détermination du diagramme de Madau à partir d'observations millimétriques conduit à une SFR très élevée à $z > 2$.

Les progrès en spectroscopie 3D (participation française) ont permis de découvrir le champ de vitesses autour des noyaux actifs, ou des centres de galaxies avec trou noir quiescent, comme celui d'Andromède et la caractérisation du trou noir central de notre Galaxie.

Les progrès en haute résolution spatiale et spectrale ont permis la spectroscopie des étoiles individuelles dans les galaxies du groupe Groupe Local et la détermination de la morphologie des galaxies jusqu'à des redshifts très élevés.

La préparation des programmes des instruments VIRMOS, GIRAFFE (VLT)

Dans le domaine des AGN, il faut noter :

a) la découverte de la relation entre la masse des bulbes des galaxies et celles des trous noirs supermassifs, attestant de l'universalité de la présence de trous noirs dans tous les noyaux de galaxies qui doivent traverser des phases d'activité intermittentes. ;

b) la détection du rougissement gravitationnel de la raie du Fer révélant que le trou noir central serait un trou noir de Kerr.

Dans le domaine Théorie/Modélisation :

1. la « crise à petite échelle » pour la théorie de la formation des galaxies devient de plus en plus aiguë. Un consensus assez fort se dégagerait pour rejeter les profils pentus de densité de masse (Nfw : Navarro -Frenck -White) pour les galaxies spirales et les galaxies Lsb conduisant à des propositions différentes pour les propriétés de la matière noire même (e.g. matière noire en auto-interaction, etc.) ;

2. le collapse des premiers objets formés fait désormais l'objet de simulations numériques (en particulier hydrodynamiques) détaillées.

Forces et Faiblesses de la Communauté

Points Forts

La mise en place d'un Programme National est certainement une force pour cette communauté. Ce regroupement lui a permis d'accroître sa cohésion et lui permettra certainement 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 devra être exploité en accentuant les relations avec les Programmes concernés (PNC, PNPS, PCMI) qui devraient être « institutionnalisées » (colloques et ateliers communs sur des thèmes à définir au moins 1 fois tous les 4 ans).

Plusieurs autres facteurs positifs sont en émergence :

– la montée en puissance en France de la spectrographie 3D, outil privilégié pour l'étude des galaxies. La haute résolution spatiale et spectrale devient un **outil clé** pour la communauté ;

– l'arrivée à court et moyen termes de nouveaux instruments de l'UV à l'IR et sub-mm ;

– la montée en puissance et la « démocratisation » des moyens de calculs puissants centralisés (IDRIS : 3 machines dans les Top-500 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 l'effort en cours 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, l'orientation vers le concept d'Observatoire Virtuel.

Points Faibles

Comme pour toutes les autres disciplines, la difficulté d'obtenir un volant de post-docs apportant un soutien, soit à la phase de définition, soit à la phase d'exploitation des données des grands projets :

– affaiblissement relatif de la communauté française AGN par rapport à une communauté internationale dynamique ;

– difficulté de la communauté à se positionner de manière optimale sur les grands projets du futur, compte-tenu du spectre actuellement très large de projets instrumentaux nouveaux.

Grandes Questions et Évolution Thématique

Sur le plan observationnel, la moisson de données multi-longueur d'ondes, l'accès à la haute résolution spatiale, l'approfondissement de la connaissance de l'Univers local (en particulier l'étude de notre Galaxie) conjointement à l'extension vers des redshifts de plus en plus élevés (avec l'accès à l'IR et au submm) va se renforcer avec l'exploitation des sondages en cours ou à venir (DENIS, 2MASS, VLT/VIRMOS/NIRMOS/GIRAFFE, HST, GALEX, XMM, SIRTF, etc.) et à plus long terme avec l'arrivée de JWST, ALMA, VLT2, GAIA, NGCFH, SNAP, SKA, etc.

Il est prévisible que dans les années à venir le thème « Évolution des galaxies » sera fortement développé, en particulier parce qu'avec la détermination précise des paramètres cosmologiques, **la dégénérescence « modèle cosmologique/évolution »** sera levée permettant d'obtenir des conclusions définitives sur l'évolution des galaxies sans autre hypothèse sur le modèle d'Univers.

Les progrès les plus importants concerneront les galaxies du Groupe Local, maintenant résolues en étoiles comme notre Galaxie et la détection d'objets à des z de plus en plus élevés conduisant à une description de plus en plus complète de la nature des premières étoiles, de la variété des SFR, de l'évolution morphologique des galaxies, etc.

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 (entre autres !) définitivement levées en particulier pour la compréhension de la nature et du rôle des galaxies naines.

4 – PHYSIQUE-CHIMIE DU MILIEU INTERSTELLAIRE

Cette thématique est née il y a 30 ans avec la découverte des nuages moléculaires dans la Galaxie à travers l'observation de la transition de rotation $J=1-0$ de la molécule CO. Les découvertes se sont depuis succédées à un rythme soutenu et l'étude physico-chimique de la matière diluée et froide est devenue une thématique transverse aux disciplines de l'astrophysique de la Cosmologie à la Planétologie et aussi un lien interdisciplinaire fort de l'Astrophysique avec la Physique et la Chimie. La formation de molécules et poussières interstellaires dans le gaz primordial puis l'espace interstellaire jouent un rôle déterminant dans la structuration de l'Univers de la formation des premières étoiles à celle des disques proto-planétaires. Ce sont les poussières qui couplent la matière avec le rayonnement stellaire, les molécules et aussi les poussières dans les condensations proto-stellaires qui rayonnent l'énergie perdue par le gaz froid sur la gravité et les ions moléculaires et les grains chargés qui lient la matière neutre au champ magnétique. L'émission du gaz et des poussières interstellaires offre tout au long de cette évolution des diagnostics spectroscopiques uniques des conditions physiques et de la composition chimique de la matière. L'étude physico-chimique de la matière a aussi une dynamique propre animée par l'exploration de la chimie interstellaire : l'originalité des processus et des espèces, sa diversité et sa richesse encore largement inexplorées avec en perspective la recherche d'une possible contribution interstellaire à la chimie du vivant.

Faits Marquants

Mise en évidence spectroscopique avec le satellite ISO de l'évolution des poussières interstellaires, des enveloppes circumstellaires aux condensations proto-stellaires et disques proto-planétaires. Identification des principaux constituants des glaces interstellaires et

des premières étapes de l'évolution physico-chimique de la matière moléculaire condensée à la surface des grains. La comparaison entre données observationnelles et de laboratoires a été essentielle dans ces avancées.

Premières explorations avec les instruments de l'IRAM de la structure et la chimie du gaz dans les condensations proto-stellaires et les disques proto-planétaires. En particulier, mise en évidence d'un important fractionnement en deutérium interprété comme le résultat de la déplétion des éléments lourds sous forme de molécules condensées sur les grains.

Détection de l'émission infrarouge de poussières interstellaires et de raies d'émission de la molécule CO 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.

Bilan

Les développements récents de la thématique ont été stimulés par les succès d'ISO et de l'IRAM auxquels elle a grandement contribué.

Les données spectroscopiques fournies par ISO et aussi 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, leur lien éventuel avec les porteurs DIBS et leur rôle de catalyseur pour la chimie interstellaire en particulier pour la formation de H₂ 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. La découverte par ISO de silicates cristallins dans les enveloppes circumstellaires, les disques circumstellaires et la comète Hale-Bopp et leur absence dans le milieu interstellaire posent le problème de la transition entre matériaux cristallins et amorphes dans l'espace.

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, un pas essentiel dans l'exploration du rôle de la turbulence sur l'évolution de la matière interstellaire en particulier la régulation du taux de formation d'étoiles et l'impact des conditions hors équilibre (liées à la dissipation intermittente de l'énergie turbulente) sur la chimie interstellaire. L'existence de gaz moléculaire chaud dans le milieu diffus loin des régions de formation d'étoiles a été mise en évidence par des observations de H₂ à la fois en émission (ISO) et en absorption (FUSE). L'exploration de la chimie dans ce milieu a connu une avancée majeure avec la détection d'une vingtaine de molécules interstellaires par spectroscopie millimétrique en absorption en direction de radio-sources. L'étude du rôle du champ magnétique dans la structuration du milieu interstellaire et la formation des étoiles se développe avec un nombre grandissant d'observations donnant accès à son intensité et orientation dans les nuages interstellaires.

Une action pluridisciplinaire réunissant astrophysiciens, spectroscopistes, physiciens et chimistes est engagée pour la préparation scientifique de HERSCHEL et ALMA. Ce groupe joue un rôle moteur dans cette préparation à l'échelle européenne.

Forces et Faiblesses de la Communauté

Forces

L'avènement à proche et moyen terme de plusieurs grands instruments aux longueurs d'onde infrarouge/millimétrique, avec un gain en sensibilité et résolution angulaire de 10 à 100 ainsi que l'ouverture de la totalité du domaine sub-millimétrique à l'exploration spectroscopique avec HERSCHEL vont grandement élargir le domaine de recherche de la communauté PCMI. C'est une grande opportunité mais aussi un défi auquel nous devons nous préparer.

La thématique PCMI a un champ d'action très large et bénéficie d'une grande diversité d'échanges. Elle 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). Elle est à la fois fédératrice au sein de l'Astrophysique et avec la Physique et la Chimie.

Rôle structurant du Programme National : cette communauté est remarquablement soudée en dépit de sa grande diversité et dispersion institutionnelle. Son action est reconnue internationalement.

Faiblesses

Les équipes constituant la communauté PCMI sont petites et dispersées, aussi bien au sein des labos d'astrophysique que dans les labos de Physique et Chimie. Elles y représentent le plus souvent une thématique minoritaire. Elles ont de ce fait du mal à y imposer leurs priorités scientifiques, en particulier en termes de recrutements et d'équipement. La nature la plus souvent pluridisciplinaire de ces priorités est une difficulté supplémentaire.

Le financement d'un projet expérimental est un parcours à obstacles répétés au succès final incertain. PCMI ne peut apporter qu'une contribution très partielle au financement de grands projets (> 200 kEuro). L'absence de cadre institutionnel pour leur financement est un frein au développement de projets expérimentaux ambitieux.

La communauté PCMI est trop petite et dispersée dans ses actions pour faire face à la multiplication des observations dont l'interprétation s'appuiera sur la compréhension de la physique des milieux dilués et froids et les connaissances des propriétés physico-chimiques et spectroscopiques de la matière. Pour préserver la position de la France dans ce domaine et assurer le retour scientifique des grands instruments élaborés dans un contexte international, l'action fédératrice et

interdisciplinaire de cette communauté doit être soutenue au niveau national, en particulier par des affichages inter-disciplinaires.

Grandes Questions

L'étude de la matière inter et circumstellaire est liée à plusieurs des grandes questions présentes 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 dans chacune de ces étapes de l'évolution de l'Univers un rôle clé. La caractérisation observationnelle de l'état physique et chimique de la matière le long de cette évolution et l'identification des processus physico-chimiques qui y contribuent sont donc naturellement un axe central de cette thématique.

Les observations à haute résolution spatiale et spectrale montrent que le milieu interstellaire est structuré à toutes les échelles accessibles à l'observation aussi bien en densité qu'en vitesse. C'est un système hors-équilibre, turbulent, hétérogène à toutes les échelles et aucune échelle ne peut y être considérée comme isolée ou fermée. L'évolution de ce milieu et en particulier le fait qu'il forme des étoiles est le fruit d'une dynamique complexe résultant des nombreux couplages non-linéaires, locaux et non-locaux, entre le rayonnement, la chimie, la turbulence, la gravité et le champ magnétique. Le milieu interstellaire constitue un archétype des systèmes régis par des lois non-linéaires dont la complexité émerge par le biais d'un très grand nombre d'échelles (spatiales et temporelles) couplées entre elles. L'émergence de structures dans ce milieu et plus généralement dans les milieux dilués de l'Univers doit être abordée dans cette perspective. Le développement de cette approche de l'évolution de l'Univers est le deuxième axe de notre contribution inter-disciplinaire à l'astrophysique.

Propositions Thématiques d'Évolution

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 ce qui devrait l'amener à jouer un rôle fédérateur fort au sein de l'Astrophysique mais aussi avec la Physique et la Chimie.

L'évolution physico-chimique de la matière lors des phases proto-stellaires et dans les disques proto-planétaires est un sujet phare qui va grandement se développer avec l'objectif de faire le lien avec la matière primitive dans le système solaire. Un enjeu majeur de ce sujet est la recherche de molécules pré-biotiques hors du système solaire. Le gain en sensibilité et résolution angulaire permet aussi d'observer plus loin.

L'observation de la matière interstellaire va s'étendre aux galaxies dans toute leur diversité et contribuer de manière essentielle à l'étude de l'évolution des galaxies en particulier les phases d'intense formation stellaire. Dans l'infrarouge lointain un projet de grand télescope (8m) refroidi par cryogénie (SAFIR) s'élabore. Le gain en sensibilité devrait pouvoir permettre l'étude de la formation des premières étoiles et des galaxies à travers l'observation des raies de rotation de H_2 . C'est aussi un des objectifs d'ALMA et du JWST.

ALMA, HERSCHEL et PLANCK permettront de tracer 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. 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 polarisa-

tion 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).

L'ouverture d'un nouveau domaine de longueurs d'onde par HERSCHEL et aussi ALMA insuffleront une nouvelle dynamique dans la recherche de nouvelles molécules. On attend un apport original à la chimie interstellaire des relevés spectraux de sources de référence représentatives des diverses étapes de l'évolution de la matière. Par exemple, l'analyse spectroscopique du gaz là où les glaces se subliment est un moyen beaucoup plus sensible d'étudier la chimie à la surface des grains que la spectroscopie IR en absorption. La spectroscopie des poussières par SIRTIF puis HERSCHEL servira enfin à caractériser les poussières interstellaires et leur cycle de vie.

Une action concertée des programmes nationaux est nécessaire pour préparer les astrophysiciens français à tirer le meilleur parti des futurs instruments dans un contexte de forte compétition internationale. En particulier l'interprétation de données spectroscopiques sur la poussière et le gaz interstellaire ne peut plus rester le domaine de spécialistes. Une réflexion est engagée dans le cadre de PCMI pour rendre disponible à une large communauté les bases de données de physique et outils de modélisation nécessaires à l'interprétation de ces observations et de les intégrer dans les observatoires virtuels.

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) qui serviront à l'interprétation des observations ;

2. avec des physiciens pour comprendre l'évolution dynamique de la matière résultant des couplages entre processus et échelles

spatiales et temporelles. L'interprétation des données sur la structure du milieu interstellaire devra par exemple s'appuyer sur une compréhension des propriétés fondamentales de la turbulence MHD.

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 futurs observatoires au-delà de PLANCK, HERSCHEL et ALMA. Les perspectives de progrès instrumentaux sont riches. Le développement de l'hétérodyne qui reste unique 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. Hors des bandes atmosphériques, l'observatoire en avion SOFIA va constituer le banc d'essai des nouveaux développements instrumentaux. La participation d'instrumentalistes français à la construction d'instruments pour cet observatoire doit être encouragée.

5 – PHYSIQUE STELLAIRE

Les recherches en cours mettent l'accent sur quelques axes thématiques forts proposés par le Programme National de Physique Stellaire. Elles englobent des recherches en cours sur :

- la formation des étoiles (et des objets sub-stellaires) et leur évolution ;
- les processus de transport ;
- les mécanismes de perte de masse ;
- les champs magnétiques (détection et génération) ;
- la détermination précise des paramètres fondamentaux.

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 en ETL et hors ETL.

Faits Marquants

La compréhension de la structure interne du Soleil a été obtenue essentiellement par l'héliosismologie avec notamment : l'évidence de la masse et de la transformation des neutrinos, la détermination de la température et de la densité (au % près), la mesure de la rotation différentielle interne et la mise en évidence d'une couche limite dite tachocline, qui joue sans doute un rôle essentiel dans la formation du champ magnétique.

La généralisation de l'approche sismique aux autres étoiles que le Soleil est rendue possible par les nouveaux instruments qui vont être mis en service (HARPS, COROT, Eddington). Déjà des oscillations ont été détectées dans quelques étoiles brillantes telles Procyon et Alpha Cen A. Dans le cas de Alpha Cen A, dont la masse est connue (système double), l'analyse des oscillations conduit par confrontation aux modèles à une estimation de l'âge de l'étoile.

La première détection de l'uranium dans une étoile du Halo galactique : jusqu'à présent, la datation d'étoiles extrêmement pauvres en métaux avait pu être faite en utilisant l'isotope radioactif du Thorium (^{232}Th), qui a une 1/2 vie de 14,5 Gans. L'intérêt de passer à l'Uranium (^{238}U) est que sa 1/2 vie est de 4,5 Gans, ce qui en fait un indicateur d'âge bien plus sensible pour des temps caractéristiques de l'ordre d'un temps de Hubble. Cette méthode cosmochronologique basée sur l'uranium et le thorium donne une limite inférieure à l'âge de la Galaxie et de l'Univers, par une méthode indépendante de celles qui se basent sur les modèles d'évolution stellaire (ex : âge des amas globulaires). L'étoile observée donne un âge de 12,5 Gans.

Bilan

Les cinq dernières années ont été marquées par :

- la création du Programme National de Physique Stellaire ;

- la mise en service d'instruments de nouvelle génération du VLT en spectroscopie à haute résolution et en Haute Résolution Angulaire ;

- l'exploitation massive des données provenant des observatoires au sol (IRAM, CFHT) et les observatoires spatiaux (HST, ISO, XMM, Chandra) ;

- la mise en route du programme européen de photométrie stellaire dans l'espace (COROT puis Eddington) ;

- le développement d'expériences de laboratoire permettant d'accéder aux conditions physiques des intérieurs stellaires (Laser Mégajoule).

Le développement de nouveaux modèles astrophysiques est stimulé par l'accroissement de l'ensemble des contraintes observationnelles. Plusieurs percées ont ainsi été réalisées et laissent présager de futurs résultats marquants dans un proche avenir. Citons par exemple :

L'observation et la caractérisation de proto-étoiles, de leur distribution de masse : Il s'agit principalement de résultats obtenus à l'IRAM. Cette détermination de la structure à petite échelle des condensations moléculaires pré-stellaires apporte une contribution significative à la compréhension du processus de formation des étoiles.

La mise en évidence d'une importante formation stellaire il y a 8 à 9 milliards d'années grâce aux suivis du Canada France Redshift Survey combinés aux observations d'ISO.

L'observation d'environnements circum-stellaires : les environnements des objets jeunes (disques protoplanétaires) mais aussi ceux des étoiles évoluées de diverses familles (Variables à Longue Période, Supergéantes, Be, vents

stellaires associés au phénomène de perte de masse responsable du recyclage de la matière dans les galaxies) ont fortement bénéficié de l'essor des méthodes d'observation du domaine frontière de la haute résolution angulaire (HST, Optique Adaptative VLT-NAOS, premiers résultats d'interférométrie longue base, perspective à très court terme de l'utilisation régulière du VLTI) et aussi des observations radio (NRT et IRAM). Ces nombreux résultats vont permettre de comprendre par exemple la chronologie d'évolution des disques avec celle de la formation des planètes, ou encore de comprendre, à l'autre extrémité de l'évolution stellaire par l'observation directe à l'échelle du rayon stellaire, la façon dont sont générés les vents.

L'analyse du magnétisme stellaire : ce thème est en pleine émergence à travers l'exploitation du spectro-polarimètre MUSICOS au TBL depuis quelques années, qui a permis la découverte de champs magnétiques dans les étoiles chaudes. La mise en service imminente du spectropolarimètre ESPADONS permettra le développement rapide de ce domaine.

L'étude de l'état dynamique des intérieurs stellaires, qui nourrira les travaux théoriques sur des processus physiques fondamentaux tels que la turbulence, la diffusion des éléments chimiques, le transport de moment angulaire.

L'étude de spectre infrarouge de naines blanches. Le spectre infrarouge d'une naine blanche extrêmement froide (environ 3 500 K) du Halo a pu être observé. Ce spectre est consistant avec les modèles qui prédisaient un spectre bleui par des effets d'opacité. Ce type de résultat a des impacts sur la contribution des naines blanches à la matière noire du Halo ainsi que sur la possibilité de contraindre l'âge de la Galaxie.

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 a été bénéfique à divers niveaux : en proposant des animations scientifiques ; en favorisant un recentrage des efforts, en générant une cohérence et une visibilité qui font que le PNPS constitue un interlocuteur vis-à-vis de nos instances et des autres domaines de l'astrophysique et de la physique ; en participant au pilotage de la recherche par la sélection et le soutien de projets. Ce travail d'organisation auquel contribue le PNPS est certainement une force de notre communauté.

Le vieillissement de la population pose la question de la mise sur pied de jeunes équipes performantes formées aux grands instruments, aux traitements massifs de données, aux simulations lourdes ou à l'instrumentation de pointe.

Grandes Questions

Dans le contexte international, notre communauté semble tenir une place honorable au niveau des avancées théoriques, observationnelles et instrumentales. Les acquis dans nos connaissances et les perspectives (d'observations et de modélisation) pour les prochaines années permettent de prédire par exemple : une percée dans le domaine de l'astérosismologie ; ainsi qu'une percée dans la compréhension des environnements circumstellaires (étoiles jeunes mais aussi étoiles évoluées). Par l'observation de ces derniers, ce sont les théories de formation de planètes qui pourront être testées/éprouvées par la mesure des conditions physiques rencontrées autour de différents types d'étoiles pris à divers stades de leur évolution. Ce sont aussi la compréhension de la formation stellaire et l'étude de la naissance des vents qui progresseront significativement.

À un horizon à trois ou quatre ans, les grandes questions, retenues par la communauté stellaire, pour lesquelles une avancée significative est attendue sont : processus de transports dans les intérieurs stellaires ; formation stellaire et phases initiales ; conditions physiques de l'environnement circumstellaire ; évolution des enveloppes, formation des disques et des planètes.

Proposition Thématique d'Évolution

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 surveys.

Grâce aux instruments d'observation auxquels a accès notre communauté et à ceux progressivement mis en service, tels que, VLT, COROT, HERSCHEL, ALAMA, JWST, la compréhension des étoiles depuis leur structure interne jusqu'aux régions les plus étendues, en connexion avec le milieu interstellaire, va connaître de nouvelles avancées significatives.

Cet ensemble de disciplines nécessite la continuité d'un soutien affirmé afin de conserver un rôle mondial de premier plan. Il s'agit en particulier de poursuivre le développement de l'interféromètre du VLT jusqu'à atteindre toutes ses performances prédites d'imagerie dans diverses fenêtres spectrales, d'assurer la filière COROT-Eddington et de profiter d'une mission telle que GAIA pour une étude sans précédent des paramètres fondamentaux et de la dynamique de notre Galaxie.

Afin de renforcer le retour scientifique de nombreux instruments d'observation mais aussi celui d'expériences de laboratoire (type Laser Mégajoule), un thème transverse est sans doute à renforcer : les simulations numériques multi-dimensionnelles.

Par ailleurs, une réflexion sur l'ouverture de grands chantiers « futuristes » mérite aussi d'être abordée. Ne faut-il pas se demander par exemple si l'hypothèse de la création d'un observatoire en Antarctique, site aux qualités présumées exceptionnelles pour de nombreuses disciplines d'observation, ne doit pas conduire notre communauté à mener une étude approfondie ?

6 – PLANÉTOLOGIE

On peut identifier dans la planétologie d'aujourd'hui deux grands thèmes fédérateurs :

- la formation des systèmes planétaires, avec le système solaire comme objet de référence ;

- l'étude comparative des processus planétaires (structure et évolution), avec comme objets de référence Mars et Titan.

À ces deux thèmes s'ajoutent un troisième thème transversal qui concerne les conditions d'émergence de la matière vivante dans les environnements planétaires primitifs, la Terre primitive et Mars étant pris comme référence.

Cette classification reprend dans ses grandes lignes celle présentée lors du colloque d'Arcachon, et semble plus que jamais d'actualité. Le premier thème est en pleine émergence avec d'une part les découvertes de plus en plus nombreuses d'exoplanètes géantes (il devrait connaître un essor encore plus grand, avec la détection attendue d'« exoterras », techniquement possible dans les années qui viennent avec la mission COROT), et d'autre part l'exploration spatiale du système solaire extérieur avec les missions Cassini et Rosetta. Le second thème est fortement ancré sur le programme d'exploration spatiale de Mars, mais aussi sur l'exploration de Titan (avec Cassini-Huygens), de Mercure (avec BepiColombo) et de Vénus (avec Venus Express). Quant au troisième thème transversal concernant les conditions physico-chimiques de l'émergence de la vie, il s'est renforcé et structuré depuis le colloque d'Arcachon avec la mise en place du GdR Exobiologie et l'insertion de ce thème spécifique comme l'un des trois grands axes du PNP.

Faits marquants

Détection d'exoplanètes géantes autour d'étoiles proches de la séquence principale

Plus de cent objets de ce type ont été découverts depuis les six dernières années. Fait

surprenant, la plupart des exoplanètes, bien que très massives (au moins la moitié de la masse de Jupiter) sont situées à proximité immédiate de leur étoile (0,05 UA). Ces systèmes planétaires sont donc très différents de notre système solaire, et leur mécanisme de formation reste à élucider. La prochaine grande avancée de ce domaine de recherche sera la recherche d'exoplanètes de type terrestre qui présente un intérêt majeur pour l'exobiologie. Celle-ci est inaccessible depuis la Terre, mais sera l'enjeu de la mission spatiale française COROT dont le lancement est prévu pour 2005.

Il convient d'associer à ces résultats marquants la découverte, l'observation et la modélisation d'objets substellaires de type naines brunes. Il s'agit d'un nouveau domaine de recherche qui explose depuis quelques années et dans lequel la communauté française est en position de force.

Mise en évidence de la glace d'eau sous les calottes polaires de Mars, et indices de la présence d'un océan d'eau liquide au début de l'histoire de la planète

La détection de la glace d'eau sous les pôles de Mars, obtenue par le spectromètre à rayons gamma de la mission Mars Odyssey, avec une forte participation française, confirme que l'eau, présente en abondance au début de l'histoire de la planète, s'est trouvée ensuite piégée en sous-sol. Ce résultat confirme aussi les mesures obtenues précédemment par le radar altimètre MOLA de la sonde Mars Global Surveyor (MGS), qui suggèrent fortement qu'un océan d'eau liquide a recouvert les plaines basses du nord au début de l'histoire de Mars. Parallèlement, la découverte (qui implique également une équipe française), par le magnétomètre de MGS, d'un champ magnétique crustal rémanent, indique que la planète a possédé au début de son histoire un champ magnétique intrinsèque qui s'est par la suite éteint. Tous ces indices tendent à montrer que Mars a connu à ses débuts une atmosphère plus dense et plus chaude qu'aujourd'hui, qui a permis à l'eau d'exister en surface sous forme liquide. Là aussi,

les implications de ce résultats pour l'exobiologie pourraient être considérables.

Dynamique du système solaire

Les progrès réalisés dans le domaine de la simulation numérique nous ont permis d'améliorer sensiblement la modélisation de l'évolution dynamique des petits corps du système solaire, notamment celle des embryons des planètes telluriques et celle des objets géocroiseurs (Near-Earth Objects). L'étude de cette dernière classe d'objets est appelée à se développer dans le futur dans le cadre de la mise en place de programmes internationaux de surveillance dédiés à la prévention des risques naturels.

Bilan

Les quatre dernières années ont été marquées par l'exploitation des missions spatiales Galileo et Mars Global Surveyor de la NASA, et du satellite Infrared Space Observatory de l'ESA. La mission Cassini-Huygens, menée conjointement par l'ESA et la NASA, a été lancée avec succès en octobre 1997 et a fourni ses premiers résultats lors du survol de Jupiter. La participation de la communauté française a été particulièrement importante dans la fourniture de l'instrumentation de Cassini-Huygens ainsi que dans l'exploitation d'ISO. En ce qui concerne les observations depuis le sol, il faut mentionner, outre la détection des exoplanètes, la découverte de plusieurs centaines d'objets trans-neptuniens dans la ceinture de Kuiper, à plus de 30 UA du Soleil.

La perspective ouverte par le CNES d'un ambitieux programme d'exploration spatiale de Mars a mobilisé la communauté des astronomes, des géophysiciens et des géochimistes. Les efforts ont porté en particulier sur la préparation à l'étude des échantillons martiens, et sur la préparation de la mission Netlander, principalement dédiée à la sismologie de Mars. En dépit des échecs des missions spatiales martiennes dans les années passées et des inconstances politiques qui remettent aujourd'hui en question le programme Mars

Premier, l'exploration de Mars reste la grande priorité des planétologues. La première étape en sera la mission Mars Express de l'ESA, dont le lancement a été réalisé en juin 2003.

Parmi les points forts des quatre années passées on peut mentionner, en plus des résultats mentionnés ci-dessus :

- étude des exoplanètes géantes : modélisation de la structure interne et de l'atmosphère, influence de l'irradiation stellaire, simulation numérique de la dynamique ;

- simulation numérique du disque proto-planétaire, de la dynamique des planétésimaux, de la formation des planètes et de l'évolution des astéroïdes ;

- étude du système solaire primitif par étude des rapports élémentaires et isotopiques dans les objets primitifs (planètes géantes, comètes) et les météorites ;

- amélioration de nos connaissances en physique cométaire, notamment après les apparitions de Hyakutake (1996) et de Hale-Bopp (1997) : observations de nouvelles molécules-mères ; développement de modèles de simulation des émissions de gaz et de grains cométaires, dans la perspective de l'exploration de la comète Churyumov-Gerasimenko par la mission Rosetta ;

- contraintes sur l'origine et la physico-chimie de l'atmosphère des planètes géantes (Galileo, ISO, observations sol) : mesures de rapports élémentaires et isotopiques (D/H, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$) ; détection d'espèces stratosphériques (hydrocarbures), mise en évidence d'une source d'oxygène externe ;

- modélisation de l'évolution climatique de l'atmosphère martienne (circulation, aéronomie, photochimie) ;

- étude de la magnétosphère et des aurores joviennes avec Galileo et Cassini.

La communauté insiste sur l'importance de la mise en place d'une base de données planétaires (mise en réseau et archivage des données acquises et à venir). Une réflexion est en cours dans le cadre du CNES, avec la participation du PNP.

Forces et Faiblesses de la Communauté

Forces

Il faut noter l'excellente structuration de la communauté autour du PNP, ainsi que du groupe de travail Système solaire du CNES. Il existe des interactions solides avec le PNPS et PCMI (formation des disques protoplanétaires et des systèmes planétaires), ainsi que de fortes collaborations Astronomie/Sciences de la Terre/Chimie/Biologie qui vont s'élargissant, notamment dans le cadre de l'exploration des exoplanètes et dans celui du programme Mars.

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, etc.

Mentionnons enfin la forte implication de la communauté française dans les programmes spatiaux Ulysse, Cassini, Mars Express, Rosetta, Venus Express, ISO ainsi que dans les programmes d'observation sol (HRA, haute résolution spectrale en IR et millimétrique).

Faiblesses

Les personnels sont insuffisants dans certains domaines, notamment un problème pourra apparaître à partir de 2004 avec l'exploitation simultanée de Cassini, de Mars Express, et ultérieurement avec l'exploitation de Venus Express. Les forces seront-elles présentes à l'horizon 2012 pour assurer l'exploitation scientifique de Rosetta et Bepi-Colombo ?

Grandes Questions

Elles sont connectées aux faits marquants mentionnées ci-dessus :

– pourquoi les exoplanètes géantes sont-elles différentes des planètes géantes du système solaire ? Quel est le pourcentage d'étoiles de types solaire dotées d' « exoterras » ?

Ces exoterras sont-elles susceptibles d'abriter la vie et, si oui, comment la détecter ? ;

– perspectives : COROT, Eddington, GAIA, DARWIN ;

– quelle est l'histoire des composants volatils de Mars ? Si un océan liquide a existé en surface au début de l'histoire de la planète, la vie a-t-elle pu y apparaître ? si oui, peut-on espérer détecter des traces de vie fossile ? ;

– perspectives : Mars Express, Mars Premier, Mars Sample Return.

Proposition Thématique d'Évolution

L'évolution des quatre dernières années incite la communauté à confirmer les deux thèmes principaux mentionnés ci-dessus (Formation des systèmes planétaires, Étude étude comparative des processus planétaires) avec un renforcement du thème transverse (conditions d'émergence de la vie) lié au développement de l'exobiologie. D'autres axes pluridisciplinaires sont également à soutenir. Citons en particulier, avec nos collègues des Sciences de la Terre, l'étude des surfaces planétaires et de l'échange avec les atmosphères, et les études liées à la gravimétrie, la géophysique et la tectonique ; avec nos collègues astronomes, une interface particulièrement importante concerne la formation stellaire et la formation des disques protoplanétaires.

7 RELATIONS SOLEIL-TERRE (ÉTOILE SOLEIL, MAGNÉTOSPHÈRE ET IONOSPHERE TERRESTRES, LEUR COUPLAGE)

La thématique recouvre deux domaines complémentaires, l'étude du Soleil d'une part et l'étude de l'environnement ionisé de la Terre

d'autre part. Les outils théoriques d'étude sont le plus souvent les mêmes car il s'agit de plasmas presque toujours complètement ionisés sauf dans la photosphère solaire. Cependant les techniques instrumentales sont, au moins à l'heure actuelle, très différentes. Le lancement de sondes spatiales dans le vent solaire, le lancement de satellites en orbites lointaines pour étudier l'interface vent solaire/magnétosphère, et enfin la perspective de faire des mesures *in situ* dans la couronne solaire, ont amené à élargir le champ des recherches. L'étude des relations Soleil-Terre en tant que système avec des éléments en interaction est d'un intérêt croissant. Ce système s'étend à l'ensemble de l'héliosphère et à son interaction avec le milieu interstellaire. Cette approche système vise aussi à développer la météorologie spatiale, avec ses diverses facettes :

- (i) connaissance du système (« expertise ») ;
- (ii) la modélisation empirique, par exemple *via* des indices ;
- (iii) les tests de ces indicateurs, et en bout de chaîne ;
- (iv) la prévision.

Les trois premiers volets ne peuvent être conduits que par des scientifiques ; le quatrième relève de services opérationnels.

L'étude du système Soleil-Terre vise donc d'abord un « objet » qui a l'avantage d'être proche et donc de permettre l'étude approfondie de mécanismes physiques, de comprendre les phénomènes observés et leurs évolutions spatio-temporelles. Dans cette approche pluridisciplinaire, la physique ainsi développée dans ces laboratoires naturels permet de progresser dans d'autres domaines (génération du champ magnétique solaire et reconnexion magnétique). De même l'échappement du vent solaire et celui des ions ionosphériques présentent des analogies importantes, qui devraient aider à mieux comprendre comment se forment les vents stellaires. L'ionosphère et la magnétosphère jouent un rôle particulier dans les mécanismes de perte d'espèces chimiques vers le milieu interplanétaire, et participent à ce titre à l'évo-

lution chimique de notre atmosphère. Ces mécanismes d'échappement jouent également un rôle important dans l'évolution chimique des atmosphères, celle de la Terre, et peut-être celle de Mars. Enfin la météo spatiale, dont l'importance socio-économique va croissant, est en plein développement, dû à la prise de conscience de risques potentiels et donc d'un besoin de modélisation et de prévision.

Faits Marquants

Localisation très basse altitude de la source de vent solaire rapide et anisotropies de température des ions (SOHO) : un mécanisme de chauffage par résonance cyclotron lui serait associé.

Filamentation des ondes d'Alfvén derrière les chocs quasi-perpendiculaires dans la magnétogaine terrestre, une observation multi-points obtenue avec CLUSTER : les petites structures de courant apparues pourraient jouer un rôle dans la thermalisation aux petites échelles.

Détection précoce des Éjections de Masse Coronale (Cme) par imagerie Euv (Eit/SOHO) et mesure spectroscopique (UVCS/SOHO) de la température (basse) de la matière.

Bilan

Parmi les découvertes majeures récentes de la physique solaire, on notera en outre :

Le problème récurrent du déficit de détection des **neutrinos solaires**, d'importance cosmologique, est enfin résolu, grâce l'effort conjoint de la communauté d'héliosismologie internationale, notamment française, et de celle de la physique des particules. Un remarquable accord entre le chiffre émanant des deux communautés, publié séparément la même année, a permis de prouver que les neutrinos ont une masse et de confirmer la qualité de ces expériences très difficiles (côté astrophysique et côté physique des particules).

L'importance de la structuration par le champ magnétique de l'atmosphère solaire et son extension dans l'héliosphère. C'est au niveau des éléments magnétiques hétérogènes et de leurs interfaces que se jouent les interactions entre la dynamique du gaz, le rayonnement et le champ magnétique ainsi que les échanges de masse et d'énergie.

La découverte du « deuxième spectre solaire », spectre de polarisation linéaire observé au bord, complètement différent du spectre en intensité, dont l'interprétation ouvre un terrain quasiment vierge pour les diagnostics spectropolarimétriques.

Accès aux couches profondes : grâce à la sismologie locale des modes p (SOHO et réseaux sol d'héliosismologie), les mouvements de matière convective sont mesurés en fonction de la profondeur, de la latitude et de l'activité magnétique et ensuite corrélés aux champs magnétiques de surface.

Notons par altitude croissante : la non-validation du concept de dynamo locale, une restructuration permanente du champ magnétique (à l'échelle de quelques dizaines d'heures) et la présence de processus de reconnexion diverses échelles.

La compréhension des boucles coronales avec SOHO, YOHKOH et TRACE.

La mise en service de RHESSI (observatoire gamma) pour l'étude des éruptions dans le contexte d'observations multi-longueurs d'onde avec SOHO, TRACE et le sol (THEMIS).

L'extension du vent solaire rapide vers les basses latitudes quelques unités astronomiques (Ulysses) confirme l'importance de ce vent qui est peut-être le vent dominant.

Ondes de surface la magnétopause et mouvement d'ensemble du choc en amont de la Terre (CLUSTER) : instabilité de cisaillement de type Kelvin-Helmoltz.

Des résultats spectaculaires de nature « météorologie spatiale » ont été obtenus avec deux techniques de natures totalement différentes (SWAN et MDI sur SOHO) sur l'activité magnétique de la face cachée du Soleil. Les

deux techniques ont un pouvoir prédictif du magnétisme solaire l'échelle de 14 jours.

Forces et Faiblesses de la Communauté

Forces

L'exploitation des grands instruments mobilise une bonne partie de la communauté. Grâce la spectropolarimétrie multi-longueur d'onde, THEMIS permet une modélisation multi-échelle du champ magnétique.

La mise en place de bases de données évoluées (BASS2000, CDPP, MEDOC qui est en outre un centre d'opérations) offre des outils d'accès et de traitement pérennes. La communauté est très impliquée dans les projets d'Observatoire Virtuel. Le programme européen EGSO (European Grid of Solar Observations) en est une préfiguration.

Nombre de projets nouveaux sol et espace sont proposés dans les cadres CNES, ESA et NASA. La synergie observations-théorie est forte. L'approche multi-longueurs d'onde et 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 deux communautés s'est faite assez vite, notamment autour de processus physiques d'intérêt commun et aujourd'hui autour de la « météorologie spatiale ».

L'aspect pluridisciplinaire de la thématique des relations Soleil-Terre, où le soleil Soleil joue le rôle d'objet « prototype » ont conduit à développer de nombreux liens et collaborations :

- les physiciens stellaires, avec la connexion solaire/stellaire, et le magnétisme et la formation des vents stellaires (*Voir* colloque PNPS-PNST de septembre 2002) ;

– les planétologues, pour l'étude comparative des objets du système solaire et de leur interaction avec le vent solaire ;

– les physiciens des plasmas, pour les aspects théoriques et la physique atomique pour la mise en œuvre de diagnostics performants via la spectroscopie et la spectropolarimétrie (notamment avec THEMIS) ;

– les centres de prévision de l'activité solaire (CLS par exemple) ;

– on notera aussi que les physiciens des sources X non solaires développent aujourd'hui des diagnostics spectroscopiques X basés sur ceux développés pour la physique solaire dans les décennies passées.

Faiblesses

La communauté solaire est vieillissante. Des profils (tels ceux d'instrumentaliste) risquent de disparaître sans relève.

Les lenteurs dans la montée en puissance de THEMIS peuvent décourager certains jeunes chercheurs intéressés par la spectro-imagerie polarimétrique à haute résolution spatiale.

Grandes Questions et Propositions Thématiques d'Évolution

Le champ magnétique

Un ingrédient clé pour la plupart des phénomènes solaires : chauffage de la couronne, accélération du vent, éruptions, CME, variations de luminosité, etc.

Accès au magnétisme interne (formation et émergence de tubes de flux magnétique) grâce à la sismologie locale. Missions : Solar Dynamic Observatory (SDO) et Solar Orbiter (SO) ;

Comprendre la dynamo solaire interne, la relier aux phénomènes de surface, et commencer à bâtir une histoire magnétique de notre étoile : ceci relève du PNST et de l'interaction Soleil-Terre avec participation future aux programmes spatiaux PICARD, ILWS et GOLF NG ;

Accès au magnétisme **externe** (rôle dans le déclenchement des CME) grâce à des cartes de champ à haute résolution. Mesure du champ magnétique dans la couronne. Éjections de masse coronale. Pleine exploitation de THEMIS (avec optique adaptative), ATST et FASR. Missions spatiales : STEREO, LYOT, SDO, Sonde Solaire ;

Études comparatives entre magnétisme solaire et stellaire. Collaboration avec le PNPS et les missions spatiales d'astérosismologie : utilisation d'ESPADONS. Comprendre l'interaction convection-rotation-champ magnétique par des codes 2-3D en prenant le Soleil comme référence pour progresser sur la compréhension des phases plus dynamiques de l'évolution stellaire.

Chauffage des ions

Comment les ions sont-ils chauffés dans la couronne solaire et dans les ionosphères planétaires ? Il est important à la fois d'obtenir des informations (statistiques) sur les processus micro-échelles et de combiner des mesures remote sensing/*in situ*, (telles sur la Sonde Solaire et SO). Autres missions : au sol : ATST et FASR ; spatiales : SDO, LYOT et ACCION (ionosphérique).

Reconnexion Magnétique

Quel est le mécanisme physique de la reconnexion magnétique en milieu collisionnel et non-collisionnel ? Quelles sont ses relations avec la turbulence ? Quelles sont les échelles réelles ?

Pour répondre à ces questions, il est impératif d'explorer la queue magnétique et d'effectuer une analyse multi-échelle dans la magnétosphère. Il est également important de pouvoir effectuer des mesures *in situ* dans la couronne solaire.

Missions au sol : FASR et LOFAR. Missions spatiales : MMS, THEMIS, HERACLES (constellation de micro-satellites permettant de traiter plusieurs échelles), sonde solaire.

Transport

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 ?

Missions « sol » : exploiter Super-DARN.
Missions spatiales : MMS, THEMIS, HERACLES, Bepi-Colombo.

Accélération de Particules

Comment sont accélérées les particules dans des milieux aussi divers que la couronne, le vent, les éruptions solaires et les magnétosphères ? Les progrès passent par une amélioration des résolutions spatiale et temporelle en physique solaire et des mesures multi-satellitaires pour les magnétosphères.

Missions « sol » : FASR et LOFAR. Missions spatiales : MIRAGES, LYOT, Sonde solaire, FLOREAL (multi-satellites auroraux), Bepi-Colombo.

Météorologie de l'Espace

Dans le domaine de l'héliosphère et de la « météorologie de l'espace », l'enjeu des dix ans à venir sera d'appréhender et structurer l'ensemble des informations disponibles pour proposer une modélisation globale de l'ensemble de la chaîne qui s'étend de la surface du Soleil à l'atmosphère des planètes. Du côté théorique, il y a là un grand défi pour la physique des plasmas et la physique atomique : complexité du système, interaction entre échelles, physique non-linéaire, etc.

Au « sol » : exploiter Super-DARN.
Missions spatiales : LYOT, SDO, STORMS, RBM, UML1.

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. Dans tous les cas 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.

Faits marquants

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.

Systemes 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^{er} janvier 1998, le système est réalisé à partir d'un ensemble de radio-sources observées par l'Interférométrie à très longue base (VLBI) pendant près de 20 ans pour un ensemble de 2,2 millions d'observations. 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.

L'adoption d'un système de référence céleste cinématique s'est poursuivie en 2000 avec des conséquences logiques pour relier les systèmes céleste et terrestre. L'UAI a

adopté lors de l'assemblée de Manchester un ensemble de résolutions, dont l'élément central est le choix d'une origine non-tournante céleste (proposée et soutenue depuis près de 20 ans par des chercheurs français).

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. Bien entendu le modèle doit prendre en compte les mouvements de surface et de déformation, ainsi que de tous les déplacements de masse qui influent sur les mouvements des satellites ou sur la rotation globale de la Terre. 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'astrogéodésie 3D que sont le VLBI, LLR (Laser Lune), SLR (laser sur satellites), GPS et DORIS (positionnement doppler par satellites).

L'an 2000 a vu l'achèvement du repère ITRF 2000 qui deviendra la version officielle de l'ITRF après la version ITRF97. Il est le résultat des solutions de systèmes de référence terrestre basés sur les solutions SLR, GPS, VLBI, DORIS et LLR. L'origine ne peut être obtenue que par des méthodes dynamiques impliquant les observations laser des satellites de géodynamique comme les LAGEOS, alors que l'orientation implique 54 sites de référence.

Références Temporelles

S'il n'y a pas eu de révolution conceptuelle dans ce domaine, et pas de changement majeur sur la réalisation des références de temps (TAF/TAI), les années 2000 laisseront leur marque avec la mise en fonctionnement

régulier des horloges à fontaine à atomes froids (Cs et Rb) avec des exactitudes de 10^{-15} et leur comparaison conduisant à des estimations de la variation temporelle de la constante de structure fine. Même si les travaux ont débuté il y a une dizaine d'années, avec le développement des sources à atomes froids et la conception d'une horloge autour de ces sources, 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^{-14} .

Position des Équipes Françaises

Les équipes françaises du SDU, du GRGS, de l'IGN et du GDR GdR AGRET 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. D'un autre côté, la métrologie du temps est une activité interdisciplinaire typique impliquant des chercheurs du SDU, SPMP, STIC.

Système Céleste

Le rôle des équipes françaises dans les travaux ayant conduit aux nouveaux systèmes et dans leur maintenance est majeur. Pour faire simple, on constate que la composition du Groupe de Travail UAI sur le système céleste comprend en premier lieu des chercheurs américains et français, puis ensuite un ou deux représentants d'autres nations. Ceci est le reflet d'une longue tradition de l'astronomie française dans ce domaine et également d'un effet d'entraînement autour de la mission

Hipparcos. Les équipes françaises ont eu un rôle moteur dans la définition et la réalisation du système de référence céleste et elles continuent à être très présentes.

On les trouve pour dans les diverses participations aux 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 Washington) ; centre de produit des paramètres de rotation de la Terre à Paris. Enfin la division I de l'UAI qui couvre l'astrométrie et la mécanique céleste est sous présidence française ainsi que le groupe de travail sur les systèmes de référence.

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. Cette phase d'approche a été reconnue par la communauté internationale en 1988 lorsque fut confié à une équipe de l'IGN et de l'Observatoire de Paris le soin de continuer cette activité dans le cadre international de l'IERS. Depuis 2001, l'IERS a été réorganisé et on nous trouve dans cette nouvelle architecture une présence française dans les organismes internationaux du thème au travers de l'UAI et de l'UGGI : 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 BNM-SYRTE) ont été des précurseurs dans le domaine des horloges à fontaine, 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.

Enjeux et Grandes Questions

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. Avec le temps, on va aussi mettre en évidence des effets systématiques dans les positions. Enfin les traitements changent, et conduisent à des révisions des positions. À chaque révision tout est mis en œuvre pour 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.

Voir le site <http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc> pour plus de détail sur cette activité et son organisation internationale.

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. Pour plus de détail et comprendre l'ampleur du travail voir le site <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF>.

Les Moyens Matériels

Au sol, les seules observations contribuant au système céleste proviennent de l'interférométrie à très longue base et la France n'a pas

d'antenne participante, bien que très présente dans l'exploitation des données et dans l'influence de ses scientifiques dans les instances de décision du secteur. Le GdR AGRET a émis une recommandation pour que l'on étudie la possibilité d'implantation d'une antenne auprès de l'observatoire géodésique de Tahiti, qui exploite déjà une station laser, un GPS et une balise DORIS. Le gain marginal d'une telle antenne est important pour la couverture du ciel, tant en nombre de bases, qu'en variété des longueurs et des orientations. La géométrie du réseau en bénéficierait considérablement en raison du déficit de bases dans la direction nord-sud. Les systèmes céleste et terrestre tireraient l'un et l'autre profit d'une telle amélioration dans l'hémisphère sud. C'est la seule technique qui permet de relier directement les systèmes terrestres et célestes.

Le réseau GPS et DORIS est bien organisé en France et dans le cas de DORIS, c'est en fait la taille des zones de visibilité qui limite la densité des balises. Pour les stations laser, un gros effort est en cours à l'OCA pour rénover la station laser satellite dans le cadre du projet T2000 et pour continuer à faire fonctionner la station laser-lune dans les meilleures conditions. Il est bon de rappeler que la télémétrie laser est la technique du long terme qui assure la stabilité du système terrestre et la seule à donner accès au géocentre. De plus son exactitude en fait un moyen d'étalonnage d'autres systèmes.

Comme dans beaucoup d'endroits, les réelles difficultés viennent des moyens en personnel, avec les départs en retraite en nombre déjà en cours. Les mesures de géodésie par laser ne sont pas automatiques (elles peuvent être partiellement automatisées, mais pour y parvenir, il faut aussi investir en moyens humains) et coûteuses en personnel.

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 et des moyens

techniques sont à prévoir pour pouvoir continuer le développement de la R&D en 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. Sur le plan des personnels, là aussi la situation est très fragile à Grasse.

Évolution à plus long terme

L'évolution du système céleste a été très rapide et spectaculaire ces dernières années avec un changement de paradigme historique. Rien de semblable ne se profile dans les dix ans qui viennent. L'effort portera lieu en premier lieu sur la consolidation et la maintenance d'un système, qui par nature n'est pas figé. 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. GALA est le mieux placé pour cette réalisation, mais une mission intermédiaire comme FAME ou DIVA, si elles se réalisaient, devrait également contribuer.

Pour le temps, les yeux sont rivés vers l'espace avec l'expérience PHARAO (horloge à atomes froids dans l'espace), la technique de transfert de temps par lien laser (T2L2) et plus loin l'utilisation des horloges spatiales ultra-stables 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 voit déjà se mettre en place un réseau européen très large piloté par le SYRTE (Time and Frequency for Galileo) pour aborder en amont les questions de recherche fondamentale et les développements technologiques.

ANNEXE 2 : INTERDISCIPLINARITÉS

« The way to do great science is to stay away from overpopulated subjects and go to the frontiers... » James Watson

1 REPOUSSER LES LIMITES DE LA MESURE DU TEMPS ET DE L'ESPACE

Ce domaine est exemplaire pour illustrer la synergie entre le monde de la métrologie du temps et de l'espace développé de longue date par les astronomes et celui des physiciens venant de la physique des oscillateurs ou de la physique atomique, ainsi que les physiciens relativistes pour la modélisation des transferts de fréquences ou des propriétés fondamentales de l'espace. La France continue à occuper une place de premier plan au niveau mondial dans la métrologie du temps et des fréquences avec une interaction forte des deux communautés. Parmi plusieurs projets d'envergure, on peut citer PHARAO, qui rentre dans la phase industrielle de la réalisation d'une première horloge spatiale à atomes froids, destinée à voler sur la station spatiale internationale dans le cadre du projet ACES. La dynamique de ce domaine a été renforcée récemment par l'intégration du LHA (STIC) au sein de l'Observatoire de Paris (SYRTE), formation qui comprend également le BNM-SYRTE, et qui coopère étroitement avec le CERGA (Observatoire de la Côte d'Azur) et l'Observatoire de Besançon dans le cadre du Moyen national temps-fréquence de l'INSU.

La réalisation des étalons de fréquence de haute performance requiert la maîtrise de la physique atomique à l'origine de ces dispositifs et, également, de larges domaines techniques tels que les systèmes à diodes laser, la réalisation de sources d'atomes froids, l'électronique hyperfréquence.

Certains développements en métrologie temps-fréquence conduisent à des applications pour les futurs systèmes de navigation et posi-

tionnement par satellites (tels que GALILEO) et pour les systèmes de synchronisation des réseaux de télécommunication (STIC). Le développement du lien entre un étalon primaire de fréquence réalisant la seconde, qui travaille dans le domaine micro-ondes, et un étalon travaillant dans le domaine optique implique des innovations dans les multiplications / divisions de fréquence, l'affinement des compétences dans les domaines de la mesure de bruit de phase, du verrouillage de phase, de la stabilisation de fréquence, techniques (SPM, STIC) qui peuvent être utiles dans certains projets astronomiques.

Depuis la réunion d'Arcachon, il faut noter la création en 1999 dans cette thématique du GdR AGRET (Astrométrie, Géodynamique et Systèmes de Référence) sur un thème interdisciplinaire au sein du département SDU regroupant principalement astronomes, géodésiens, géophysiciens. Parmi les objectifs du GdR, citons le protocole AGRET d'installation et de maintenance de sites géodésiques-géophysiques, la sensibilité des dispositifs globaux d'observation aux paramètres géodynamiques, l'étude des mouvements du géocentre, les analyses expérimentales pour contribuer à l'unification des références, l'approche statistique du traitement des observations. Ce dernier point a fait l'objet depuis plusieurs années de relations suivies conduisant à des transferts de savoir-faire avec des mathématiciens du domaine de l'analyse du signal et de l'estimation statistique. L'arrivée récente au sein du SYRTE d'une équipe de physiciens relativistes (SPM) qui se consacrent à l'application des méthodes de la relativité générale aux problèmes posés par la définition et la réalisation des systèmes de référence astrométriques est un autre exemple concret de synergie entre astronomes et physiciens.

2 ASTROPARTICULE ET COSMOLOGIE

Sous la dénomination « astroparticule » se reconnaît une communauté, interdisciplinaire par construction, d'astrophysiciens, de physiciens des

particules et de physiciens théoriciens, attachés d'une part à étudier les sites des phénomènes cosmiques de haute énergie par la collecte de messagers que ces phénomènes produisent d'une manière privilégiée (photons X et gamma, neutrinos de haute énergie, rayons cosmiques de haute énergie, ondes gravitationnelles) et d'autre part à mener des recherches en tirant parti de ces laboratoires de l'extrême, où règnent des conditions physiques hors de portée de l'expérimentation directe. Les phénomènes cosmiques de haute énergie concernent notamment les objets compacts et leur environnement (étoiles à neutrons, pulsars, trous noirs en système binaire, microquasars, sursauts gamma, noyaux actifs de galaxie), impliquant l'accrétion de plasmas chauds accompagnée d'éjections le plus souvent relativistes, parfois explosives. De telles éjections sont sources de rayonnements de haute énergie et de rayons cosmiques ; ce sont, avec les défauts topologiques et les reliquats des transitions de phase primordiales, les explications possibles à l'énigme des rayons cosmiques d'ultra haute énergie.

Au cours des dernières années, l'investissement de la communauté astroparticule française s'est fortement accru dans le domaine de la collecte de données. Tout en maintenant un engagement fort dans les moyens spatiaux dévolus aux observations X et gamma (XMM-Newton, puis surtout INTEGRAL et enfin GLAST), astrophysiciens et physiciens des particules des laboratoires français s'impliquent dans le développement de l'astronomie gamma au sol (CAT, CELESTE puis HESS) et dans l'émergence de nouveaux moyens d'observation non-photonique (AMS, ANTARES, AUGER, VIRGO), tout en menant l'analyse multi-longueurs d'onde des objets et milieux concernés. À noter les développements liés à la nucléosynthèse, qui bénéficiera notamment des mesures par INTEGRAL des raies gamma nucléaires dans différents types de site cosmique et ceux plus généraux d'astrophysique nucléaire avec, par exemple, la confirmation récente de la masse des neutrinos par le « Sudbury Neutrino Observatory », en accord avec les modèles solaires.

La cosmologie étudie l'évolution globale de l'Univers et l'histoire de sa structuration. Elle doit donc recenser les contributions à son contenu et les mécanismes contrôlant son évolution. Les échelles de temps, d'espace, et d'énergie qu'elle explore la mettent naturellement en position de poser voire de résoudre des questions de physique fondamentale. Elle se situe donc naturellement elle aussi à l'interface de l'astrophysique, de la physique théorique et de la physique des particules.

Ainsi, les reliques des phases les plus primordiales de l'Univers (pré big-bang, inflation et autres extensions du modèle standard), objets d'étude de la physique théorique, peuvent être surtout étudiées expérimentalement par leurs empreintes détectables sous forme d'anisotropies du fond de rayonnement cosmologique. La mesure de ces anisotropies est l'objectif de deux expériences où se sont fortement impliqués astrophysiciens et physiciens français : ARCHEOPS, dès aujourd'hui, et le satellite PLANCK, dans un proche avenir (qui impliquent INSU, IN2P3, SPM, DAPNIAA). De plus la polarisation de ces anisotropies offre sans doute la meilleure chance de détection du fond d'onde gravitationnelle primordial. Par ailleurs l'étude de l'évolution temporelle possible des fréquences de transition atomique grâce à l'analyse des spectres de quasars lointains permet de contraindre ou de détecter des variations lentes, à l'échelle de milliards d'années, des constantes fondamentales. La cosmologie est aussi à l'interface de nombreux domaines astrophysiques, car l'étude de la formation des structures fait appel au croisement des compétences en dynamique gravitationnelle, (magnéto)-hydrodynamique, physique du milieu interstellaire et stellaire, simulations numériques lourdes, etc.

Diverses mesures cosmologiques conduisent à supposer qu'environ un quart du contenu de l'Univers est sous forme « de matière noire », sans interaction électromagnétique. Les possibilités théoriques ne manquent pas (axions, particule supersymétrique la plus légère, etc.). Cette nouvelle particule est traquée à la fois par des expériences de détection directe (comme EDELWEISS) et par des mesures astrophysiques

portant sur la dynamique des galaxies et des amas de galaxies. Plus surprenant encore est le défi théorique posé par la mise en évidence de cette « énergie noire », qui représenterait environ les deux tiers du contenu en énergie-matière de l'Univers et qui serait responsable de la phase d'expansion accélérée de l'Univers. Cette accélération fut mise en évidence pour la première fois par des observations de supernovae lointaines de type Ia, une autre activité conjointe des astrophysiciens et physiciens des particules. Les résultats récents de mesure des anisotropies confirment indépendamment l'existence de cette énigme théorique. Dans un futur proche, les progrès sur l'énergie du vide sont sans doute à attendre des projets interdisciplinaires sur les supernovae et la cartographie des effets de cisaillement gravitationnel (CFHTLS, SNAP, DEP).

Les liens interdisciplinaires en astroparticule et cosmologie existent depuis déjà un certain temps par le truchement d'écoles, de colloques, du Programme National de Cosmologie (PNC), du Programme Astroparticules, du fléchage d'un certain nombre de postes au CNRS et de postes pluridisciplinaires dans les universités. La structuration du domaine continue avec, depuis 2000, la constitution du Groupe de Recherche Phénomènes Cosmiques de Haute Énergie (PCHE) et la mise en place de la Commission InterDisciplinaire (CID) Astroparticules. Enfin signalons les efforts de concertation et regroupement en province, la création de laboratoires à vocation interdisciplinaire, comme le Groupe Astroparticule de Montpellier, l'Institut d'Astrophysique de Paris et le GRECO, et la Fédération de Recherche Astroparticule et Cosmologie, préparatoire au laboratoire du même nom en construction sur le site de Paris-Rive Gauche dans le cadre de la nouvelle implantation de l'Université Paris VII.

3 LA PHYSIQUE DES PROCESSUS DE TRANSPORT DES OBJETS ASTROPHYSIQUES

La prise en compte des processus de transport de matière et de rayonnement pour la

compréhension de la physique et de l'évolution des milieux astrophysiques est non seulement toujours d'actualité, mais en développement croissant, grâce à la levée de difficultés conceptuelles et numériques. Il fait appel aux techniques avancées de simulation numérique, en particulier lorsqu'il s'agit de prendre en compte les aspects multidimensionnels des processus physiques. Il est maintenant possible de lever l'approximation de l'isotropie, de prendre en compte le couplage de l'évolution spatiale et temporelle dans les milieux hors équilibre, et d'inclure le champ magnétique dans la modélisation. Les différentes échelles spatiales et temporelles sont en effet liées par des couplages locaux (par exemple les processus collisionnels ou certaines réactions chimiques) et non locaux (par exemple les processus radiatifs) entre les processus physiques. C'est au niveau des interfaces entre les phases que se jouent les interactions non linéaires entre la dynamique du gaz, le rayonnement et le champ magnétique ainsi que les échanges de masse et d'énergie. L'importance relative de ces couplages a des conséquences importantes sur l'évolution des systèmes vus dans leur globalité et leur complexité.

Ce thème apparaît comme un axe prioritaire des programmes nationaux Physique Stellaire (PNPS), relations Soleil-Terre (PNST) et Milieu InterStellaire (PCMI), le GdR PCHE et intéresse également la planétologie. Dans les sujets d'actualité, notons l'accrétion dans les disques, la rotation différentielle du Soleil et la modélisation de la tachocline, les éjections de masse coronale et le vent solaire, l'origine de la structure multi-échelle du milieu interstellaire, le transport turbulent depuis les disques proto-planétaires jusqu'au milieu intra-amas dans les amas de galaxies, diffusion microscopique, convection, turbulence, circulation méridienne, perte de masse et transport du moment angulaire. Ces quatre dernières années ont permis en France de réels progrès dans le domaine de cette physique complexe. Les processus de transport du rayonnement, processus non locaux, plus connus sous le nom de « transfert du rayonnement », sont fondamentaux pour la modélisation du rayonnement observé

et connaissent depuis quelques années un nouvel intérêt : couplage avec la dynamique du milieu et la turbulence, prise en compte de processus microscopiques anisotropes et du champ magnétique en liaison avec la polarisation du rayonnement. Ces études menées en liaison avec la physique atomique ont permis des développements originaux de diagnostics spectropolarimétriques de champs magnétiques et aussi de champs de vitesses anisotropes.

Plus généralement, les processus de transport en astrophysique font de nos jours simultanément appel à plusieurs domaines de la physique, en croissance eux aussi : hydrodynamique particulière, physique atomique et moléculaire dans les milieux complexes, couplage de la physico-chimie et de l'hydrodynamique, traitement simultané de la diffusion microscopique et de la turbulence, etc. En retour, les progrès effectués en astrophysique irriguent les différents domaines de la physique de base des processus de transport. Ceci peut se vérifier grâce aux articles publiés dans les revues de physique, basés sur l'étude de processus dans les milieux astrophysiques servant de laboratoire naturel où les conditions physiques ne sont pas toujours possibles à reproduire sur terre. Inversement, soulignons l'intérêt du développement de l'approche expérimentale avec, par exemple, une expérience Taylor Couette au CEA. Ces expériences étudient l'écoulement produit entre deux cylindres tournant avec des vitesses différentes dans le but de comprendre l'apparition de la turbulence dans un disque quasi-képlérien. Signalons également les développements expérimentaux relatifs à l'étude de l'apparition de l'effet dynamo, responsable des champs géomagnétique et solaire. La participation des équipes de la communauté française à la fois à des expériences spatiales de sismologie à bord de SOHO et des expériences de laboratoire sur la turbulence a permis de mettre des contraintes observationnelles très fortes sur ces processus. Compte tenu du fort investissement théorique sur la turbulence en France, les observations ont permis de réels progrès numériques dans le domaine de la diffusion et des forces radiatives dans les étoiles.

Les développements escomptés sur la modélisation de la convection en fonction du

temps devraient permettre de progresser dans la physique de l'intérieur du Soleil, et de décrire correctement certaines instabilités stellaires et de perte de masse. Les études faisant appel à la physique non linéaire multidimensionnelle et aux instabilités ont des implications sur l'évolution dynamique et physico-chimique de la matière froide en relation avec la formation des étoiles. L'émergence de l'hydrodynamique particulière en liaison avec la physique atomique des processus anisotropes permet d'envisager des progrès sérieux dans le domaine de la compréhension du défi du chauffage de la couronne solaire et de la génération et de l'accélération du vent solaire et de son expansion dans l'héliosphère. Les études de transport d'éléments par turbulence, le couplage convection-rotation créent des liens à encourager avec la communauté des géophysiciens intéressés par la description du climat et de la météorologie de l'atmosphère terrestre.

4 ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE ET DYNAMIQUE DES MILIEUX INTER ET CIRCUM-STELLAIRES

La découverte des nuages moléculaires a fait naître une communauté interdisciplinaire réunissant astrophysiciens, physiciens et chimistes qui ensemble travaillent à l'évolution des milieux dilués et froids présents dans l'espace. Ces travaux ont une dynamique propre animée par l'exploration de la chimie interstellaire : l'originalité des processus et des espèces, sa diversité et sa richesse sont encore largement inexplorées avec en perspective la recherche d'une éventuelle contribution interstellaire à la chimie du vivant. Ils sont aussi reliés à plusieurs des grandes questions de l'astrophysique : la formation et l'évolution des galaxies et la formation des étoiles et des planètes. L'approche interdisciplinaire de ces questions est essentielle. Ce sont des travaux interdisciplinaires qui fondent les identifications spectroscopiques des constituants de la matière, les diagnostics des conditions physiques et notre compréhension des

processus physico-chimiques dans l'espace. C'est aussi à travers des échanges interdisciplinaires que l'on peut espérer comprendre l'évolution physico-chimique et dynamique de la matière froide dans le milieu interstellaire et les enveloppes circumstellaires mais aussi le gaz primordial.

Les échanges interdisciplinaires doivent être renforcés suivant deux axes :

1. avec les physico-chimistes et spectroscopistes pour obtenir les connaissances physico-chimiques (spectroscopie, excitation, réactivité chimique pour les molécules et poussières interstellaires) qui serviront à l'interprétation des observations. Les chimistes théoriciens participent activement à ces recherches grâce au développement de nouveaux outils numériques comme la méthode DFT (Density Functional Theory) ;

2. avec des physiciens pour comprendre l'évolution dynamique de la matière résultant des couplages entre processus et échelles spatiales et temporelles.

La préparation scientifique de HERSCHEL et ALMA ouvre de nouvelles perspectives aux collaborations existantes sur les propriétés microscopiques de la matière, la réactivité chimique à basse température, les collisions et l'interaction matière-rayonnement. La majorité des espèces détectées à ce jour est constituée de radicaux et d'ions moléculaires particulièrement instables dans les conditions des laboratoires « terrestres » et l'interprétation de leur spectre astrophysique a requis la coopération des astrophysiciens avec les spectroscopistes, particulièrement du domaine micro-ondes, de laboratoire ainsi que les chimistes théoriciens. L'élargissement du domaine électromagnétique vers le sub-millimétrique avec HERSCHEL et le gain en sensibilité et résolution angulaire d'ALMA vont nous donner accès à des espèces nouvelles, comme les hydrures métalliques mais peut-être aussi à des molécules organiques complexes, et nous permettre de sonder des états moléculaires rotationnellement, voire vibrationnellement excités encore peu étudiés pour les espèces instables. Un travail théorique est également indispensable pour réunir les

données nécessaires au calcul d'excitation de molécules comme H_2O qui seront de précieux diagnostics des conditions physiques.

Un fort couplage entre les observations et études expérimentales et théoriques est également nécessaire pour l'étude des grains et des glaces. Le Programme National a engagé plusieurs projets expérimentaux destinés à reproduire au laboratoire des analogues des poussières interstellaires qui servent à caractériser les grains. Cet effort doit être associé aux analyses d'échantillons extra-terrestres porteurs de grains interstellaires. Les avancées attendues dans les observations des poussières doivent déboucher sur une compréhension de l'évolution physico-chimique des grains et des processus à leur surface. Pour cela de nouveaux projets expérimentaux permettant d'étudier les processus contribuant à la synthèse et l'évolution des grains dans l'espace et à la chimie à leur surface doivent être engagés.

Les observations montrent qu'une fraction importante des poussières sont des nano-particules carbonées d'au plus quelques milliers d'atomes. La nature précise de ces particules, leur origine et leur lien avec les bandes diffuses restent encore à élucider. Elles jouent certainement un rôle important dans l'évolution physico-chimique de la matière, les échanges d'énergie et peut-être le couplage de la matière avec le champ magnétique. Ce domaine constitue une nouvelle discipline frontière où les astrophysiciens doivent tisser des liens avec les physiciens moléculaires et physiciens du solide qui explorent les propriétés de la matière aux nano-échelles.

Le milieu interstellaire constitue un archétype des systèmes régis par des lois non-linéaires dont la complexité émerge par le biais d'un très grand nombre d'échelles (spatiales et temporelles) couplées entre elles. Ces couplages sont locaux comme les processus collisionnels et les réactions chimiques mais aussi non-locaux avec l'action de la gravité, du champ magnétique, du rayonnement et de la turbulence. La relative importance des couplages locaux et non-locaux a des conséquences importantes sur l'évolution de ces systèmes dans leur

ensemble. L'émergence de structures dans le milieu interstellaire doit être abordée dans cette perspective. Les systèmes constitués d'un grand nombre d'éléments en interaction ont tendance à s'organiser en structures sur une vaste gamme d'échelles. L'intermittence spatio-temporelle induite, par exemple par la dissipation de la turbulence interstellaire, engendre des régions hors-équilibre. Bien que ces régions n'occupent qu'une très petite fraction de l'espace et aient des temps de vie courts, il existe en permanence une fraction du gaz observée dans ces états hors-équilibre. Ce gaz peut jouer un rôle déterminant dans l'évolution de la matière car il peut être le lieu de processus physico-chimiques inopérant à basse température. La portée pour l'Astrophysique de cet axe de recherche dépasse l'étude de la matière interstellaire et devrait devenir un thème fédérateur. L'astrophysique doit s'ouvrir à la communauté de la physique statistique, aux outils statistiques et théoriques développés dans les nombreux champs de la Physique et des Sciences de la Terre où sont étudiés des comportements de type systèmes complexes, en particulier dans les domaines suivants :

- (i) la morphogenèse ;
- (ii) l'universalité, les lois d'échelles ;
- (iii) la combustion, la physique des interfaces ;
- (iv) l'ordre et le désordre ;
- (v) la criticalité auto-organisée.

5 ÉVOLUTION COMPARÉE DES PLANÈTES TELLURIQUES

L'objectif de cette démarche est de dégager les processus physico-chimiques communs à la Terre et aux objets du système solaire qui lui sont analogues (planètes telluriques, satellites extérieurs) afin de mieux comprendre leurs mécanismes de formation et d'évolution, et aussi d'apporter un regard nouveau sur l'histoire et le devenir de la planète Terre.

L'étude de la planète Mars reste indiscutablement au centre de ce thème de la planétologie comparée. Au-delà de l'étude de la structure interne de la planète, trois grandes questions (intéressant également l'exobiologie, Voir thème 6 « Les conditions d'évolution vers la matière vivante ») sont mises en avant dans les motivations du programme d'exploration spatiale de Mars :

1. quel a été le climat passé de Mars, et durant quelles périodes a-t-il permis la présence d'eau liquide en surface ? Est-elle actuellement enfouie sous la surface ou s'est-elle échappée dans l'espace interplanétaire ? ;
2. quelle est la structure interne de Mars et son évolution ? Quels sont les échanges atmosphère-surface ? ;
3. la vie a-t-elle pu se développer durant ces périodes ?

Des moyens importants ont été mobilisés par le CNES et l'INSU depuis Arcachon pour organiser une communauté pluridisciplinaire très large, indispensable à une bonne préparation scientifique de ce programme. En particulier la part des ressources du PNP consacrée à ce programme a été en augmentation sensible, et un plus grand nombre d'équipes de Sciences de la Terre s'intéresse à la planétologie. Les motivations scientifiques de l'exploration de Mars sont très fortes. La communauté concernée s'est élargie et mobilisée. Elle intéresse également les chercheurs des sections 11, 12, et 13. L'exploration de Mars, vue sous l'angle de l'exobiologie (Voir question 3 précédente sur le développement de la vie et développée en 6 dans le thème suivant) concerne plusieurs communautés d'autres départements du CNRS, principalement SDV et SC, qui jusqu'à présent n'étaient pas impliquées dans des programmes d'intérêt planétologique. **Ce caractère largement fédérateur de l'étude de la planète Mars est à souligner.**

À côté de Mars, l'étude de Mercure, l'un des « end-numbers » de la famille des planètes telluriques, est l'objet de la mission

européenne Bepi-Colombo. Celle de Vénus est programmée dans le cadre de la préparation de la mission Venus Express, également dans le cadre de l'ESA. Ces missions auront un impact important sur le développement de l'étude comparative des planètes telluriques en Europe. Parallèlement, l'exploration des satellites galiléens avec les missions Galileo et Cassini, et surtout l'exploration programmée de Titan par la sonde Cassini-Huygens en 2005 ouvriront de nouvelles perspectives sur l'étude comparative des objets extérieurs de type terrestre, qu'il s'agisse de leur intérieur, de leur surface ou, dans le cas de Titan, de leur atmosphère.

La planétologie comparée nécessite une collaboration très étroite entre les différentes sections. Il convient de définir au mieux les compétences thématiques relevant des sections 11, 12, 13 et 14 de SDU.

6 LES CONDITIONS D'ÉVOLUTION D'ÉVOLUTION VERS LA MATIÈRE VIVANTE (INTERACTIONS AVEC SC ET SDV)

De façon générale, l'exobiologie (ou Exo/astrobiologie) est l'étude de la vie dans l'Univers. Plus précisément, elle inclut l'étude des conditions et des processus qui ont permis l'émergence du vivant sur notre planète, et ont pu ou pourraient le permettre ailleurs, l'étude de l'évolution de la matière organique vers des structures complexes dans l'Univers, et les recherches qui concernent la distribution de la vie sous toutes les formes qu'elle pourrait revêtir, et son évolution. Il s'agit d'un vaste domaine thématique, qui fait appel à des disciplines scientifiques très diverses, depuis l'étude des origines et de l'évolution de la vie sur Terre et de sa dépendance des conditions environnementales, jusqu'à celle des structures moléculaires et des mécanismes chimiques associés, dans d'autres environnements planétaires, y compris au voisinage d'autres étoiles.

Le colloque National d'Exobiologie organisé par le GdR Exobio en mai 2002 a permis d'élaborer une prospective pour les 4-5 années à venir. Quatre thèmes principaux ont été retenus :

– thème 1 : Les ingrédients de la vie primitive dans leur contexte géologique, planétaire et interstellaire. Ce premier thème inclut les deux liens suivants avec l'astrophysique : la chimie du milieu interstellaire : sa composante organique, son apport à la chimie de la nébuleuse protostellaire et la chimie organique planétaire, en particulier sur Titan un exemple de réacteur prébiotique à l'échelle planétaire. Il est étroitement lié aux missions d'exploration des comètes (Rosetta) et de Titan (Cassini-Huygens) et aux missions de collecte de matériaux extraterrestres ;

– thème 2 : De la chimie des origines de la vie à l'émergence du vivant – structures et fonctions des molécules biologiques ;

– thème 3 : La vie terrestre comme référence : fossiles, biomarqueurs, milieux extrêmes ;

– thème 4 : Habitats et signatures de vies extraterrestres.

Les objets extraterrestres différenciés susceptibles d'abriter ou d'avoir abrité la vie, en particulier Mars et Europe. Critères d'habitabilité. La définition des signatures de la vie.

Les possibilités de recherches en dehors du système solaire : planètes extrasolaires, modélisation des atmosphères, signatures spectrales de la vie, etc.

Ce dernier thème est en pleine expansion dans la perspective d'un vaste programme d'exploration de Mars et celle des missions spatiales de recherche de planètes extrasolaires et d'études spectroscopiques de leurs atmosphères (COROT, DARWIN-TPF, etc.)

ANNEXE 3 : OUTILS ET MÉTHODES PLURIDISCIPLINAIRES TRANSVERSAUX

T1 : SIMULATION NUMÉRIQUE (INTERACTIONS AVEC SPM, SPI, STIC, Sc)

Les simulations numériques ont émergé comme un outil incontournable dans toutes les disciplines astrophysiques. Outre leur rôle traditionnel d'« expérience du théoricien » pour explorer le comportement de systèmes complexes, elles s'imposent aujourd'hui pour optimiser le concept d'expériences lourdes, préparer puis valider leur chaîne de traitement des données et enfin pour maximiser leur exploitation scientifique. Ce rôle nouveau tient à leur capacité à maintenant engendrer des observations virtuelles réalistes (*Voir* notamment en cosmologie), et c'est sans doute pourquoi elles ressortent très souvent comme action prioritaire nouvelle dans la plupart des prospectives thématiques qu'ont menées les programmes nationaux.

La simulation numérique donne lieu à de nombreuses interactions avec d'autres secteurs du CNRS. Ces interactions ont lieu au niveau de l'algorithmique et de l'étude des processus physiques (où des chercheurs d'autres sections développent des codes similaires aux nôtres) comme, par exemple l'hydrodynamique, la MHD, l'accélération de particules, la physico-chimie et le transfert de rayonnement.

L'hydrodynamique joue un rôle essentiel dans plusieurs domaines de l'astrophysique, de la cosmologie aux intérieurs stellaires ou aux disques protoplanétaires. Les méthodes numériques utilisées en astrophysique diffèrent peu de celles qui sont développées dans différentes sections de SDU, SPM et SPI. De nombreuses collaborations existent, tant pour la physique fondamentale (turbulence, chocs radiatifs) que pour les méthodes numériques (notamment sur les méthodes de grille adaptative) (*interactions avec les équipes relevant des sections 02, 10, 11, 12, 13*).

La Magnétohydrodynamique (MHD) joue un rôle important en physique des plasmas de fusion contrôlée. Des méthodes numériques développées dans ce contexte ont été adaptées aux études astrophysiques (du Mis aux objets compacts), et font l'objet de collaborations actives. Des collaborations se développent également sur le thème de la dynamo turbulente (*interactions avec les équipes relevant des sections 02, 04, 13, 12*).

L'accélération de particules, observée dans de nombreux objets astrophysiques (supernova, noyaux actifs de galaxies, vent solaire, magnétosphère, etc.) est étudiée par différentes approches numériques, en liaison avec les observations des instruments au sol ou en vol. Des collaborations se développent dans ce domaine (*interaction avec équipes relevant de la section 02*).

Physico-Chimie, chimie et transfert de rayonnement sont les outils de l'interprétation des observations de la matière froide ou chaude, dans tous les domaines de longueurs d'onde et se font depuis longtemps à l'interface de diverses communautés. Des collaborations très actives existent pour développer et appliquer les outils de la chimie quantique à l'étude des processus physico-chimiques de la matière dans l'espace (structure moléculaire, réactivité chimique, interaction matière-rayonnement, sections efficaces de collisions). Ces collaborations s'appuient sur des outils numériques complexes (calcul de surfaces de potentiel, dynamique réactionnelle). Le couplage des processus physico-chimiques avec l'évolution dynamique des milieux et le transfert de rayonnement est un problème complexe qui ne peut être abordé que par la simulation numérique. De tels calculs servent notamment à l'étude des atmosphères dynamiques planétaires (*collaborations avec les équipes relevant des sections, 04, 10, 12, 13, et 18*).

Le rôle de la simulation numérique en astrophysique fait l'objet d'une réflexion spécifique et d'un désir de structuration. Si les besoins ne sont pas identiques selon les disciplines, il paraît incontournable que puissent émerger quelques équipes structurées alliant l'ensemble des compétences nécessaires (infor-

matique, algorithmique, astrophysique théorique et observationnelle) et disposant de moyens comparables à leurs homologues étrangers. *En parallèle, cette activité en plein essor gagnerait en efficacité grâce à une interaction plus forte avec les mathématiques appliquées et au recrutement volontaire d'ingénieurs en algorithmique sur les grands centres de calcul nationaux.*

T2 : ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE (COLLABORATIONS SPM, STIC, CEA, DGA)

L'« Astrophysique de Laboratoire » consiste à développer des expériences de laboratoire destinées à reproduire les milieux astrophysiques les plus divers, soit pour les étudier de manière spécifique, soit parce que les processus étudiés sont inexplicables par les observations, soit parce que leur modélisation théorique et/ou numérique n'est pas encore validée ou reste encore irréalisable à l'heure actuelle. Certaines expériences sont citées dans les thèmes astrophysiques. Nous ne retiendrons dans cette section que les expériences plus transverses utilisant l'accès à de très grandes installations, les situant d'emblée dans un cadre interdisciplinaire et inter-organismes.

Dans les perspectives à moyen et long terme, l'utilisation des Lasers Intenses permet d'envisager la modélisation de plasmas astrophysiques et l'étude de processus physiques ayant lieu dans des conditions extrêmes propres à l'astrophysique. Le contexte national français de cette thématique est le **Laser Mégajoule** (LMJ, à partir de 2008), et son pilote, la Ligne d'Intégration Laser, (LIL en 2004), construits par le CEA ainsi que la chaîne laser du LULI (École Polytechnique). Le Laser Mégajoule, un des dispositifs français pour la simulation d'essais nucléaires, doit permettre de reproduire en laboratoire les conditions d'une explosion nucléaire, grâce à un ensemble de 240 faisceaux laser. Les applications vont de la modélisation des instabilités hydrodynamiques des SuperNovae, des chocs radiatifs astrophysiques en passant par l'étude des opacités dans les conditions des inté-

eurs stellaires, de l'équation d'état de milieux très denses (intérieurs stellaires, planètes géantes), de l'hydrodynamique radiative, de la génération de champs magnétiques extrêmes. Cette thématique, amenée à se développer avec les installations du CEA, est en phase d'émergence avec des expériences d'astrophysique. La réalisation des cibles spécifiques devrait être l'occasion d'échanges technologiques fructueux (interactions avec SPM, STIC et le CEA).

Enfin le **rayonnement synchrotron** apporte beaucoup à l'astrophysique, (collaboration SPI/SPM). En effet, par sa largeur de bande, sa stabilité et son intensité, le rayonnement synchrotron est une source précieuse dans les domaines X et UV. Depuis près de trente ans, il a été couramment utilisé comme source d'étalonnage pour les instruments X et UV de missions spatiales telles que D2B, SOHO, XMM. Ces étalonnages portent sur des composants séparés (réseaux, miroirs, caméras) ou sur l'instrument entier. Actuellement, ils sont pour la plupart menés dans la station d'étalonnage de l'IAS (qui bénéficie de deux lignes dédiées) en collaboration avec des établissements de SPI et SPM tels que le LURE et l'IOTA. En vue des futures missions UV (Stereo, Solar Orbiter, Sonde Solaire), une installation dédiée a été demandée dans le cadre de **SOLEIL**, dont la mise en service est prévue pour 2006.

Par ailleurs, une expérience de laboratoire CHIRAL-MICMOC vise à utiliser les propriétés de polarisation du rayonnement synchrotron pour obtenir, par photochimie des glaces, des molécules de type pré-biotique propres à expliquer l'homochiralité dans les molécules organiques.

T3 : INSTRUMENTATION (COLLABORATIONS AVEC STIC, SDV, SPM, LE CEA, L'ONERA, L'INSERM)

Le domaine de la Haute Résolution Angulaire est un domaine d'expertise français qui lui a dédié un programme national

(PNHRA) puis une Action Spécifique (ASHRA). Les nombreux développements technologiques liés au domaine de l'Optique et Adaptative bénéficient d'échanges avec les communautés SPM et STIC, l'ONERA, le CEA et l'industrie privée et en retour, sont susceptibles d'apporter à de nouvelles disciplines des avancées notables.

C'est le cas de l'étoile laser polychromatique nécessaire pour obtenir une couverture suffisante du ciel dans le cadre des télescopes de la classe des 100 m. Issue de collaborations entre laséristes, physiciens, opticiens et astrophysiciens, le projet français est très bien situé dans la compétition internationale (collaboration SPM/STIC/CILAS, etc.).

C'est le cas également de l'optique intégrée pour l'astronomie, et qui tire profit des synergies avec le CEA/LETI et de divers laboratoires de la section 8. L'optique guidée planaire devient un atout considérable, notamment pour les instruments d'interférométrie au sol et dans l'espace (VLTAI, DARWIN).

L'un des points durs des développements en Optique Adaptative réside dans la réalisation de micro-miroirs déformables à très grand nombre d'actionneurs. Ces recherches intéressent également les télécommunications optiques et la réalisation de matrices de brassage optiques accompagnant les développements en optique intégrée.

Ces synergies avec les technologies des télécommunications devraient tirer grand bénéfice du projet de structure mixte MINATEC entre le CEA, le CNRS, l'Université de Grenoble et l'industrie.

Les techniques développées dans le cadre des recherches liées à l'**optique adaptative** ont des retombées dans le secteur des sciences de la vie. Ainsi, l'imagerie tridimensionnelle de l'œil à très haute résolution spatiale doit procurer des informations fondamentales sur la fonction et le comportement du tissu rétinien. Les techniques actuelles butent sur les médiocres propriétés optiques des divers dioptries de l'œil qui ne permettent pas de visualiser correctement le fond de l'œil. Une expérience CEIL en construction à Paris propose un concept d'instrument imageur à trois dimensions basé sur une tech-

nique proche de l'imagerie astronomique et sur la tomographie optique cohérente.

La physique des détecteurs spécifiques à l'astronomie est également source d'échanges pluridisciplinaires et de retombées en dehors de notre discipline.

Citons les développements de détecteurs JSET-3D dans le domaine visible de l'IR aux X, les matrices de bolomètre pour l'imagerie focale submm, la montée en fréquence des mélangeurs hétérodynes dans le domaine des Téra-Hertz avec les jonctions SIS, les bolomètres à électrons chauds et les CCD miniaturisées et intégrées.

Citons également les développements basés sur l'utilisation de matériaux semi-conducteurs pour le domaine des rayons gamma, les X durs mais aussi le domaine IR.

L'astronomie a développé une expertise dans le domaine des détecteurs à faible bruit de lecture. Citons ici les retombées des développements en termes de détecteurs optiques pour SDV. Ces détecteurs à Comptage de Photons Nouvelle Génération avec un rendement quantique de 25 % dans le visible et une extraction/compression du signal entièrement numérique, etc. Les spécifications de cette caméra développée au CRALL pour l'astrophysique ont été également établies en fonction aussi des besoins de ces biophysiciens. L'intérêt des biophysiciens réside dans la microscopie confocale à faible flux de lumière (afin de ne pas tuer les cellules dans les préparations observées).

Il ne faut pas oublier les développements en optronique (lasers, fibres optiques, photodiodes) avec leurs applications dans le domaine optique (recombinaison de faisceaux, cophasage), dans le domaine radio millimétrique et sub-millimétrique (oscillateurs locaux, transmission de la fréquence intermédiaire) pour l'interférométrie, dans le domaine des temps-fréquences (transmission de référence de temps, chaînes de fréquences), etc.

Cette sélection d'exemples non exhaustive est extraite pour partie du rapport du colloque de prospective R&D CNRS – INSU de Boussens en 1999. Elle est destinée à illustrer l'impact des développements de haute technologie réalisés pour et par l'astrophysique pour des domaines variés.

T4 : TRAITEMENT DU SIGNAL ET DES IMAGES (COLLABORATION AVEC STIC, CEA, ONERA, INSERM)

Les conditions observationnelles extrêmes propres aux très grands télescopes (par exemple les télescopes au sol de l'ESO, avec leur optique adaptative, mais aussi les grands programmes spatiaux poussant les limites de la résolution à des valeurs encore jamais atteintes) conduisent les astronomes à développer des solutions inventives dans le domaine du traitement du signal et des images.

L'analyse des résultats de Simulation Numérique pose d'ailleurs les mêmes problèmes.

Ces travaux sont menés sur deux plans : travaux théoriques sur la théorie du signal (problèmes inverses, entropie et information, reconnaissance de formes) et travaux « aval » de recherche et développement (notamment imagerie médicale et 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 »).

T5 : BASES DE DONNÉES ET ARCHIVAGE MASSIF (COLLABORATION AVEC SDU/ ST, OA, STIC, CEA, IN2P3)

Ce domaine est en plein développement avec le concept d'Observatoires Virtuels visant à fédérer l'ensemble des efforts réalisés dans le domaine du traitement massif des données, de leur archivage et de leur mise en ligne.

L'expertise française est reconnue au niveau mondial et s'appuie sur des collaborations avec des laboratoires d'informatique français et étrangers.

On peut citer en particulier le rôle du Centre de Données astronomiques de Strasbourg (CDS) au niveau Européen et international, au cœur de la problématique des Observatoires Virtuels. Le CDS joue aussi un rôle de formation et d'animation d'un réseau de bases de données thématiques en astronomie, et au-delà, dans l'ensemble des sciences de l'Univers.

Des expertises solides se sont aussi construites autour des grands projets producteurs de données (grands relevés du ciel dans l'optique ou l'infrarouge, observations de champs profonds, ou observations répétées des mêmes champs pour recherche de phénomènes transitoires). Cette expertise résulte fréquemment de collaborations avec d'autres départements ou organismes (IN2P3, CEA) et avec des laboratoires relevant du département STIC.

ANNEXE 4 : SPÉCIFICITÉS DE L'ÉVALUATION ET DU RECRUTEMENT EN RECHERCHE INTERDISCIPLINAIRE

La recherche interdisciplinaire débute le plus souvent par une initiative individuelle des chercheurs en poste. Pour intervenir en amont, sans doute faudrait-il inciter les jeunes chercheurs à proposer des projets interdisciplinaires, en commençant, au niveau des programmes, par organiser des journées thématiques regroupant plusieurs communautés, ce qui se pratique déjà. Peut-être faudrait-il favoriser les thèses en codirection, ce qui passe par un assouplissement du fonctionnement des écoles doctorales en termes de distribution de bourses.

L'interdisciplinarité est souvent bidirectionnelle entre les disciplines concernées. C'est le cas du domaine « Astroparticules » qui apporte aux

astrophysiciens des techniques nouvelles d'observation et aux physiciens nucléaires l'étude de la matière dans des conditions extrêmes inaccessibles par les accélérateurs. C'est également le cas de l'exobiologie, qui replace le problème de l'origine de la vie sur terre dans le contexte général de l'évolution chimique de la matière dans l'espace et les systèmes planétaires. Les « retours » de l'interdisciplinarité pour les différentes communautés sont alors équilibrés, ce qui favorise les échanges.

Très souvent, il s'agit aussi de retombées d'une discipline vers une autre, qui nécessite l'implication de spécialistes de la discipline « prestatrice ». Dans ce cas, la position du chercheur d'interface est très spécifique en ce sens que son activité ne peut pas (ou ne peut plus, s'il s'agit d'études anciennes) être considérée comme innovante par cette discipline. Par ailleurs elle peut ne pas paraître assez « astrophysique » par notre communauté, en particulier s'il se consacre à plein temps à cette activité d'interface. C'est typiquement la difficulté que nous rencontrons à l'interface avec les mathématiques appliquées dans le développement de modélisations astrophysiques. C'est également le cas pour la spectroscopie, et particulièrement la spectroscopie conventionnelle de laboratoire, discipline orpheline en France, les recherches correspondantes n'étant plus innovantes (et pourtant des besoins réels existent en accompagnement de missions spatiales, telles XMM, HERSCHEL ou ALMA). Elle s'apparente ainsi à une action de valorisation d'une communauté de chercheurs vers une autre. **Il serait opportun de faire entrer, à l'instar des valorisations techniques et culturelles qui s'adressent au monde social et économique, ce type de valorisation entre disciplines dans les critères d'évaluation des chercheurs.**

Le recrutement volontariste et suivi sur profil interdisciplinaire aura un effet bénéfique pour soutenir les principaux thèmes d'échange de l'astrophysique avec d'autres disciplines. La section 14 a, entre 1997 et 2002, a bénéficié de 4 recrutements CR sur postes interdisciplinaires pour 7 postes CR « donnés » en retour à d'autres sections (Voir tableau 3).

Tableau 3. Concours fléchés interdisciplinaires 1997* – 2002

D.S. origine	Section	Grade d'accès	D. S. bénéficiaire	Année	Intitulé du poste
SDU	14	CR2	SPM	1998	Cosmochimie
SDU	14	CR1	PNC	1998	Astrophysique des particules
SDU	14	CR2	SPM	1998	Optique pour la métrologie temps-fréquence
SDU	14	CR1	PNC	2000	Projet Auger
SDU (de fait, SC)	14	CR1	SC	2001	Synthèse et méthodologie dans le milieu interstellaire ou exoplanètes
STIC	8	CR1	SDU	2001	Micro-optique pour les grands télescopes
SPM	2	CR1	SDU	2001	Cosmologie, relativité générale
PNC	3	CR2	SDU	2002	Astronomie non photonique
STIC	7	CR2	SDU	2002	Observatoire Virtuel non pourvu
SPM	4	CR2	SDU	2002	Horloges à atomes froids
SDU	14	CR2	PNC	2002	Astrophysique des hautes énergies
SDU	14	CR2	SPM	2002	Propriétés physiques nanoparticules

En ce qui concerne les concours actuels sur ces profils interdisciplinaires, l'évaluation des candidats n'est pas aisée. Ceci est particulièrement vrai au niveau du recrutement CR2. L'évaluation ne se fait que sur la base de la compétence dans la discipline où se présente le candidat et sur l'adéquation du programme de travail au profil interdisciplinaire. Par ailleurs, les jurys de concours pour ce genre d'activité sont actuellement inadaptés. La présence d'experts des autres disciplines relève du bon sens.

Il est en effet très difficile à un jeune candidat interdisciplinaire de convaincre un jury mono-disciplinaire quel qu'il soit. **Le nombre des experts devrait être au moins égal au tiers des membres du jury, ce qui revient à faire des jurys mixtes. Un rapporteur de chaque thématique est absolument indispensable.**

Les postes pourraient être affichés dans plusieurs sections à la fois, éventuellement à l'intérieur du même Département Scientifique pour les interactions transversales touchant aux sciences de la terre, l'affectation du chercheur à une section donnée **se faisant à l'issue des concours**. Il serait intéressant d'élargir le recrutement interdisciplinaire au niveau CR1 voire DR2. En effet, l'expérience acquise, les collaborations nouées, l'élargissement de l'éventail des compétences, l'éventuelle mobilité thématique sont alors plus faciles à évaluer.

Enfin le suivi de la carrière des chercheurs à l'interface par le Comité National nous semble demander une réflexion spécifique.

ANNEXE 5 : LA COMMUNAUTÉ ASTROPHYSIQUE ET LES UNIVERSITÉS

Du point universitaire, les laboratoires d'astrophysique et les observatoires émergent à la section 34 du Comité National des Universités, c'est l'une des quatre sections du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers (STU alias DS3, Direction Scientifique 3). Si leur gestion est donc élaborée de concert avec les laboratoires de géophysique et instituts de physique du globe, en revanche leur mission d'enseignement et de formation doctorale se fait essentiellement en partenariat avec les autres disciplines de la physique qui, elles, relèvent de la DS2. La DS3 administre 97 laboratoires, abritant 1967 chercheurs (790 chercheurs CNRS, 1177 enseignants-chercheurs et assimilés) ; soit 8,4 % du total des effectifs. Environ 400 étudiants font des thèses dans la vingtaine d'écoles doctorales qui sont

principalement rattachées à la DS3. Environ la moitié de ces étudiants bénéficie d'une allocation de la DS3.

Le budget de la DS3 est de l'ordre de 180 MF distribué de la façon suivante :

- 85 MF pour le soutien aux laboratoires (légèrement supérieur au soutien de base du CNRS selon les données du ministère concernant les laboratoires d'astrophysique) ;

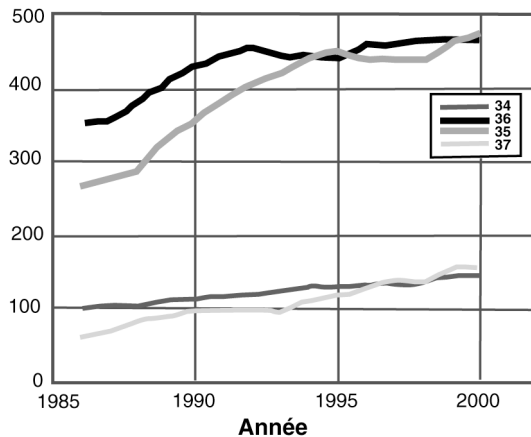
- 35 MF pour les Plans Pluri-Formation ;

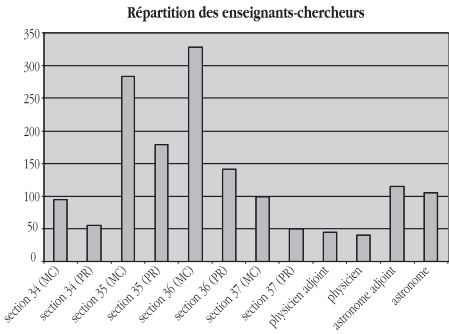
- 60 MF pour les Allocations et Écoles doctorales.

1 ÉVOLUTION DES EFFECTIFS ENSEIGNANTS-CHERCHEURS STU (DS3)

Les effectifs des enseignants-chercheurs de la section 34 ont légèrement progressé au cours des dernières années, mais nettement moins que ceux des sections 35 et 36. Cette évolution est à examiner en fonction des départs à la retraite dont le nombre important apparaît clairement sur l'histogramme des classes d'âge présenté plus loin.

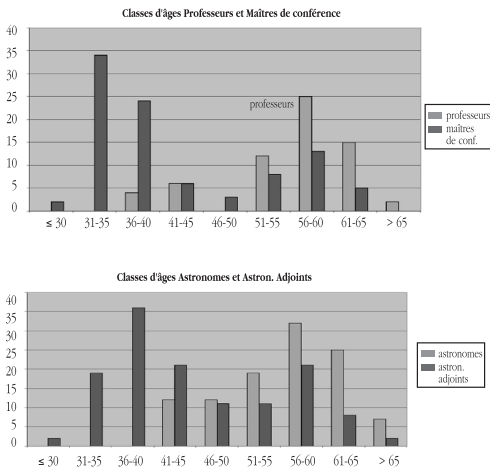
Évolution nombre Enseignants - Chercheurs de 1987 à 2000





2 HISTOGRAMME DES EFFECTIFS PAR CLASSE D'ÂGE

Il y a actuellement environ 400 enseignants-chercheurs (professeurs et maîtres de conférences) et assimilés (astronomes et astronomes-adjoints) affectés aux laboratoires d'astrophysique affiliés à l'INSU. Leur répartition par classe d'âge et par grade conduit aux histogrammes suivants qui parlent d'eux-mêmes. Le creusement autour de 45 ans de l'histogramme ci-dessous des enseignants-chercheurs de notre discipline (section 34) est particulièrement marqué ; l'histogramme des astronomes et astronomes-adjoints est mieux réparti.



3 RECRUTEMENT DES MAÎTRES DE CONFÉRENCE ET PROFESSEURS DEPUIS 1996

Le tableau ci-dessous indique les recrutements réalisés dans les universités sur les thèmes astrophysique, essentiellement en section 34 pour les labos d'astrophysique, mais aussi pour des activités d'astrophysique dans des labos IN2P3 (marqués d'une *).

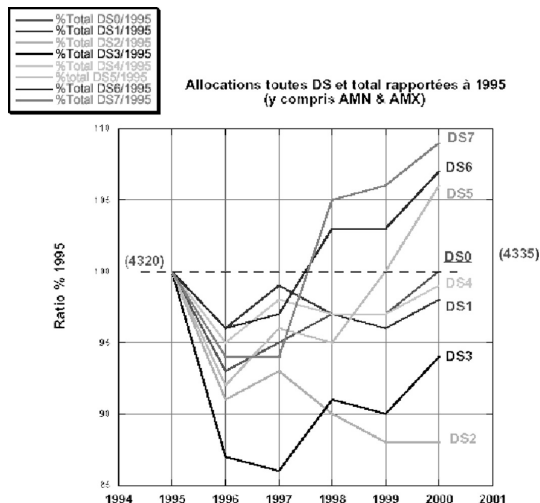
Universités	96	97	98	99	00	01	02	03	04
Aix-Mars		MdC34		MdC34	MdC34				
Besançon	MdC28								MdC34
Bordeaux	MdC34		MdC34						
Cergy-Pont.		MdC30	MdC30						
Grenoble	MdC34	MdC34	PR34	PR34					MdC34
			MdC29*	MdC34					
Lyon		MdC34	MdC34			MdC34			MdC34
			PR29*						
Montpellier			PR34		MdC34				MdC34
Nice			MdC30-34		PR34+61				MdC34
Orléans				PR34					
Obs. Paris			MdC34-27		MdC34				
			MdC34		PR34				
Paris 6	MdC34		MdC34	MdC29*	MdC34	MdC34	MdC34	MdC34	MdC34
					PR34				MdC29
Paris 7	MdC34	PR34	MdC29-34*	MdC34	MdC34	PR34	MdC34	MdC34	MdC34
						MdC34		MdC29	MdC29
						2MdC29*			
Paris 11	MdC34	MdC34	MdC34	PR34	MdC34		MdC34	MdC34	
				MdC29*				MdC61	
Paris 12				MdC34					
Toulouse	MdC31-34	MdC34	PR34		MdC34	PR34	MdC34		MdC34
			4MdC34		PR34	PR34 ?			
Vers.-SQ.		MdC34		MdC34					
Vannes			PR34						
Strasbourg							MdC34		MdC34

NB. On trouve un bilan global des recrutements universitaires dans le testament de la section 14.

4 FORMATION DOCTORALE

La formation doctorale de notre discipline est une composante importante de la vie de notre communauté ; il importe que les instances de notre discipline, notamment les sections du CNU, du CNAP et du CNRS, maintiennent une attention constante sur le fonctionnement des moyens de formation afin de garantir le maintien d'un vivier de bons doctorants pour nos laboratoires. On sait à quel point ceci est crucial pour la vitalité des laboratoires. La répartition des formations doctorales sur le territoire français permet à tous les sites d'astronomie d'être en contact avec une formation doctorale ; les liens en fonction des laboratoires sont plus ou moins forts mais existants. Le nouveau mode de distributions des allocations devrait rendre la migration des étudiants d'un DEA quelconque vers n'importe quel laboratoire plus facile et il importe que les directeurs d'école doctorale favorisent ce mouvement.

Le nombre des étudiants s'inscrivant dans les DEA d'astrophysique est resté à peu près stable, autour d'une centaine par an, sans baisse significative remarquée malgré la baisse des effectifs dans les UFR de physique ces toutes dernières années (cependant la vigilance s'impose). Le nombre de thèses soutenues dans le cadre des formations doctorales d'astrophysique est d'environ 70 par an. Le nombre d'allocations MENRT est de l'ordre de 45 par an, d'autres bourses, de l'ordre de 25, sont donc obtenues pour compléter l'apport du ministère. Les allocations MENRT proviennent non seulement de la DS3, mais aussi de la DS2 (physique). Le nombre cumulé de post-docs a régulièrement augmenté au cours des années 97, 98, 99, soit 73, 91 et 93 (source : enquête 2001 de Pierre Léna) et semble se stabiliser, mais représente toujours une pression très forte sur les concours de recrutement. Le nombre de candidats en post-doc qui atteignent la limite d'âge du concours CR2 est important et incite à faire des recrutements CR1 bi-modaux : recrutement jeune chercheur (moins de 35 ans) et recrutement chercheur confirmé (autour de 40 ans).



5 RAPPORTS ENTRE LES LABORATOIRES D'ASTROPHYSIQUE ET L'UNIVERSITÉ

Rapport avec le MEN

Mise à part les difficultés que peuvent éprouver les directeurs de laboratoires dans leur gestion administrative, imputables en grande partie au manque de personnels dans les administrations universitaires, mais qui ne sont pas propres à notre discipline, il est une difficulté particulière qui mérite d'être soulignée. Comme indiqué précédemment, notre discipline est administrée par le Département STU avec trois autres sections dont la coloration environnementale est dominante, alors que par ailleurs elle a des liens très forts avec les autres disciplines de la physique fondamentale (mais pas exclusivement ; les liens avec la chimie se développent également). Les enseignants-chercheurs, dans leur grande majorité, enseignent la physique et ne sont même pas distingués des autres physiciens dans les UFR de physique, comme c'est le cas dans la plupart des autres pays. Sans arrière-pensée liée à une pseudo-pyramide des connaissances, on peut dire simplement que la problématique

de notre discipline est d'une autre nature que celle des sciences environnementales. En effet, notre discipline a pour principale motivation la compréhension de notre univers physique, en contribuant à le rendre intelligible, en testant les lois de la physique dans des conditions autres que celles de la physique de laboratoire, en suscitant des recherches fondamentales aux frontières de la connaissance de la Nature. Nos collègues géophysiciens inscrivent leurs activités dans une autre perspective. S'ils partagent avec nous cette exploration de la Nature, leur motivation dominante – et à juste titre – est l'étude de l'environnement, dont l'importance est devenue évidente et suscite des besoins de financements particuliers. Cette cohabitation n'est pas sans soulever des problèmes, tant pour les financements de programmes, dont les arbitrages se font sans support commun de comparaison, que pour la définition de nouvelles filières d'enseignement. Quant à l'élargissement des OSU, il se traduit pour l'instant par un alourdissement bureaucratique patent sans que notre discipline y trouve un intérêt à la hauteur de l'investissement.

Rapports avec l'université de rattachement

Malgré la désaffection constatée récemment des étudiants pour la physique, le lien étroit de notre discipline avec les autres composantes de la physique paraît vital. On constate d'ailleurs que les laboratoires ou observatoires d'astrophysique coupés du tissu universitaire et notamment de la physique universitaire pâtiennent de cette situation, en particulier pour l'obtention de postes de maîtres de conférence ou de professeurs. Illustrer la physique par des exemples astrophysiques – et ils sont fort nombreux et de grande valeur pédagogique – est une opportunité à saisir, qui redonne du lustre aux enseignements de physique et – l'expérience le montre – motive les étudiants. De fait, la baisse de la population d'étudiants de physique ne semble pas avoir affecté les DEA d'astrophysique.

Nous devons être vigilants quant à l'évolution de la politique scientifique des universités (quand elle existe !), car, sous l'effet des

orientations nationales, les politiques locales tendent à accuser ces orientations en dégarissant les sciences fondamentales au profit de disciplines émergentes, telles que les sciences de l'environnement, la génétique, les « STIC » etc.

Mise à jour des recommandations du colloque d'Arcachon sur les thèses et les recrutements

Au niveau des DEA

- Développer un enseignement qui ne soit pas trop académique mais proche des réalités de la recherche scientifique et instrumentale actuelle, (c'est une tendance forte aussi bien pour la formation à l'instrumentation et l'observation, que pour la formation aux concepts théoriques nouveaux) ;

- Stabiliser les effectifs autour de 100 pour l'ensemble des DEA, (c'est effectivement ce qui a été réalisé) ;

- Répartir les stages sur l'ensemble des laboratoires et des disciplines (cette pratique est encouragée, mais nécessite encore des efforts d'ouverture de la part des directeurs d'école doctorale).

Au niveau de la thèse

- Favoriser les sujets qui nécessitent la connaissance et l'utilisation d'un outil technique ou informatique (sans perdre la motivation « frontière de la physique » qui fait le succès et l'attrait de l'astrophysique) ; en outre, l'affichage des priorités scientifiques des laboratoires est une pratique instituée au niveau des écoles doctorales, avec néanmoins quelques difficultés de mise en œuvre : il faut s'assurer que les meilleurs choisissent les sujets les plus porteurs ; il faut aussi éviter de trop baliser, accepter la prise de risque, pourvu qu'elle soit consciente et partagée par l'étudiant, le responsable de la thèse et le conseil de laboratoire ; il faut encourager la fluidité entre les écoles doctorales en accueillant en thèse

des étudiants formés dans d'autres écoles et réciproquement les directeurs d'école doctorale doivent accepter de voir certains de leurs étudiants s'orienter vers un sujet de thèse d'une autre école doctorale ;

- Aider les directeurs de formations doctorales dans leurs actions de formations encourageant les doctorants à suivre ces formations (les doctoriales et autres initiatives de ce type ont été mises en œuvre) ;

- Agir pour que les thèses ne durent pas plus de trois ans ;

- Prévenir les doctorants 6 mois avant la soutenance s'il ne semble pas souhaitable qu'ils poursuivent dans la recherche ;

- Éviter si possible les situations de doctorants au chômage dans l'attente d'un post-doc.

Au niveau de l'après thèse

- N'envoyer en post-doc que les docteurs qui ont des chances sérieuses d'obtenir un poste dans la recherche (c'est impératif et ce souci est largement partagé) ;

- S'assurer que le post-doc sera utile avant d'y envoyer un docteur.

Au niveau des recrutements

- Afficher clairement les priorités scientifiques des laboratoires (et ceux de la discipline, etc.) ;

- Les jurys de recrutements doivent annoncer clairement aux candidats non retenus s'ils ont néanmoins des chances d'être recrutés les années suivantes (mise en œuvre délicate, etc.) ;

- Les candidats recrutés ainsi que les chercheurs en activité doivent penser à passer une habilitation (du moins tant que cette dernière existe).

ANNEXE 6 : LA PLACE DE L'ASTROPHYSIQUE EN EUROPE

On se reportera au texte du Groupe de Travail « Europe » du Colloque de Prospective de la Colle-sur-Loup (<http://www.oamp.fr/section14/>)

Les agences de moyens (ESO, ESA) et les instituts multilatéraux (EISCAT, IRAM, THEMIS).

Depuis longtemps, l'ESA et l'ESO, chacun pour le domaine qui le concerne, ont permis le développement de l'astronomie dans l'espace et au sol en Europe. En complément de ces agences généralistes, des instituts spécialisés (EISCAT, IRAM, THEMIS) exploitent les grands et très grands équipements. Ces instituts font l'objet d'accords multilatéraux, parfois avec des partenaires non-européens. Les succès répétés des missions spatiales, le déploiement réussi du VLT et de l'interféromètre du Plateau de Bure sont quelques exemples du rôle structurant de ces agences et instituts européens.

1 L'UNION EUROPÉENNE

Bilan de la participation française au 5^e programme cadre

La situation vis-à-vis de l'Union Européenne est assez contrastée. Le domaine couvert par la section 14 est concerné par 16 des 104 « réseaux de formation par la recherche » en physique financés dans le cadre du programme horizontal intitulé « accroître le potentiel humain de recherche et la base de connaissances socio-économiques » du 5^e programme cadre. Il faut souligner que des laboratoires français participent à la quasi-totalité de ces réseaux. Concernant l'« accès aux infrastructures de recherche », la mise en réseau des télescopes visibles (OPTICON) doit permettre une utilisation plus rationnelle de ces moyens disséminés en Europe. OPTICON est également

le seul réseau auquel l'INSU participe directement. Enfin, il existe quelques participations aux autres réseaux (météorologie de l'espace, valorisation de la science, programmes d'échanges INCO, INTAS, etc.) et certaines réalisations ont été financées par le FEDER.

Toutefois, on peut regretter qu'à une exception près, aucun de ces réseaux ne soit piloté par une institution ou un laboratoire français. Les instituts britanniques pilotent à eux seuls la moitié des réseaux de formation par la recherche, les instituts allemands un quart. Cette tendance étant générale sur l'ensemble du 5^e programme cadre, on ne doit pas y voir une spécificité propre à notre discipline. Néanmoins il convient de s'interroger sur l'aide que pourrait apporter le CNRS dans la préparation des propositions de réseaux. L'antenne CNRS à Bruxelles devrait centraliser les renseignements utiles et favoriser la participation d'experts français dans les commissions de sélection des programmes. Son rôle devrait donc croître significativement dans les toutes prochaines années.

2 L'ESPACE EUROPÉEN DE LA RECHERCHE (EER)

L'EER, instrument d'une véritable politique européenne de recherche, devrait se mettre en place avec le 7^e programme cadre (2007–2011). L'objectif est de structurer et d'intégrer la recherche européenne. L'un des outils de cette politique est l'identification de réseaux d'excellences qui organiseront les moyens et compétences des instituts participants autour de programmes communs prioritaires. Un autre outil du développement de l'EER est la possibilité donnée à l'UE par le traité de l'Union (art. 169) de participer à des programmes de recherches nationaux, conjointement avec des États Membres ou d'autres organisations européennes de recherches. Afin de répondre au besoin de coopération avec l'UE, 7 organisations européennes de recherches (CERN, EMBL, ESA, ESO, ESRF, ILL, EFDA) viennent

de former un consortium, l'EIROforum, piloté actuellement par l'ESO. Enfin, 7 projets intégrés mobiliseront d'importants moyens financiers sur un nombre d'années pouvant dépasser la durée du 6^e programme cadre. La météorologie de l'espace devrait être à nouveau soutenue dans le cadre du projet intégré sur le développement durable et les changements planétaires. Le reste de l'astronomie profitera des retombées des autres projets intégrés (développements des nanotechnologies, des réseaux informatiques et du concept du GRID pour le calcul intensif et les bases de données, programme aéronautique et espace, etc.).

Complétées par d'autres dispositifs semblables à ceux du 5^e programme cadre (mobilité des chercheurs, accès aux infrastructures, etc.), les actions de l'UE permettront d'harmoniser les politiques de recherches nationales et européennes. Il convient donc de réfléchir dès à présent à la place de l'astronomie dans le 6^e programme cadre, surtout vis-à-vis des nouveaux dispositifs mis en place.

ANNEXE 7 : LA VALORISATION

1 RÉFLEXIONS SUR LA VALORISATION DANS LE CADRE DE L'ENQUÊTE DU SÉNAT

(Extrait de la lettre adressée le 23 avril 2001 au sénateur Fréville par J.C. Vial au nom de la section 14, concernant la valorisation et répondant aux questions de la commission sénatoriale sur le recrutement et la gestion des personnels universitaires et de recherche) :

En ce qui concerne la valorisation, elle porte notamment sur la vulgarisation scientifique : comme vous le savez, l'Astronomie rencontre une grande curiosité du public. Les chercheurs y répondent sous les formes les plus diverses : rencontre avec le public, avec

les scolaires, portes ouvertes, animations de clubs d'astronomie, émissions radio et télé, films, livres, articles de journaux, etc. Ils n'ont pas attendu la création (puis la suppression) d'une section dédiée du Comité national. Dans la section 14, cette activité est évaluée au même titre que les activités de production scientifique. Il serait bon toutefois que les instances pèsent bien le nombre de sollicitations dont ces chercheurs font l'objet et donc la lourdeur de leurs tâches effectuées, le plus souvent, entièrement bénévolement, etc.

La valorisation porte aussi sur l'application des travaux technologiques effectués dans les laboratoires d'Astronomie. Le champ de ces applications est très vaste et va de la micro-optique jusqu'au traitement d'images. Le pas décisif nous paraît être d'ordre psychologique dans la mesure où ces actions de valorisation ne sont plus vécues comme des actions isolées et susceptibles de « faire tache » sur les dossiers scientifiques mais au contraire comme un prolongement logique de leurs travaux.

2 LES DIFFÉRENTS ASPECTS DE LA VALORISATION EN ASTROPHYSIQUE

La valorisation se présente principalement sous deux aspects, culturel et technique, évoqués dans la lettre au Sénat rappelée ci-dessus. Mais elle se présente aussi sous d'autres aspects, comme on peut le voir dans l'énumération qui suit :

Diffusion des sciences

Cette activité peut prendre elle-même des aspects très variés, tels que :

- conférences (généralement dans le cadre de clubs d'astronomes amateurs, de maisons des jeunes, d'universités du 3^e âge, d'associations, de CCSTI ou pour la Semaine de la science dans chaque laboratoire ou observatoire ; mais il y a aussi les conférences

en milieu scolaire, pour la formation continue des enseignants du secondaire ou des ITA, ainsi que les actions spécifiques comme « Passion Recherche ») ;

- conception d'expositions temporaires ou permanentes (dans le même cadre que les conférences évoquées ci-dessus, mais plus spécifiquement pour la Cité des Sciences, le Palais de la découverte, l'exposition annuelle de l'Observatoire de Paris ou d'autres établissements de recherche) ;

- visites guidées d'observatoires et séances d'observation. Il convient de noter que ce type d'activité est organisé par la plupart des observatoires astronomiques, souvent avec l'aide d'associations au sein desquelles les chercheurs jouent un rôle important, de conseil mais aussi d'animation ;

- conception de programmes de planétarium et animation ;

- participations à des émissions de radio ou de télévision (le plus souvent en fonction de l'actualité astronomique) ou à la réalisation de films scientifiques ;

- écriture d'ouvrages (destinés au grand public, aux étudiants, aux astronomes amateurs) ;

- écriture d'articles pour des revues de vulgarisation ou pour des quotidiens ;

- mise en ligne d'informations sur le Web (actualité astronomique, cours, etc.) ;

- alimentation de la photothèque du CNRS en images, mais aussi d'établissements scolaires et universitaires.

Brevets

Il s'agit là principalement de brevets déposés pour de l'instrumentation faisant appel à des concepts d'optique originaux (pupille blanche, inversion champ-pupille) ou à des techniques de fabrication novatrices d'éléments optiques (miroirs asphériques, réseaux holographiques, etc.) mais cela peut toucher également

à l'électronique des détecteurs ou à tout autre partie de l'instrumentation de plus en plus diverse et variée qu'utilisent les astronomes, avec un domaine spectral qui s'élargit chaque jour davantage. De ce fait, les développements instrumentaux en astronomie font de plus en plus appel aux nouvelles technologies et sont toujours très pointus et très exigeants en terme de qualité et de précision.

Il convient enfin de souligner que les progrès en instrumentation astronomique ne touchent pas que les professionnels mais intéressent souvent le marché de l'astronomie d'amateur. Elles trouvent aussi parfois des applications dans d'autres domaines utilisant l'optique.

Logiciels

Les développements de logiciels spécifiques, que ce soit pour la simulation numérique, le traitement des données ou le pilotage des instruments, constituent une activité de plus en plus importante de l'activité des chercheurs. Certains de ces logiciels trouvent des applications inattendues dans la vie courante et constituent ainsi une retombée intéressante pour la société. L'exemple le plus significatif est sans doute celui de l'imagerie médicale.

Enfin, la mise au point de bases de données, qui se développe de plus en plus en astrophysique, peut également avoir des applications dans d'autres domaines et entre parfaitement dans le cadre des STIC.

Activités de consultant

Consultant auprès d'une entreprise (pour la fabrication de pièces optiques ou d'instruments par exemple).

Consultant auprès d'un architecte pour la réalisation de bâtiments destinés à accueillir des activités astronomiques (pour grand public, amateurs ou professionnels) ou pour la réalisation d'un cadran solaire, ou plus simplement encore pour étudier l'ombre portée par un bâtiment.

Consultant auprès du grand public (cette activité n'a en fait rien d'officiel et se situe à une échelle plus modeste que les deux cas précédents ; mais elle n'en est pas moins importante pour l'homme de la rue, lorsqu'il s'agit par exemple de guider quelqu'un dans le choix d'un instrument astronomique, dans la réalisation d'un cadran solaire, ou plus simplement dans l'identification d'un astre dans le ciel). Cette activité n'a rien d'anodin en raison des nombreux appels téléphoniques et courriers en tous genres que reçoivent régulièrement les observatoires.

Expertise

Expertise pour les assurances (notamment pour des accidents survenus à la suite d'un éblouissement de conducteur).

Expertise auprès de la police (pour des enquêtes ou des reconstitutions dans lesquelles la position de la Lune ou du Soleil a une importance cruciale).

Expertise auprès des tribunaux (pour des affaires criminelles dans lesquelles on a besoin, de la même façon, de connaître avec précision la position de la Lune ou du Soleil).

Relations avec les entreprises

Parmi les activités évoquées ci-dessus, celles de consultant, de dépôt de brevet ou de développement de logiciels peuvent tout naturellement amener les chercheurs à entrer en contact avec les industriels. Mais on peut également mentionner une activité de valorisation, qui consiste à amener les entreprises à se rapprocher des laboratoires de recherche publique afin de regrouper leurs forces et leurs compétences, il s'agit de la création de pôles technologiques. On peut citer, par exemple, la création dans le sud-est du pôle optique et photonique POPsud dont les initiateurs sont des astronomes.

L'astrophysique et l'enseignement

L'astrophysique est un élément attractif dans l'enseignement de la physique. Nos collègues anglais ont constaté, en introduisant davantage d'astrophysique dans les cours de physique à l'université, qu'ils arrivaient à arrêter l'hémorragie d'étudiants en physique que l'on constate partout en ce moment. Nos collègues québécois viennent de faire le même constat à l'Université de Montréal. Il s'agit donc là d'un élément de valorisation qui ne doit pas être négligé, même s'il concerne en premier chef les enseignants-chercheurs.

Dans l'enseignement secondaire, l'astrophysique joue un rôle important dans les programmes de physique. Cette implication conduit aussi les astrophysiciens à apporter aux enseignants des collèges et des lycées un enseignement spécifique. Il est à noter également que les TIPE spécifiques des classes préparatoires aux grands écoles scientifiques conduisent nombre d'étudiants à interagir avec notre communauté.

Réponse à des besoins spécifiques de la société

Il y a des missions spécifiques assignées aux astronomes par la société : établissement des références de temps et de fréquence, calcul des éphémérides, rotation de la Terre, surveillance des géocroiseurs, météo de l'espace. Une grande partie de ces tâches est assurée par l'IMCCE, qui contribue également aux types d'expertises évoquées au point) ci-dessus.

3 OBJECTIF DE LA VALORISATION TECHNIQUE

Si l'objectif de la valorisation culturelle est relativement clair, à savoir qu'elle doit principalement répondre à une demande d'information de la part du public, celui de la valorisation technique est plus difficile à appréhender.

Dans les domaines techniques et technologiques, la valorisation doit avoir un double objectif : ajouter de la valeur marchande aux développements issus des unités de recherche, ajouter de la valeur intellectuelle en assurant la diffusion des innovations vers la société en général, le milieu industriel et celui de la formation en particulier.

Disposons-nous des outils nécessaires, sont-ils bien connus et utilisés par les formations de recherche ? Quel peut être le rôle de la section ? Répondre à ces questions devrait nous fournir les grandes lignes de notre action pour les années à venir.

La valorisation « Marchande »

Elle se fait, essentiellement, par l'intermédiaire du brevet. Depuis de nombreuses années, l'une des critiques majeures faite aux organismes de recherche est de ne pas déposer suffisamment de brevets. La procédure de dépôt de brevet n'est toujours pas entrée dans la culture des laboratoires et elle reste une « corvée » pour ceux susceptibles de l'utiliser. Il est grand temps de rappeler que la valorisation « marchande » et la protection des découvertes et des inventions font partie des missions du service public de recherche. Le CNRS s'est doté d'un service de valorisation qui, au niveau régional, dispose des moyens pour aider les unités dans leurs démarches. Les délégations régionales et les unités doivent interagir pour que l'information se fasse. La visite des laboratoires par des spécialistes de la valorisation, la nomination dans les formations d'un correspondant valorisation améliorerait le fonctionnement de l'ensemble ; enfin, les sections du Comité National devraient prendre en compte les performances des laboratoires dans ce domaine lors de l'évaluation.

La valorisation intellectuelle

Dans ce domaine, il n'existe pas de solution unique, mais divers moyens sont à notre disposition.

La publication dans des revues techniques

Elle est encore peu utilisée. Les revues techniques et technologiques sont moins connues que les revues scientifiques et sont beaucoup plus nombreuses dans certains secteurs (STIC et SPI) que dans d'autres. Il n'en reste pas moins que les développements instrumentaux du secteur SDU peuvent très bien faire l'objet de publications dans des revues relevant des STIC, de SPI, voire de SPM. Un effort doit être fait en direction des ingénieurs pour les informer des revues existantes et les inciter à fournir cet effort de valorisation.

Les réseaux de métiers

Le CNRS a favorisé la création de réseaux nationaux et régionaux autour d'une profession (réseau des mécaniciens, des électroniciens, des informaticiens, etc.). Ces réseaux permettent l'échange de savoir et de savoir-faire entre les membres d'une même discipline technique au service de disciplines scientifiques différentes. L'organisation de rencontres annuelles avec la participation de chercheurs et de représentants de l'industrie (cours, séminaires) donne les moyens de réfléchir sur le devenir des métiers et peut déboucher sur des actions de rationalisation dans certains domaines (logiciels par exemple). On ne peut qu'encourager de telles actions et faire en sorte que les ITA participent à ces réseaux.

Colloques nationaux et internationaux

Dans les domaines techniques et technologiques, ce genre de manifestation reste exceptionnel. Il serait bon que les Sections du CNRS encouragent l'organisation de telles réunions et qu'elles donnent aux ITA notamment les moyens d'y participer.

4 CONCLUSION

Longtemps ignorée dans la carrière des chercheurs, voire même dénigrée pour ce qui est de l'aspect diffusion des sciences, la valorisation est officiellement reconnue depuis une vingtaine d'années, puisqu'elle est explicitement mentionnée dans le rapport d'activité des chercheurs du CNRS.

Force est de constater, toutefois, que les chercheurs consacrant une part non négligeable de leur temps aux actions de valorisation ont été jusque là plutôt pénalisés dans le déroulement de leur carrière par rapport à leurs collègues se consacrant à plein temps à la recherche pure et dure, principalement du fait que ce type d'activité est plus difficilement quantifiable.

On peut espérer, dans l'avenir, une meilleure prise en considération de ce type d'activité, au vu notamment des idées affichées par la directrice générale du CNRS, Geneviève Berger (par exemple les entretiens parus dans la revue Campus n° 43 de septembre 2000, et dans « Le journal du CNRS » de janvier 2001) et par son président, Gérard Mégie (par exemple l'entretien paru dans « Le journal du CNRS de mai 2001 »). D'autant que l'un des axes de réflexion principaux retenus par le président et le conseil d'administration du CNRS dans le cadre de la mise en place d'un schéma stratégique global est libellé comme suit : *Valoriser les relations avec les entreprises, les décideurs politiques et la société.*

La concrétisation de ces idées a d'ailleurs commencé avec les passages DR accordés au titre de la valorisation et on ne peut que l'encourager.

Compte tenu de la forte demande d'information de la part du public pour tout ce qui touche à l'astronomie et à l'espace il ne semble pas déraisonnable d'attribuer à la Section 14 des postes supplémentaires spécifiquement orientés vers la valorisation, et plus spécifiquement la diffusion des sciences, avec par exemple **un passage DR supplémentaire par an à ce titre** (on peut aussi envisager

la création de postes CR spécifiques, bien que cela paraisse plus difficile dans l'évaluation et le suivi). Cela permettrait effectivement de satisfaire un des souhaits émis par le président et le conseil d'administration sur la place de la valorisation dans les axes de réflexion stratégique définis par le CNRS (extrait du texte paru dans « Le journal du CNRS » de mai 2001, page 6) :

– développer une stratégie de communication et d'information scientifique et technique, et participer au renforcement de la place de la science dans la société et de son rôle culturel ;

– en ce qui concerne plus spécifiquement la valorisation technique, il apparaît que nous disposons d'outils efficaces permettant de réaliser des actions de valorisation technique et technologique. La Section14 peut avoir un rôle important dans deux domaines :

– l'information, en rappelant aux unités les moyens qui sont à leur disposition,

– la reconnaissance des actions de valorisation dans l'évaluation de l'activité des ITA et des chercheurs.