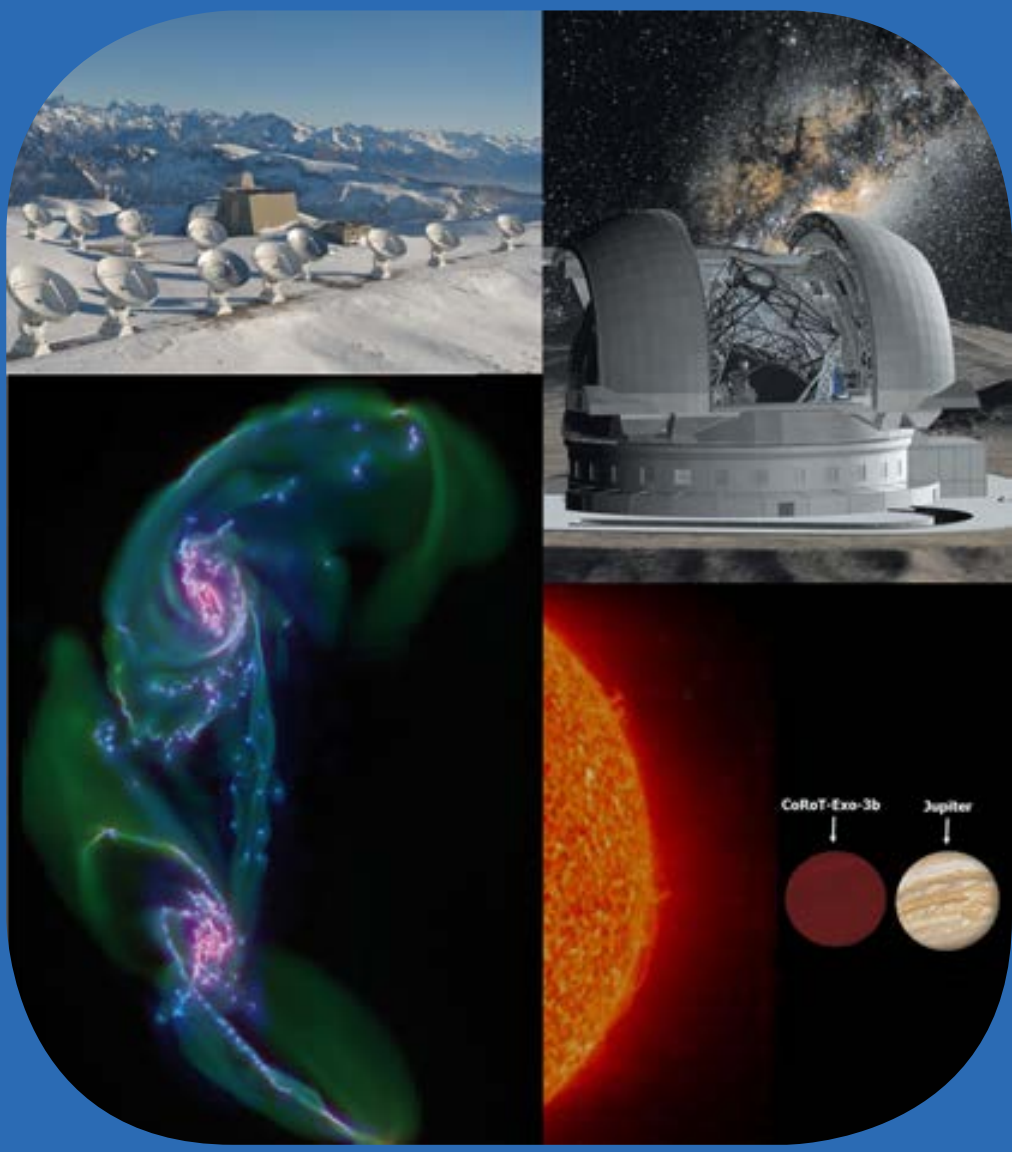
Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



cnrs INSU
Observer & comprendre

Astronomie - Astrophysique
2010 - 2015

A la mémoire de Pierre Valiron,
président de la commission spécialisée Astronomie-Astrophysique
lors du lancement de cet exercice de prospective

LA PROSPECTIVE ASTRONOMIE-ASTROPHYSIQUE 2009: INTRODUCTION

Françoise Genova

L'astrophysique aujourd'hui

Les grandes questions de l'astrophysique aujourd'hui tournent autour de la question des origines : origines de l'Univers, des systèmes solaires, de la vie. C'est, comme les autres disciplines de l'INSU, une science observationnelle, basée sur le recueil sur le long terme de grandes masses de données par des instruments très divers, au sol et dans l'espace. Ces instruments sont en général bâtis autour de collaborations internationales, bilatérales ou multilatérales, souvent à l'échelle européenne. Deux agences intergouvernementales mettent en place au niveau européen des moyens pour la discipline, l'Observatoire Austral Européen (European Southern Observatory - ESO) et l'Agence Spatiale Européenne (European Space Agency – ESA), ainsi que plusieurs sociétés internationales comme l'IRAM et le TCFH. Les Très Grandes Infrastructures de Recherche sont donc un composant majeur pour la discipline, sans lesquels celle-ci n'existerait simplement pas. De même, les Services d'Observation mis en place en support au recueil de données jouent un rôle fondamental.

La préparation et l'utilisation des grands instruments requièrent une organisation nationale forte, et la mise en réseau des compétences au niveau national et international – les différents aspects de l'activité de recherche s'effectuent de plus en plus au sein de grands consortia.

L'interdisciplinarité est également un élément constitutif de l'astronomie, et de nombreuses interfaces existent avec les disciplines intéressées par les questions et les objets étudiés.

Les prospectives

L'une des grandes avancées récentes pour la discipline a été la création en 2005 par les agences européennes de recherche en astronomie du réseau ASTRONET, dans le cadre des ERA-NET mis en place par la Commission Européenne pour encourager la coordination des activités de recherche dans les pays membres et associés. L'objectif d'ASTRONET, qui est coordonné par le CNRS/INSU, est d'établir une planification sur le long terme pour l'astronomie en Europe : cela est passé en particulier par l'établissement d'une « Vision scientifique pour l'astronomie européenne », qui a produit en 2007 un document détaillé qui identifie les questions clés des vingt prochaines années :

- comprenons-nous les extrêmes de l'Univers ?
- comment les galaxies se forment-elles et évoluent-elles ?
- quelles sont l'origine et l'évolution des étoiles et des planètes ?
- comment nous et notre système solaire trouvons-nous notre place ?

Ces questions recoupent – heureusement - celles identifiées par l'exercice « Cosmic Vision 2020 » mené vers la même époque par l'Agence Spatiale Européenne :

- quelles sont les lois fondamentales de l'Univers ?
- comment l'Univers s'est-il formé et de quoi est-il fait ?
- comment le système solaire fonctionne-t-il ?
- quelles sont les conditions nécessaires à la vie et à la formation des planètes ?

C'est sur ces questions que se construit la stratégie de développement des moyens instrumentaux en Europe. Elles ont servi de base à la « Feuille de Route » européenne des infrastructures publiée par ASTRONET en 2008, qui inclut les très grandes infrastructures du Forum ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) et les projets spatiaux.

Au niveau national, l'INSU organise régulièrement des exercices de prospective pour chacune de ses disciplines – le premier exercice de prospective national pour

l'instrumentation en astronomie remonte à 1987. Les Sections du Comité National produisaient en parallèle leurs rapports de conjoncture et de stratégie scientifique. Depuis 1998, l'exercice de prospective est mené de façon conjointe par la Section et par la Commission Spécialisée Astronomie et Astrophysique.

La prospective Astronomie-Astrophysique 2009

L'exercice de prospective dont les conclusions font l'objet du présent document a mobilisé la communauté en 2009. Il a combiné une analyse détaillée du positionnement national en terme de priorités scientifiques, des forces et des faiblesses de la communauté dans les différents champs disciplinaires, avec l'établissement d'une stratégie de développement des moyens : grands instruments sols et moyens d'accompagnement, ainsi qu'une analyse de l'organisation de la discipline (y compris pour l'enseignement et la diffusion des connaissances), du contexte national et européen, des Services d'Observation, et des personnels et métiers. Une attention particulière a été également portée aux interfaces interdisciplinaires et aux synergies sol-espace – le CNES avait réalisé son propre exercice de prospective des moyens spatiaux début 2009, réaffirmant la priorité donnée aux programmes de l'ESA et à l'exploitation des instruments. Plus généralement, l'exercice de prospective a permis de positionner la prospective nationale par rapport aux prospectives européennes.

Pour ce qui concerne les priorités des champs thématiques, l'exercice a été réalisé sur la base des Programmes Nationaux qui structurent la discipline, en tenant évidemment compte des « grandes questions » posées au niveau européen mais en les croisant avec la vision nationale de la discipline. Ces Programmes, le Programme National Cosmologie et Galaxies (PNCG), le programme Physique Chimie du Milieu Interstellaire (PCMI), le Programme National de Physique Stellaire (PNPS), le Progamme National Soleil-Terre (PNST), le Programme National Planétologie (PNP), et le GdR Phénomènes Cosmiques de Haute Energie (PCHE), ont été largement mis à contribution pour la discussion et la rédaction des aspects scientifiques de la prospective, y compris pour la définition des besoins en terme de moyens.

Ce document de prospective est publié par l'INSU à la suite du Colloque final, qui s'est tenu à La Londe Les Maures en octobre 2009. Les différents chapitres résument les analyses de l'exercice de prospective et les conclusions du Colloque.

Sommaire

Synthèse	p. 5
Contribution à la prospective thématique	p. 15
Evolution des moyens et nouveaux moyens à 5 - 10 ans	p. 63
R&D et les moyens du futur	p. 87
Astrophysique de Laboratoire	p. 89
Calcul, archivages, OV, logiciels	p. 99
Valorisation	p. 109
Europe	p. 117
Les interfaces interdisciplinaires de l'astronomie	p. 123
Enseignement - Diffusion des connaissances	p. 137
Prospective spatiale : synergies et comparaison sol/espace	p. 147
Personnels et métiers	p. 163
Services d'Observation, évaluation et évolutions	p. 173
Organisation nationale	p. 181
Ensemble des résumés exécutifs	p. 185

Photos en couverture : en haut à gauche, projet NOEMA. © IRAM. A droite, projet E-ELT. © ESO. En bas à gauche, simulation de la collision des deux galaxies des Antennes. © AIM. A droite, dessin d'artiste représentant CoRoT-exo-3b. © LAM. OAMP.

J.L.Puget Institut d'Astrophysique Spatiale

Cette synthèse ne reprend pas l'ensemble des recommandations des groupes de travail dont les rapports constituent la base de cet exercice de prospective. La synthèse replace cette prospective dans un contexte plus large (national/international, sol/spatial) et reflète les principaux débats durant trois jours à La Londe les Maures sur ces rapports et sur les questions spécifiquement posées par l'INSU. Les recommandations apparaissent en gras italique.

L'astronomie : d'abord une activité culturelle mais aussi une discipline à vocation utilitaire

L'astronomie est issue de l'observation du ciel qui remonte inévitablement très loin dans l'histoire de l'humanité. Depuis l'antiquité, on a nommé les objets célestes en séparant ceux qui étaient fixes des objets vagabonds.

Ces observations ont d'abord servi à la mesure du temps rythmé par les jours, les cycles lunaires et le cycle annuel. Elles se sont aussi attachées à des tentatives d'explications à caractère magique des événements humains avec les astrologues.

L'astronomie devient une discipline scientifique au sens moderne relativement récemment (début du XVIIème siècle), avec l'invention de la lentille optique par les Hollandais et de la lunette astronomique par Galilée, mais surtout avec l'établissement des grands observatoires, l'Observatoire de Paris puis celui de Greenwich en particulier, avec comme objectif l'établissement des éphémérides en vue de la mesure des longitudes pour la navigation lointaine. Ces objectifs étaient bien sûr motivés par des considérations économiques et militaires.

En parallèle, l'astronomie a gardé un lien très fort avec de grandes questions philosophiques : quelle est l'organisation des astres et comment prédire leur mouvement, la Terre est elle le centre du monde, l'humanité y joue-t-elle un rôle central avec un but qui la transcende ? L'Univers est-il fini ou infini était une question que se posaient les grands humanistes de la renaissance, et Giordano Bruno a fini sur le bucher à Campo di Fiori en 1600 pour avoir affirmé la pluralité des mondes dans un Univers infini qui contredisait le dogme religieux dominant en Europe.

L'astronomie est donc bien ancrée depuis le début des temps historiques, et probablement préhistoriques, dans l'histoire de l'humanité et de ses questionnements les plus fondamentaux.

Cette position centrale dans la culture reste très présente aujourd'hui puisque les grandes questions actuelles de l'astronomie, sur lesquelles on reviendra plus en détail dans la section 2, sont directement liées à de grandes questions philosophiques. Les systèmes planétaires sont-ils communs autour des étoiles (question de la « pluralité des mondes » enfin résolue) et quels sont les mécanismes de leur formation, l'existence ou non de formes de vie extraterrestres (question qui restera probablement ouverte pendant un bon nombre d'années même si on s'occupe activement dès aujourd'hui des moyens d'y répondre), quelle est la structure et l'histoire de notre Univers et quelle est la physique qu'il révèle, enfin quelles sont les limites de l'exploration scientifique de ces questions ?

L'astronomie est une science observationnelle. Le dire peut sembler une évidence mais elle n'est pas sans conséquences. L'astronomie peut servir à illustrer d'autres disciplines (les mathématiques, la physique et la chimie) auprès des collégiens, lycéens et étudiants, même si elle ne peut pas se substituer à une expérience et à une éducation à la méthode expérimentale, fondement de la démarche scientifique.

Les sciences observationnelles (toutes les disciplines de l'INSU en font partie) rencontrent des questions méthodologiques spécifiques du fait même qu'elles ne sont pas des sciences expérimentales. Dans ces domaines, la méthode scientifique remplace la vérification expérimentale des modèles et théories par la statistique. On ne peut pas changer la masse d'une étoile mais on observe assez d'étoiles de masses très différentes (ou de compositions chimiques ou d'âges différents) pour tester les effets de ces paramètres sur les observables prédites par les théories et modèles. Les questions épistémologiques deviennent beaucoup plus difficiles quand on étudie des objets uniques à histoire unique dont l'Univers dans son ensemble est le meilleur exemple. Ceci était le cas jusqu'à récemment pour le Système solaire - excepté le Soleil qui est une étoile parmi beaucoup d'autres - mais aussi pour la Terre puisque le petit nombre de planètes telluriques et leurs paramètres très différents interdisent une approche statistique. La découverte des planètes et systèmes planétaires extrasolaires en nombre croissant change radicalement ce problème.

En paléontologie, ou en histoire, les traces laissées aux scientifiques sont de moins en moins lisibles et fraiches au fur et à mesure que l'on remonte loin dans le temps. La question de la nature de la vie et de son origine est bien sûr une de ces questions fondamentales pour laquelle il est probable que les traces de l'évolution initiale de la vie soient minces (ou même totalement détruites) sur Terre. Les biologistes sont donc réticents à s'engager fortement sur ces questions pour des raisons évidentes, puisque les tests des modèles et théories sont probablement hors de portée de l'expérimentation à échéance courte ou moyenne. On voit bien que les observations significatives pour cette question passent probablement par la recherche de signatures biologiques sur les exoplanètes.

La cosmologie est un cas différent et encore plus extrême. Le cosmologiste a le privilège extrême d'observer directement le passé, aussi lointain soit-il, tant qu'il trouve un porteur d'informations pour lequel l'Univers est transparent depuis l'époque visée. Cependant il n'observe évidemment que l'Univers observable dans lequel nous vivons. Nous observons seulement l'Univers observable mais nous l'observons dans le temps jusque là où les porteurs d'informations que nous sommes capables de détecter (directement ou indirectement) nous portent, potentiellement jusqu'aux tous premiers instants. Par contre, si la relativité restreinte reste vraie à ces échelles, nous n'observons que la partie spatiale de l'Univers située assez près pour que l'information ait eut le temps de nous parvenir. La cohérence entre observables très différentes et potentiellement indépendantes reste alors l'outil imparfait de l'approche scientifique, qui pourrait se trouver fondamentalement limitée par la nature inhomogène de la physique aux échelles plus grande que l'horizon de l'Univers observable. La cosmologie est donc bien, par sa nature même, indissociable de la physique fondamentale établie dans nos laboratoires et nos accélérateurs - pour lesquels, aussi grands soient-ils, les énergies accessibles sont limitées.

L'astronomie se trouve donc occuper pour d'autres disciplines une position centrale, puisqu'elle seule peut apporter à celles-ci (physique, biologie, planétologie, et géophysique) les observations d'autres objets d'études similaires mais de caractéristiques physiques plus ou moins radicalement différentes de leurs traditionnels objets d'études (expérimentales ou observationnelles). Ceci est une relation différente des interdisciplinarités méthodologiques ou de questions aux frontières bien connues entre sciences expérimentales ou entre celles-ci et les mathématiques.

L'astronomie se doit donc, quand elle cherche à définir son avenir à moyen et long terme, de garder ces questions présentes car elles dépassent les questions d'une organisation de la recherche issues d'une histoire contingente ou de considérations liées aux applications de l'astronomie.

La part purement scientifique de la prospective : les grandes questions de la décennie à venir

La prospective de la section astronomie et astrophysique de l'INSU, acteur national de l'astronomie (opérateur de recherche et agence de moyens dans la nouvelle organisation de la recherche), se doit donc de partir avant tout des grandes questions scientifiques qui vont dominer la recherche dans les 10 ans à venir (même si elle ne doit pas ignorer les liens avec les question sociétales).

Cette astronomie se fait et se construit en grande partie à l'échelle européenne et même à l'échelle mondiale pour les plus grands instruments sol et spatiaux. Les grandes questions scientifiques ne sont pas attachées de façon simple à des moyens sol ou spatiaux, nationaux ou internationaux. Le rôle des exercices de prospective est bien d'établir ces questions et de les distribuer entre les différents niveaux et acteurs. L'Europe a longtemps souffert d'un retard par rapport à l'Amérique du Nord dans l'organisation de ce travail au plus haut niveau, effectué par les « decadal surveys » de la National Academy des USA (on verra dans la section 7 qu'inversement, notre discipline a aujourd'hui d'autres outils qui font cruellement défaut à nos collègues d'outre atlantique).

On ne peut que se féliciter de l'initiative prise par les agences académiques de la recherche en astronomie dans l'Union Européenne, sous l'impulsion de la division AA de l'INSU en 2005, de créer le réseau ASTRONET en réponse à l'appel d'offre ERA-NET pour prendre en charge un exercice de prospective amont transnational de l'astronomie couvrant les grands projets potentiels aussi bien sol que spatiaux.

Les grandes questions pour la décennie à venir ont été bien mises en évidence par ASTRONET et les très grandes infrastructures de l'astronomie du futur ont été regroupées dans un plan ESFRI (voir le rapport de TE). Les deux grandes agences européennes de l'astronomie, l'ESO et l'ESA ont elles aussi développé des plans stratégiques (Cosmic Vision pour l'ESA et Plan stratégique pour l'ESO). On y retrouve les mêmes grandes questions, qui sont aussi celles qui sont sous jacentes à l'exercice de prospective INSU qui se les est appropriées, comme il ressort du rapport préparé par la Section et les Programmes Nationaux présenté le premier jour. Ce plan est bien le cadre général scientifique dans lequel s'inscrit cet exercice de prospective de l'INSU.

L'organisation de l'astronomie en Programme nationaux trans-organismes a permis de développer une vision nationale de ces priorités scientifiques rapportées dans les rapports inclus dans ce document.

Ce pavage des thématiques liées à l'astronomie doit être non seulement pérennisé, mais étendu en transformant le GDR PCHE en Programme National, la thématique étant définie comme celle de l'astrophysique des objets extrêmes et non pas de l'observations de photons et particules de grandes énergies. La physique fondamentale pour sa thématique étude de la gravitation, du temps fréquence et des référentiels, est fortement liée à l'astronomie et cet ensemble doit être structuré par la création d'une action spécifique GRAM.

Une action spécifique Exoplanètes ou au moins un groupe de travail consacré à l'instrumentation permettrait de consolider la mise en œuvre des priorités sur ce thème essentiel avec les aspects multi longueur d'onde et observations sol versus espace abordés dans le rapport ESO-ESA mais pas définitivement conclus (cette structure n'a pas vocation à se substituer aux programme nationaux concernés qui doivent garder une vision thématique complète).

Il est clair qu'il est indispensable que l'Europe continue de disposer d'un outil de prospective amont, qui passe probablement par la pérennisation d'ASTRONET sous une forme ou une autre, et que les agences nationales ou internationales reconnaissent ce cadre et soutiennent ce travail. Elles sont, en particulier l'ESO et l'ESA, et les agences nationales chargées de l'astronomie ou agences spatiale nationales, les agents de la mise en œuvre de

cette prospective scientifique à très long terme.

Le contexte et les objectifs de cette prospective

Cette prospective s'inscrit donc dans une perspective à très long terme de grandes questions avec des interfaces interdisciplinaires en évolution rapide (système planétaires, vie extraterrestre, objets effondrés en particulier les trous noirs, cosmologie).

Les agences européennes (ESO et ESA) les déclinent en grands projets dans lesquels la prospective INSU doit choisir où s'investir. Il faut aussi se souvenir que les plus grands projets dépendent de collaborations à l'échelle mondiale, comme ALMA ou les grands observatoires et relevés spatiaux (par exemple Herschel, JWST, SPICA, IXO, Mars Sample Return, LISA, Planck, Euclid, …). Enfin on voit émerger de nouvelles forces avec les pays émergents (Inde, Chine, Brésil, Sud-Est asiatique) qui modifient radicalement le paysage de l'avenir de l'astronomie à dix ans et qu'il faut prendre en compte.
Dans le contexte national, l'INSU doit, pour l'astronomie, travailler avec un nombre accru de partenaires : en France, le CNES (en charge de la prospective et de la mise en œuvre de la partie spatiale), le CEA, les autres instituts du CNRS, les universités (acteurs nouveaux de la politique scientifique) et à l'international.

Il est donc clair que la mise en œuvre de cette prospective par l'INSU se fera à la fois en faisant valoir ses propres priorités auprès de ces partenaires, mais aussi en s'inscrivant dans les contraintes dictées par leurs choix. Ce sera à la direction et aux instances de l'INSU de faire évoluer les priorités dégagées ici en fonction de ce contexte complexe.

Il est bon de rappeler que l'astronomie/astrophysique en France est menée par environ 800 (enseignants-) chercheurs permanents, 300 doctorants et post doctorants, et par un nombre comparable d'ingénieurs, techniciens et administratifs. Tous ne sont pas au sein de l'INSU ; certains sont au CEA ou à l'IN2P3. Les projets sont réalisés et/ou financés dans le cadre d'organismes ou de sociétés internationaux (ESO, ESA, CFHT, IRAM) ou d'organismes partenaires (CEA, CNES, ONERA, ...).

Les personnels techniques des laboratoires sont un des atouts critiques des équipes françaises en contribuant pour une large part à la réalisation des instruments, à leur exploitation et à la mise à disposition efficace des données, avec une continuité et une pérennisation des compétences qui n'est pas possible dans les pays finançant ces fonctions uniquement sur contrats de projets. Il faut donc maintenir une fraction substantielle de postes technique permanents qui ne devrait pas descendre significativement en dessous de la fraction actuelle.

Il faut enfin noter que le financement total annuel de l'astronomie est de 250 M€, soit environ 0,3 M€ par chercheur.

Le but de l'exercice de prospective AA de l'INSU est donc de discuter des priorités de la communauté française pour :
- s'inscrire dans les grands projets internationaux ;
- développer des projets nationaux complémentaires ;
- participer à l'extraction et la diffusion de l'information scientifique de l'ensemble des données mise à la disposition de la communauté scientifique internationale, que nous ayons ou non participé à la construction des instruments correspondants.

Il faut donc définir des priorités entre projets où nous jouerons un rôle majeur et les participations mineures à des projets qui complètent la couverture des grandes questions, mais aussi passer en revue nos structures et discuter de leur évolution. Cet exercice se place, de ce point de vue, dans une période de réforme profonde du dispositif de la recherche et de l'Enseignement Supérieur : loi LRU, rôle accru des instituts nationaux dans la conduite de la politique de recherche, grands campus/PRES regroupant non seulement les universités mais aussi des écoles d'ingénieurs et des EPIC et finalement rôles respectifs des acteurs de la recherche (laboratoires, universités et agences de moyens) avec les acteurs de l'industrie.

La prospective de l'astronomie à l'échelle européenne doit être maintenue et développée comme la référence commune des agences nationales et internationales européennes en astronomie, que cette recherche soit mise en œuvre par les acteurs traditionnels de l'astronomie et dont c'est l'activité dominante ou par ceux appartenant aux disciplines pour qui l'astronomie apporte des informations uniques (la physique des particules et la physique nucléaire, la physique fondamentale, la géophysique ou la biologie).

Les grands projets et leur cadre de réalisation

Les sociétés internationales CFHT, IRAM, ESO, ESA sont plus que jamais les acteurs permettant à l'Europe de prendre une place de premier plan dans la recherche mondiale en astronomie. Les très grands projets où l'Europe est leader passent inévitablement par ces structures. Des participations nationales sont par ailleurs l'outil complémentaire pour les thématiques où l'Europe n'a pas le leadership.
Les plans de jouvence de ces sociétés internationales pour ce qui relève du chapitre correspondant de leur budget annuel ont été approuvés par la prospective.

Les très grands projets du futur se trouvent par contre de fait en compétition au sein de ces sociétés internationales.

Les très grands projets au sol

Pour les très grands projets au sol la question était de dégager

parmi les priorités ASTRONET les projets prioritaires pour notre communauté et d'en classer un très petit nombre. Le projet **« European Extremely Large Telescope »** (E-ELT) dans le domaine des observations en lumière visible et infrarouge proche donnera une extrême résolution angulaire et sensibilité. Ce télescope permettra des avancées spectaculaires dans de nombreux domaines de l'astrophysique, en particulier les planètes telluriques extrasolaires, les galaxies lointaines et la cosmologie. Son classement résulte aussi de son degré avancé de définition et de préparation technologique et de l'implication très forte de équipes françaises dans sa préparation (en particulier dans les études d'instruments focaux à très hautes performances).

L'E-ELT a été clairement mis en première priorité.

Classé en seconde priorité dans cette classe vient le projet franco-allemand de réseau de télescopes Cerenkov pour la détection des photons gammas de haute énergie CTA.

Ce projet correspond au développement de la troisième génération de télescopes dans un domaine où les équipes françaises ont aussi pris une position parmi les meilleures. Ce secteur a été plus particulièrement développé par l'IN2P3 dans le passé. Les objectifs scientifiques sont principalement liés à l'observation des phénomènes à haute énergie autour des objets effondrés. Les résultats spectaculaires obtenus par la collaboration HESS montrent le potentiel considérable de cette nouvelle astronomie et de CTA, observatoire de troisième génération. Ce projet est retenu pour son importance scientifique très claire et pour renforcer l'implication croissante et indispensable des laboratoires de l'INSU dans ces observations.

Les autres grands projets de la liste de projets retenus par ASTRONET ne sont pas des priorités nationales pour une réalisation dans le calendrier de cette prospective :
Le projet SKA est clairement identifié comme le concept du futur pour les observations au sol dans le domaine des radiofréquences qui apportera des capacités d'observations uniques dans de nombreux domaines de l'astronomie. Cependant, il n'est pas au même degré de définition que le projet de même classe retenu ci dessus (E-ELT) ; il doit être fortement soutenu pour les études préparatoires.

Cette préparation doit être structurée par la mise en place d'une Action Spécifique SKA-LOFAR.

Le projet « European Solar Telescope » EST doit faire l'objet d'une action préparatoire pour structurer la communauté. Le projet de détection des neutrinos de haute énergie Km3NET n'a pas été jugé assez mûr.

Les projets internationaux de classe intermédiaire (5 à 15 M€)

Ces projets avec différents degrés de participation sont, comme on peut s'y attendre, plus nombreux et conduisent à des choix moins tranchés au vu des incertitudes du contexte international pour les trois projets retenus.
Le projet NOEMA d'extension de l'interféromètre millimétrique de l'IRAM a été classé en tête de ces projets pour maintenir un leadership mondial incontesté des équipes franco-germano-espagnoles dans ce domaine et pour des objectifs scientifiques essentiels de ce domaine de fréquence en parallèle aux observations à haute résolution angulaire du JWST dans l'espace et d'ALMA dans le submillimétrique. L'interféromètre de l'IRAM est en effet le meilleur instrument pour la détection des raies moléculaires millimétriques dans les objets à grands redshifts et l'étude des objets protostellaires.

Un autre projet d'extension d'un moyen d'observation ayant des capacités uniques est l'interféromètre optique de l'ESO (VLTI) avec un nouvel instrument de recombinaison d'image et l'adjonction de deux télescopes auxiliaires. Cette extension devrait permettre de faire beaucoup plus efficacement de l'imagerie en utilisant uniquement les télescopes auxiliaires. ***Ce projet est classé derrière le projet NOEMA car le VLTI dans sa version actuelle n'est pas encore complètement opérationnel. La décision dépend bien sur d'une décision par le conseil de l'ESO dans un calendrier similaire à celui de l'E-ELT (qui reste donc incertaine).***

Le plus grand projet sol dans le domaine des relevés massifs de galaxies dans le visible, destiné en particulier à établir les propriétés des forces à l'origine de la ré-accélaration de l'Univers et à contraindre leur nature physique, est le projet américain LSST. ***L'implication des équipes françaises dans les grands relevés précédents et leur instrumentation (en particulier avec MegaCam) conduit à le retenir aussi avec une forte priorité dans cette classe.*** Ce projet comprend un volet instrumental sur les caméras principalement dans les laboratoires de l'IN2P3 et un volet traitement des données partagé entre INSU et IN2P3. Ce projet dépend de la priorité qui lui sera donnée dans le « decadal Survey » américain et d'un apport suffisant de partenaires étrangers.

Les deux autres projets de ce type où on recherche une participation française mineure sur une thématique importante (BigBOSS et CCAT) ont été reconnus d'un grand intérêt scientifique mais classés derrière LSST.

L'évolution du contexte devra être prise en compte par les instances de l'INSU pour décider si une contribution sur de tels projets peut se faire dans le calendrier de cette prospective.

Les moyens nationaux

Ceux-ci ont été définis comme étant les télescopes et/ou instruments d'importance scientifique majeure pour faire l'objet d'un engagement à moyen ou long terme de l'INSU, pouvant inclure une jouvence significative des instruments et leur fonctionnement sur une période de l'ordre de 5 ans suivant ces jouvences.

Les moyens observationnels retenus dans ce cadre ont été le TBL-Narval au Pic du Midi et l'OHP-Sophie. Ce classement est fondé sur les résultats scientifiques majeurs obtenus par ces instruments sur des télescopes de la classe 2 mètres. L'engagement pluriannuel est pour l'instant limité à 2015.

Le radiotélescope de Nançay arrive à la fin de l'engagement pluriannuel, pris à la suite de la prospective de Carqueiranne et

les programmes scientifiques proposés rentrent dans le cadre des programmes dont le soutien par l'INSU est discuté année par année en parallèle avec le soutien de l'établissement et/ou de la région dont dépend le projet ou l'équipe. Ceci n'implique donc pas un retrait du soutien INSU mais la disparition du niveau de soutien pluriannuel garanti. La station de Nançay peut et doit développer ses projets dans le cadre d'une stratégie de l'OSU région Centre vers LOFAR et SKA.

L'Observatoire de Paris et les OSU concernés par l'évolution de ces trois moyens nationaux doivent préparer dès maintenant ces transferts de compétence de l'INSU vers eux-mêmes et des supports régionaux pour une prise de décision en 2012.

Le CDS et les activités « système de référence espace-temps » sont des services qui ont vocation à rester moyens nationaux. Le CDS a maintenant le statut de TGIR qui lui assure la pérennité nécessaire à son rôle international central dans le développement de l'Observatoire Virtuel.

L'astronomie au Dôme C est une activité d'importance comparable aux activités géophysiques. Les propositions de nouveaux grands instruments n'ont pas encore démontré un avantage décisif du site justifiant les coûts supplémentaires d'implémentation.

La caractérisation du site doit être terminée et évaluée. Une revue de projet sur les activités liées à l'évaluation du site et portés notamment par le laboratoire FIZEAU devra aussi être tenue avant toute décision d'implémentation d'un projet majeur d'astronomie au Dôme C. Aujourd'hui l'astronomie au Dôme C n'est pas une priorité de la discipline au moins à court terme.

Les projets instrumentaux de classe internationale

Les projets retenus sont dans cet ordre :
L'instrument de spectro-polarimétrie SPIRou pour le CFHT et un spectrographe multi objets grand champ pour le suivi de la mission spatiale d'astrométrie GAIA (jugé de haute priorité scientifique mais dans un état de définition insuffisant pour être classé en tête).

La synergie Sol Espace

La prospective nationale en astronomie spatiale a été élaborée à Biarritz en Mars 2009. L'abandon de SIMBOL X a déstabilisé une partie de la communauté et a montré les difficultés de combiner un démonstrateur d'une nouvelle technologie spatiale (le vol en formation) avec des objectifs scientifiques ambitieux.

L'astronomie spatiale reste centrée sur les projets de l'ESA avec Cosmic Vision et le programme Exploration clairement affichés comme prioritaires mais devant laisser un espace pour des missions d'opportunité permettant ponctuellement de couvrir des thématiques non couvertes par les missions ESA. La réflexion sur la comparaison des mesures devant être faites plutôt au sol ou dans l'espace a commencé à se structurer avec les rapports ESO-ESA sur les exoplanètes et l'exobiologie et celui sur l'énergie noire.

Cette démarche doit être poursuivie. Plus important, les conclusions de tels rapports devraient être utilisées plus efficacement dans l'établissement des plans stratégiques des agences internationales et dans les exercices de prospective qui dans le passé ont parfois éludé ces questions.

Le rapport préparatoire a bien mis en évidence les sujets et projets où des suivis sols sont indispensables à une exploitation optimale de missions spatiales (comme par exemple CoRoT, GAIA et PLATO s'il est sélectionné). Il faut que ces accompagnements sol soient pris en compte dès la conception de la mission et que des discussions s'engagent pour savoir quels télescopes sont disponibles (ceux de la classe 1 à 4 m sont typiquement ce qui est recherché) et quelle est l'instrumentation spécifique nécessaire. Le cas de SVOM pour lequel un tel suivi a été identifié dans le projet mais rencontre des problèmes de mise en œuvre liés aux surcoûts du projet montre la nécessité d'une concertation régulière CNES/INSU pour dégager les meilleures solutions quand de tels problèmes apparaissent.

L'astrophysique de laboratoire

L'astrophysique de laboratoire est une composante indispensable pour l'interprétation des multiples observations et données de l'astronomie. Elle repose en partie et pour de bonnes raisons sur des collaborations interdisciplinaires et ses moyens humains et matériels ne viennent pas tous de l'astronomie mais restent très dépendants de celle-ci. Les augmentations de moyens pour ce type de recherche doivent d'abord venir des collaborations extérieures pour accroître le périmètre des compétences dans ce domaine interdisciplinaire, sans toutefois amoindrir l'effort déterminant de l'INSU dans cette thématique

La recherche en amont

La recherche en amont des projets implique des profils assez différents et pas seulement des instrumentalistes de laboratoire. La recherche de technologies pointues permettant d'envisager de nouveaux types d'observation est clairement critique pour garder la place privilégiée de la communauté astronomique française dans un certain nombre de domaines. Ces éléments sont aussi bien des détecteurs de photons à toutes les fréquences, de particules ou d'ondes gravitationnelles, que des composants optiques nouveaux ou des cryogénérateurs, …

Ces recherches sont critiques dans une période où de nouveaux vecteurs de l'information astronomique apparaissent : les photons et particules de très haute énergie ou les ondes gravitationnelles seront une part importante de l'astronomie de demain. Il faut laisser venir à l'astronomie les physiciens qui sont naturellement intéressés par ces observations et qui ont des compétences particulières pour leur détection en conservant une coordination nationale de la discipline qui pour l'astronomie est confiée à l'INSU comme institut national. L'attitude traditionnelle de méfiance des astronomes vis a vis des physiciens des particules (et réciproquement) s'atténue grâce aux collaborations en cours et aux structures interdisciplinaires (voir paragraphe « L'interdisciplinarité »). Il faudra probablement songer à traduire dans les institutions cet élargissement de l'astronomie.

La question du recrutement des meilleurs profils pour cette

recherche est un problème récurrent mal résolu. Des profils de physiciens ou d'ingénieurs sont souvent plus adaptés à effectuer cette recherche (on ne parle pas ici des ingénieurs impliqués dans la réalisation des instruments). La structure du CNRS qui sépare ingénieurs et chercheurs s'accommode mal de profils originaux d'ingénieurs chercheurs en instrumentation. Les chercheurs sont recrutés par des commissions reflétant, par leur mécanisme de composition, la population dominante d'astronomes et astrophysiciens peu capables d'évaluer ces profils et tendant naturellement à s'auto reproduire. Il faut introduire des mécanismes de recrutement spécifiques pour ces profils.

Un autre profil indispensable à la genèse des projets est celle d'astrophysiciens pouvant développer des concepts de nouveaux instruments s'appuyant sur les développements amonts récents et de monter des consortia rassemblant les compétences nécessaires et souvent dispersées dans plusieurs laboratoires et pays. On ne recrute pas ni ne forme spécifiquement de tels profils qui émergent de l'évolution des astronomes et astrophysiciens recrutés pour leurs compétences dans ces domaines.

Enfin il existe une phase intermédiaire de validation de concepts et de technologie dans les phases de type préparation de programme, phase 0 et A qui exige que des laboratoires mettent des ressources non négligeables

Les services d'observation

Les services d'observation sont les éléments des missions de services qui justifient l'existence du CNAP. Ces missions sont bien définies et ont été divisée en 6 types de services. Le service SO4 (sur les Grands relevés) rentre évidemment bien dans les missions du corps mais pourrait être intégré aux services SO2 (instrumentation fournissant des données publiques à la communauté - pas toute l'instrumentation astronomique !) et SO5 (centres de traitement et d'archivage). Cette évolution simplifiera le dispositif mais n'est pas fondamentale. Par contre le fait que dans la classe SO2 (instrumentation) qui regroupe plus de 60% des 110 services actuellement recensés plus de la moitié des services n'ont pas répondu à l'enquête de la prospective indique la nécessité d'une revue de ces services.

Un travail de revalidation et de 'nettoyage' de la liste des services reconnus est indispensable et devra être menée avec rigueur.

Cette revalidation devrait faire intervenir les PN pour une évaluation scientifique et une évaluation globale de la répartition des tâches de service entre les différents corps de chercheurs pour vérifier si les membres du CNAP sont bien affectés aux tâches prioritaires de la discipline.

Les services attachés à la réalisation d'instrument, par exemple, sont par définition des services temporaires. La répartition des membres du corps sur un autre service quand un de ceux ci est terminé est une tâche dont les OSU ne peuvent se dispenser quand ils plaident pour conserver leurs postes CNAP. Enfin comme pour tout programme de recherche les services d'observation ne peuvent se contenter d'être utiles à la recherche mais doivent l'être plus que ceux qui ne sont pas soutenus faute de moyens.

Il faut donc mettre en place un mécanisme inter OSU pour permettre cette répartition sur les services prioritaires qui justifie l'existence d'un CNAP national.

Le traitement des données, le développement et l'utilisation des bases de données et des observatoires virtuels

L'astronomie est passée en 20 ans d'un mode d'observation où un (ou quelques) chercheur observait quelques objets pour en comprendre la structure et/ou vérifier un modèle ou parfois une théorie à un mode d'observation initié par « la carte du ciel » et développé surtout par les missions spatiales d'observation couvrant systématiquement tout le ciel (ou une grande fraction, ou de très nombreuses sources) : SAS2 pour les rayons gamma, IUE dans l'UV, Hiparcos pour l'astrométrie, X et ROSAT pour les rayons X, IRAS pour l'infrarouge thermique et lointain, COBE pour le millimétrique et le submillimétrique sont quelques uns des précurseurs de ce mode d'observation.

Les observations très pointues d'un objet relèvent toujours des observatoire sol ou spatiaux où on propose un programme d'observation bien défini dont les données vous appartiennent (encore que la période propriétaire devienne limitée à environ une année). On voit donc arriver le temps où une observation possible a peut-être déjà été faite et où il faut, pour vérifier un modèle, aller chercher les données dans un serveur lointain plutôt que d'aller observer quelque part en haute altitude. Aller observer fait partie des plaisirs du métier d'astronome. Ce n'est pas forcement la méthode la plus efficace pour engranger les observations utiles à l'ensemble des astrophysiciens. Les observatoires, spatiaux d'abord, puis sol se sont donc mis à créer des programmes clé (legacy programs) faisant des observations systématiques en spectroscopie, imagerie, photométrie d'ensemble d'objets statistiquement définis. L'archivage de la donnée se généralise. Les observatoires comme l'IRAM, qui n'archivent pas leurs données en vue de les mettre à la disposition de la communauté parce que leurs tutelles leur refusent les moyens de le faire, vont devoir évoluer.

Le corollaire est que les moyens mis à déplacer en avion les astronomes d'un bout à l'autre de la planète pour aller observer devront continuer d'être progressivement transférés, comme c'est déjà souvent le cas dans certains observatoires (au CFHT et à l'ESO par exemple), aux moyens d'observations de service et d'archives et de distribution des données. Ce mouvement doit être étendu à tous les observatoires au sol en raison de son coût non seulement pour l'astronomie mais aussi sociétal.

L'interdisciplinarité

L'interdisciplinarité en astronomie est de deux types : l'une d'entre elles est celle qui collabore avec les physiciens ou chimistes qui nous apportent leurs compétences sur certains mécanismes, modèles physiques ou chimiques, les mesures de paramètres (fréquences de transitions, sections efficaces, probabilité de réactions, …), méthodes mathématiques et informatiques. Celle-ci existe depuis longtemps, elle doit se poursuivre. Il faut noter la part croissante prise par les mathématiques appliquées en liaison avec l'organisation des grandes masses de données acquises de plus en plus par l'astronomie.

L'autre démarche est celle plus fondamentalement interdisciplinaire où l'astronomie et une autre discipline ont des objectifs scientifiques profondément liés souvent parce que la compréhension des objets d'étude de l'astronomie implique le progrès d'autre questions fondamentales dans d'autres sciences ou réciproquement, ou l'astronomie est la seule façon de tester les théories et modèles de la physique ou de la biologie (physique aux énergies extrêmes, champs gravitationnels forts et physique des trous noirs, origine de la vie).

L'interdisciplinarité est favorisée par la circulation thématique des chercheurs qui changent de sujet et apportent une connaissance profonde d'une autre discipline dans l'astronomie ou réciproquement où des chercheurs formés dans les laboratoires d'astronomie vont apporter notre culture dans d'autres disciplines. Dans ce cadre, il est particulièrement utile de mettre en place des mécanismes permettant de favoriser le recrutement de chercheurs ayant effectué leur travail de thèse ou un séjour post doctoral hors des laboratoires de la discipline où ils sont recrutés. Cette démarche n'est pas naturelle au sein de commissions de recrutement disciplinaires en compétition les unes avec les autres pour obtenir des postes.

Il faut donc des mécanismes incitatifs forts. Les commissions de recrutement interdisciplinaires sont un tel mécanisme efficace qu'il faut les développer aussi bien au CNRS que dans les universités. Celles ci ont de plus l'avantage de faire travailler ensemble et de se connaitre les chercheurs de différentes sections. La disparition de la CID47 sans qu'aucun mécanisme efficace de continuation de cette politique en place est un pas dans la mauvaise direction.

D'autres instituts développent des activités (projets observationnels, modélisation et théorie) en astronomie quand leurs techniques et méthodes sont particulièrement utiles et/ou les problèmes scientifiques touchent à leurs propres problématiques. Cette part s'accroit : groupe de physicien des particules travaillant sur des projets d'astroparticules mais aussi sur des observations astronomiques en visible (étoiles ou galaxies) pour analyser la nature de la matière noire ou de l'énergie noire (projet EROS, BOSS, LSST, EDELWEISS,), fond cosmologique micro-onde pour la physique de l'Univers primordial regroupant des cosmologistes venant de l'astronomie, de la physique des particules et de la physique théorique (ARCHEOPS, PLANCK, ...), ondes gravitationnelles (VIRGO, LISA, …).

Les détecteurs de nouveaux porteurs d'information de l'astronomie : photons gamma et particules de très haute énergie, neutrinos, ondes gravitationnelles, sont principalement développés en dehors des laboratoires d'astronomie. Cela est logique dans les phases de R et D très amont où il faut transposer des techniques de laboratoire ou utilisées sur des accélérateurs, en instrument observant le ciel. Il faut cependant éviter que l'information ne circule pas assez entre équipes de différents instituts et que de fait une duplication de moyens n'entraine un gaspillage de ressources et des compétences.

L'observation des exoplanètes va donner aux planétologues et géophysiciens une base statistique large qui manquait aux tests des modèles. C'est là un champ de collaboration interne à l'INSU important et pour lequel les efforts de décloisonnement doivent être poursuivis.

La partie la plus interdisciplinaire se rencontre quand on s'adresse aux questions de l'exobiologie de la vie dans les milieux extrêmes et d'origine de la vie. Pour ces questions la recherche des signatures biologiques extraterrestres est indéniablement une des grandes aventures scientifiques des décennies à venir.

La contribution des biologistes à la définition de ces signatures, en liaison avec les questions sur l'origine de la vie et les premières étapes de l'évolution biologique, est nécessaire dès maintenant. Le PIR « Origine des planètes et de la vie » (prolongé par le programme « Environnement planétaire et Origine de la vie ») est un élément important de la structuration de ces interfaces. Les recrutements interdisciplinaires doivent l'accompagner.

D'une manière générale, l'astronomie doit encourager les commissions de recrutements interdisciplinaires à ses interfaces dans les organismes de recherche et les universités.

Les laboratoires d'astronomie doivent développer en collaboration avec les autres secteurs de l'INSU et les laboratoires de l'IN2P3, de l'INP, de l'INC et de l'INSB les projets qui optimisent l'utilisation des compétences. De même les collaborations et circulation de chercheurs entre astronomie et mathématiques appliquées doivent être utilisées pour optimiser notre exploitation des grands relevés et l'interprétation des données de l'astronomie de précision qui émerge.

Les structures de l'astronomie/astrophysique et leur évolution

Les laboratoires sont actuellement la structure de base de la recherche dans notre domaine. Les conséquences de la LRU n'ont pas toutes été tirées mais l'INSU est le modèle qui a souvent été utilisé pour défendre la nécessité d'instituts nationaux définissant une politique nationale à coté d'universités autonomes mais dont la somme des politiques ne fait pas une stratégie nationale dans

une discipline (en particulier pour celles qui exigent des moyens lourds souvent internationaux). Il est important de noter que l'absence d'une telle structure aux Etats Unis est un handicap certain pour les astronomes d'outre atlantique comme l'atteste le prééminence du VLT parmi les grands télescopes optiques et maintenant leur difficultés à construire un projet efficace d'ELT, ou l'échec à développer depuis 30 ans une stratégie gagnante dans le domaine millimétrique malgré des moyens supérieurs à l'Europe.

La structure d'UMR est maintenue, reconnaissant le besoin d'une tutelle locale et d'une tutelle nationale. Le système précédent avec des tutelles égales sur tous les sujets est clairement inviable quand les universités commencent à jouer leur rôle. La définition des responsabilités respectives des deux types de tutelles reste à finaliser. La gestion par l'hébergeur ne résout pas la question de la gestion des moyens lourds venant des acteurs nationaux (EPST, EPIC) et internationaux (Sociétés internationales) mais répartis sur plusieurs laboratoires et universités qui doivent rester coordonnés.

Il faudra aussi que les laboratoires (UMR) à multiples tutelles « locales » en réduisent le nombre s'ils ne veulent pas se trouver écartelés entre des politiques d'établissements concurrents.

La LRU va amener inévitablement un renforcement des acteurs régionaux. Il faut donc que l'astronomie s'organise aussi à l'échelle universitaire et régionale en particulier avec l'apparition des regroupements d'universités en pôles, PRES et grands campus. Ceux-ci auront entre autres comme atout d'intégrer les écoles d'ingénieurs et l'astronomie a certainement intérêt à profiter des liens accrus avec ces dernières que cela permettra.

Les participants au colloque de prospective ont réaffirmé unanimement leur attachement à la structure de laboratoire comme entité de base de la recherche. Cela va avec un niveau correct de soutien de base et de moyens communs qui n'est plus acquis aujourd'hui. La recherche dans une discipline à moyens lourds doit avoir une partie programmée mais il est impératif de laisser une partie NON programmée. Un transfert trop grand des moyens vers des agences exigeant une programmation et une comptabilité très (trop !) fine des actions ne peut que scléroser la recherche originale qui a besoin d'un espace de temps et de moyens libres.

La croissance de la discipline s'est faite plus par augmentation de la taille des laboratoires existants que par création d'équipes nouvelles. En fait au cours des 20 dernières années on a vu deux grands laboratoires en province se développer avec beaucoup de succès ce qui est certainement une excellente évolution mais peu (ou pas) de création de petites équipes.

Avec le rôle croissant des universités dans la recherche, concomitant avec le rôle croissant de l'ANR capable de les financer, il devient certainement possible d'avoir de petites équipes de théoriciens ou d'utilisateurs des moyens d'observation ne contribuant pas aux projets expérimentaux et n'ayant pas d'équipe technique mais participant activement au travail de recherche et au rayonnement de l'astronomie dans des universités où elle n'est pour l'instant pas représentée.

Ce n'est pas le rôle de l'INSU de créer de telles équipes, mais la discipline et ses instances (la section du CNRS par exemple) ne peut ignorer cette question et devrait y réfléchir comme un moyen d'augmenter son potentiel et son rayonnement par des postes universitaires et des soutiens régionaux et ANR.

L'existence de l'AERES en charge d'une évaluation homogène des équipes et laboratoires quelque soit leur établissement de rattachement est une évolution indispensable. Il faut par contre s'opposer à la tendance croissante a réduire l'évaluation à une évaluation purement quantitative et qui plus est simpliste (classement A,B,C) .

Le résumé exécutif des évaluations AERES est le condensé de l'évaluation et ne doit pas être réduit ensuite à une lettre.

La création d'OSU pluridisciplinaires au sein de l'INSU est la structure intermédiaire inévitable pour élaborer une politique régionale et la discuter avec l'INSU. Ces OSU pourraient être en charge de moyens lourds et de centre d'opérations et/ ou de traitement et de distribution de données mutualisés régionaux.

La valorisation des recherches est un des critères d'évaluation. L'astronomie est une discipline essentiellement de recherche fondamentale. La valorisation existe sous forme de développements instrumentaux applicables ailleurs. Il faut aussi faire valoir l'apport en savoir faire pointus acquis par les équipes industrielles qui construisent les instruments très sophistiqués de l'astronomie, même si les technologies utilisées ne sont pas directement réutilisables.

Les femmes et hommes de la recherche : métiers, formation, recrutement, structures

La richesse d'une discipline est d'abord dans ses personnels et leur savoir faire qu'ils soient scientifiques, techniques ou administratifs plus que dans les moyens (même lourds) qu'ils contrôlent. Les mécanismes de formation et de recrutements révèlent des biais très fâcheux aussi bien d'un simple point de vue de justice que d'un point de vue d'efficacité. Il faut comprendre et corriger les biais qui, partant d'une population de lycéens passant le bac où les jeunes filles sont plus performantes que les jeunes gens, aboutit à un recrutement de chercheurs et chercheuses totalement déséquilibré en faveur du groupe le moins performant protégé par des archaïsmes politiques et culturels. Pire encore, ce déséquilibre s'accroit.

Il est donc clair que le problème prends son origine en amont

des recrutements mais qu'on ne peut pas défendre tel quel un tel système qui a besoin d'une profonde réforme à long terme, puisque les archaïsmes ne se corrigent que lentement et sous l'effet de politiques volontaristes. Le rappel constant de ce problème aux acteurs des recrutements est efficace. Il peut et doit être accompagné de mesures incitatives fortes vers les équipes et les laboratoires et vers les lycéennes et étudiantes.

Il est de plus indispensable de travailler à une transmission efficace de la science, que ce soit ses méthodes ou ses résultats, vers les plus jeunes générations. La part prise aujourd'hui par les chercheurs pour ces actions est bien trop faible. Là encore des actions incitatives fortes au niveau formation et évaluation sont indispensables.

Les métiers de la recherche sont nombreux et divers. Il est indispensable de les faire connaitre ***tous*** et de ne pas laisser entendre aux jeunes intéressés par la recherche que c'est très difficile et que les postes sont de moins en moins nombreux (ce qui est une affirmation fausse), ou réduire, sans le dire explicitement, les métiers de la recherche à ceux de chercheur ou d'enseignant chercheur.

Un problème bien identifié est la décroissance du nombre de contrats de thèse offert en astronomie dans les nouvelles écoles doctorales pluri thématiques en province, la région Ile de France étant protégée par une école doctorale dominante monothématique. Cela résulte de la politique de ces écoles doctorales. C'est donc au niveau local et avec les autres disciplines que le débat doit avoir lieu en comparant entre autres les débouchés professionnels mais pas seulement. La recherche fondamentale a un rôle culturel qui ne doit ni ne peut s'évaluer d'un simple point de vue économique.

Une autre question cruciale a été débattue : comment faut-il former et recruter les chercheurs instrumentalistes. Il faut considérer que différents profils sont inclus sous ce vocable (voir chapitre « Personnels et métiers »). Une frange de chercheurs développe des moyens de mesures originaux par des développements de laboratoire. D'autres, partant d'un point de vue plus proche des besoins des disciplines en nouvelles observations élaborent des concepts d'instruments utilisant les développements précédents (ou les incitent s'ils n'existent pas). Enfin ceux-ci ou d'autres rassemblent à l'échelle nationale ou internationale les équipes porteuses de l'ensemble de la compétence nécessaire. Nos commissions de recrutements reflètent, par leur mode de constitution, la sociologie des laboratoires qui tend alors à se reproduire. Cette composition est dominée par les observateurs et modélisateurs très proches de problèmes astrophysiques et ceci est logique. Par contre, ce groupe n'est pas forcément celui qui est le plus à même de recruter la minorité qui permet à une équipe ou un laboratoire d'être leader sur un nouvel instrument.

Il est apparu dans les discussions sur ce point que les commissions de recrutements nationales devraient se concerter sur la meilleure façon d'aborder ce problème.

Il a aussi été évoqué que des commissions de recrutement spécialisées pourraient peut-être faire un meilleur travail que des commissions reflétant toujours la composition moyenne. Ce point de vue n'est certainement pas majoritaire mais a le mérite de poser clairement la question.

Les modes très différents de recrutement et d'évaluation des ingénieurs de recherche et des chercheurs ne sont pas justifiés par une préoccupation d'efficacité mais plutôt par un conservatisme ne désirant pas modifier un système ayant le mérite d'être connu faute d'être clairement le meilleur. Une évolution vers une moins grande différentiation reflétant mieux le spectre continu entre ces métiers serait certainement utile.

Enfin l'interdisciplinarité a le grand mérite de faire découvrir aux chercheurs d'un organisme des cultures forts différentes de celles jugées souvent inchangeables.

Contributions à la prospective thématique

Direction et Comités Scientifiques des Programmes Nationaux et Section 17 du CoNRS

Ces contributions à la prospective présentent, au travers de la structuration de la discipline en programmes nationaux, les thématiques en astronomie-astrophysique et leurs évolutions, les faits marquants des cinq dernières années, les moyens d'observation, les interfaces et les forces et faiblesses des disciplines. Elle a été réalisé par la direction de l'INSU, les comités scientifiques des programmes nationaux et la section «Système solaire et Univers lointain» du Comité national de la recherche scientifique.

Cosmologies et Galaxies

S. Charlot, V. Hill, P. Jablonka, M. Arnaud, O. Bienayme, J. Braine, J.-G. Cuby, F. Combes, G. Lagache, Y. Mellier, C. Turon, J.-P. Uzan

Le Programme National de Cosmologie et Galaxies (PNCG) est un nouveau programme issu de la fusion des anciens Programmes Nationaux de Cosmologie (PNC) et Galaxies (PNG). Il couvre un domaine en pleine effervescence marqué par la mise en opération imminente des satellites Planck, Herschel, Gaia et JWST. Plus de 550 chercheurs sont impliqués dans cette thématique.

Faits saillants

Plusieurs résultats majeurs ont valorisé les travaux de qualité des équipes françaises dans ce domaine au cours des dernières années. Les exemples mentionnés ici donnent un aperçu de leur diversité, mais ils ne peuvent à eux seuls rendre compte de toute la richesse de la contribution française à la discipline.

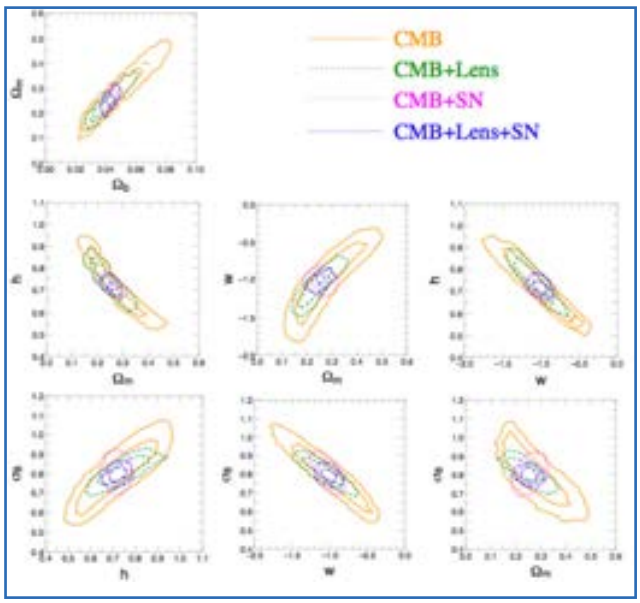
Avancées sur la caractérisation du modèle cosmologique

La mise en œuvre et l'exploitation par des équipes françaises des 400 nuits d'observation du CFHT-*Legacy Survey* (CFHTLS) avec MegaCam a conduit à plusieurs résultats majeurs récompensés par deux médailles d'argent du CNRS en 2009 (P. Astier à l'IN2P3 et Y. Mellier à l'INSU ; il faut noter aussi la médaille d'argent décernée par l'INSU à F.-X. Désert en 2008 pour ses travaux sur le CMB). D'un côté, le programme SNLS de détection de supernovæ de type Ia (SNIa) dans le CFHTLS, dont le suivi spectroscopique est assuré par les télescopes VLT, Keck et Gemini, a produit le plus grand échantillon de SNIa lointaines à ce jour. L'évolution de la distance lumineuse de ces objets entre les redshifts z = 0,2 et 1,0 apporte des contraintes importantes sur la densité de matière de l'Univers et sur l'équation d'état décrivant les propriétés de l'énergie noire. D'un autre côté, l'analyse des distorsions gravitationnelles de millions de galaxies du CFHTLS-WL (*Weak Lensing*) a permis de caractériser le spectre de puissance de la matière noire aux échelles entre 750 kpc à 90 Mpc et pose les meilleures contraintes actuelles sur la normalisation de ce spectre. La qualité de cette analyse repose notamment sur la calibration spectroscopique des redshifts photométriques de galaxies CFHTLS grâce au relevé franco-italien VVDS à l'ESO. L'analyse conjointe des données du SNLS, CFHTLS-WL et du satellite américain WMAP5 conduit à de sévères contraintes sur les paramètres du modèle cosmologique qui, si *w* est constant, confortent un Univers à constante cosmologique (Figure 1).

Figure 1 : Contraintes sur les paramètres cosmologiques du modèle standard déduites des observations de WMAP5 (CMB), SNLS (SN) et CFHTLS-WL (Lens). Les différentes couleurs correspondent à différentes combinaisons de contraintes observationnelles, comme indiqué. Les paramètres sont : la densité de baryons, Ω_b, la densité de matière, Ω_m, la constante de Hubble réduite, h, la normalisation du spectre de puissance de la matière noire, σ_8, et le paramètre de l'équation d'état de l'énergie noire, w. Les contours correspondent aux niveaux de confiance 68% et 95%. Si w est constant, une simple constante cosmologique (w=-1) semble favorisée par les données. *Kilbinger et al. 2009, A&A, 497, 677.*

Structuration de la matière noire et des baryons

Les équipes françaises ont aussi contribué à d'importantes avancées dans notre compréhension de la structuration de la matière noire et de son influence sur la structuration des baryons dans l'Univers. D'une part, la résolution spatiale des satellites XMM et Chandra a permis de montrer que le profil de masse dynamique d'un amas (révélé par l'émission X du gaz chaud intra-amas) est quasi-universel. Ce résultat, compatible avec la prédiction d'un modèle simple dominé par la gravitation, confirme notre compréhension basique de la structuration de la matière noire et l'utilité des amas de galaxies comme sondes cosmologiques. D'autre part, l'analyse multi-longueur d'onde du relevé COSMOS, dans lequel sont fortement impliquées plusieurs équipes françaises, a permis d'étudier l'impact de la structuration de la matière noire sur l'évolution des baryons. Ce relevé profond d'un champ de 2 deg^2, initié avec HST/ACS, bénéficie aujourd'hui de l'une des plus vastes couvertures spectrales du domaine X au domaine radio et d'un suivi spectroscopique avec VIMOS à l'ESO.



L'analyse WL du relevé COSMOS a ainsi produit la première carte 3D de la matière noire dans un large volume d'Univers et permis sa comparaison avec la distribution de la matière lumineuse prisonnière des puits de potentiel (Figure 2, extraite du papier de Massey et al. 2007 illustrant les travaux de l'équipe internationale COSMOS).

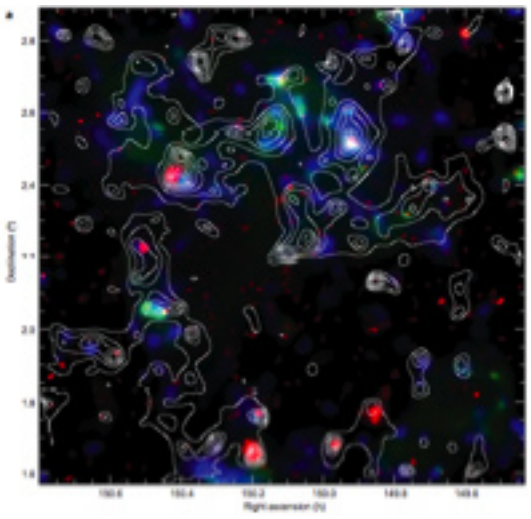


Figure 2 : Projection 2D de la comparaison des distributions de masses révélées par différents traceurs : les contours indiquant la masse totale (dominée par la matière noire) sont superposés à une image en couleurs de la masse baryonique (bleu : masse stellaire ; jaune : densité numérique de galaxies ; rouge : émission X d'amas de galaxies). *Massey et al. 2007, Nature, 445, 286.*.

Processus physiques de formation et d'évolution des galaxies

Au cours des dernières années, les satellites GALEX et Spitzer ont ouvert de nouvelles fenêtres d'observation ultraviolette et infrarouge sur l'Univers, permettant la mesure de l'activité de formation d'étoiles des galaxies jusqu'à l'époque z ~ 2. La combinaison de ces observations avec d'énormes échantillons de spectres optiques (SDSS, VVDS) a donné lieu à un nouveau type d'analyse statistique des paramètres physiques de galaxies (tels que la masse, le taux de formation d'étoiles, la métallicité, le contenu en poussière, l'activité nucléaire) en fonction des paramètres structuraux, de l'environnement et de l'époque cosmique. Plusieurs équipes françaises ont contribué au tout premier plan à ces développements, notamment en caractérisant l'activité de formation d'étoiles, l'évolution des contenus en gaz moléculaire et en poussière et l'activité nucléaire depuis l'époque z ~ 2. L'évolution de la densité de masse stellaire déduite d'observations optique et infrarouge est en bon accord avec l'évolution du taux de formation d'étoiles déduit d'observations ultraviolettes après correction pour la poussière (Figure 3). Les équipes françaises ont montré également qu'au moment du pic d'activité de l'Univers à l'époque z ≳ 1, la formation d'étoiles semble avoir été plus intense dans les environnements denses que dans le champ, une tendance qui s'est inversée depuis.

Avancées en archéologie galactique dans le Groupe Local

Les galaxies du Groupe Local offrent l'opportunité d'explorer en détail les vestiges de la formation de galaxies individuelles. Au cours

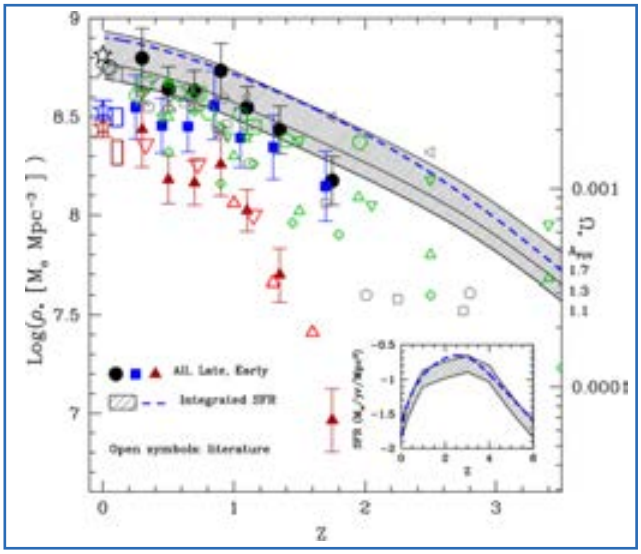


Figure 3 : Evolution de la densité de masse stellaire de l'Univers en fonction du redshift, déduite de la combinaison d'observations Spitzer/SWIRE, VVDS et CFHTLS. Les différents symboles représentent la densité totale (cercles noirs) et les contributions par les galaxies de type tardif (carrés bleus) et de type précoce (triangles rouges). Les courbes noires montrent le résultat attendu de l'évolution de la densité de formation d'étoiles estimée à partir d'observations ultraviolettes avec GALEX (en encadré). *Arnouts et al. 2007, A&A, 476, 137.*

des dernières années, la mise en opération de spectrographes à moyenne et haute résolutions sur des télescopes de la classe de 10m a permis des analyses chimiques et cinématiques de grands échantillons d'étoiles dans des environnements très divers (de la Voie lactée et ses galaxies satellites jusqu'à la plus proche galaxie spirale, Andromède). Les équipes françaises se sont distinguées sur deux aspects très complémentaires de l'archéologie galactique. Le premier est l'identification d'étoiles extrêmement déficientes en métaux dans le halo de la Voie lactée, dont les abondances placent des limites inédites sur l'âge et les conditions de nucléosynthèse primitive de formation de notre Galaxie. L'autre aspect concerne la caractérisation des populations stellaires dans les parties externes des galaxies du Groupe Local, où

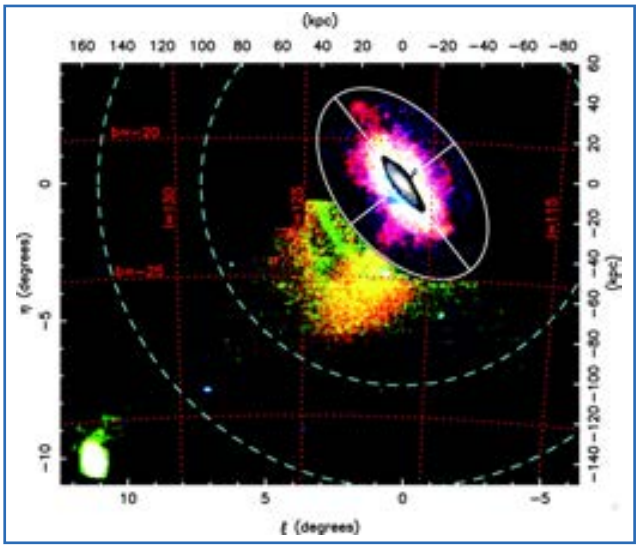


Figure 4 : Etiquetage chimique des différentes populations stellaires du halo de la galaxie d'Andromède (dont une image optique est indiquée au centre de l'ellipse blanche pour l'échelle). Les couleurs rouge, jaune, verte et bleue correspondent à des métallicités de plus en plus faibles. Les enveloppes stellaires autour de la galaxie (à l'intérieur de l'ellipse blanche) et les courants géants (à l'extérieur) sont les témoins flagrants de plusieurs épisodes d'accrétion. *Ibata et al. 2007, ApJ, 671, 1591.*

l'on trouve les vestiges d'évènements d'accrétion aux époques reculées où les grandes galaxies à disques, comme la Voie lactée et Andromède, ont commencé à s'assembler. L'« étiquetage » chimique et cinématique de différents courants de populations stellaires a ainsi révélé les signes de plusieurs fusions subies par la galaxie d'Andromède au cours des derniers milliards d'années (Figure 4 ; Ibata et al. 2007).

Grandes questions

De manière très schématique, la recherche dans le domaine de la cosmologie et des galaxies est aujourd'hui guidée par plusieurs questions fondamentales, qui suscitent des études aussi bien sur le plan théorique qu'observationnel.

Cosmologie théorique : dans quel Univers vivons-nous ?

Le modèle standard de la cosmologie permet aujourd'hui de décrire l'évolution de l'Univers et sa structuration depuis ~ 0,01s après le Big Bang à partir d'une phase chaude et dense à l'équilibre thermodynamique. Ce modèle pose pourtant encore des questions. En particulier, la conclusion que deux composantes énigmatiques de matière noire non baryonique et d'énergie noire représentent 95% de la densité totale d'énergie de l'Univers aux côtés de la matière ordinaire demande soit une validation, soit une remise en cause des hypothèses sous-jacentes. Par ailleurs, les conditions initiales du modèle standard semblent peu probables. Une étape a déjà été franchie lorsque tous les problèmes de conditions initiales (platitude, horizon, spectre de perturbation initial) ont pu être résolus simultanément en invoquant l'existence d'une phase d'inflation. Cependant, la construction de cette phase repose sur une physique nouvelle faisant par exemple intervenir des champs scalaires, qui doit être consolidée, notamment par des expériences (e.g. Planck). Les grands thèmes de recherche qui retiennent particulièrement l'attention en cosmologie théorique sont donc : l'origine de l'accélération de l'Univers (tests de la théorie de la relativité générale, de la variation des constantes fondamentales, du principe cosmologique) ; la nature de la matière noire (froide, chaude, tiède, modèles alternatifs) ; et la physique de l'Univers primordial à des échelles d'énergie non encore atteintes en accélérateur (baryogénèse, réchauffement, inflation).

Quelle est l'histoire des baryons dans un Univers hiérarchique?

Dans le modèle standard, la structuration de l'Univers est dominée par l'effondrement gravitationnel de la matière noire, largement majoritaire. Si cette structuration semble maintenant bien comprise, l'évolution de la minorité de baryons entraînés dans les puits de potentiel de matière noire l'est beaucoup moins. La structuration des baryons est un problème multi-phase, multi-échelle qui, outre la gravitation, fait intervenir des processus physiques complexes (refroidissement du gaz, formation d'étoiles et de trous noirs super-massifs, chauffage du gaz par les supernovæ et les noyaux actifs). Ainsi, l'histoire des galaxies dépend de leur environnement à grande échelle (amas, filaments, vides) et des propriétés physiques et chimiques du gaz intergalactique à partir duquel elles se forment. En retour, les galaxies réinjectent de l'énergie et des métaux dans leur environnement, qui pourraient jouer un rôle essentiel dans la régulation de la formation stellaire. Pour mieux comprendre ces phénomènes, il est nécessaire de combiner des observations multi-longueur d'onde (des rayons X au domaine radio) des différentes composantes baryoniques de l'Univers aux différentes échelles avec des simulations cosmologiques de formation des structures. Des progrès majeurs sont attendus sur des questions comme : quelles sources (étoiles ou quasars) ont dominé la réionisation de l'Univers ? Les baryons « manquants » dans l'Univers local sont-ils bien dans des filaments de gaz tiède (WHIM) comme le prédisent les modèles ? Quelle est l'origine de l'excès d'énergie observé dans le gaz intra-amas, et quelle est l'histoire thermique du milieu intergalactique ? Comment l'environnement, local et à grande échelle, affecte-t-il les propriétés des galaxies ? Quelle est l'histoire cosmique de la production et de la circulation des métaux ?

Quels processus physiques dominent l'évolution des galaxies ?

Les galaxies sont à la charnière entre la cosmologie, la physique des étoiles et la physique du milieu interstellaire. Comprendre quels processus physiques dominent les différentes phases d'assemblage d'une galaxie nécessite une étude approfondie de la distribution spatiale et la dynamique du gaz, des étoiles et de la poussière, des propriétés structurelles et de l'activité nucléaire, et des variations de ces propriétés en fonction du type de galaxie et de l'environnement. Plusieurs de ces informations ont déjà été recueillies pour de grands échantillons de galaxies cartographiées du domaine X au domaine radio, mais d'autres restent à assembler. Ces observations ont permis de montrer, entre autres, que l'histoire de la formation d'étoiles dans les galaxies et la croissance du trou noir central sont fondamentalement liées (rapport de masse quasi-universel entre trou noir central et bulbe galactique ; « downsizing » des AGNs en X accompagnant celui des galaxies en optique/IR). La compréhension de cette co-évolution et des autres processus physiques affectant l'évolution des galaxies suscite plusieurs questions : le gaz accrété par les galaxies est-il majoritairement chaud ou froid ? La croissance des trous noirs dans les galaxies prend-elle place essentiellement lors de fusions ou par accrétion de gaz ? Les effets d'environnement jouent-il un rôle majeur dans l'évolution des galaxies ? Comment les bulbes et les disques s'influencent-ils mutuellement ? Les structures comme les barres sont-elles des phénomènes passagers ? Les progrès significatifs accomplis récemment en simulations hydrodynamiques de formation des galaxies seront un complément précieux à l'approche observationnelle pour répondre à ces questions.

Comment les galaxies du Groupe Local se sont-elles formées ?

La Voie lactée et les galaxies du Groupe Local sont des objets de référence nous permettant d'étudier dans le plus grand détail des exemples d'histoires d'accrétion, de formation d'étoiles et d'enrichissement chimique des galaxies. L'accès privilégié à la mesure des abondances des étoiles les plus déficientes en métaux dans les halos de ces galaxies proches apporte des contraintes inestimables sur la composition du gaz primordial au moment de la réionisation. Par ailleurs, l'étiquetage chimique et cinématique de populations stellaires, qui est réalisable dans le Groupe Local, représente le moyen le plus direct et le plus fiable

de reconstituer les histoires de fusion et d'enrichissement chimique d'une galaxie. Les courants les plus anciens sont particulièrement intéressants de ce point de vue, car ils témoignent des premiers épisodes de fusion. La cartographie des populations stellaires des galaxies proches, combinée avec des observations du gaz et de la poussière, permet également de répondre à d'autres questions qui ne peuvent être abordées que de manière au mieux indirecte dans les galaxies distantes : l'universalité de l'IMF dans différents environnements ; le cycle de la matière, depuis le refroidissement du gaz chaud jusqu'à la formation et l'évolution des étoiles ; la distribution de masse et la structure du puits de potentiel de matière noire.

Évolutions thématiques

Le PNCG a récemment subi une évolution thématique par le biais de la fusion des anciens PNC et PNG. Cette fusion s'explique par le fort intérêt des deux programmes dans la formation et l'évolution des galaxies. D'autres évolutions thématiques vont marquer le PNCG dans les prochaines années, avec l'entrée en opération de plusieurs télescopes, dont les satellites Planck, Herschel, Gaia et JWST.

Vers l'observation directe de l'époque de la réionisation

Le projet LOFAR va bientôt pouvoir mesurer la température de brillance moyenne du ciel dans la raie d'émission de HI à 21cm à différents redshifts échantillonnant l'époque de la réionisation. A partir de 2013, ALMA puis le satellite JWST permettront d'observer directement les premières sources ayant réionisé l'Univers (des galaxies à flambées de formation d'étoiles sont déjà observées à $z > 6$ avec l'IRAM). Après 2014, la mission spatiale SVOM identifiera les galaxies les plus lointaines où se produisent des sursauts gamma. Ces développements instrumentaux, que devrait accompagner la mise en œuvre des performances exceptionnelles de l'E-ELT en spectroscopie infrarouge quelques années plus tard puis l'arrivée de SKA, ouvrent un nouveau domaine de confrontation entre modèles et observations.

Energie noire et caractérisation du modèle cosmologique

Le lancement réussi du satellite Planck laisse entrevoir des nouveautés importantes sur la physique de l'Univers primordial. Ces nouveautés sont très attendues dans un contexte où l'hypothétique énergie noire, qui serait une composante essentielle non incluse dans le modèle standard de la physique des particules, retient l'attention des physiciens. L'étude de l'énergie noire ouvre de formidables perspectives de recherches pour les prochaines années, où la physique théorique, la physique des hautes énergies, la cosmologie et l'astrophysique peuvent (et doivent) joindre leurs forces pour repousser les frontières de la connaissance.

Nouvelles fenêtres sur les amas de galaxies et la croissance des structures

Le satellite Planck détectera un échantillon unique de plusieurs milliers d'amas par effet Sunyaev-Zel'dovich jusqu'à $z \sim 1$ dans la totalité du ciel. La combinaison de ces données avec des observations XMM fournira un nouveau type de contrainte sur l'évolution des propriétés statistiques des amas et la croissance des structures. Ce catalogue pourra être corrélé avec le relevé LOFAR (détection d'amas à halo radio, signature de phénomènes dynamiques violents) pour étudier l'histoire dynamique du milieu intra-amas. A plus long terme, EUCLID permettra la détection directe des amas comme structures de matière noire, mais il faudra attendre IXO pour mesurer les propriétés thermodynamiques et le contenu en métaux des jeunes amas et groupes de galaxies à $z \sim 2$.

Lever de voile sur la dynamique du gaz et l'activité de formation stellaire dans les galaxies

Le satellite Herschel, qui vient également d'être lancé avec succès, va permettre la caractérisation détaillée des propriétés de formation d'étoiles et de poussière des galaxies proches dans un domaine de longueur d'onde bien plus vaste et avec des résolutions spatiales bien plus hautes que ne le permettaient ISO et Spitzer. Herschel ouvre aussi la voie aux études de l'émission infrarouge des galaxies à des époques plus reculées que ses prédécesseurs. ALMA, avec son petit champ mais sa très haute résolution spatiale, accompagné peut-être de NOEMA dans l'hémisphère nord, vont ensuite permettre de caractériser le milieu interstellaire et la cinématique des galaxies des plus proches aux plus distantes. Le suivi de ces observations avec JWST pourra alors renseigner, par exemple, sur l'évolution des halos de matière noire des galaxies en fonction du redshift.

Archéologie galactique de la Voie lactée à l'amas de la Vierge

Le satellite Gaia, qui sera lancé en 2012, va permettre la cartographie 6D pour un milliard d'étoiles dans la Voie lactée et le Groupe Local. Ces étoiles seront également caractérisées par de la spectrophotométrie, et de la spectroscopie pour les plus brillantes. Cette formidable base de données ouvre la porte à des études d'une précision inédite sur la structure, la formation et l'évolution de notre Galaxie. Ces contraintes seront complétées par les études de populations stellaires des galaxies du Groupe Local. Dès 2014, le JWST permettra d'étendre les études de diagrammes couleur-magnitude de populations stellaires voisines jusqu'aux galaxies de l'amas de la Vierge, donnant pour la première fois accès à l'histoire détaillée de la formation d'étoiles dans des galaxies de tous types et masses. Dans ces mêmes galaxies, l'E-ELT devrait ensuite permettre la spectroscopie d'étoiles individuelles. L'archéologie galactique rentre donc dans une période d'effervescence.

Interdisciplinarité et interfaces

Le PNCG est un programme inter-organisme fortement interdisciplinaire ayant des interfaces avec plusieurs autres programmes de l'INSU et concernant plusieurs sections du CNRS (sections 2, 3, 17 et l'ex-CID 47).

La théorie de l'Univers primordial, la physique des noyaux actifs de galaxies et l'étude des explosions stellaires font appel à la physique des hautes énergies (interface avec le *Groupe de Recherche Phénomènes Cosmiques de Haute Energie*).

Les expériences de détection directe de matière noire sont guidées par la physique des particules (interface avec le *Programme*

Interdisciplinaire Particules et Univers).
Les études de formation d'étoiles dans les galaxies et de l'évolution de populations stellaires font intervenir les propriétés statistiques de grands échantillons d'étoiles (interface avec le *Programme National de Physique Stellaire*).
Les études du cycle de la matière dans les galaxies nécessitent la description des propriétés physiques du gaz interstellaire et de son enrichissement en éléments lourds par les étoiles qu'il forme (interface avec le *Programme National Physique Chimie du Milieu Interstellaire*).

Forces et faiblesses de la communauté française

Les conditions dans lesquelles les équipes françaises s'apprêtent à répondre aux grandes questions du PNCG ne sont pas uniformes. Les compétences scientifiques et techniques ne font défaut dans aucun cas, mais certaines thématiques souffrent parfois d'un manque crucial de moyens, de valorisation ou de coordination.

Points forts

Il faut souligner les contributions récentes très remarquées internationalement d'équipes françaises en cosmologie théorique, notamment sur la quintessence, le problème transplanckien dans l'inflation, les Univers branes, les modifications à grande distance de la gravitation et la matière noire.
La communauté française « cosmologie et grandes structures » a démontré sa capacité de mobilisation autour des projets « énergie sombre ». L'émergence d'une nouvelle communauté pour l'analyse des oscillations acoustiques des baryons (BAO : projets SDSS-III/BOSS, HSHS et BigBOSS) est de ce point de vue exemplaire.
Les équipes françaises ont affirmé leur expertise dans la mise en œuvre, le traitement des données et l'exploitation scientifique des grands relevés d'imagerie (CFHTLS : structuration, SNIa, WL), de spectroscopie (VVDS : structuration ; évolution des galaxies) et de spectroscopie intégrale de champ (SAURON, IMAGES, MASSIV : dynamique). Cette expertise est un sérieux atout pour préparer les futurs grands relevés de galaxies.
La France se distingue aussi dans les domaines de l'astronomie infrarouge spatiale (formation d'étoiles et propriétés du milieu interstellaire des galaxies) et de l'analyse du rayonnement de fond cosmologique (signal cosmologique et avant-plans). Cette force est concrétisée par des participations majeures à l'instrumentation et à l'exploitation scientifique de plusieurs missions spatiales (ISO, Archeops, Spitzer, Herschel, Planck)
Les équipes françaises ont largement participé à l'exploitation et à la valorisation de l'interféromètre du Plateau de Bure, qui est l'instrument le plus performant au monde pour détecter les galaxies distantes. D'importants programmes ont aussi permis de cartographier le milieu interstellaire des galaxies proches et étudier, notamment, l'alimentation des noyaux actifs. Cette expertise est précieuse pour la future exploitation d'ALMA. Aux plus basses fréquences, les équipes françaises ont participé activement au SKA *Design Study* (prototype EMBRACE à Nançay).
La France a une grande tradition dans l'observation, la modélisation et l'interprétation de populations stellaires. Son positionnement stratégique dans le domaine de l'archéologie galactique au sol et dans l'espace en est l'illustration (Hipparcos, Gaia). Les codes français de synthèse de populations stellaires et de redshifts photométriques (modèle de Besançon, Pégase, Galaxev, HyperZ, LePhare) sont des références internationales.
Au cours des dernières années, les chercheurs français développant des simulations numériques de formation et d'évolution des grandes structures et des galaxies ont su fédérer leurs efforts au sein du « projet Horizon ». Cette stratégie leur a permis de hisser la France dans le peloton de tête des acteurs mondiaux du domaine (aussi bien pour la physique mise en œuvre, que pour les techniques et algorithmes développés et les moyens de calcul).

Points faibles

La communauté française n'est impliquée dans aucun grand relevé d'imagerie ni de spectroscopie après 2012 (un seul membre français est impliqué dans le relevé KIDS/VIKING à l'ESO), ce qui compromet fortement ses chances de préserver le *leadership* qu'elle a su sécuriser sur le projet de mission spatiale EUCLID en 2018.
Le consortium Gaia, dans lequel la France est impliquée de façon majoritaire (en particulier, à travers le *leadership* du DPAC), ne dispose pas du (des) spectrographe(s) grand champ multi-objet nécessaire(s) aux nombreuses observations complémentaires qui permettront d'optimiser le retour scientifique de la mission.
Il serait souhaitable que communauté française exploitant l'IRAM, encore limitée aux initiés, s'élargisse pour assurer le retour scientifique d'ALMA et en préparer les futurs compléments (NOEMA, CCAT). Aux plus basses fréquences, la communauté mobilisée sur la préparation de SKA et ses précurseurs devrait aussi s'élargir.
Bien que les équipes françaises aient récemment produit des simulations numériques innovantes et compétitives à l'échelle cosmologique, la valorisation de ces simulations n'est pas encore optimale. Cette faiblesse semble attribuable au moins en partie à l'immensité du volume de données à gérer pour analyser les simulations.
Les interactions entre théoriciens de l'Univers primordial et astrophysiciens, qui ont déjà progressé ces dernières années, pourraient encore évoluer vers une meilleure intégration de la théorie dans des projets astrophysiques.
La participation de chercheurs français à des expériences intéressant conjointement des laboratoires de l'INSU et de l'IN2P3 semble parfois souffrir d'un manque de coordination dommageable à la fédération des efforts (par exemple, dans les domaines de la polarisation du CMB et de l'énergie noire).
Les équipes françaises ne sont impliquées de façon significative dans aucune expérience de mesure de la polarisation du CMB après Planck.

Moyens et priorités

Le Tableau 1 résume les projets de fort intérêt pour le PNCG d'ici 2025 et leurs priorités. Le Tableau 2 illustre le déroulement temporel de ces projets. Les projets à long terme mis en « top priorité » par Astronet et soutenus par le PNCG sont individualisés dans ces tableaux. Un point délicat concerne ici les priorités sur les projets à plus court terme devant mener aux projets Astronet. Ces priorités correspondent à la stratégie suivante.

Positionnement stratégique sur les missions « énergie noire »

Pour pallier le manque d'implication majeure d'équipes françaises à des projets énergie noire pour la période 2012-2017, le PNCG considère que l'objectif est de préparer un projet à trois sondes primaires (SNIa, WL et BAO) et trois sondes secondaires (amas de galaxies, effet Sachs-Wolfe intégré, effets de distorsion en redshift). Dans l'état actuel des débats, la solution LSST semble la meilleure voie pour les SNIa. La mission spatiale EUCLID (avec son appui sol), dans laquelle la France occupe une position de *leadership*, apparaît comme la meilleure solution pour le WL et, sur le long terme, pour les BAO (la fusion d'EUCLID avec un projet américain pourrait inclure la sonde SNIa). Elle apporte aussi un formidable complément proche-infrarouge au LSST. En ce qui concerne les BAO, le projet BigBOSS semble la meilleure voie à soutenir sur le moyen terme, qui assure la transition entre SDSS-III/BOSS et le relevé spectroscopique d'EUCLID. Il est souhaitable par ailleurs que les équipes françaises répondent au prochain appel d'offre de l'ESO pour des relevés spectroscopiques grand champ, afin de constituer un échantillon qui permettra entre autres de calibrer les redshifts photométriques d'EUCLID et du LSST. Enfin, une des clefs de voûte de ce plan stratégique consiste à effectuer le suivi du relevé visible Pan-STARRS 4 en bande *u* avec MegaCam au CFHT. Outre la valorisation de MegaCam pour un grand suivi « *legacy* » du ciel, cette stratégie favoriserait l'accès aux données visibles complémentaires d'EUCLID provenant d'un relevé dans lequel les équipes françaises souhaitent s'impliquer. Elle permettrait aussi de participer au projet BigBOSS, dont les porteurs ont besoin du complément *u* à Pan-STARRS 4. A plus long terme, SKA permettra un immense progrès aussi bien sur les sondes primaires (WL, BAO) que secondaires.

Sécurisation du suivi spectroscopique sol de Gaia

La réflexion sur le suivi spectroscopique sol qui permettra d'optimiser le retour scientifique de Gaia est en cours au niveau européen. Les équipes françaises, qui bénéficient d'une expérience, et de responsabilités majeures, aussi bien sur le plan instrumental (Giraffe, X-Shooter), que dans la réduction des données de spectrographes multi-objet et dans les outils d'analyse des spectres RVS de Gaia (la France est le premier contributeur au DPAC), revendiquent une place de choix dans ce projet. Deux types de spectrographes sont envisagés pour l'archéologie galactique. Le premier, qui permettra d'assurer l'étiquetage chimique des 2×10^6 à 1×10^7 étoiles les plus brillantes du disque Galactique, doit avoir un multiplex >200 fibres, une résolution R ~ 20 000 à 40 000 et champ entre 0,25 et 1 deg^2. Le second, dédié au suivi des étoiles plus faibles (étiquetage chimique et cinématique des étoiles du halo Galactique et des galaxies naines du Groupe Local), doit être massivement multiplex (>1 000 fibres), pour une résolution R ~ 5 000 à 10 000 dans un champ >1 deg^2. L'une des premières priorités à l'échelle nationale est d'identifier un porteur de ce projet. Côté imagerie, le LSST représente un complément très attractif de Gaia car il permet une astrométrie d'une précision de l'ordre de 1mas/an pour les étoiles 3 ou 4 magnitudes moins brillantes.

Préparation de l'instrumentation E-ELT

L'énorme surface collectrice, les hautes résolutions spatiale et spectrale et la large bande spectrale optique/infrarouge de l'E-ELT en font un télescope aux multiples intérêts pour le PNCG. La grande surface collectrice permettra par exemple d'obtenir des spectres à haute résolution (entre les raies OH) des premiers objets à l'époque de la réionisation jusqu'à des magnitudes plus faibles qu'avec JWST. Les frontières de l'archéologie galactique et de l'étiquetage chimique et cinématique d'étoiles individuelles seront étendues au-delà de l'environnement immédiat de la Voie lactée jusqu'aux galaxies du groupe de Sculpteur (nécessité d'un spectrographe multi-objet visible/infrarouge avec R>20 000) et de l'amas de la Vierge (spectrographe multi-objet infrarouge avec R ~ 5 000). La topologie de la forêt Lyα du milieu intergalactique pourra être caractérisée avec un spectrographe multi-objet/multi-IFU optique de résolution R ~ 10 000, mais l'exploration des variations de constantes fondamentales (structure fine, rapport de masse e^-/p) nécessitera R ~ 50 000 et une première mesure de la dérive des redshifts R ~ 150 000. Le PNCG mettra en place un groupe de travail pour évaluer la pertinence des différents projets d'instrumentation E-ELT pour répondre à ces questions et d'autres.

Préparation de SKA

Avec sa surface de 10^6 m^2, son énorme champ de 50 deg^2 (à 21cm) et ses hautes résolutions spatiale et spectrale, SKA aura un impact unique pour le PNCG. Il pourra par exemple obtenir les spectres HI d'un milliard de galaxies à z ~ 2, caractériser l'évolution des galaxies et des grandes structures, les propriétés de la matière noire et de l'énergie noire, et la dynamique du gaz dans les galaxies et le milieu intergalactique à toutes les époques cosmiques. SKA ouvre aussi une fenêtre unique sur l'étude de l'âge sombre et la réionisation de l'Univers. La priorité aujourd'hui est à la préparation des technologies nouvelles de multi-faisceaux, réseaux phasés et de reconstruction électronique de faisceaux. Le prototype EMBRACE est en cours d'étude à Nançay, et LOFAR s'apprête à tester ces technologies pour s'attaquer à la réionisation. Il est primordial que les équipes françaises s'investissent dans les programmes scientifiques des précurseurs de SKA en construction (ASKAP, Meer-KAT).

Autres moyens

Le PNCG mettra en place des groupes de travail pour évaluer les besoins scientifiques précis et une stratégie programmatique autour de plusieurs autres thèmes et instruments prioritaires : la valorisation des simulations numériques, `IMAKA, NOEMA, CCAT, l'étude des sursauts gamma, les expériences de polarisation du CMB et un spectrographe grand champ de prochaine génération (*Next-Generation WFS*).

Tableau 1 : *projets sol/espace à implication française de fort intérêt pour le PNCG d'ici 2025 et leurs priorités :* ***P0*** *, top priorité Astronet soutenue par le PNCG ,* ***P1****,* ***stratégie/performances à évaluer****, financé ou hors évaluation*

Type de projet	CMB	Epoque de la réionisation et premiers objets	Gaz intra-amas et AGN	ISM, dynamique du gaz, formation d'étoiles dans les galaxies	Grandes structures et énergie noire : relevés grand champ	Evolution des populations de galaxies et des amas: grands relevés	Archéologie et dynamique galactique	Ondes gravitationnelles et détection de matière noire
Projets Espace acceptés	Planck	JWST SVOM	XMM	Herschel Planck		JWST Planck XMM	Gaia	LISA-PF
Projets Espace non encore acceptés		IXO	IXO	SPICA	EUCLID	IXO SPICA		LISA
Projets Sol financés		ALMA LOFAR	LOFAR	ALMA VLT/VLTI (2nd Gen)*	SDSS-III Demo-HSHS VST/VISTA	VLT/VLTI (2nd Gen)* VST/VISTA	VLT/VLTI (2nd Gen)* SDSS-III VST/VISTA	LHC Pre-EURECA
Projets Sol non encore financés	Expériences polarisation	E-ELT† SKA	SKA Pre-SKA	E-ELT† SKA Pre-SKA NOEMA CCAT	MegaCam-u LSST BigBOSS SKA P-STARRS4 Pre-SKA IMAKA Next-Gen WFS	E-ELT† SKA Pre-SKA CCAT	Suivi Gaia LSST E-ELT† P-STARRS4 IMAKA Next-Gen WFS	EURECA
Simulations numériques	Simulations numériques post-HORIZON (JADE, Bluegene-P, Platine)							

* X-Shooter, KMOS, MUSE, GRAVITY, MATISSE † EAGLE, CODEX, MICADO, HARMONI, METIS, OPTIMOS

Tableau 2 : calendrier des projets de fort intérêt pour le PNCG d'ici 2025 et leurs priorités.

Astrophysique des hautes énergies, objets compacts, astroparticules, ondes gravitationnelles)

J. L. Atteia, G. Dubus, J. Knödlseder, A. Marcowith, avec la participation du Conseil Scientifique du GdR PCHE et de T. Pradie

Introduction

L'astrophysique des hautes énergies est par essence un domaine interdisciplinaire qui unit astronomes et astrophysiciens, physiciens des particules et physiciens nucléaires. Tandis que cette interaction existait déjà au début du 20ème siècle (avec les premières études des rayons cosmiques), les liens se sont renforcés avec l'émergence au début des années 90 de la thématique « astroparticules » qui vise à répondre à des questions issues de la physique théorique, de la cosmologie ou de l'astrophysique grâce à la mise en commun de techniques et de savoir-faire complémentaires.

En France, la communauté « astrophysique des hautes énergies » s'est structurée depuis 2000 dans le Groupement de Recherche « Phénomènes Cosmiques de Haute Energie » (GdR PCHE) qui unit astrophysiciens observateurs et théoriciens et physiciens des particules du CNRS (INSU, IN2P3, INP) et du CEA (SAp, SPP). Aujourd'hui, cette communauté compte environ 320 chercheurs, dont 38% appartient à des laboratoires de l'INSU, 52% à des laboratoires de l'IN2P3, 2% à des laboratoires de l'INP et 8% au CEA (données issues de l'annuaire du GdR PCHE). La prospective thématique du présent document prend en compte cette communauté interdisciplinaire au delà des frontières institutionnelles ; cependant, l'analyse des moyens et les recommandations dans le document concernent plus spécifiquement l'INSU.

Depuis la création du GdR PCHE le domaine de l'astrophysique des hautes énergies a considérablement évolué, grâce à l'investissement de la France dans des nouveaux moyens d'observation comme les télescopes XMM-Newton & INTEGRAL (rayons X), les télescopes HESS & Fermi (rayons gamma), l'observatoire Pierre Auger (rayons cosmiques), le détecteur Antares (neutrinos de hautes énergies) et le détecteur Virgo (ondes gravitationnelles).

La communauté « astroparticules » européenne a élaboré sa propre prospective dans le cadre du réseau ASPERA. Plusieurs de ses projets futurs s'inscrivent également dans les prospectives européennes ASTRONET pour l'astrophysique et Cosmic Vision pour le spatial. Parmi les questions fondamentales identifiées dans ces prospectives figure la question des extrêmes de l'Univers : « Do we understand the extremes of the universe ? » - comprenons nous les extrêmes de notre univers ? Dans le domaine de l'astrophysique des hautes énergies, cette interrogation se décline en cinq grandes questions :

- Quelle est la nature de la matière noire ?
- Quelle est l'influence des objets compacts sur leur environnement ?
- Comment explosent les astres ?
- Quelle est l'origine des rayons cosmiques ?
- Que va nous révéler le ciel non-photonique ?

Pour répondre à ces questions, la communauté française s'appuie sur un éventail performant de moyens d'observation qui existent déjà, ou sont en phase de définition ou de construction. L'interprétation des observations s'appuie sur des efforts de modélisation qui sont plus ou moins importants selon les domaines. La compréhension des phénomènes à haute énergie nécessite aussi de plus en plus souvent des observations complémentaires aux plus basses fréquences, et l'observation multi-longueur d'ondes des sources d'émission haute énergie prend un rôle de plus en plus important dans l'activité de la communauté française.

Le présent document de prospective s'appuie largement sur l'exercice de prospective du GdR PCHE pour la période 2010-2015.

Faits saillants

Le domaine d'astrophysique des hautes énergies a été marqué dans les dernières années par des avancées importantes. Voici 4 de celles auxquelles la communauté française a contribué d'une manière significative et qui semblent être les plus marquantes des cinq dernières années :

➢ ***Le ciel gamma à très haute énergie dévoilé par HESS.***

Depuis ses premières observations en 2004, l'observatoire HESS dévoile un ciel gamma à très haute énergie d'une richesse insoupçonnée. En particulier, l'observation du plan galactique révèle une multitude de sources, dont des nébuleuses de pulsars, restes de supernovae, binaires gamma et plusieurs sources sans contreparties visibles à plus basse énergie (nommées « accélérateurs noirs ») – cf. Fig. 1. HESS a franchi le pas important d'une astronomie exploratoire (avec seulement quelques sources connues depuis plusieurs dizaines d'années) à une astrophysique mature, avec à la clé la compréhension des phénomènes d'accélération de particules dans l'univers.

➢ ***L'anisotropie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie dévoilée par Auger.***

L'origine des rayons cosmiques reste une question centrale de l'astrophysique des hautes énergies. Généralement déviés par les champs magnétiques galactiques et intergalactiques, seuls les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ($E > 5 \times 10^{19}$ eV) subissent une déviation suffisamment faible pour que leurs directions d'arrivée puisse nous renseigner sur leurs sites d'accélération. Les 27 premiers événements avec des énergies $> 5{,}7 \times 10^{19}$ eV enregistrés par l'observatoire Pierre Auger sont clairement distribués d'une manière anisotrope sur le ciel (cf. Fig. 2). La distribution des rayons cosmiques semble suivre la densité de la matière dans l'univers local, telle qu'elle est tracée par la distribution des noyaux actifs galactiques proches ($D < 75$ Mpc).

➢ **L'imagerie de l'annihilation électrons-positrons au centre de la galaxie et la découverte de l'asymétrie du disque.**

Depuis les années 1980 on sait que les régions centrales de notre galaxie sont le lieu d'une forte annihilation électron-positron, cependant la source des positrons reste toujours inconnue. Le spectromètre SPI à bord d'INTEGRAL a mis en évidence la forte concentration de l'émission d'annihilation à 511 keV vers le centre galactique et a pu cartographier l'émission du disque. Cette dernière se révèle asymétrique par rapport au

centre galactique, avec un excès dans une région qui abrite un grand nombre de binaires X de faible masse (cf. Fig. 3). Cette coïncidence suggère que ces dernières pourraient être des sources importantes de positrons galactiques.

➢ **La découverte des sursauts gamma à très grand redshift et la caractérisation de leur émission à très haute énergie.**

Les sursauts gamma, phénomènes extrêmement brillants mais aussi relativement brefs, ont été proposés depuis longtemps comme excellentes sondes de l'univers lointain, mais pendant longtemps les distances mesurées ne pouvaient pas égaler celle des quasars ou des galaxies lointaines. En 2005, grâce aux observations de Swift et de TAROT un objet a été détecté à z = 6,3 (GRB 050904), rivalisant ainsi avec les objets connus les plus lointains. Et en avril 2009, la contrepartie du sursaut GRB 090424 a même été localisée à z = 8,2, en faisant l'objet le plus distant jamais observé. Ces observations ouvrent la voie à l'étude de l'univers lointain par l'intermédiaire des sursauts gamma, ce qui devrait permettre dans l'avenir de mieux comprendre la formation des premières étoiles et des premières galaxies dans l'univers. En même temps, le lancement de Fermi en 2008 a ouvert la voie à l'étude des sursauts gamma aux plus hautes énergies, ce qui a été brillamment illustré avec l'observation de GRB 080916C, le sursaut le plus énergétique jamais observé.

Thématiques scientifiques & évolutions

L'Univers comme laboratoire

L'astrophysique des hautes énergies offre une opportunité unique pour étudier les lois de la physique fondamentale au-delà de ce qui est accessible en laboratoire. Des exemples sont la gravitation en champ fort, la matière ultra-dense, les champs magnétiques extrêmes ou la physique des particules au-delà de 10^{12} eV (TeV).

Les observations d'oscillations quasi périodiques dans les binaires X permettent de sonder les régions proches des étoiles à neutrons où l'espace-temps est courbe et les vitesses orbitales s'approchent de la vitesse de la lumière. Ainsi, la théorie de gravitation peut être vérifiée dans le domaine des champs forts qui est inaccessible sur Terre. Récemment, des chercheurs français ont ainsi pu mettre en évidence l'existence d'une dernière orbite stable autour des étoiles à neutrons, confirmant ainsi une prédiction de la relativité générale. La mesure du profil de la raie du fer dans les disques d'accrétion autour des trous noirs est un autre diagnostic permettant la mesure du spin des trous noirs, paramètre fondamental qui est assez

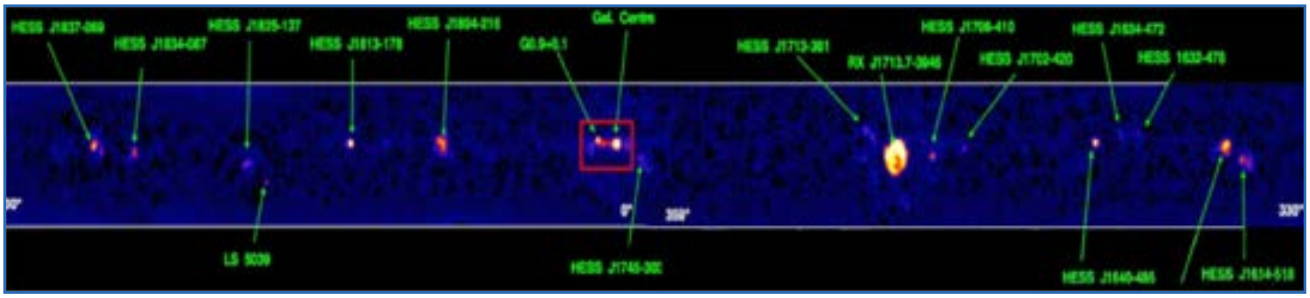


Fig. 1 : Image HESS de l'émission du plan galactique. *Aharonian et al. 2005, Science, 307, 1839.*

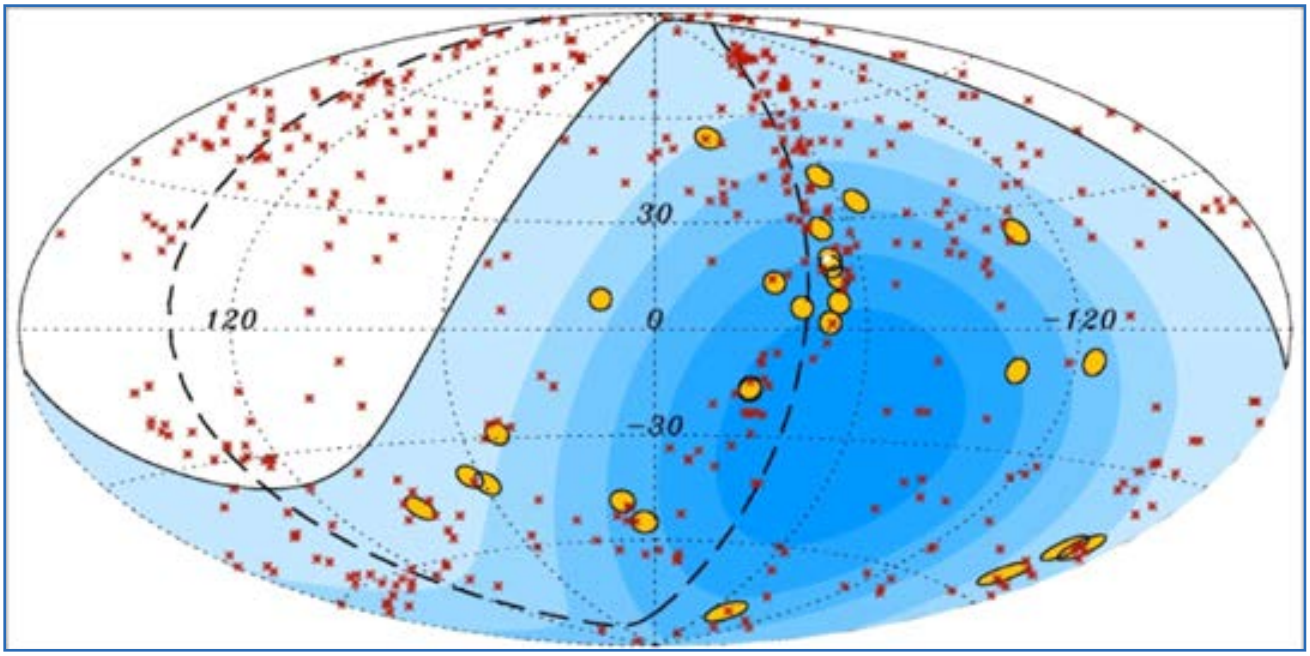


Fig. 2 : Carte du ciel en projection galactique montrant la direction d'arrivée des 27 rayons cosmiques d'ultra-haute énergie observés par Auger (en cercles jaunes) et la distribution des noyaux actifs galactiques proches (D < 75 Mpc ; en astérisque rouge). Le gradué bleu indique l'exposition du ciel vu par Auger. *Abraham et al. 2007, Science, 318, 938.*

peu contraint actuellement (cf. 3.2). Le futur observatoire IXO sera essentiel pour avancer dans ce domaine. Puis, la détection directe des effets de la relativité générale induits par le trou noir central galactique sur les étoiles les plus proches dans l'infrarouge (GRAVITY) est une autre possibilité intéressante à tester la relativité générale en champ fort, à laquelle la communauté se prépare aujourd'hui à l'aide de simulations numériques.

Dans certains modèles de la gravité quantique, qui cherchent à rendre compatible la théorie de la relativité générale avec celle de la mécanique quantique, l'invariance de Lorentz n'est plus garantie, prédisant une dépendance du temps de propagation des rayons gamma en fonction de leur énergie. L'observation des sursauts gamma ou des éruptions des noyaux actifs galactiques fournissent alors des contraintes de plus en plus sévères, grâce en particulier aux télescopes gamma Fermi et HESS. Récemment, l'observation de Fermi de GRB 080916C a contraint la masse de la gravité quantique à > 1,3 x 10^{18} GeV/c^2, seulement un ordre de grandeur plus petit que la masse de Planck (cf. 2) !

Les étoiles à neutrons contiennent la matière dans sa forme la plus dense et montrent à leur surface les champs magnétiques les plus intenses dans l'univers, faisant d'elles des laboratoires astrophysiques des extrêmes. La mesure de la masse et du rayon des étoiles à neutrons, accompagnée d'efforts en modélisation, permet de contraindre l'équation d'état à haute densité et basse température dans des conditions inaccessibles aux collisionneurs d'ions lourds. Depuis longtemps, des chercheurs français contribuent à cette recherche au niveau observationnel et théorique. Ainsi, les modèles théoriques et numériques ont gagné en richesse, notamment en incluant la possibilité de former des condensats de pions, kaons, voire de quarks aux centres de ces astres ; mais aussi en améliorant la description de la matière superfluide et du couplage avec l'écorce (élastique), dont dépendent la plupart des observables astrophysiques. Ces études sur la structure des étoiles à neutrons sont le lieu d'une grande synergie entre astrophysiciens théoriciens et physiciens nucléaire (notamment à l'IPN). L'étude des champs magnétiques forts des étoiles à neutrons qui se manifestent par des faisceaux collimatés de lumière dans les pulsars a récemment eu un regain d'intérêt important en France grâce aux observations du satellite Fermi (cf. 3.2). Les champs magnétiques intenses autour des étoiles à neutrons sont un site privilégié pour observer la biréfringence magnétique du vide qui pourra dévoiler la vraie nature du vide, une idée sur laquelle des chercheurs français travaillent depuis quelques années.

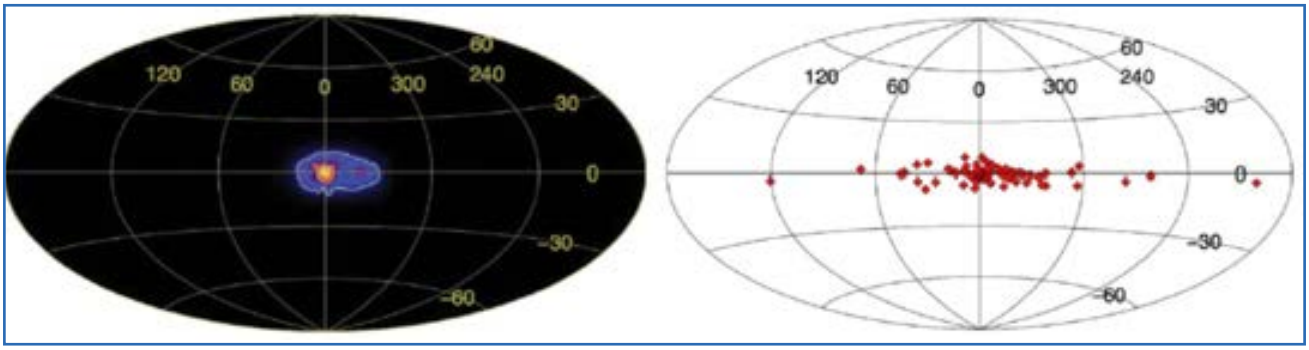


Fig. 3 : Carte du ciel dans la raie d'annihilation électrons-positrons à 511 keV observée avec INTEGRAL/SPI (gauche) et distribution des binaires X de faible masse observées en X-durs avec INTEGRAL/IBIS (droite). L'émission 511 keV du disque galactique montre une asymétrie comparable à celle des binaires X de faible masse *Weidenspointner et al. 2008, Nature, 451, 159*.

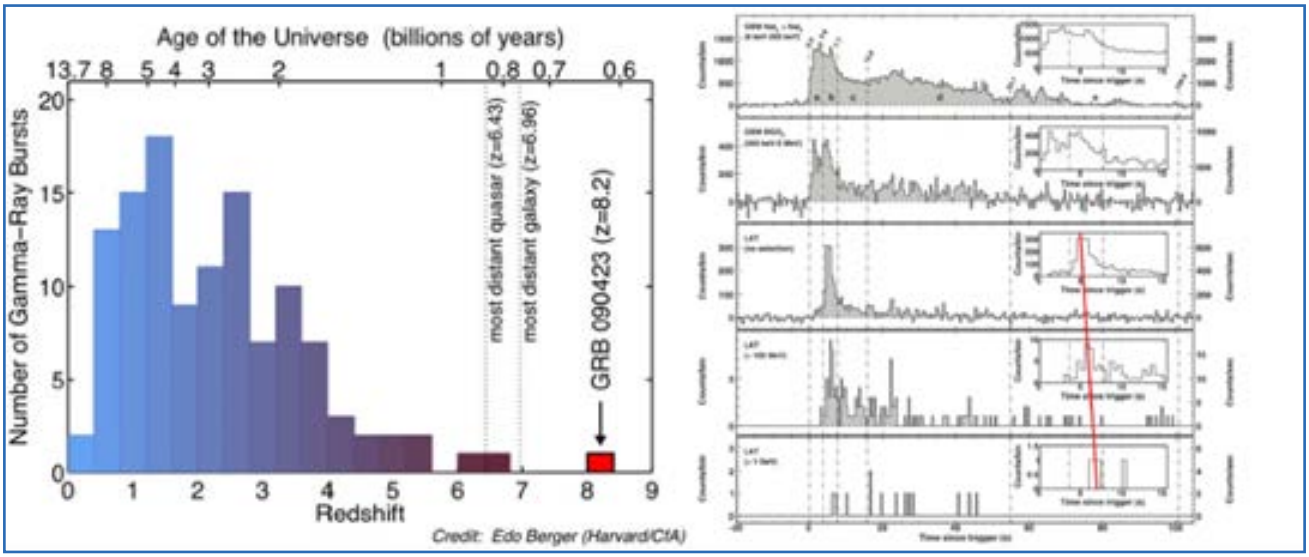


Fig. 4 : Gauche : Distribution en redshift des sursauts gamma. En 2005 le télescope robotique TAROT a permis la découverte d'un sursauts gamma à z=6,29. *Boër et al. 2006, ApJ, 638, L71*. Aujourd'hui le sursaut gamma le plus lointain observé se situe à z = 8,2, plus loin que les quasars et galaxies les plus lointains connus. Droite : Courbes de lumière du sursaut gamma GRB 080916C observé par Fermi entre 8 keV et plusieurs GeV. Le pic de lumière à haute énergie est retardé par rapport au pic à basse énergie contraignant l'échelle d'énergie d'une possible violation de l'invariance de Lorentz prédite par certaines théories de gravité quantique. *Abdo et al. 2009, Science, 323, 1688*.

Comprendre la nature de la matière noire reste une préoccupation essentielle de l'astrophysique moderne. Sous l'hypothèse que la solution se trouve dans l'existence de particules non-relativistes à faible section efficace, la méthode la plus directe consiste à observer le recul nucléaire engendré par les interactions de la matière noire avec la matière normale dans des laboratoires souterrains (Edelweiss). Une approche complémentaire consiste en la détection de produits secondaires (rayons gamma, neutrinos, antiprotons, positrons) de la matière noire concentrée gravitationnellement. Avec INTEGRAL, Fermi, HESS et Antares (existant) et AMS-02, CTA et KM3NeT (futurs), la communauté française est particulièrement bien équipée pour contribuer aux recherches dans ce domaine.

Une autre grande énigme de la formation de l'univers concerne la brisure de la symétrie entre matière et antimatière. Prochainement, le spectromètre AMS-02 sera à la recherche d'antinoyaux ou d'antiprotons de haute énergie qui permettront la découverte des reliques d'antimatière datant de la période d'inflation, sous condition bien sûr que ces reliques existent ! D'une manière plus conventionnelle, la communauté française participe depuis longtemps aux observations de la raie d'annihilation à 511 keV permettant l'étude de la production d'antimatière au sein de notre propre galaxie. Grâce aux observations du satellite INTEGRAL des progrès important ont été accomplies dans les années récentes (cf. 2), sans toutefois apporter de réponse définitive à la question de l'origine des positrons galactiques. Une instrumentation bien plus sensible sera nécessaire pour percer ce mystère.

Objets compacts et leur environnement

Les objets compacts (naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs) sont au coeur de l'astrophysique des hautes énergies. L'énergie de rotation et l'énergie potentielle de gravitation pouvant être mises en jeu sont démultipliées par le grand rapport M/R de ces astres. La physique autour des objets compacts vise à une meilleure compréhension des différents canaux via lesquels cette énergie est libérée et dissipée. Cette compréhension nécessite de résoudre des problèmes complexes de magnéto-hydrodynamique partiellement en régime relativiste.

Le ciel X est dominé par des sources (binaires X, noyaux actifs de galaxies) dont la puissance provient de l'accrétion de matière. La fraction de cette énergie qui est rayonnée dépend du régime du flot d'accrétion. Les observations corrélées multi-longueurs d'onde de binaires X transitoires font largement progresser notre connaissance de ces régimes, des transitions et de leur lien avec l'éjection de matière (hystérésis, lien jet compact - état spectral X etc). INTEGRAL a permis de découvrir une population de binaires massives dont l'émission X est très absorbée. Certaines montrent une variabilité très rapide qui pourrait être reliée à la structure très inhomogène du vent du compagnon massif. Ces recherches bénéficieront de l'arrivée de X-SHOOTER, LOFAR et SVOM. Le trou noir central de notre galaxie reste le meilleur banc d'essai des modèles d'accrétion radiativement inefficaces. Les observations multi-lambda des éruptions de Sgr A* (XMM, VLT…) montrent que celles-ci seraient dues à du rayonnement synchrotron d'électrons accélérés.

Chandra et XMM-Newton permettent d'obtenir des spectres X haute résolution avec un rapport signal sur bruit sans précédent. L'application de diagnostics X des plasmas devient possible, permettant de caractériser températures et densités dans les régions internes des disques et de rechercher les signatures d'effets relativistes (raies du Fer). IXO généralisera ces études actuellement limitées aux objets les plus brillants. La spectroscopie X nécessite des codes calculant avec précision le continuum ainsi que les nombreuses raies en absorption ou en émission dans le milieu photoionisé.

Le transport du moment cinétique dans les disques est un processus fondamental qui fait l'objet de recherches depuis plus de trente ans. Après une longue période de controverses, il a été établi dans ces dernières années que des instabilités hydrodynamiques ne peuvent pas rendre compte de ce transport turbulent. Le seul mécanisme viable connu actuellement est l'instabilité magnéto-rotationnelle. Son étude numérique a beaucoup progressé récemment grâce aux travaux de groupes français. La modélisation numérique constitue également un moyen privilégié pour l'étude de l'interaction disque – magnétosphère et des processus MHD d'éjection de matière. Les moyens numériques actuels permettent des simulations qui peuvent valider ou non les approches semi-analytiques employées jusqu'à présent pour résoudre ces problèmes.

L'étude des jets des noyaux actifs de galaxie bénéficie actuellement d'un contexte très favorable avec les observations de Fermi et HESS (HESS-2 et CTA dans le futur) qui contraignent l'émission Compton inverse des blazars. Quel que soit l'objet, la modélisation radiative est le seul moyen pour identifier les processus d'accélération de particules. L'observation de variabilité au TeV démontre que les zones d'émission sont compactes et se déplacent à des vitesses hautement relativistes. Plusieurs groupes français développent des modèles radiatifs inhomogènes et dépendant du temps dans le but de reproduire les observations multi-longueur d'onde, de contraindre la structure du jet, sa composition et l'accélération de particules.

La très grande majorité des sources du ciel gamma galactique sont associées à des pulsars. La communauté française s'est impliquée de manière croissante dans les observations gamma de ces pulsars, de leurs nébuleuses et des binaires gamma. Une partie du chronométrage radio indispensable à la détection de certains pulsars est effectué à Nançay. La communauté est également présente dans l'étude théorique des mécanismes d'émission de ces objets. Fermi a déjà identifié plus de 40 pulsars gamma jeunes ou millisecondes, dont certains dans des amas globulaires. Le rayonnement des pulsars est émis surtout en gamma, la radio ne représentant qu'une très faible fraction de la puissance émise. La principale source d'information sur le mécanisme d'émission des pulsars devient ainsi accessible, ouvrant la perspective de progrès rapides sur ce problème ouvert il y a 40 ans. La récente (re) détection de la polarisation X du pulsar du Crabe par INTEGRAL, après un hiatus de plus de trente ans, nous rappelle que la polarisation apporte des informations uniques sur la géométrie dans ces sources mais aussi pour les disques et les jets. Un effort instrumental dans cette direction semble indispensable.

Les nébuleuses de pulsar sont le produit de l'interaction du vent relativiste généré par les pulsars avec le milieu interstellaire. Les observations, Chandra, XMM et HESS permettent pour la première fois l'étude spatialement résolue des pertes en énergie

des électrons de la nébuleuse. Le mécanisme par lequel l'énergie de rotation du pulsar est donné aux particules dans le vent relativiste est un problème majeur avec des implications pour les sursauts gamma ou les noyaux actifs de galaxie où l'énergie de l'éjecta pourrait être initialement sous forme de flux de Poynting avant de devenir cinétique. La dissipation pourrait avoir lieu par reconnection dans la nappe de courant qui sépare les hémisphères du pulsar de polarité opposée.

Plusieurs binaires sont maintenant des émetteurs gamma confirmés, avec une modulation orbitale vue par HESS et Fermi. Les observations suggèrent que ces binaires « gamma » contiennent un pulsar jeune. L'émission proviendrait de l'interaction du vent de pulsar avec son environnement radiatif (photons de l'étoile massive) et matériel (vent stellaire de son compagnon). Cette interaction a lieu sur des échelles spatiales très petites. Les binaires gamma donnent ainsi accès à des informations sur les conditions dans les vents relativistes bien plus près du pulsar.

La quasi-totalité des galaxies abritent des trous noirs supermassifs. La formation et l'évolution du trou noir et de sa galaxie hôte sont inséparables. On sait qu'il existe des mécanismes de régulation qu'il est indispensable d'identifier pour comprendre la formation des grandes structures. Les observations gamma (Fermi) et radio (LOFAR) apporteront une meilleure connaissance des mécanismes de dissipation des jets dans le milieu intergalactique. Fermi va permettre l'étude statistique de l'évolution de blazars sélectionnés en gamma et d'en déduire des contraintes sur les cycles d'activité. Les observations X, optique et radio semblent indiquer deux séquences de noyaux actifs de galaxies dont l'une est plus brillante en radio que l'autre, indépendamment de la luminosité de l'objet. Outre le taux d'accrétion, le deuxième paramètre en jeu pourrait être la rotation du trou noir.

Enfin, l'observation de quasars à $z > 6$ implique l'existence de trous noirs de 10^4 masses solaires accrétant au taux d'Eddington à z=10, au moment de la formation des premières étoiles. Curieusement, on observe des sources X ultralumineuses dans d'autres galaxies qui pourraient être des trous noirs de masse intermédiaire entre celle des trous noirs stellaires et supermassifs. La détection de nébuleuses photoionisées dans certains cas prouve que l'émission X est bien isotrope et élevée. Une étude réalisée en France a permis la découverte d'une source variable ayant une luminosité X de plus de 10^{42} erg/s, ce qui implique clairement un trou noir de plusieurs centaines de masses solaires. Cette masse est trop élevée pour être expliquée par l'effondrement d'une étoile, exceptée peut-être avec une étoile primordiale de très faible métallicité.

Phénomènes explosifs

Les étapes finales de l'évolution stellaire conduisent dans certaines conditions à une explosion qui détruit tout ou partie de l'étoile. De tels événements sont accompagnés d'une émission électromagnétique observable, mais aussi d'une émission non-photonique (neutrinos, ondes gravitationnelles) qui peut être dominante. La compréhension des explosions stellaires constitue un enjeu majeur de l'astrophysique moderne car celles-ci permettent une mesure précise de la géométrie de l'Univers (qui a conduit à la découverte de l'énergie noire), elles tracent l'histoire de la formation des étoiles massives, elles marquent la naissance des trous noirs stellaires, elles fournissent des sondes du milieu interstellaire des galaxies jeunes (sursauts gamma), et elles sont le lieu privilégié de production des rayons cosmiques galactiques (cf. 3.4) et des sites potentiels d'émission de neutrinos énergétiques et d'ondes gravitationnelles (cf. 3.5). Les grandes questions concernent la physique de l'explosion (tant pour les supernovae thermonucléaires que pour les supernovae gravitationnelles), la nature des progéniteurs (pour les supernovae thermonucléaires et les sursauts gamma) et les conditions d'émission d'un jet relativiste, la nature des astres issus de la coalescence de deux étoiles à neutrons, l'importance des émissions non-photoniques (neutrinos, ondes gravitationnelles), et le rôle des restes de supernovae dans la production des rayons cosmiques galactiques.

La contribution de la communauté française à cette thématique est notable, tant au niveau observationnel, qu'au niveau théorique. Au niveau observationnel, la communauté française contribue aux grands relevés de supernovae de type Ia pour la cosmologie (SNLS) et étudie les émissions X et gamma des restes de supernovae. HESS a mis en évidence pour la première fois l'émission gamma des restes de supernovae qui nous renseignent sur l'accélération des rayons cosmiques (cf. 3.4). INTEGRAL a permis la réévaluation du taux de supernovae galactiques avec la mesure précise de l'émission radioactive de ^{26}Al et a confirmé la présence du radioisotope ^{44}Ti dans le reste de supernova Cas A. Le satellite GALEX a apporté une ouverture sur des phénomènes peu ou pas observés jusqu'ici comme l'émission UV liée au « shock breakout » de deux supernovae et à la découverte de l'émission UV associée à la destruction d'une étoile par effet de marée au voisinage d'un trou noir supermassif. Dans le domaine des sursauts gamma le travail en France porte actuellement sur le suivi des afterglows dans le domaine visible : suivi rapide de l'afterglow visible avec l'observatoire robotique TAROT, étude des absorptions dans les spectres à haute résolution pris avec UVES au VLT et étude du site de production des sursauts dans les galaxies proches.

Au niveau théorique, une nouvelle piste prometteuse a émergé ces dernières années pour tenter de résoudre l'énigme du mécanisme d'explosion des supernovae, celle du rôle possible de l'instabilité advective-acoustique. Ceci suppose toutefois des développements théoriques et numériques conséquents, pour lesquels la communauté française semble bien mieux placée que dans le passé, en particulier grâce aux développements théoriques menés au CEA. En ce qui concerne la coalescence de deux objets compacts (deux étoiles à neutrons ou une étoile à neutrons et un trou noir) la communauté française est très active dans la construction précise de la structure du système avant la coalescence et également la prédiction des ondes gravitationnelles émises. À côté de la modélisation des explosions, il convient de mentionner également l'implication de la communauté française dans les expériences de chocs radiatifs avec des lasers qui reproduisent les conditions des chocs astrophysiques, en particulier dans les supernovae.

Les années à venir vont être marqués par le développement du projet satellite franco-chinois SVOM (2014) qui fédère l'ensemble de la communauté des sursauts gamma. Un GDRE s'est mis en place en 2009 pour préparer le suivi sol des sursauts gamma SVOM.

Rayons cosmiques

Depuis la découverte des rayons cosmiques par Victor Hess en 1912, la recherche de leurs sources est une quête capitale de l'astrophysique des hautes énergies. Les rayons cosmiques sont principalement composés de protons et/ou de noyaux lourds et la recherche des signatures de leur accélération (décroissance des pions neutres en rayons gamma, modification morphologique en rayons X, neutrinos, ionisation du milieu interstellaire) est au centre des investigations. Il est généralement admis aujourd'hui que les rayons cosmiques aux énergies $E < 10^{15}$ eV sont d'origine galactique, cependant aucune source d'accélération hadronique n'a pu encore être identifiée sans ambiguïté dans notre galaxie. Un bond en avant de nos connaissances a pu être obtenu récemment grâce à l'imagerie X et gamma des restes de supernova qui montre la présence de particules très énergétiques ainsi qu'une forte amplification du champ magnétique localement à des valeurs de l'ordre de deux ordres de grandeur au-dessus de celles du milieu interstellaire. Une telle amplification pourrait expliquer la production de rayons cosmiques jusqu'aux plus hautes énergies dans les phases primaires de l'évolution du reste de supernova. Les résultats de Fermi sont attendus pour donner en combinaison avec les mesures de HESS une preuve observationnelle directe de l'accélération de protons (et d'ions) dans les restes des supernovae. La communauté française prend très activement part dans ce domaine de recherche, à la fois au niveau observationnel mais aussi au niveau théorique avec la modélisation des phénomènes d'accélération et des émissions diffuses galactiques.

À plus haute énergie ($E > 10^{19}$ eV), l'origine des rayons cosmiques est extragalactique, avec comme candidats favoris les noyaux actifs de galaxies ou les sursauts gamma. Dans ce domaine, les avancées récentes proviennent de l'observatoire Auger. D'abord, Auger a permis de confirmer l'existence de la coupure GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) au-delà de 4×10^{19} eV qui s'explique par l'interaction des rayons cosmiques avec les photons du fonds diffus cosmique. Ainsi, les rayons cosmiques aux plus hautes énergies nous parviennent de l'univers local. Puis, Auger a pu mettre en évidence une anisotropie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie ($E > 5{,}7 \times 10^{19}$ eV) qui semble être corrélée avec la densité de la matière dans l'univers local. À priori, il est même envisageable de tracer directement la distribution des sources des rayons cosmiques car leur déviation par le champ magnétique intergalactique devient assez faible aux plus hautes énergies. Pour le moment, le faible nombre de rayons cosmiques d'ultra-haute énergie détectés avec Auger (environ 50) ne permet pas l'identification de contreparties, donc la question de la possibilité d'une astronomie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie reste pour le moment en suspens. C'est dans cette optique que la communauté mise sur la construction d'Auger Nord afin d'augmenter la sensibilité pour la détection des rayons cosmiques. D'autres techniques d'observation comme la radiodétection des gerbes atmosphériques (CODALEMA) ou l'observation des gerbes depuis l'espace (JEM-EUSO) sont à l'étude afin d'améliorer la statistique d'événements d'ultra-haute énergie dans un temps de mesure raisonnable.

La propagation des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire est toujours mal comprise. Là encore les observations de l'émission diffuse dans la galaxie (Fermi, HESS, CTA) pourraient nous permettre de mieux appréhender la diffusion des particules depuis les sources et leurs interactions avec les zones denses du milieu interstellaire. Les observations directes à des énergies de l'ordre de quelques dizaines de TeV menées par CREAM ou celles qui seront menées par AMS-02 dans le domaine du GeV au TeV vont permettre de mieux contraindre la dépendance en énergie du coefficient de diffusion des rayons cosmiques.

Enfin à basse énergie, les sondes Voyager et Pioneer devraient continuer à nous apporter des indications sur le spectre des rayons cosmiques en deçà de la limite imposée par la modulation solaire. Cette partie du spectre joue sans doute un rôle essentiel dans la formation et la dynamique des structures du milieu interstellaire ou du milieu de formation des premières étoiles. Elle joue un rôle aussi dans l'irradiation cométaire, l'astrochimie, et les études des climats. Ce domaine encore largement inexploité devrait faire l'objet de collaborations accrues entre différentes composantes de l'INSU.

Notons également que les rayons cosmiques de basse énergie produisent des raies d'excitation nucléaires dans le domaine du MeV. Une instrumentation adéquate, comme un télescope Compton, pourrait ouvrir cette fenêtre d'investigation dans l'avenir. Des progrès récents ont aussi été faits concernant la détection de la composante leptonique des rayons cosmiques à haute énergie (Fermi, HESS) qui suggèrent l'existence d'une ou plusieurs sources de rayons cosmiques proches de la Terre.

Nouveaux messagers

En astronomie, les photons constituent notre principale source d'informations sur l'univers, ceux-ci sont étudiés aujourd'hui à travers tout le spectre électromagnétique, de la radio jusqu'au gamma. Les seuls messagers non-photoniques auxquels nous avons accès aujourd'hui sont les échantillons de matière extraterrestre qui tombent sur Terre (ou qui ont été cherchés dans l'espace), les rayons cosmiques, les neutrons et le vent de particules qui provient du soleil, et les neutrinos de basse énergie observés du soleil et de SN 1987A. Les progrès technologiques nous permettent aujourd'hui de concevoir l'exploitation d'autres messagers de l'univers, comme les ondes gravitationnelles ou les neutrinos de haute énergie. Pour le moment, ces domaines restent exploratoires, avec des progrès notables en instrumentation et en modélisation théorique.

L'énorme potentiel scientifique lié à la détection des ondes gravitationnelles couvre plusieurs domaines allant de la physique fondamentale à la cosmologie en passant par l'astrophysique. Par exemple, la vitesse des ondes gravitationnelles pourrait être mesurée en comparant les temps d'arrivée à chaque détecteur à ceux de signaux électromagnétiques provenant de la même source (par exemple un sursaut gamma). D'autre part, la masse du graviton pourrait être contrainte en cherchant des distorsions dans la forme d'un chirp gravitationnel, par rapport à celle prévue par la relativité générale. En astrophysique, la coalescence des objets compacts (étoiles à neutrons et trous noirs) est une source intense d'ondes gravitationnelles, ouvrant ainsi un vaste domaine d'investigations qui permet de mieux cerner la physique de ces objets extrêmes. Et la détection des ondes gravitationnelles primordiales donne la possibilité d'étudier la phase de l'inflation de l'univers.

La modélisation des sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles, que ce soit par des méthodes numériques ou analytiques (perturbatives) est un point crucial en vue de la détection d'un signal, à cause du faible rapport signal/bruit attendu. Les calculs perturbatifs, pour lesquels les chercheurs français sont les plus en pointe, permettent ainsi aujourd'hui d'avoir une « banque de données » complète pour les sources de binaires d'astres compacts. D'un autre côté, les simulations numériques ont permis de construire des modèles astrophysiquement de plus en plus réalistes de binaires d'étoiles à neutrons et de binaires mixtes. Certains de ces modèles servent par la suite de conditions initiales pour des groupes simulant les sources d'ondes gravitationnelles aux États-Unis ou en Allemagne. Une thématique très prometteuse ici aussi est la simulation de supernovae gravitationnelles en tant que sources d'ondes gravitationnelles.

Les dernières années ont été marquées par les premières mesures scientifiques des interféromètres kilométriques Virgo et LIGO, qui ont maintenant des sensibilités très proches des celles qui étaient prévues. Désormais il est possible de détecter une coalescence d'une binaire d'étoiles à neutrons de 1,4 masses solaires à 15 Mpc environ et celle d'une binaire de trous noirs de 20 masses solaires à environ 70 Mpc. Avec ces limites, les taux estimés d'événements sont encore trop faibles pour assurer une détection (environ 1 événement sur 200-300 ans). Toutefois, les détecteurs de deuxième génération, advanced Virgo et advanced LIGO apporteront une amélioration en sensibilité par un facteur 10, se traduisant par un taux de détection pour les coalescences d'étoiles binaires de quelques événements par an pour les modèles les plus pessimistes à une centaine d'événements par an pour les modèles les plus optimistes. Ainsi, la première détection d'ondes gravitationnelles est à portée de main.

En ce qui concerne les neutrinos de haute énergie, les sources astrophysiques visées sont les mêmes que celles qui sont étudiées par HESS ou Auger, ou même encore Virgo : sursauts gamma, noyaux actifs de galaxies, microquasars ou encore soft-gamma repeaters et restes de supernovae. De plus, les neutrinos présentent un fort potentiel de découverte pour des sources cachées qui sont opaques pour la transmission des photons. Un télescope à neutrinos de haute énergie a d'autre part une capacité à détecter le signal d'annihilation de neutralinos/WIMPs, particules supersymétriques stables pouvant constituer l'essentiel de la matière noire de l'Univers, qui s'accumulerait au centre de la Terre, du Soleil, ou de la galaxie.

La France a initié le projet Antares, un détecteur Cherenkov sous-marin couvrant 0,1 km^2, situé au large des côtes méditerranéennes françaises. Antares voit le ciel de l'hémisphère sud, incluant le centre galactique, et possédant ainsi une vue du ciel complémentaire à celui d'IceCube. La prochaine étape envisagée est le projet KM3NeT qui vise un volume instrumenté de plus d'un km^3 pour un détecteur sous-marin en Méditerranée. Ce télescope devrait améliorer d'un facteur 50 la sensibilité actuellement accessible par Antares et présenter une résolution angulaire significativement meilleure que IceCube à haute énergie.

Aux plus hautes énergies (100 PeV et au-delà), les neutrinos peuvent être générés par les interactions GZK de protons d'ultra-haute énergie produits par des sursauts gamma ou des noyaux actifs galactiques. Trois techniques sont à l'étude qui pourraient apporter une détection dans l'avenir : (1) l'observation des gerbes atmosphériques horizontales initiées par des interactions profondes dans l'atmosphère (qui est déjà possible avec Auger ou dans le futur avec JEM-EUSO), (2) la détection de l'onde acoustique créée par les cascades dans l'eau (R&D Amadeus sur le site Antares), ou (3) la détection radio des gerbes dans la glace ou la lune (qui sera possible avec LOFAR).

En attendant les premières détections, une astronomie multi-messagers est en train de se structurer en France. Il s'agit des projets TaToO (recherche de contreparties optiques de signal neutrinique), GWHEN (analyse conjointe neutrinos de haute énergie/ondes gravitationnelles impulsives) et d'un projet de suivi optique des triggers gravitationnels produits par Virgo et LIGO.

Forces et faiblesses de la communauté française

La France compte une communauté importante dans le domaine de l'étude des objets compacts et de leur environnement, tant au niveau des observations que des modélisations, avec une forte visibilité internationale. Plusieurs ANR ont été financés dans cette thématique et la France participe également au ITN européen « Black Hole Universe ». Cependant, la thématique repose beaucoup sur des observations en rayons X (même si les observations en gamma gagnent en importance avec HESS et Fermi), et la France n'est aujourd'hui impliquée dans aucun projet instrumental X à court et moyen terme, tandis que des projets existent aux Etats Unis, en Allemagne et Russie, et au Japon.

La France compte également une importante communauté dans la recherche sur les rayons cosmiques et l'étude des sources astrophysique de haute énergie, avec une bonne visibilité internationale. Dans le domaine de l'astronomie des rayons gamma (HESS, Fermi), une forte interaction et synergie s'est développé entre chercheurs INSU et IN2P3 en France qui est un des grands succès des « Astroparticules » qui voient enfin leurs développements contribuer réellement à l'astrophysique. L'observation des rayons cosmiques au sol (Auger), porté principalement par des chercheurs de l'IN2P3, a aussi fait des progrès considérables, cependant l'interaction entre les communautés INSU et IN2P3 semble beaucoup plus faible dans ce domaine. En ce qui concerne l'étude théorique de l'accélération de particules et plus particulièrement la modélisation des chocs et l'étude du transport des particules énergétiques, la communauté française bénéficie des nombreux outils développés dans le cadre du PNST. L'application de ces outils à l'astrophysique demeure encore trop limitée.

La communauté française est également bien représentée dans les domaines de l'étude des restes de supernovae en rayons X et l'étude des sursauts gamma. La mission sino-française SVOM présente un projet fédérateur pour la France dans les domaines des sursauts gamma, et la communauté est en train de se structurer à l'aide d'un GDR européen. Un effort semble toutefois nécessaire à l'échelle nationale pour rapprocher la communauté « hautes énergies » des autres communautés susceptibles d'utiliser les sursauts comme sondes astrophysiques, par exemple les cosmologues ou les physiciens qui étudient

les ondes gravitationnelles ou les neutrinos. La modélisation des phénomènes explosifs (et en particulier des supernovae gravitationnelles) gagne en importance en France, cependant elle repose seulement sur quelques individus.

Les chercheurs français en hautes énergies s'intéressent aussi de plus en plus aux questions de la physique fondamentale, avec une visibilité significative pour les tests de la relativité générale à l'aide des oscillations quasi-périodiques et sur l'étude de l'origine des positrons galactiques à l'aide des observations de la raie d'annihilation à 511 keV. Cependant, sur d'autres questions centrales, comme la mesure du spin des trous noirs, l'impact de l'activité de recherche en France est moindre.

Une forte activité s'est développée en France dans le domaine de la détection des nouveaux messagers (Auger, Antares, Virgo) qui est principalement porté par les chercheurs de l'IN2P3. Les interactions avec la communauté INSU se limitent principalement à la modélisation de la propagation des rayons cosmiques à ultra-haute énergie ou aux ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence des objets compacts, même si la mise en place des alertes multi-messagers commence aussi à impliquer des observateurs.

Moyens

L'étude des phénomènes cosmiques de haute énergie nécessite un large spectre de moyens d'observation qui comprend des télescopes à rayons X et gamma dans l'espace, des observatoires Cherenkov au sol pour l'observation du ciel gamma de très haute énergie, des observatoires radio ainsi que des détecteurs pour la détection des messagers non-photoniques comme les rayons cosmiques, les ondes gravitationnelles et les neutrinos. En plus, des simulations numériques lourdes s'appuient sur des moyens de calcul importants qui dépassent parfois les moyens disponibles dans les laboratoires.

Le tableau suivant résume les moyens observationnels existants et futurs dans lesquels la France a une implication instrumentale en séparant les moyens sols et spatiaux en fonction des thématiques scientifiques. Pour les moyens sols avec une implication de l'INSU, une mise en priorité a été effectuée par classement en P0 (absolument indispensable pour la communauté française), P1 (nécessaire pour la communauté française), et P2 (souhaitable pour la communauté française). Les moyens sols de l'IN2P3 sont non-classées et sont donnés entre parenthèses.

	L'Univers comme laboratoire	Objets compacts et leur environnement	Phénomènes explosifs	Rayons cosmiques	Nouveaux messagers
Moyens sols existants P0 – gras P1 – souligné P2 – italique	**HESS** (Antares)	**HESS** **X-SHOOTER*** *LOFAR* *Nançay*	**X-SHOOTER*** *LOFAR*	**HESS** (Auger Sud) (CODALEMA)	**Virgo** (Antares)
Moyens sols futurs P0 – gras P1 – souligné P2 – italique	**CTA** (KM3NeT)	**CTA** *SKA*	**GFT***	**CTA** (Auger Nord)	**advanced Virgo** (KM3NeT)
Moyens spatiaux existants	Fermi INTEGRAL XMM-Newton	Fermi INTEGRAL SWIFT XMM-Newton	Fermi INTEGRAL SWIFT XMM-Newton	CREAM (ballon) Fermi XMM-Newton	
Moyens spatiaux futurs	AMS-02 IXO SVOM	IXO LISA SVOM	IXO SVOM	AMS-02 IXO JEM-EUSO	LISA

Tableau 1 : Moyens d'observation dans le domaine de l'astrophysique des hautes énergies. Les moyens d'accompagnement qui ne servent pas spécifiquement à l'observation des phénomènes de haute énergie sont marqués avec un astérisque

Avec des nombreuses découvertes récentes, l'astronomie gamma est actuellement en plein essor (Fermi, HESS). La France réunit aujourd'hui une communauté importante dans ce domaine qui regroupe des chercheurs de l'INSU, de l'IN2P3 et du CEA. Dans ce contexte, la construction de CTA doit être une priorité absolue. Conçu comme un observatoire ouvert à la communauté, l'INSU a un rôle important à jouer dans la réalisation et l'exploitation de CTA.

Les sursauts gamma sont en train de devenir les sondes les plus lointains de l'univers, avec des nombreuses applications en cosmologie, physique stellaire et physique fondamentale. Avec SVOM, la France porte aujourd'hui un des projets phares du domaine qui doit être accompagné d'un suivi sol adéquat.

Virgo met la détection des ondes gravitationnelles à portée de main, et advanced Virgo ouvrira très probablement la fenêtre de l'astronomie gravitationnelle. Il est important que l'INSU se prépare à intégrer pleinement ce nouveau domaine astronomique dans sa prospective.

Avec l'abandon du projet Simbol-X, l'astronomie X en France se voit dépourvue de prospective instrumentale à court et moyen terme. Dans ce contexte, il est indispensable de poursuivre tant que cela est techniquement réalisable l'exploitation de XMM-Newton et INTEGRAL. À long terme, la participation de la communauté française au projet IXO est indispensable.

Des moyens devront aussi être consacrés à des actions de R&D destinées à accompagner le développement rapide de l'instrumentation pour l'astrophysique des hautes énergies. Côté spatial il s'agit de développer les nouveaux détecteurs pour l'astronomie X et gamma (détecteurs pour IXO, polarimétrie X, concentrateurs gamma, télescope Compton). Côté sol, il s'agit de préparer les détecteurs de grande dimension et bas coût au foyer des télescopes Cherenkov.

Liens thématiques

Le domaine de l'astrophysique des hautes énergies se caractérise par ses nombreux liens avec les autres thématiques de l'astrophysique française. Même si ces liens existent, un effort particulier est nécessaire pour dynamiser les relations entre les différentes communautés impliquées :

Physique et Chimie du Milieu Interstellaire

- Rayons cosmiques et leurs rôles dans la formation et la dynamique des structures du MIS et de l'astrochimie, émissions diffuses
- Champs magnétiques galactiques et transport des particules chargées
- Les sursauts gamma comme sondes du MIS des galaxies jeunes

Cosmologie et Galaxies

- Les sursauts gamma comme sondes de l'univers lointain
- L'étude des noyaux actifs de galaxies et leur impact sur leur environnement
- La nature de la matière noire

Physique Stellaire

- Formation et évolution des objets compacts galactiques
- Nucléosynthèse stellaire et astronomie gamma nucléaire
- Physique des disques

Physique des Plasmas et Soleil

- Physique des chocs non-collisionnels
- Transport de particules
- Émissions hautes énergies du soleil

Pour renforcer les liens entre le GdR PCHE et le PCMI, le PNCG et le PNST une participation réciproque aux conseils scientifiques favorisera l'émergence d'actions ou de projets communs.

Recommandations

Le domaine de l'astrophysique des hautes énergies est en plein évolution car les frontières traditionnelles entre astronomes, astrophysiciens, physiciens de particules et physiciens nucléaires sont en train de disparaître. Même si ces changements sont souvent une question de génération, on voit naître une nouvelle génération de chercheurs pour lesquelles la différence entre ces différents domaines n'existe plus. Ainsi, d'une rencontre entre différentes disciplines une nouvelle discipline est en train de poindre. Les différents instituts du CNRS impliqués dans cette discipline (INSU, IN2P3, INP) ainsi que le CEA doivent tout mettre en oeuvre pour maintenir ensemble cette nouvelle dynamique.

Pendant 9 ans, le GdR PCHE et le programme interdisciplinaire Particules & Univers (PID P&U) ont servi à l'émergence de cette nouvelle discipline. Le PID P&U ainsi que le GdR PCHE vont arriver à échéance en 2012 et la question de la pérennité de ses actions se pose. Une solution sera la création d'un programme national « Hautes Energies » à l'instar des autres programmes nationaux qui existent à l'INSU (et en particulier à l'instar du Programme National Cosmologie et Galaxies (PNCG) qui réunit déjà aujourd'hui les chercheurs de l'INSU, de l'IN2P3, de l'INP et du CEA). Quelque soit la solution envisagée, il conviendrait de garder une structure réunissant les instituts concernés avec un conseil scientifique interdisciplinaire à l'image de ce qui existe actuellement. Ainsi, cette discipline aura le cadre et les moyens de poursuivre son plein développement.

En plus de cette recommandation structurelle, voici une liste de recommandations plus spécifiques qui aideront à renforcer l'astrophysique des hautes énergies en France.

Recommandations sur les moyens :

- S'investir sans délai dans la réalisation de CTA
- Poursuivre tant que cela est techniquement réalisable l'exploitation de XMM-Newton, INTEGRAL et Fermi
- Pousser le plus loin possible l'amélioration de la sensibilité des détecteurs d'ondes gravitationnels au sol (projet advanced Virgo)
- Développer un télescope robotique dans la classe des 2m pour accompagner la mission SVOM par un suivi sol

des sursauts gamma dans l'infrarouge
- Participer au développement du futur grand observatoire en rayons X IXO
- Mener des R&D pour l'instrumentation de l'astronomie du MeV afin de relancer le développement de l'astronomie gamma-nucléaire
- Participer au développement d'instruments capables de mesurer la polarisation en X ou en gamma

Recommandations scientifiques :

- Maximiser le retour scientifique de SVOM et X-SHOOTER en soutenant la préparation des observations « sursauts gamma » mais aussi du programme d'observations hors sursauts
- Renforcer l'implication de la communauté française dans l'exploitation scientifique de futurs télescopes radio (LOFAR, SKA)
- Encourager en France la modélisation des supernovae gravitationnelles
- Encourager les collaborations multidisciplinaires sur l'étude du rayonnement cosmique et de son impact sur le milieu interstellaire ou planétaire
- Renforcer les contacts entre la communauté astrophysique et les communautés nouveaux messagers (ondes gravitationnelles, rayons cosmiques d'ultra haute énergie, neutrinos) afin de préparer l'exploitation scientifique des premières détections
- Soutenir la communauté française naissante impliquée dans la compréhension des processus physiques fondamentaux dans les disques en liaison avec le PNPS
- Soutenir la communauté astrophysique et stimuler les échanges avec la communauté plasma et PNST sur les chocs noncollisionnels, en particulier autour de l'utilisation de codes numériques susceptibles de modéliser les processus d'accélération de particules.

Physique et chimie des milieux interstellaires et circumstellaires

C. Joblin, M. Gérin, S. Guilloteau, P. Hennebelle, J. Braine

L'étude de la physique et de la chimie du milieu interstellaire (PCMI) est en France un domaine à grande visibilité internationale car elle fédère une communauté d'astrophysiciens, de physiciens et de chimistes qui ont construit un véritable champ d'activités interdisciplinaires incluant une production scientifique importante et un rôle dans la formation des jeunes chercheurs à l'interface entre leurs disciplines. La communauté PCMI se reconnaît autant dans le partage de ses approches méthodologiques et de ses problématiques que dans l'étude du milieu interstellaire stricto sensu. L'activité de cette communauté qui regroupe environ 200 chercheurs (INSU, INP, INC) s'inscrit, dans les grandes thématiques porteuses de l'astrophysique contemporaine mais repose sur des approches qui lui sont propres comme par exemple (1) la spectro-imagerie à très haute résolution spectrale en raies moléculaires, (2) la chimie à très basse température en phase gazeuse et sur les surfaces et (3) les expériences de laboratoire sur les nanograins. Ces approches lui confèrent sa spécificité. Cette communauté utilise et s'investit dans le développement d'un certain nombre d'outils et méthodes qui vont des instruments d'observations astronomiques, aux expériences de laboratoire, calculs théoriques et simulations numériques, jusqu'a la réalisation de bases de données, en particulier dans le domaine de la physique atomique et moléculaire.

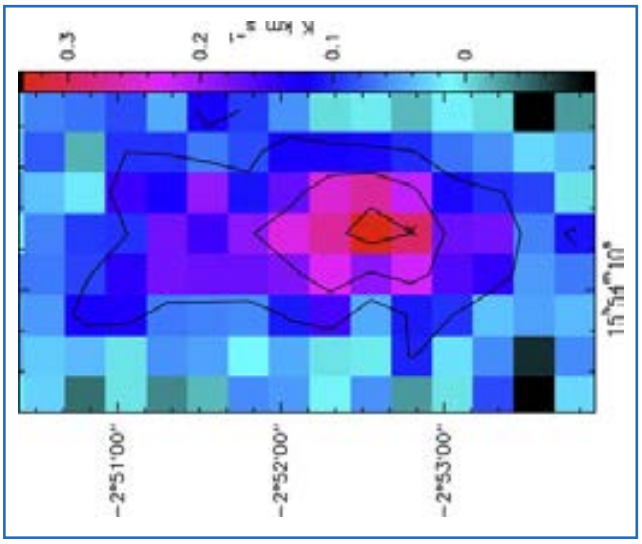
Faits saillants des 5 dernières années

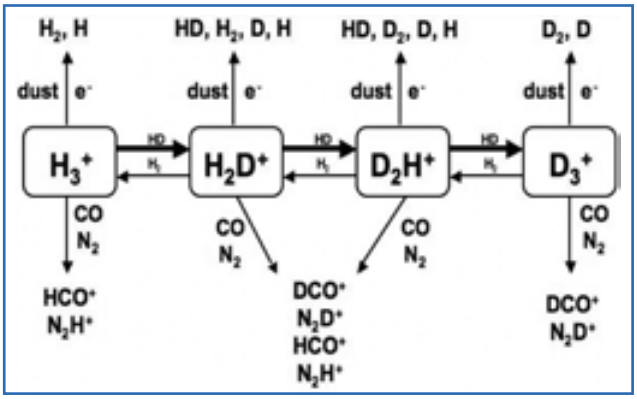
H_2O molécule sonde des milieux astrophysiques.

La vapeur d'eau est une molécule importante et encore trop peu étudiée en raison des difficultés observationnelles liées à la contamination atmosphérique. L'eau est un constituant majeur des glaces, et devient, lors de leur sublimation dans les chocs ou les régions protostellaires, un des principaux réservoirs de l'oxygène. Ce sera une molécule clé pour Herschel. L'analyse de ses spectres permettra de caractériser la cinématique et les conditions physiques des milieux (densité, température), ce qui nécessite de connaitre les sections efficaces d'excitation collisionnelle de cette molécule en particulier avec la molécule la plus abondante H_2. Des théoriciens ont obtenu une description très précise de la surface d'énergie potentielle flexible (à 9 dimensions) pour H_2O-H_2. Les sections efficaces d'excitation collisionnelle ont ensuite été obtenues par des calculs de dynamique collisionnelle sur cette surface en utilisant une modélisation quantique dans le cas des collisions à basse énergie et une approche classique combinée à une procédure d'extrapolation pour modéliser les effets rovibrationnels à plus haute énergie. Ce projet a requis, depuis 2002, environ 30 années de CPU sur des super-calculateurs locaux et nationaux.

Les molécules comme sonde des cœurs froids préstellaires.

Les molécules sont utilisées pour sonder les différents environnements du milieu interstellaire neutre, en particulier les régions les plus froides et les plus denses où se forment les étoiles. Un résultat marquant de ces dernières années a été le fait que, dans les cœurs préstellaires, la conjonction d'une plus forte densité et d'une basse température favorise la substitution des atomes d'hydrogène par des atomes de deutérium dans de nombreuses molécules. Cela a notamment été mis en évidence par les mesures de déplétion de la molécule CO, amenant à modifier les réseaux chimiques jusque là ébauchés. Les nouvelles molécules deutérées découvertes ont permis la mesure de fractionnements isotopiques très élevés. La compréhension détaillée de ce phénomène, couplant des mesures spectroscopiques d'espèces choisies (comme H_2D^+/D_2H^+, N_2H^+/N_2D^+, $NH_3/NH_2D/ND_2H/ND_3$, HCO^+/DCO^+) et une modélisation avancée, peut permettre de contraindre finement des paramètres importants du milieu qui ne





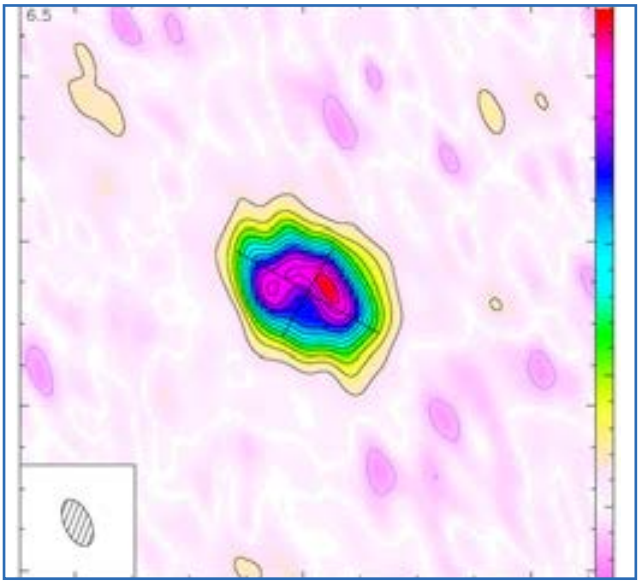
A gauche, le coeur préstellaire et le filament dense de L183 révélés par la raie de ortho-H_2D^+. *Pagani et al. 2009, A&A, 494, 623.*

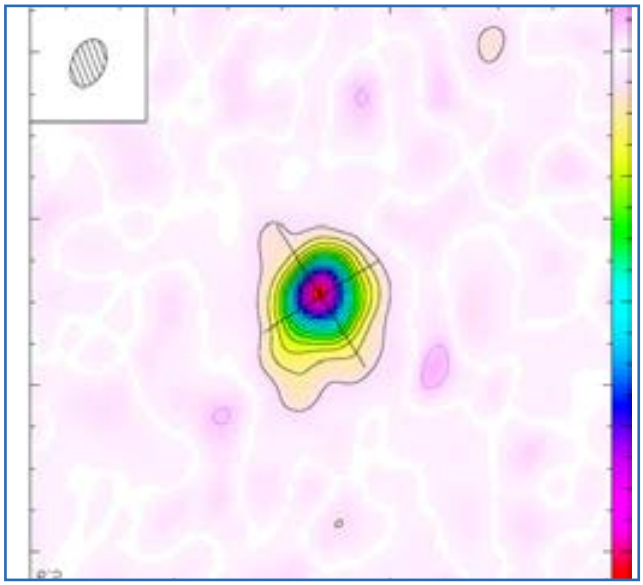
Au-dessus, réactions principales conduisant à la deutération de H_3^+ dans les cœurs préstellaires. *Vastel et al. 2006, ApJ, 645, 1198.*

sont pas mesurables directement, comme la température du gaz, l'âge du cœur, les fractions relatives d'hydrogène moléculaire sous les formes ortho et para, ainsi que la cinématique via l'analyse des profils de raie.

Physico-Chimie des disques proto-planétaires.

L'amélioration de la résolution spatiale de l'interféromètre du Plateau de Bure a permis deux découvertes importantes par une équipe française : i) l'existence de cavités internes (tant en gaz qu'en poussière), liées soit à la formation des planètes, soit à la binarité, et ii) la mesure de la faible température de la poussière responsable du rayonnement dans le domaine millimétrique. Ces gros grains froids jouent peut-être un rôle dans le piégeage de



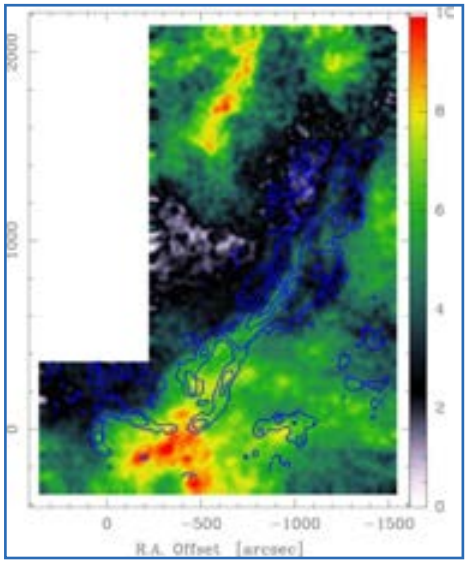


Images dans le continuum de la poussière à 1,3mm pour LkCa15 (à gauche) et MWC 480 (à droite) obtenues à une résolution de 0,4» au PdBI. Une cavité est visible au centre de l'émission de LkCa15.

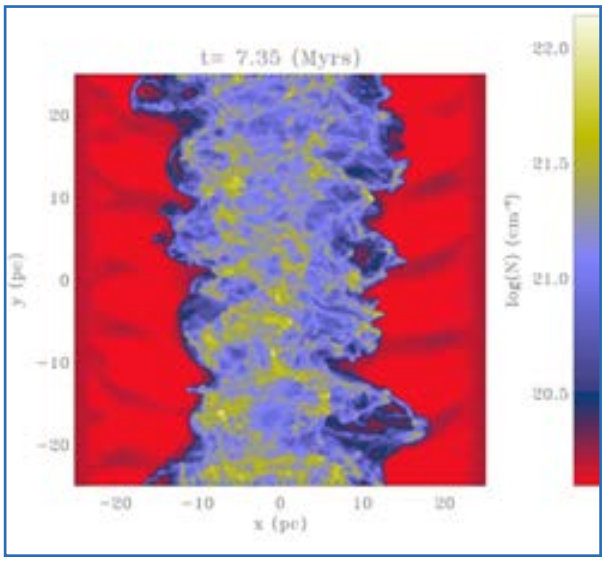
CO autour des étoiles chaudes. Ces basses températures sont confirmées par les observations d'autres molécules comme HCN, mais aussi CN et C_2H ce qui est très surprenant, sachant que l'on s'attend à ce que les radicaux soient présents dans les zones irradiées par les photons UV où la température de la poussière est plus élevée que dans le plan médian.

Etudes des phases et de la dynamique du milieu interstellaire.

Dans une galaxie comme la Voie lactée, l'essentiel du gaz est dans une phase très diluée, irradiée par les photons UV et X et les particules cosmiques, et est le siège de phénomènes violents. C'est pourtant dans ce milieu hostile et turbulent qu'apparaissent (et sont observées) les premières molécules, posant ainsi le problème aigu de leur formation et de leur résilience jusqu'à la constitution des nuages moléculaires. Des simulations numériques MHD ont montré que la convergence subsonique de deux flots de gaz atomique chaud et dilué suffit à créer, sous l'influence de l'instabilité thermique, de la pression dynamique puis de la gravité, des condensations de gaz dense et froid pérennes au sein du milieu chaud. Les propriétés statistiques de ces condensations sont proches des lois d'échelle du milieu interstellaire. L'impact de la turbulence et de sa dissipation intermittente sur l'évolution du milieu diffus s'étend à la formation des molécules : les modèles récents sont aujourd'hui étayés par des observations IRAM-30m et PdBI qui révèlent des cisaillements de vitesse exceptionnels,



A gauche, région d'intense cisaillement du champ de vitesse (contours bleus) superposée à l'émission intégrée de la raie CO(1-0) dans un nuage à haute latitude galactique (échelle en K km/s). *Hily-Blant & Falgarone, 2009, A&A, 500, L29.*

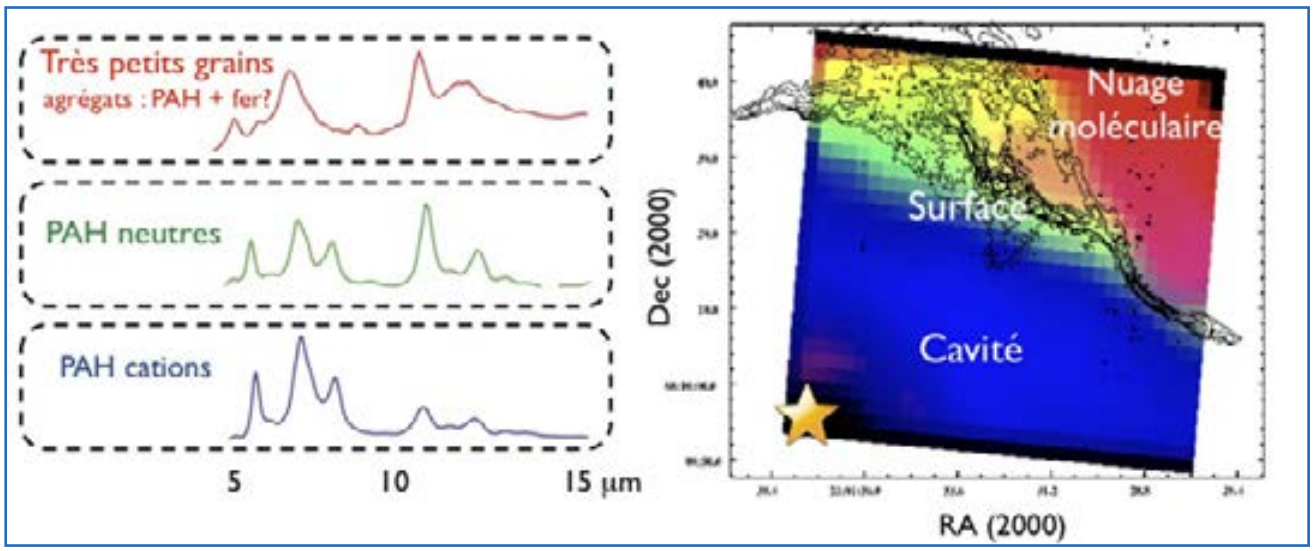


A droite, simulations MHD de la collision de deux flots de gaz interstellaire. Carte en densité de colonne. *Hennebelle et al., 2008, A&A 486, L43.*

cohérents sur des échelles allant du milliparsec au parsec. On entrevoit que la confrontation de telles observations avec les simulations numériques ouvre une perspective nouvelle sur les modèles de formation d'étoiles, car elle permet d'y introduire des contraintes sur la dissipation du support turbulent et ses échelles caractéristiques.

Evolution physico-chimique des porteurs des bandes aromatiques IR.

Les observations des satellites infrarouges ISO, Spitzer et AKARI ont montré que les bandes d'émission IR dites aromatiques (AIB) entre 3 et 15 mm, sont des signatures spectrales majeures des régions irradiées par les photons UV : milieu diffus, régions de formation d'étoiles, disques protoplanétaires, nébuleuses planétaires, … L'observation de ces AIB s'étend maintenant dans les galaxies extérieures jusqu'à des décalages spectraux z ≥ 2. L'analyse de ces bandes a permis d'avancer dans notre compréhension de la nature des porteurs en lien avec leur évolution physico-chimique dans les milieux observés. Ces porteurs sont constitués de macromolécules polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH) dont l'état de charge dépend des conditions physiques locales : densité électronique et champ UV. Outre des effets de charge, les variations spectrales impliqueraient des variations de taille et d'organisation structurelle. Un scénario d'évolution est proposé dans lequel des très petits grains donneraient naissance aux PAH



En couleurs, les signatures IR et les distributions spatiales associées des populations émettant dans les bandes aromatiques entre 5 et 15 mm observées par les satellites ISO et Spitzer dans la nébuleuse par réflexion NGC7023 NW. Les contours représentent l'émission rouge étendue (ERE) mesurée par Hubble. Ces observations ont amené à l'élaboration d'un scénario possible d'évolution des molécules polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH) et des très petits gains carbonés sous l'effet du champ UV. *Berné et al. (2008, A&A 479, L41), Berné et al. (2007, A&A 469, 575), Rapacioli et al. (2005, A&A 429, 193).*

dans les régions les plus diffuses et/ou les plus irradiées par les photons UV. Ceci motive des travaux expérimentaux et théoriques afin d'explorer les chemins entre phase macromoléculaire et phase solide du carbone. Ces travaux peuvent également avoir des répercussions quant à l'analyse en laboratoire d'échantillons de matière extraterrestre issus des premières phases de formation de notre Système solaire à partir des briques du milieu interstellaire.

Thématiques scientifiques et évolutions

Pour comprendre la formation et l'évolution des galaxies, tout

comme celle des étoiles et des systèmes planétaires, l'étude des milieux interstellaire et cicumstellaire est incontournable. La matière interstellaire, enrichie en éléments lourds par des générations successives d'étoiles, est à la fois le matériau primitif pour les nouvelles générations d'étoiles et le témoin de l'activité présente. Cette matière est intimement couplée aux photons, au champ magnétique et aux rayons cosmiques. Son étude implique de comprendre la nature de ses constituants, leur évolution physico-chimique, la dynamique des milieux associés et leur couplage.

Evolution de la matière interstellaire et circumstellaire

Le cycle de la poussière

L'étude de l'évolution des propriétés de la poussière tout au long de son cycle : de sa formation dans les enveloppes d'étoiles évoluées à son incorporation dans les systèmes planétaires, est un sujet de recherche en soi. Quelle est la nature de la poussière et quels processus gouvernent son évolution physico-chimique en particulier pour ce qui est de la formation et de la destruction ? Quelles sont les propriétés spectroscopiques associées ? L'évolution physico-chimique de la poussière couplée avec la dynamique, joue un rôle fondamental dans la structuration des milieux et ceci à petite comme à grande échelle : formation des étoiles et des systèmes planétaires, évolution des phases du milieu interstellaire (MIS), formation des galaxies, … Se pose donc la question de l'utilisation du cycle de la poussière pour caractériser les milieux et objets astrophysiques. Enfin l'émission de la poussière doit être proprement soustraite dans les études du fond diffus cosmologique.

Ce domaine va connaître des avancées dans les années à venir avec l'accès aux longueurs d'onde du sub-millimétrique (Herschel/Planck, PILOT) et l'amélioration des performances des instruments astronomiques en résolution angulaire et en sensibilité de l'IR au millimétrique (JWST, ALMA et à plus lointaine échéance SPICA). L'étude du continuum sub-mm en lien avec les données de laboratoire devrait permettre le suivi des processus de coagulation des grains dans le milieu interstellaire, processus initialement mis en évidence par la mission ballon française PRONAOS et qui sont de première importance pour l'étude des premières étapes de la formation des étoiles et des systèmes planétaires. L'observation de l'émission polarisée de la poussière que permettront Planck et la mission ballon PILOT fournira des contraintes nouvelles sur les propriétés de la poussière en particulier sur les processus d'alignement des grains sur le champ magnétique et sur la relation de la poussière avec le rayonnement. Les observatoires spatiaux dans l'IR, tels que ISO (ESA) et plus récemment les télescopes Spitzer (NASA) et AKARI (JAXA) ont permis de mieux caractériser les plus petites composantes de la poussière : les macromolécules PAH et les très petits grains (VSG) carbonés qui sont les traceurs des régions de photodissociation. Ce sont des équipes françaises qui ont mis en évidence la variation de charge des PAH et le lien entre VSG et PAH libres. Dans les années à venir, un des objectifs va être l'identification de molécules PAH individuelles. Herschel va être un outil privilégié pour rechercher les modes de pliage du squelette carboné à basses fréquences. Planck permettra de progresser dans la caractérisation de l'émission anormale des grains dans le domaine centimétrique, émission qui est attribuée à des très petites particules en rotation (PAH et/ou VSG). La connaissance détaillée de l'émission de la poussière présente un intérêt fort pour l'étude du fond cosmologique micro-onde (CMB) car cette émission doit être proprement soustraite des données observationnelles pour mesurer précisément le rayonnement primordial (problème des avant-plans). Enfin, l'étude de la formation et l'évolution des glaces nous renseigne sur l'origine des molécules ainsi que sur l'origine de la matière volatile dans le Système solaire.

Les gains en sensibilité et résolution spatiale des futurs instruments (ALMA, JWST et SPICA, ELT) permettront de mener ces études sur la poussière de manière plus détaillée (par ex. à l'échelle des disques protoplanétaires) et de plus en plus loin dans l'Univers. Cette évolution a déjà commencé, en particulier avec Spitzer qui a permis l'étude du cycle de la poussière dans les galaxies proches avec l'évaluation du rôle de la métallicité sur la formation et l'évolution de la poussière. Pour les galaxies plus lointaines, la question est posée de la nature et de l'abondance de la poussière à grand décalage spectral, et l'impact de la présence de poussière sur la formation des grandes structures. C'est un domaine où les mesures en laboratoire sont indispensables car les propriétés optiques des grains sont directement liées à leurs caractéristiques physiques (structure, composition chimique, taille des grains).
La communauté française est très bien positionnée dans ces études avec un rôle de leader sur de nombreux aspects, à la fois au niveau des observations, des études de laboratoire et de la modélisation. Un point faible néanmoins concerne le peu d'études menées sur la formation de la poussière dans les environnements circumstellaires.

Vers la complexité moléculaire

La diversité de la composition chimique des divers environnements interstellaires est étonnante en regard des conditions extrêmes où se forment les molécules. L'exploration de cette diversité, et la modélisation de ces divers environnements est un enjeu des prochaines années, qui devient accessible par le saut quantitatif en sensibilité, résolution angulaire et capacité numérique que permettent les nouveaux outils. En particulier, il s'agit de rechercher des molécules de plus en plus complexes (y compris des molécules prébiotiques) et de contraindre les réseaux chimiques mis en jeu dans leur formation (chimie en phase gazeuse et chimie sur les grains). L'évolution actuelle est de comprendre comment cette complexité apparaît et évolue au cours des phases précoces de formation stellaire et dans quelle mesure la complexité moléculaire des régions entourant l'étoile en formation peut être transmise au disque protoplanétaire. La mesure des taux de fractionnement isotopique, essentiellement en deutérium, est un traceur complémentaire des mécanismes de complexification chimique qui est amené à se développer avec l'amélioration de la sensibilité et de la couverture en fréquence des télescopes.

Il s'agit d'un sujet à grande visibilité avec un lien fort avec la radioastronomie. La communauté française est bien ancrée sur ce sujet en particulier grâce aux observations menées à l'IRAM, aux programmes Herschel-HIFI sur temps garanti : CHESS, PRISMAS, WADI, WISH et à l'activité de laboratoire (synthèse, spectroscopie moléculaire et étude des mécanismes chimiques). L'arrivée d'ALMA devrait permettre

un bond quantitatif dans ces études.

Structuration des milieux interstellaires et circumstellaires

Les phases du MIS

Il s'agit de comprendre l'organisation des différentes phases ionisée/ atomique/ moléculaire, les mécanismes qui gouvernent la transition du milieu diffus au milieu dense, l'impact de la formation stellaire sur l'organisation du MIS à grande échelle (explosions d'étoiles : supernovae, sursauts gamma, vents stellaires), et l'influence de la métallicité sur l'équilibre entre les phases. Il s'agit également de caractériser le champ de rayonnement, la structure du champ magnétique, à petite et à grande échelle, et les distributions spatiale et énergétique des rayons cosmiques. L'association entre restes de supernovae et nuages moléculaires géants détectés en gamma par HESS et FERMI pose sur une base nouvelle la question de la propagation des rayons cosmiques dans les nuages moléculaires et leur interaction avec ces nuages.

Les observations révèlent que le milieu diffus est un milieu turbulent hors d'équilibre. C'est dans ce contexte que se pose la question de la formation de la matière moléculaire. Les modélisations et simulations numériques directes commencent aujourd'hui à maîtriser le couplage non linéaire de plusieurs des processus essentiels à cette transformation et c'est donc l'interaction entre numériciens et théoriciens, d'une part, et observateurs de la dynamique du gaz et des propriétés des grains de poussière et des molécules, d'autre part qui va faire avancer cette thématique dans les années à venir.

Une évolution de ce sujet est l'extension vers les études extragalactiques. Dans le groupe local, en commençant avec les Nuages de Magellan, il est possible d'étudier la physico-chimie du milieu interstellaire et la formation stellaire dans des conditions physiques inaccessibles dans notre Galaxie, notamment des environnements moins riches en métaux et similaires aux environnements de l'Univers jeune. Pour l'étude de la transition de phase du MIS dans les galaxies proches, on peut citer le programme Herschel HerMES (Herschel M33 Extended Survey). A plus grande échelle, la question des effets de rétroaction dans la formation des galaxies, en particulier des échanges de matière et d'énergie est un thème de recherche dont les observables (spectroscopie du gaz et de la poussière), la formulation théorique et la modélisation des processus physiques est une extension dans le cadre cosmologique du travail sur la matière interstellaire dans la galaxie.

C'est un sujet où la communauté française est traditionnellement bien positionnée à la fois au niveau des études sur la poussière, sur la dynamique du gaz et de celles sur la turbulence. Ces études mettent en jeu des observations et aussi un travail conséquent de modélisation. La communauté travaillant sur l'effet des étoiles massives sur leur environnement est encore faible numériquement. L'expertise acquise sur le MIS galactique commence à être mise à profit au niveau des galaxies extérieures avec les données Spitzer et IRAM mais elle devra être renforcée dans les années à venir avec l'arrivée des données Herschel, JWST, ALMA puis SPICA qui permettront de dépasser notre compréhension encore essentiellement empirique de la formation des galaxies en traçant l'évolution du gaz et de la poussière au cours de l'histoire cosmique.

Les premières phases de la formation stellaire

Notre compréhension des phases précoces de la formation stellaire passe nécessairement par une meilleure connaissance des conditions physiques des nuages denses et froids de la Galaxie (T ~ 10 K, $n_H \sim 10^3$-10^6 cm^{-3}). L'émission de la poussière, la deutération et le rapport ortho/para des espèces chimiques seront en particulier utilisées comme sondes des cœurs denses et froids, berceaux de la formation stellaire. Les observations polarimétriques apporteront les informations longuement attendues par les théoriciens sur l'intensité et la structure du champ magnétique (effet Zeeman et polarimétrie de l'émission thermique submillimétrique). La combinaison des observations sur le gaz et la poussière (Herschel, Planck, PILOT, IRAM, JWST, APEX, …) ainsi que l'accès à des données à plus haute résolution spatiale (PdBI à NOEMA, ALMA) permettra de mieux comprendre l'origine des cœurs préstellaires, leur évolution, le rôle des mécanismes de formation stellaire induite à grande échelle, et de préciser leur structure, la présence de disques circumstellaires ainsi que leur connexion avec les jets et les flots moléculaires. En parallèle, les simulations numériques offriront un cadre interprétatif précis permettant la meilleure exploitation des résultats obtenus. A court terme, ALMA permettra de rechercher des cœurs de plus petite taille et d'améliorer ainsi notre compréhension de la fragmentation des nuages. Il permettra également de mesurer le rôle des abondances élémentaires en observant des cœurs massifs dans les galaxies de faible métallicité du groupe local.

C'est un sujet à forte visibilité dans lequel la communauté française est bien positionnée en particulier de par son implication dans l'astronomie sub-millimétrique (cf. son implication dans les programmes clés d'Herschel) et dans les simulations numériques.

Les premiers pas de la formation des systèmes planétaires

Avec la mise en service dans les prochaines années de grands télescopes dont la sensibilité et le pouvoir résolvant vont permettre de sonder la matière à l'échelle même de la formation planétaire (VLT, VLTI, JWST, PdBI à NOEMA, ALMA SKA, …), il est important de se donner rapidement les moyens de comprendre les premières phases d'évolution de la matière (gaz et poussière) gravitant autour des étoiles jeunes jusqu'à la formation de nouveaux systèmes planétaires. Dans les milieux denses proches de l'étoile en formation, l'évolution physique et chimique de la matière est rapide et se fait via de multiples processus (coagulation, sédimentation et fragmentation des grains, chocs, turbulence, champ magnétique, …) qui se reflètent dans l'émission du gaz et des grains. C'est l'évolution des grains qui va initier la formation des planétésimaux. Il faut donc connaître pour ces grains leurs propriétés ainsi que leur évolution avec les processus de microphysique à l'œuvre pour leur grossissement. Ceci s'appuie sur des études d'astrophysique de laboratoire. Le gaz, qui représente la quasi-totalité de la masse dans les phases jeunes, joue un rôle déterminant dans l'évolution du disque et vraisemblablement la nature des planètes formées. Ainsi la détermination des échelles de temps de dissipation du gaz est

aussi nécessaire pour discriminer entre les différents scénarios de formation de planètes géantes. Les effets dynamiques dans ces milieux sont très importants et l'apport des simulations numériques dans ce domaine est crucial. En particulier, les petits grains de poussière (de taille inférieure à quelques millimètres) sont fortement influencés par les propriétés de la turbulence (fluctuations de vitesse, présence d'une zone morte). Ceci amène à développer de nouvelles techniques de simulations numériques magnétohydrodynamiques, permettant de modéliser les processus de transport et de coagulation des poussières. Des prédictions d'observables pourront être déduites de ces simulations pour permettre une comparaison avec les nouvelles mesures (Spitzer, Herschel, JWST, NOEMA, ALMA, VLT-I, ELT, SKA...).

C'est un sujet avec une très grande expertise française à la fois sur les aspects observationnels et sur la modélisation incluant la dynamique.

Moyens

Moyens d'observations

L'observation du MIS s'appuie sur un vaste domaine de longueurs d'onde. Le domaine (sub-) millimétrique, avec l'IRAM, le CSO, APEX et prochainement ALMA, et l'IR lointain avec Herschel, y jouent un rôle prépondérant. Les domaines proche-IR, IR-moyen, visible et UV restent incontournables : Spitzer, le VLT et le HST sont utilisés par la communauté, et le JWST sera une nouvelle étape. Après Herschel/Planck, les priorités seront SPICA, et à plus long terme, FIRI qui apporteront un gain notable en sensibilité et en résolution spatiale. Une priorité dans le domaine millimétrique et sub-millimétrique est l'amélioration des capacités de l'IRAM (projet NOEMA) suivie d'une participation (nécessairement minoritaire) à CCAT qui a beaucoup de potentiel comme suivi d'Herschel. L'accès à la haute résolution spatiale justifie aussi l'intérêt de la communauté pour les moyens VLTI, et à plus long terme, E-ELT.

Parmi les autres projets qui permettront d'avancer dans les thématiques « milieu interstellaire », le rayonnement gamma par HESS suivi de CTA et par FERMI permet de tracer l'interaction des rayons cosmiques avec les nuages moléculaires. Gaia permettra de caractériser la distribution des étoiles par rapport à celle de la matière et de calculer précisément le champ de rayonnement incident sur les nuages interstellaires. A l'autre extrémité du spectre électromagnétique, le e-VLA, puis à plus long terme SKA, devraient relancer l'étude de la composante la plus diffuse du MIS, le gaz atomique. SKA est également intéressant pour l'étude du champ magnétique. Les autres thématiques qui bénéficieront de SKA sont plutôt intéressées à sa partie « haute fréquence » où se trouvent les raies moléculaires (NH_3, H_2O, chaines carbonées, …) et l'émission de la poussière (émission thermique normale pour les disques et émission anormale). LOFAR a un intérêt moindre sauf peut-être pour l'émission synchrotron. Enfin, La communauté suit également avec intérêt les projets au Dôme C en particulier en ce qui concerne la spectroscopie dans l'IR (PLT) et le sub-mm (AST).

Le CDS est un moyen important pour notre communauté en particulier pour la préparation et l'analyse (multi-longueurs d'onde) des observations.

Dispositifs expérimentaux d'astrophysique de laboratoire

Les mesures en laboratoire sont un outil incontournable pour l'analyse des données astronomiques concernant à la fois le gaz et la poussière. Elles comprennent des études de spectroscopie mais aussi de réactivité : excitation collisionnelle, réactions chimiques en phase gazeuse et à la surface des grains. Il s'agit également de produire des analogues en laboratoire de la matière solide interstellaire et de simuler son évolution physico-chimique sous l'effet du rayonnement UV et des particules énergétiques (cf. Chapitre Astrophysique de laboratoire). Les conditions physiques particulières des nuages interstellaires (très faibles pressions et températures) impliquent l'utilisation de méthodes spécifiques et donc des dispositifs expérimentaux dédiés. Ces dispositifs sont développés dans les laboratoires de la discipline ou dans des laboratoires INP et INC travaillant en étroite collaboration avec la communauté astrophysique, grâce au rôle structurant des PN.

Modèles numériques

L'analyse de l'émission de la matière permet d'accéder à la composition chimique, aux conditions physiques et à la cinématique. L'interprétation de ces observations nécessite des codes d'émission de la poussière et du gaz, et de transfert radiatif. Leur analyse implique également une modélisation « lourde » incluant des simulations de magnétohydrodynamique et de physico-chimie des milieux interstellaires et circumstellaires. Les moyens requis sont variables d'une activité a l'autre, allant d'un simple PC pour des codes monodimensionnels ou à une zone (type LVG) aux architectures massivement parallèles disponibles dans les centres de calculs nationaux, nécessaires aux simulations numériques de turbulence qui comprennent plusieurs milliards d'éléments de calcul ou encore aux calculs de chimie quantique qui traitent un grand nombre de configurations. Ces deux activités sont cruciales pour les thématiques « milieu interstellaire ». L'utilisation des supercalculateurs ne remplace pas le besoin de méso-machines locales et dédiées afin de développer les codes et faire tourner facilement des configurations de tailles raisonnables. Les moyens mis en jeu concernent également le stockage et la visualisation. Le besoin de puissantes machines locales est ressenti également par les observateurs qui ont des ensembles de données de plus en plus vastes à traiter avec des méthodes de plus en plus sophistiquées. Cf. Chapitre « Calcul, Logiciel, Archivage, OV ».

Interfaces

Les études sur la matière interstellaire et circumstellaire ont des implications pour les objets de l'astronomie des petites aux grandes échelles : étoiles, disques planétaires, galaxies, grandes structures, ainsi que sur l'origine de la complexité moléculaire. Les thématiques du programme national PCMI présentent donc des interfaces avec le PNCG, le PNPS, le PNP, et le PID OPV. La communauté française a des atouts pour le transfert d'expertises du domaine galactique vers l'extragalactique ; il s'agira de tracer l'évolution du gaz et de la poussière au cours de l'histoire cosmique. C'est un domaine à renforcer. Des liens existent également avec le GdR PCHE en particulier autour de l'étude des

rayons cosmiques. Ces échanges sont à soutenir dans l'avenir. La gestion des interfaces entre PN n'est pas toujours simple et peut devenir un point sensible. Elle pourrait être améliorée en synchronisant le renouvellement des programmes. Afin d'optimiser l'animation scientifique entre programmes, il est aussi important que des ateliers soient organisés sur les sujets d'interface.

Aspects interdisciplinaires

Ils concernent la spectroscopie, l'étude des processus micro-physiques et l'étude en laboratoire de la matière extraterrestre et de ses analogues impliquant des interactions avec des physiciens, physico-chimistes, chimistes et géochimistes. Ces communautés apportent des outils et une expertise indispensables pour les applications en astrophysique. *A contrario*, le MIS constitue un laboratoire unique, où la matière peut être étudiée dans des conditions extrêmes, et où de nouveaux phénomènes physiques ou chimiques ont été découverts. L'étude de ces phénomènes contribue ainsi à l'amélioration de nos connaissances en physique et chimie. L'ensemble de ces objectifs a permis de développer, sous l'impulsion du PN PCMI, une dynamique interdisciplinaire impliquant des équipes d'astrophysique, de physique et de chimie (cf. Chapitre Interdisciplinarité).

Un autre aspect interdisciplinaire concerne les aspects « dynamique » et l'interaction avec les physiciens des systèmes complexes. Cette interface ne s'avère pas facile à développer. Les fluides astrophysiques sont considérablement plus complexes que ceux traditionnellement étudiés par les physiciens dont la démarche est plutôt de simplifier au maximum leur objet d'étude. De leur côté, les astrophysiciens cherchent à interpréter les observations, la tendance actuelle est donc plutôt à la complexification des modèles et des codes. En revanche, un rapprochement plus immédiat, et de fait déjà à l'œuvre, peut certainement s'opérer avec d'autres communautés d'astrophysiciens dont les problèmes et les approches sont similaires sans être identiques.

Points forts / points faibles – Priorités / choix

— Etude des processus physico-chimiques impliquant un lien fort avec l'astrophysique de laboratoire dans un cadre interdisciplinaire fortement ancré avec la physique moléculaire, la physico-chimie, la chimie théorique qui s'est développé au cours du temps dans la communauté PCMI. Cette spécificité est enviée au niveau international et fait référence dans les réseaux (par ex. réseau FP6 *Molecular Universe*, action COST en cours : *The Chemical Cosmos*).

— Le fort investissement dans les études de physico-chimie conduit au danger d'une migration des études sur les objets astronomiques vers les autres programmes. Ceci est un véritable problème sur le long terme car les liens avec la communauté de physico-chimie ne peuvent se justifier que par une interaction forte avec les grandes questions astrophysiques. Par exemple, l'étude des cœurs préstellaires et des disques protoplanétaires, même si ceux-ci constituent les premiers pas respectivement de la formation stellaire et planétaire, fait naturellement partie des thématiques PCMI. C'est également le cas à l'échelle des galaxies, qu'il s'agisse des études de physico-chimie du milieu interstellaire et de formation stellaire dans le groupe local ou des études mettant en jeu des processus physico-chimiques pour des galaxies dans le cadre cosmologique.

— Des liens entre les communautés PCMI et PCHE se sont récemment crées. Cet effort est à souligner et mérite d'être encouragé en particulier autour de la problématique des rayons cosmiques.

— Les équipes travaillant sur la partie théorique de la dynamique des nuages interstellaires (turbulence multiphasique du MIS et rétroaction des objets astrophysiques sur la dynamique du gaz) sont encore trop peu nombreuses en comparaison des autres pays européens. Ce volet doit être renforcé et il faut également intensifier les échanges entre théoriciens et observateurs.

Les priorités fortes pour les années à venir sont (à priorité égale)

➢ L'exploitation Herschel/Planck puis du JWST ainsi que la préparation à SPICA.

➢ Le recrutement d'astrophysiciens spécialistes en interférométrie pour assurer notre participation à la science d'ALMA et à la mise en place de NOEMA.

➢ Le renforcement de la partie théorique (simulations numériques) de la dynamique des nuages interstellaires.

➢ Faire vivre l'astrophysique de laboratoire en prenant en compte les relations avec la physique et la chimie, le problème des recrutements interdisciplinaires et la difficulté à mettre en place une politique incitative étant donné les budgets disponibles.

➢ Maintenir un équilibre entre les thématiques malgré les effets de mode.

Autres axes prospectifs

➢ Renforcer les interactions entre la communauté « milieu interstellaire » et la communauté des hautes énergies.

➢ Transférer la méthodologie des études de la Galaxie vers les études des galaxies extérieures.

	Evolution matière interstellaire et circumstellaire		Structuration des milieux interstellaire et circumstellaire	
	Cycle de la poussière	Complexité moléculaire	Phases du MIS	Formation stellaire / planétaire
Interfaces	PNCG - Evolution de la poussière avec la métallicité - Formation de la poussière - Avant-plans du CMB	PNP + OPV - Complexité moléculaire dans la nébuleuse solaire primordiale - Origines des matériaux primitifs du système solaire	PNCG - Influence de la métallicité sur l'équilibre des phases - Formation des galaxies - rétroaction - échanges de matière et d'énergie PCHE - Rayons cosmiques PNPS - Interaction des étoiles évoluées avec leur environnement	PNPS - Cœurs préstellaires PNP + PNPS + OPV - Disques protoplanétaires
Moyens spatiaux	Spitzer Herschel Planck JWST SPICA	Herschel JWST FIRI	Herschel Planck Fermi Ballon : PILOT JWST GAIA SVOM SPICA FIRI	Herschel Planck Ballon : PILOT JWST SPICA FIRI
Moyens sol	VLT VLT-I IRAM à NOEMA ALMA CCAT SKA (10 GHz) E-ELT-METIS	IRAM à NOEMA NOEMA ALMA APEX à CCAT VLT; E-ELT-METIS SKA (~22 GHz)	IRAM à NOEMA ALMA HESS à CTA VLT; E-ELT(spectro 3D) CFHT : SITELLE CCAT SKA LOFAR	IRAM à NOEMA ALMA VLT VLT-I CFHT : SPIRou E-ELT (METIS) CCAT SKA(> 10 GHz)
Moyens de laboratoire : Expérience, théorie, simulations	Astrophysique de laboratoire : analogues de la poussière : spectroscopie, formation, évolution Modélisation: émission de la poussière, transfert de rayonnement, rotation/ alignement dans le champ magnétique, évolution physico-chimique de la poussière.	Astrophysique de laboratoire : synthèse et spectroscopie moléculaire, étude des processus de formation et d'excitation en phase gazeuse et/ou solide Modélisation: modèles de transfert/ émission du gaz, modèles de chimie	Astrophysique de laboratoire : spectroscopie du gaz et de la poussière Modélisation: - modèles d'émissivité de la poussière incluant la polarisation, de champ magnétique à l'échelle galactique, de séparation de composantes (Planck sky model), d'accélération des rayons cosmiques - simulations MHD.	Astrophysique de laboratoire : spectroscopie molécules et poussière dans milieux froids. Modélisation: simulations MHD + physico-chimie du gaz et des grains (ex : formation des glaces, coagulation des grains) + transfert

Origine, structure et évolution des étoiles et des systèmes planétaires

P. Stee (directeur du PNPS), F. Ménard (président du CS du PNPS), du CS du PNPS, F. Motte, T. Böhm, D. Mourard

La physique stellaire est, de longue date, un des fleurons de l'astrophysique française. La communauté — en pleine révolution avec par exemple les découvertes des naines brunes et des exoplanètes et avec l'avènement de l'astérosimologie donnant, enfin, accès aux paramètres de la structure interne des étoiles — regroupe environ 200 chercheurs permanents et une centaine de thésitifs et postdocs en France. La communauté est fortement structurée autour du Programme National de Physique Stellaire (PNPS) qui, dans sa forme actuelle, a été créée à la fin du mandat (1999-2002) de l'Action Spécifique de Physique Stellaire.
Le Conseil Scientifique du PNPS est composé de quinze membres, dont un directeur, et un président. Parmi ce conseil scientifique, un sous-ensemble de six membres compose le CS2M, le comité de sélection des programmes d'observations stellaires sur les télescopes nationaux. Le directeur, nommé par l'INSU, rend compte annuellement à la CSAA de l'INSU de l'activité du PNPS. A chaque année et ce depuis 20 ans, le programme (et auparavant les divers GdR qui en furent les précurseurs), organise l'école de Physique Stellaire d'Aussois. Pour célébrer cet anniversaire, l'école fut rebaptisée « Ecole EVRY-SCHATZMAN de Physique Stellaire » en 2009, en l'honneur d'un de ses illustres fondateurs. Le rôle du PNPS est donc celui d'un animateur scientifique.
Tout aussi important, le programme est l'instance d'évaluation pour les projets soumis en réponse aux appels d'offres annuels de l'INSU et de ceux du CNES, pour le soutien aux missions spatiales.
Le document qui suit contient quelques exemples de résultats scientifiques marquants obtenus durant les cinq dernières années et qui doivent servir à illustrer l'originalité et le dynamisme de la communauté stellaire française. Le document présente par la suite l'état de la communauté, les thèmes scientifiques prioritaires et les propositions en cours pour les faire évoluer. Il passe finalement en revue les moyens d'observations existants et émet une liste de priorités pour aider au choix des instruments dont bénéficieront les prochaines générations de chercheurs.

Faits saillants

Toujours plus loin…

La montée en puissance récente des grands interféromètres a permis de mesurer de façon très précise les rayons stellaires d'étoiles proches. Ces résultats ont un impact fort, bien au-delà du périmètre de la seule communauté stellaire française. En effet, les grands interféromètres infrarouges tel le VLTI équipé des instruments AMBER, MIDI et PRIMA, ou l'interféromètre VEGA aux longueurs d'onde du visible, ont permis des mesures directes du rayon des étoiles pulsantes de type Céphéïde. Ces mesures permettent des avancées en physique stellaire, une meilleure calibration de leur relation période-luminosité, mais par le fait même elles permettent aussi une meilleure calibration de l'échelle des distances cosmologiques, fondamentale en cosmologie et en physique des galaxies.

Par ailleurs, de forts aplatissements des photosphères, beaucoup plus importants que prévus, sont aussi mesurés pour les rotateurs rapides *Altaïr* et *Achernar* (voir figure 1, page suivante) indiquant là aussi, et si besoin était, la forte nécessité de développer en parallèle les modèles adaptés d'évolution et de structure stellaire multidimensionnels nécessaires à l'interprétation des données.

Des avancées théoriques « Made in France »…

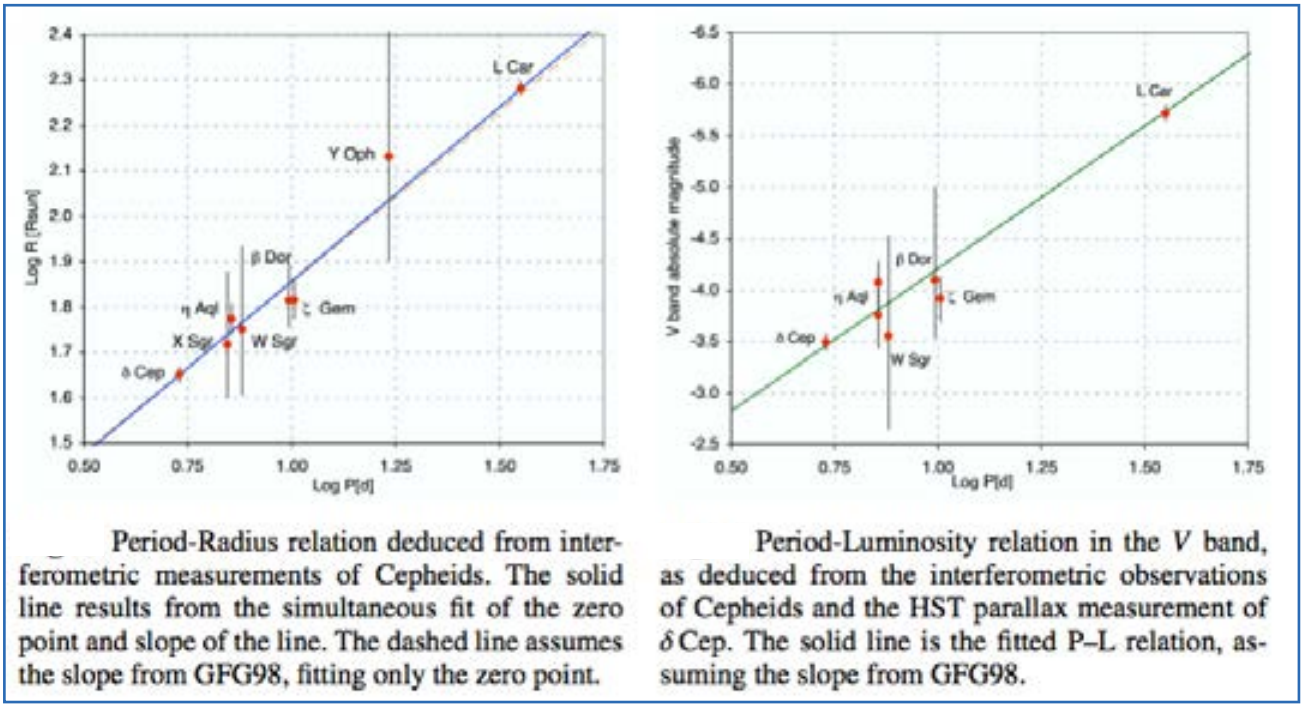
Priorité thématique affichée depuis plusieurs années au PNPS, les modèles de structure interne d'étoiles bénéficient maintenant d'avancées majeures pour la modélisation des processus de transport du moment cinétique et des espèces chimiques, liés en particulier à la rotation, aux ondes internes de gravité, au mélange thermohaline, et à la diffusion microscopique. Ces percées théoriques ont permis de réconcilier modèles et observations en divers points du diagramme HR et il est désormais possible d'expliquer simultanément la rotation rigide de l'intérieur du Soleil et l'évolution de l'abondance du lithium à la surface des étoiles de faible masse d'amas ouverts et du champ, par exemple.

Les nouveaux modèles permettent également de "remonter" à l'abondance primordiale du lithium et les valeurs estimées sont maintenant en accord avec la détermination récente obtenue à partir des paramètres cosmologiques issus des données du satellite WMAP. Par ailleurs, la prise en compte de l'instabilité thermohaline (encore connue au laboratoire et en océanographie sous le nom d'instabilité de « doigts de sel ») permet d'expliquer enfin les abondances observées pour le carbone et l'azote dans les étoiles géantes et les nébuleuses planétaires, ainsi que l'évolution de l'hélium 3 dans la Galaxie. Là aussi, les liens avec les thématiques de la physique Solaire et des Galaxies sont apparentes.

Les dynamos stellaires : surprises et remises en question

Grâce à des développements instrumentaux sans égal en spectropolarimétrie utilisés par les instruments ESPaDOnS au TCFH et NARVAL au TBL, et une maitrise toute aussi unique de la chaine de traitement et d'analyse du signal polarimétrique, les modules et la topologie du champ magnétique peuvent être étudiés à travers tout le diagramme H-R. Surprise, les étoiles froides, complètement convectives, peuvent maintenant être mesurées et elles montrent, contre toute attente, que leur champ magnétique est stable et principalement dipolaire. Ces résultats, incontournables, remettent en cause toute notre compréhension des mécanismes de la dynamo dans ce type d'étoile, et plus généralement notre compréhension de la dynamo dans son ensemble.

Plus prospectif, il est intéressant de noter la première mesure du champ magnétique dans les parties internes d'un disque d'accrétion entourant une étoile jeune. Les mesures sont en accord avec les topologies magnétiques utilisées par les modèles MHD



Period-Radius relation deduced from interferometric measurements of Cepheids. The solid line results from the simultaneous fit of the zero point and slope of the line. The dashed line assumes the slope from GFG98, fitting only the zero point.

Period-Luminosity relation in the *V* band, as deduced from the interferometric observations of Cepheids and the HST parallax measurement of δ Cep. The solid line is the fitted P–L relation, assuming the slope from GFG98.

Figure 1 : Observation de Céphéides avec le VLTI/VINCI. *Kervella et al. 2004 A&A, 423, 327.*

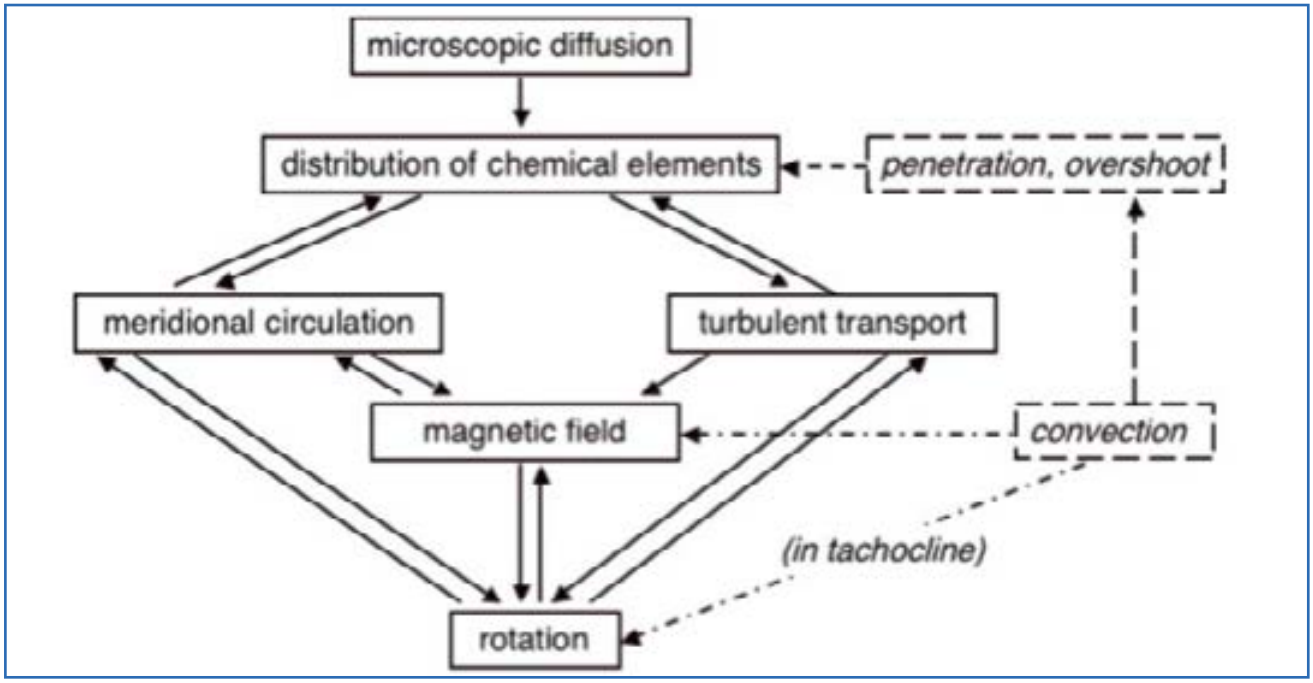


Figure 2 : Mélange rotationnel dans un intérieur stellaire en présence de champ magnétique : un phénomène fortement non-linéaire. *Mathis & Zahn, A&A, 440, 653.*

pour propulser les jets qui leur sont associés. La confirmation du champ magnétique dans les disques, si elle devait se généraliser, aurait un impact fort outre sur la physique de l'accrétion contrôlant ainsi *in fine* la masse finale des étoiles, et donc la forme finale de l'IMF, mais aussi sur la migration de planètes car le champ magnétique modifie vraisemblablement la structure en densité du disque interne de façon importante.

Vers la compréhension du spectre de masse des étoiles … nos origines.

Les grands relevés des zones de formation stellaire, rendus possibles grâce aux caméras grands champs (WIRCAM et MegaCam du TCFH), permettent maintenant de confirmer l'universalité de la fonction de masse des étoiles observées dans le voisinage solaire. Ils mettent par ailleurs en évidence une masse "typique" dans ces fonctions de masse, de l'ordre de 30% de la masse solaire. Cette masse correspond sans doute à la masse typique des cœurs pré-stellaires, durant l'effondrement. La forme de cette fonction de masse stellaire est aussi en bon accord avec celle des cœurs pre-stellaires mesurée avec les instruments de l'IRAM. Il reste maintenant à comprendre les liens intimes qui unissent ces deux types de fonctions de masse : y a-t-il filiation ou non? Dans nombre de laboratoires français des travaux théoriques de premier plan sont en cours qui intègrent la fragmentation, la turbulence et l'influence du champ magnétique (dans le cadre

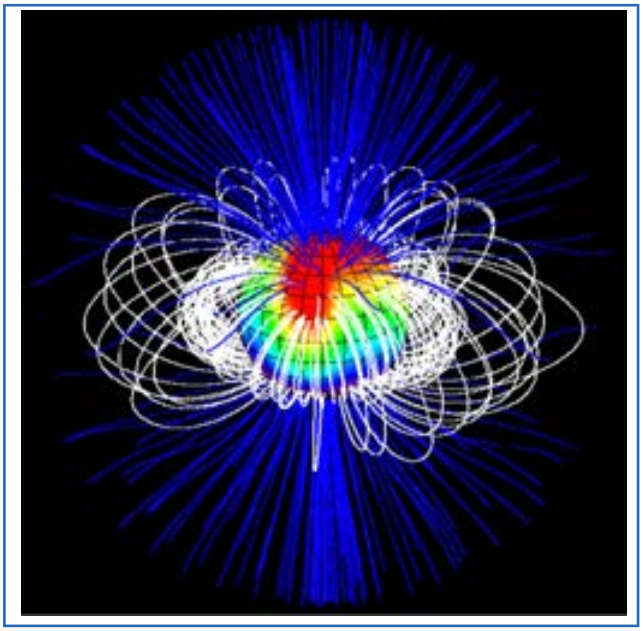


Figure 3 : Reconstruction 3D du champ magnétique de V374 Peg à partir d'observations ESPaDOnS sur le CFHT. *Morin et al. 2008, MNRAS, 384, 77.*

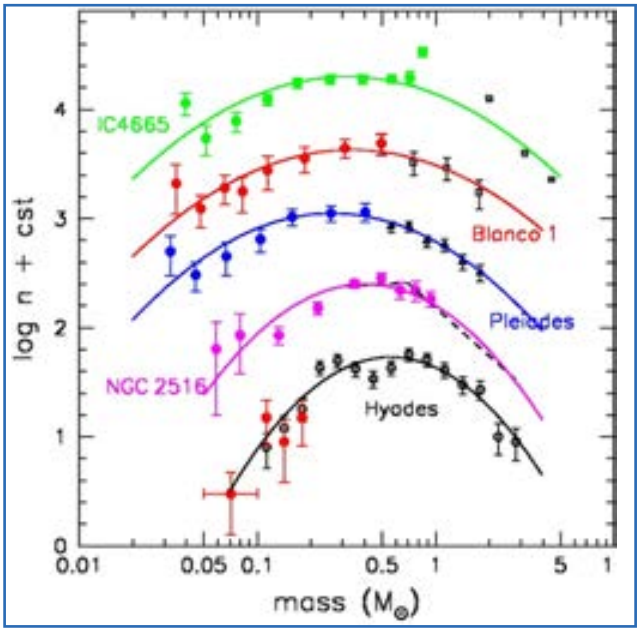


Figure 4 : Fonction de masse « Universelle » pour différents amas. *Moraux et al. 2007, A&A, 471, 499*

de grands réseaux européens RTN et/ou grâce à l'ANR) pour comprendre l'origine de ce spectre des masses stellaires.

Par ailleurs, toujours plus près de la transition étoile-planète, les caméras grand champ du TCFH révèlent maintenant toute une population d'objets très froids, permettant de faire la liaison entre les régimes stellaire et planétaire. Ainsi, des naines brunes ayant des températures effectives de l'ordre de 500K et qui présentent notamment de l'absorption par l'ammoniac sont maintenant détectées. Des avancées majeures en France sur la modélisation de ces atmosphères très froides, incluant notamment les processus de formation et de sédimentation des poussières (aérosols), permettent une progression commune de la compréhension des processus à l'œuvre dans les atmosphères des naines brunes et des planètes.

Une révolution à venir…

Pour terminer, on ne saurait oublier le lancement réussi de la mission CoRoT (en décembre 2006) et l'extraordinaire qualité des courbes de lumière observées depuis. Peu publicisés à ce jour en raison de la complexité du traitement du signal, les nombreux résultats maintenant disponibles sont à la hauteur des attentes. Ils font l'objet d'un numéro spécial de la revue Astronomy & Astrophysics en octobre 2009. Des avancées importantes sont maintenant attendues rapidement pour la structure interne des étoiles avec les mesures photométriques pour l'astérosismologie ainsi que pour la caractérisation des systèmes planétaires et de leur étoile centrale. CoRoT a déjà révolutionné la détection de modes d'oscillation dans pratiquement l'ensemble du diagramme HR. La photométrie haute précision permet des avancées importantes dans de nombreux autres domaines de la physique stellaire comme l'activité magnétique, la convection turbulente à la surface, la rotation, les étoiles binaires ou encore l'interaction disque/étoile.

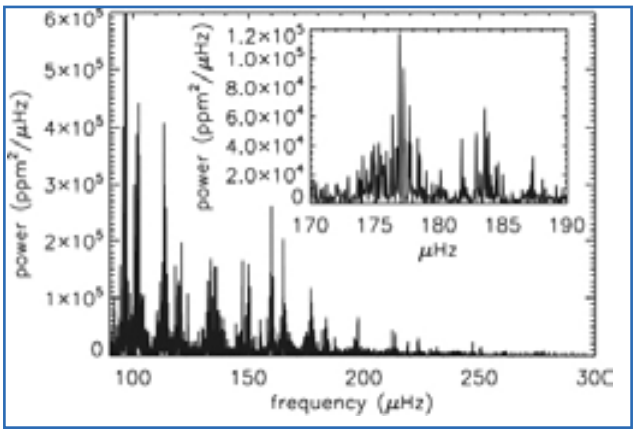


Figure 5 : Spectre de Fourier de l'étoile V1449 Aql observée par CoRoT pendant presque 150 jours consécutifs. *Belkacem et al. Solar oscillation in a massive star, Science 324, 2009*

Thématiques scientifiques et liens communautaires

La structuration de la communauté de physique stellaire par le programme national du même nom (PNPS) est effective depuis plus d'une décennie maintenant. Généraliste par nature, le Programme encourage toutes les études en physique stellaire. Cependant, pour chacun des exercices quadriennaux, la communauté décide, lors d'un forum de prospective ouvert à tous, des thèmes scientifiques à soutenir de façon prioritaire. Pour l'exercice qui se termine, les thèmes prioritaires sont :

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

A ces quatre thèmes prioritaires s'ajoutent deux thèmes transversaux qui concernent la physique fondamentale pour l'astrophysique (la physique de laboratoire, les opacités, coefficients de collisions, …) et la mesure des paramètres fondamentaux des étoiles.

Outre le développement d'instruments (haute résolution

angulaire, spectro-polarimétrie, 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.

Liens thématiques

Les résultats et les outils de la physique stellaire sont utilisés bien au-delà du périmètre du PNPS. De nombreuses passerelles, très naturelles, existent vers les autres programmes de l'INSU et du CNRS. Ces liens sont à entretenir, à cultiver précieusement.

Physique et Chimie du Milieu Interstellaire (PCMI)

- Propriétés des poussières, opacités, coefficients de transition, …
- Champs magnétiques galactiques, effondrement et cœurs préstellaires
- Structure et composition des disques planétaires et protoplanétaires
- Cosmologie et Galaxies (PNCG)
- Echelle des distances cosmologiques
- Physique stellaire dans le Groupe Local
- Hautes Energies (PCHE)
- Formation et évolution des objets compacts galactiques
- Nucléosynthèse stellaire et astronomie gamma nucléaire
- Physique des disques

Physique des Plasmas et Soleil (PNST)

- Astéro- et Hélio- sismologie
- Structure interne : dynamo, mécanismes de transport

Système Solaire et exoplanètes (PNP)

- Exoplanétologie comparée, atmosphères des exoplanètes
- Physique des disques planétaires et protoplanétaires
- Dynamique des systèmes planétaires
- Origines des Planètes et du Vivant (PID OPV)
- Composition et structure des disques protoplanétaires
- Dynamique des systèmes planétaires

Évolutions thématiques.

Contexte et évolution des thématiques prioritaires

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, la physique et l'évolution stellaires (théorie et modélisation), les phases précoces de la formation stellaire. Grâce aux instruments d'observation auxquels nous avons accès et à ceux progressivement mis en service, tels que VLT, CoRoT, Herschel, ALMA, 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. L'étude des propriétés des étoiles hôtes d'exoplanètes (métallicité, binarité, …) doit aussi être mise de l'avant afin de mieux cerner leur impact sur la formation planétaire. Cet ensemble de projets nécessite la continuité d'un soutien en personnel et en moyens afin de conserver un rôle mondial de premier plan.

Il s'agit par exemple de poursuivre le développement de l'interféromètre du VLT jusqu'à la pleine obtention des performances annoncées en imagerie. Nous souhaitons ainsi insister sur l'importance du soutien aux instruments GRAVITY et MATISSE de seconde génération, et sur la nécessité de poursuivre l'extension du réseau actuel de télescopes auxiliaires (AT) avec l'ajout de 2 ATs. Cette exploitation sera renforcée par la mise en place de l'instrument VSI qui pourra bénéficier du réseau auxiliaire étendu à 6 télescopes. Cette exploitation du potentiel interférométrique du VLT passe aussi par une «démocratisation» de l'accès aux données traitées et exploitables scientifiquement et par un élargissement de la communauté interférométrique. Il nous semble que les actions du Centre Jean-Marie-Mariotti sont à soutenir sans faille dans ce contexte.

Il faut aussi veiller au bon retour scientifique de missions spatial en cours comme CoRoT et Herschel. A ce titre, les liens entre les programmes nationaux et le CNES pour en faciliter les exploitations sont à mentionner. Plus lointaine, la mission Gaia doit aussi être préparée dans de bonnes conditions. Il semble nécessaire de sensibiliser un peu mieux la communauté à l'urgence de préparer cette mission dès maintenant, par la définition des instruments adéquats et la mise en place des suivis spectroscopiques multi-objets nécessaires, par exemple.

Par ailleurs, il faut poursuivre l'accompagnement des premières tentatives d'exploitation du site Antarctique, aux qualités présumées exceptionnelles, afin d'en vérifier le potentiel pour l'astrophysique.

Modélisation, codes numériques lourds, et astrophysiques de laboratoires

Il va sans dire que le développement de nouveaux modèles de structure et d'évolution stellaire mais aussi de modèles d'atmosphères pour l'astrophysique stellaire est stimulé par cet accroissement de l'ensemble des contraintes observationnelles.

D'ailleurs, dans le but de maximiser le retour scientifique de la partie sismologie de CoRoT, des progrès décisifs ont été obtenus sur des aspects jusqu'alors mal compris des oscillations stellaires (effet de la rotation, mécanismes d'excitation). La préparation de CoRoT est aussi à l'origine d'une nouvelle génération de modèles d'évolution stellaire multidimensionnels qui cherchent à mieux tenir compte des phénomènes de transport dans les intérieurs stellaires. Le développement de codes de transfert du rayonnement performants a permis de mieux comprendre la chronologie d'évolution des disques avec celle de la formation des planètes. Et pour préparer et interpréter les expériences des grandes installations lasers, de nouveaux codes d'hyrodynamique radiative ont également été développés. Finalement, les résultats de Narval et Espadons stimulent d'importants efforts de modélisation des effets et de l'origine des champs magnétiques stellaires.

Pour terminer, il faut aussi noter le développement d'expériences de laboratoire permettant d'accéder aux conditions physiques des intérieurs stellaires et des chocs dans les jets supersoniques stellaires avec les grandes installations laser.

Les grandes questions

Dans le contexte international, notre communauté tient donc une place honorable pour les avancées théoriques, observationnelles et instrumentales. Les acquis dans nos connaissances et les perspectives d'observations et de modélisation pour les prochaines années permettent d'envisager une percée supplémentaire dans

le domaine de l'astérosismologie ainsi qu'une percée dans la compréhension des atmosphères et des environnements circumstellaires des étoiles jeunes et évoluées, en particulier pour les objets dits froids. Par l'observation de ces derniers, et en particulier des disques (thématique fortement transverse à l'INSU), ce sont toutes les théories de la formation des planètes qui pourront être testées par la mesure directe des conditions physico-chimiques à divers stades de leur évolution.

Evolution des moyens d'observations

Accès à des moyens nouveaux

Il faut noter la perte (temporaire?) des capacités spatiales d'imagerie dans le visible (STIS et ACS en panne sur HST, avec remise en route partielle pour l'instant) et de spectroscopie dans l'UV avec la fin du programme FUSE. En contrepartie, on note l'ouverture de la fenêtre infrarouge thermique 10-20 microns au sol et dans l'espace, et surtout celle entre 30 et 300 microns avec le lancement des satellites Spitzer et Herschel.

Plus prospectifs, les projets de très grands télescopes se multiplient avec, en particulier, une volonté affirmée de l'ESO d'avancer très rapidement pour la mise en service d'un télescope de la classe des 40 mètres, l'E-ELT. Il faudra donc poursuivre la réflexion en cours pour identifier lesquels, et avec quelles capacités, seront les premiers instruments à équiper ce télescope. Il est évident pour l'instant qu'un spectrographe doit composer la garde-robe du télescope et qu'il doit pouvoir mesurer des abondances chimiques dans les étoiles des galaxies externes au Groupe Local. Un imageur visible et/ou infrarouge proche, limité par la diffraction, devrait pouvoir de son côté offrir un champ de vue suffisant pour imager les disques protoplanétaires (10 arcsec de diamètre). Finalement, un imageur limité par la diffraction dans la gamme 5-20 microns semble pouvoir maintenir une niche compétitive face au JWST de par sa résolution angulaire.

La mission Gaia de l'ESA ne devra son plein succès qu'au traitement des données sol pris en charge par le consortium européen DPAC. Le nombre très élevé de sources observées (de l'ordre de 10^9) générera un nombre important d' « outliers », d'alertes ou encore de suivi photométrique et spectrométrique. En particulier l'obtention de vitesses radiales utiles pour l'étude de la structure de la Galaxie et de son histoire passe par des mesures de vitesses radiales d'étoiles standards couvrant tout le ciel observé par Gaia, mesures qui nécessitent un suivi temporel de qualification comme standards. Ces mesures de vitesses commencées à l'OHP et au TBL, doivent impérativement continuer après le début de la mission et avec les mêmes instruments pour éviter tout problème de calibration des standards.

Également de nombreux objets variables nécessiteront un suivi temporel en complément des observations Gaia. Il est indispensable pour le succès de la mission de maintenir l'instrument 193cm de l'OHP et le TBL en état de fonctionnement optimal jusqu'au moins 2017. Nous attirons l'attention sur le fait que l'ESA ne s'occupe pas du traitement sol, et que tout financement des équipes, de leur matériel et des temps d'observations complémentaires sol sont à la charge des instituts et pays engagés dans le programme DPAC de Gaia. L'action spécifique Gaia supporte déjà les missions ESO sur des programmes de standards vitesses radiales et constitue une part importante du budget. Si les télescopes nationaux sont dénationalisés un tel suivi deviendra certainement problématique voir non réalisable.

Enfin, la mise en place de « Grands Programmes » (LP) sur les télescopes de 2m nationaux, au même titre que ceux qui existe déjà à l'ESO ou au CFHT nous paraît une chose importante à mettre en place rapidement pour pleinement rentabiliser la spécialisation instrumentale.

Forces et faiblesses de la communauté

Structuration et démographie

La physique stellaire, domaine traditionnel d'excellence en France, regroupe une grande variété de thèmes de recherche. La création du Programme National de Physique Stellaire (PNPS) en 1999 fut bénéfique à plusieurs égards en proposant des animations scientifiques, en favorisant un recentrage des efforts, et en générant une cohérence et une visibilité accrue qui font maintenant du PNPS un interlocuteur incontournable. Le PNPS participe au pilotage de la recherche en physique stellaire par la sélection et le soutien des meilleurs projets théoriques, observationnels, et instrumentaux. Il participe aussi au dynamisme de la communauté en permettant l'organisation de nombreux ateliers, colloques et écoles annuellement ainsi qu'en favorisant les échanges avec les autres programmes nationaux. Ce travail d'organisation est une force certaine de notre communauté.

Le vieillissement de la communauté "stellaire" pose cependant la question de son renouvellement et des choix thématiques à faire pour entourer au mieux la mise en place de nouvelles équipes formées aux grands instruments à venir, aux traitements massifs des données, aux simulations numériques lourdes et/ou à l'instrumentation de pointe. De façon encourageante, les premiers effets de structuration sont déjà visibles à travers la forte activité de la communauté dans les réseaux européens (FP-5 : *Planets, Clusters* ; FP-6 : *JETSET, CONSTELLATION, Molecular Universe*) et l'augmentation rapide du nombre de projets ANR acceptés ("blancs" et "jeunes chercheurs") concernant les thèmes du PNPS.

Accès aux outils du calcul intensif

Concernant l'utilisation massive de gros codes numériques, il apparaît que nous avons maintenant rattrapé une bonne partie du retard constaté il y a encore peu de temps dans le domaine des moyens de calculs nationaux mis à notre disposition (comme en témoigne la récente évolution du calcul au CINES) ainsi que l'émergence de quelques méso-centres qui répondent efficacement à des besoins spécifiques et plus localisés. Le problème se déplace maintenait du coté de la main d'œuvre disponible pour le développement de ces "gros" codes numériques (e.g., d'évolution stellaire, MHD, multi dimensionnels, …) même si les simulations numériques 3D destinées à modéliser les phénomènes magnéto-hydrodynamiques dans les étoiles ou les disques restent bien limitées par la faiblesse de ces moyens. Il faut enfin rajouter que la construction de grille de modèles d'étoile nécessaire à la sismologie stellaire bénéficierait grandement d'un

accès plus aisé à un grand nombre de processeurs. Cela retarde également le calcul de grilles de modèles non-standards, étendus en terme de masse, métallicité et phases évolutives, nécessaires tant pour l'exploitation des données des grands TGE que pour la préparation des nouvelles missions comme Gaia ou PLATO, pour ne citer qu'elles.

Tableaux récapitulatifs des moyens prioritaires pour la communauté stellaire française

Moyens Spatiaux

	note globale	Theme 1: Formation Stellaire	Theme 2: magnetisme	Theme 3: evolution stellaire / modelisation	Theme 4: interaction etoile / MIS	Autres:
Moyens existants						
XMM	P1				P1	
CHANDRA	P1				P1	
Herschel	P0	P0		P0		
COROT	P0			P0	P0	
HST	P1					Imagerie visible
Moyens futurs						
GAIA	P0	P0		P0	P0	P0
JWST	P0	P0		P0	P0	
SIMBOL X	P1				P1	
PLATO	P0	P0		P0		
SPICA	P1	P0		P1		
DARWIN	P1					
SIM lite	P1/P0	P1		P0	P0	P1
FKSI	P1/P0	P0			P1	P0

P0 = rouge
P1 = bleu
P2 = vert

Moyens au Sol

	note globale	Theme 1: Formation Stellaire	Theme 2: magnetisme	Theme 3: evolution stellaire / modelisation	Theme 4: interaction etoile / MIS	Autres:
Moyens existants						
CFHT	P0	Espadons P0 Spirou P0	Espadons P0 Spirou P0			
CFHT	P1					IMAKA P1 FIRST P1 MEGACAM
OHP	P1			SOPHIE P1		
TBL	P0		Narval P0			
ALMA	P0	P0			P0	
IRAM	P0	P0			P0	
ESO/LaSilla	P1		Harps+polar	Harps		
ESO/Paranal	P0	P0 VLTIP0		P0	P0	
RT Nancay	P2				P2	
Moyens futurs						
Dome C	P2					autres...
Dome C	P1			ASTEP P1		
E-ELT	P0	P0		P0	P0	EPICS METIS SPECTRO
NOEMA	P0	P0			P0	
SKA	P2					
ESO/Paranal	P0	VLTI-6AT P0			VLTI-6AT P0	
CCAT	P2+					
LSST	P2+					
LOFAR	P2					

P0 = rouge
P1 = bleu
P2 = vert

Planétologie

B. Bézard (directeur du PNP), le CS du PNP, P. Drossart et O. Mousis.

La planétologie est par essence un domaine fortement interdisciplinaire qui repose sur les communautés de l'Astronomie-Astrophysique (AA) et des Sciences de la Terre (ST). Environ 230 chercheurs, enseignants-chercheurs et astronomes en France consacrent au moins une partie de leur recherche à la planétologie (une centaine à temps plein). Le PNP joue un rôle important dans la structuration de cette communauté.

Forces et faiblesses de la planétologie française

Forces

Une enquête menée par le PNP en 2006 concluait que la recherche française en planétologie occupait une place de leader en Europe et, rapportée au nombre d'habitants, apparaissait plus active que la recherche allemande ou britannique. Cette enquête utilisait plusieurs indicateurs comme les publications dans deux revues dominantes de la discipline, la participation à des conférences internationales majeures, et l'implication des équipes françaises dans des missions phare de l'ESA (Mars Express, Venus Express, Rosetta et Cassini/Huygens). Plus récemment, il faut souligner le succès impressionnant des équipes françaises qui ont répondu à l'appel d'offres Cosmic Vision de l'ESA puisque les trois missions planétaires retenues pour étude (EJSM, TSSM, Marco Polo) ainsi que PLATO, qui a des objectifs exoplanétaires, ont toutes un PI français. On peut aussi noter que EuroPlanet, programme

fédérateur de la planétologie européenne, a été initié et est présidé par un chercheur français. Enfin, les trois seuls lauréats non américains du prestigieux « Urey Prize » du DPS/AAS sont français. La communauté possède une expertise reconnue en de nombreux domaines ; un point fort est que les équipes issues de l'astronomie et des sciences de la Terre sont hébergées au sein d'une même structure, le PNP.

Faiblesses

Les forces sont insuffisantes dans certains domaines, notamment pour l'exploitation simultanée des missions Cassini, Mars Express et Venus Express. Le problème risque de persister avec l'arrivée prochaine des missions Rosetta, Bepi Colombo, Mars Science Laboratory, ExoMars et Phobos-Grunt dans lesquelles la France est très impliquée. On peut aussi noter un besoin de structuration plus forte dans certains domaines comme la modélisation des systèmes exoplanétaires et une implication des planétologues du Système solaire dans l'exoplanétologie à encourager. Le renfort de nouvelles équipes venues des sciences de la Terre est souhaitable pour interpréter au mieux les données des sondes spatiales sur Mars, Vénus et Titan (surfaces, intérieurs, interactions surface / atmosphère, atmosphère / magnétosphère). Enfin, la communauté est en retard dans la mise en place de centres de données planétaires.

Faits marquants (2004-2009)

Exoplanètes

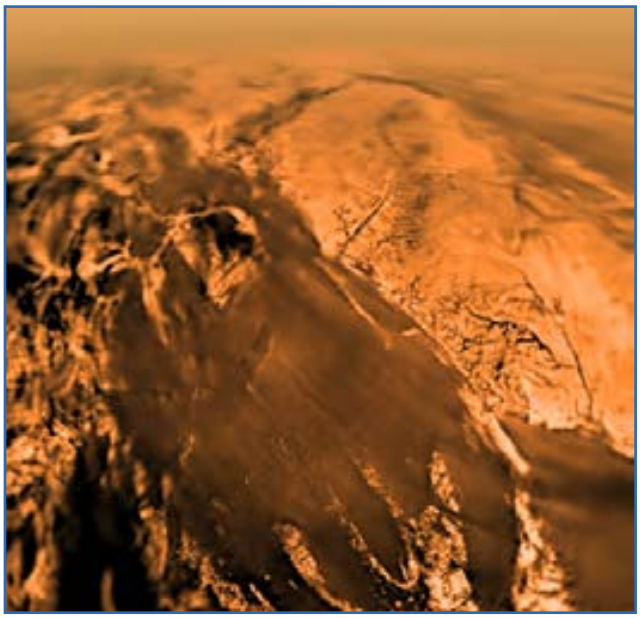
Depuis 2004, la communauté française a été très active dans le domaine de la recherche des exoplanètes, avec la première détection directe d'une exoplanète par optique adaptative avec VLT-NACO et la première détection d'une planète tellurique (de 5 masses terrestres) par la méthode des micro-lentilles gravitationnelles. Les spectrographes HARPS et SOPHIE ont permis la détection de nombreuses exoplanètes par la méthode des vitesses radiales dont certaines en transit devant leur étoile et plusieurs en dessous de 10 masses terrestres. Le satellite CoRoT a permis la découverte d'une « Super-Terre » d'environ 5 masses terrestres, très près de son étoile, et qui constitue la plus petite planète jamais caractérisée avec un rayon de 1,7 fois celui de la Terre. On citera enfin des travaux de simulations hydrodynamiques qui permettent de reproduire les excentricités observées pour les couples de planètes résonnantes.

Le Système solaire précoce

Un résultat théorique important a été la construction d'un modèle dynamique cohérent de l'origine du grand bombardement tardif de la Lune. Ce modèle, qui s'appuie sur des simulations numériques, prédit la déstabilisation du Système solaire externe par les planètes géantes plusieurs centaines de millions d'années après le début de l'histoire du Système solaire. Cette déstabilisation a causé l'injection dans la zone des planètes terrestres de planétésimaux glacés provenant de la ceinture de Kuiper et explique les orbites actuelles des planètes géantes et des Troyens de Jupiter. D'autres travaux sur la dynamique de Jupiter et Saturne dans le disque protoplanétaire gazeux permettent d'expliquer l'absence d'un Jupiter chaud dans notre Système solaire. Enfin, des progrès importants ont été accomplis sur les mécanismes qui auraient pu empêcher la perte des noyaux des planètes géantes dans le Soleil lors de leur migration au sein du disque de gaz protoplanétaire.

Le système de Saturne

Le 14 janvier 2005, la sonde Huygens atterrissait sur la surface de Titan, après une descente de deux heures et demie pendant laquelle ont été obtenues des données uniques qui nous ont révélé un monde façonné par des processus géophysiques et météorologiques assez semblables à ceux se déroulant sur Terre mais avec des acteurs chimiques différents. La communauté française est très impliquée dans cette mission avec des co-Is dans cinq des six instruments de la sonde (dont un PI). En orbite autour de Saturne depuis juillet 2004, la sonde Cassini explore la planète, son environnement et ses satellites au moins jusqu'en 2010. Des résultats remarquables ont été obtenus par les différents instruments auxquels participent des équipes françaises :

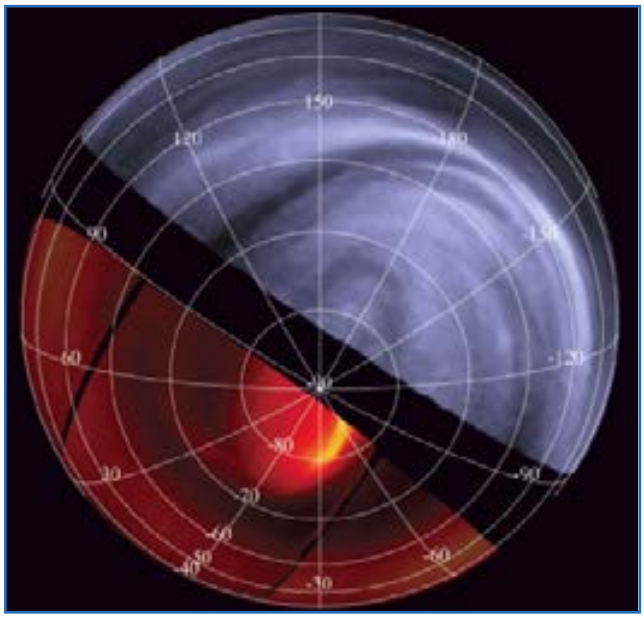


Panorama de la surface de Titan enregistré par l'instrument DISR à bord de Huygens le 14 janvier 2005. © ESA / NASA / Univ. Arizona

cartographie de la température et de la composition chimique de Saturne et Titan, mise en évidence d'une source interne et d'une atmosphère sur Encelade, découverte de lacs d'hydrocarbures et d'un cryovolcanisme sur Titan, étude détaillée des anneaux de Saturne et de sa magnétosphère, etc.

Vénus

La sonde Venus Express est en orbite autour de Vénus depuis le 11 avril 2006. La suite d'instruments à bord a déjà produit de nombreux résultats (plus de 40 articles au total). Parmi les plus marquants on notera les observations de : (i), la surface, via l'émission thermique dans les fenêtres du proche infrarouge, avec des mesures d'anomalie d'émissivité liée à l'âge ou la nature des zones concernées, (ii) l'atmosphère profonde avec les mesures combinées de chimie/dynamique traçant l'activité de la cellule de Hadley de l'équateur à ~60° de latitude, (iii) la dynamique globale et locale (dans la morphologie du vortex polaire sud en particulier), (iv) la chimie et la dynamique de la haute atmosphère (nouvelles détections de OH ou NO en infrarouge, premières mesures

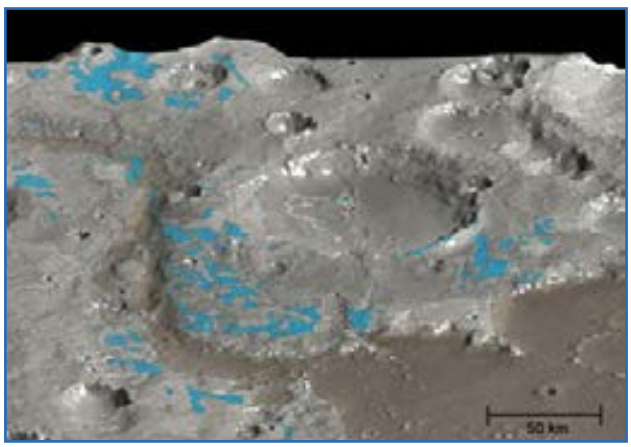


Vue composite de l'hémisphère sud de Vénus en infrarouge et en ultraviolet obtenue à partir des instruments VIRTIS et VMC à bord de Venus Express. © ESA.

systématiques globales sur O_2, ...), (v) l'interaction avec le vent solaire et la détection d'orages dans l'atmosphère de Vénus par leur signature radio (« siffleurs »).

Mars

La sonde Mars Express, en orbite autour de Mars, cartographie la planète depuis plus de cinq ans. Des scientifiques français sont présents dans les équipes des sept expériences embarquées. Le spectro-imageur infrarouge OMEGA (PI français) a détecté la présence, à la surface martienne, de deux types de minéraux hydratés, des phyllosilicates et des sulfates, mais aucune trace de carbonates. Ces observations semblent indiquer l'absence d'étendues d'eau pérennes au cours des derniers trois milliards d'années mais révèlent, au début de son histoire, une période climatique humide avec de grandes quantités d'eau à la surface, suivie d'un environnement plus acide. OMEGA a aussi mesuré l'évolution, au cours des saisons, de la composition des calottes polaires, ce qui a montré qu'elles sont surtout composées de glace d'eau et non de dioxyde de carbone, cette dernière formant une sorte de vernis à leur surface.



Phyllosilicates (en bleu) détectés par l'instrument OMEGA à bord de Mars Express dans la région de Mawrth Valles. Crédit : ESA / OMEGA & HRSC teams.

Les grandes questions

On peut identifier dans la planétologie trois grands thèmes fédérateurs :

- ➢ la formation des systèmes planétaires : comprendre comment, à partir d'une nébuleuse primitive, les corps primitifs se forment et évoluent vers des corps planétaires ;
- ➢ la structure et l'évolution des corps planétaires : comprendre l'évolution des corps planétaires après leur formation et étudier leur structure actuelle (intérieurs, surfaces et enveloppes fluides) dans le cadre de la planétologie comparée ;
- ➢ les environnements planétaires primitifs : explorer et comprendre l'environnement dans lequel l'activité biologique s'est développée sur Terre ; caractériser l'environnement primitif de Mars.

On notera que ces thèmes relèvent de deux des quatre grands chapitres de la « Science Vision » d'ASTRONET : « What is the origin of stars and planets? » et « How do we fit in? ».

Les champs d'étude qui s'inscrivent dans le premier thème *Formation des systèmes planétaires* sont :

- — La composition de la nébuleuse protosolaire : étude de la matière primitive, processus précoces, chronologie de la formation des solides.
- — Les corps peu évolués du Système solaire (comètes, objets trans-neptuniens, astéroïdes carbonés).
- — La formation des planètes et la dynamique du Système solaire jeune.
- — Les exoplanètes : détection et caractérisation, processus de formation et d'évolution.
- — Les disques protoplanétaires et planétaires.

Le thème *Structure et évolution des corps planétaires* couvre les domaines :

- — Chimie et dynamique des atmosphères planétaires : couplages chimie-dynamique-rayonnement-magnétosphère, évolution des atmosphères.
- — Surfaces planétaires : géomorphologie, tectonique, interactions surface-atmosphère.
- — Structure interne des corps planétaires : évolution interne, différenciation, convection, origine et formation des dynamos planétaires.
- — Structure et dynamique des magnétosphères.

Enfin, le troisième thème *Environnements planétaires primitifs* s'intéresse aux questions suivantes :

- — Paramètres externes de l'environnement de la Terre primitive et d'autres corps (e.g. Mars) : flux de matière extraterrestre, rayonnement, protection des surfaces par les atmosphères et magnétosphères, formation et évolution précoce de l'atmosphère et des océans.
- — Origine de la stratification géophysique, géochimique et minéralogique de la Terre primitive (différenciation du noyau, première croûte océanique, ...).

Évolution des thématiques

Quatre thèmes, dans lesquels des évolutions sensibles sont attendues, sont discutés ci-dessous.

Systèmes planétaires extrasolaires

Le nombre d'exoplanètes découvertes (350 à ce jour) ne cesse de croître et il est aujourd'hui possible de mener des études statistiques afin de contraindre les modèles de formation planétaire. Les objectifs prévisibles dans ce domaine sont les suivants :

- Vitesses radiales : aujourd'hui, la vélocimétrie permet d'atteindre des planètes de quelques masses terrestres. L'objectif est maintenant d'accéder au domaine de masse des planètes telluriques (exoterres), avec comme corollaire de trouver de telles planètes dans la zone habitable de leur étoile. Il convient aussi d'explorer la diversité des systèmes planétaires, en particulier en fonction de la masse de l'étoile (e.g. poursuivre l'exploration du domaine des naines M).
- Imagerie directe : après les premières détections retentissantes, l'arrivée de nouveaux instruments comme SPHERE devrait permettre une moisson dans ce domaine. Les objets concernés sont les exoplanètes dans les systèmes jeunes, donc chaudes, et celles à longue période, plus difficilement accessibles par vélocimétrie, et qui sont aussi la cible des techniques d'astrométrie (Gaia, PRIMA) et de microlentilles. Les interféromètres (MATISSE, GRAVITY, VSI) permettront peut-être d'accéder à de l'imagerie indirecte, mais pour des planètes beaucoup plus proches de leur étoile et dont l'orbite est déjà connue, et ainsi de déterminer leur masse.
- Transits et modélisation des atmosphères : l'observation spectroscopique des transits fournit des contraintes uniques sur la structure des atmosphères. C'est un domaine en pleine expansion qui devrait bénéficier des missions CoRoT, Kepler, et plus tard JWST, avec comme objectif la caractérisation de super-Terres. En parallèle, la modélisation des atmosphères en termes de circulation générale, structure thermique, photochimie et évolution doit être développée. Les liens entre les communautés « Système solaire » et exoplanétaire doivent continuer à se tisser.
- Formation des systèmes planétaires : sur le plan théorique, il apparaît nécessaire de modéliser la diversité des évolutions possibles dans le processus de formation de systèmes planétaires, afin de resituer le Système solaire dans ce contexte, e.g. étudier l'universalité d'événements de type LHB (Late Heavy Bombardment).

La montée en puissance des recherches sur les systèmes exoplanétaires a conduit le PNP à en faire un thème prioritaire à part entière à compter de cette année.

Origine du Système solaire

Si l'évolution du Système solaire après la formation des planètes est relativement bien comprise, les phases les plus précoces de la formation planétaire demeurent mystérieuses. Il s'agit là d'un thème transverse à la planétologie et à la formation stellaire, et qui rejoint le thème de la formation des systèmes planétaires mentionné ci-dessus. Trois grandes questions vont faire l'objet d'efforts de modélisation dans les prochaines années.

- L'accrétion des premiers planétésimaux : comment des corps solides de plusieurs kilomètres ont-ils pu se former, en dépit de la difficulté des grains à se coller les uns aux autres et de la tendance des roches à migrer rapidement vers le Soleil par interaction avec le gaz de la nébuleuse ? Des résultats récents suggèrent que les structures turbulentes du disque protosolaire pourraient jouer un rôle important. La communauté française, hier en avance sur la question des interactions entre le gaz turbulent et les particules, doit se réorganiser pour relever le défi et permettre de mieux comprendre cette phase cruciale de l'histoire de notre Système solaire.
- L'accrétion des noyaux des planètes géantes : il est maintenant clair que la formation des planètes géantes commence avec la formation d'un noyau massif de glace et de roches. Cependant, l'accrétion de ce dernier n'est toujours pas correctement reproduite dans les simulations numériques, la dispersion des planétésimaux voisins limitant la croissance au-delà d'une masse terrestre. Il convient donc d'explorer de nouveaux mécanismes, sans doute liés à l'interaction avec le gaz, et comprendre quelle est la taille caractéristique des planétésimaux qui ont le plus contribué à la formation des noyaux.
- L'arrêt de la croissance des planètes géantes : qu'est-ce qui limite la masse finale des planètes géantes alors que les modèles d'accrétion du gaz prédisent que celle-ci accélère exponentiellement avec le temps ? L'ouverture d'un sillon dans le disque ne devrait limiter la croissance qu'au-dessus de 5 masses de Jupiter et la disparition du disque, quant à elle, explique difficilement la présence simultanée de Jupiter et Saturne dont les masses diffèrent sensiblement. La solution de ce problème passe par une étude plus fine du mécanisme d'accrétion du gaz, prenant en compte l'évacuation de l'énergie par transfert de rayonnement, la formation d'un disque circumplanétaire et l'évolution de sa viscosité.

Surfaces et intérieurs planétaires, interactions surface/atmosphère-exosphère

Cette thématique est actuellement irriguée par les données des sondes Cassini/Huygens, Mars Express et Venus Express. Un objectif est d'inciter de nouvelles équipes issues de disciplines comme celles des sciences de la Terre (géophysique, géochimie, minéralogie, géomorphologie, ...) et des atmosphères à s'intéresser à ces données via une approche résolument pluridisciplinaire. L'accent doit aussi être mis sur les efforts de modélisation à la fois théoriques, numériques et expérimentaux en ce qui concerne les couplages entre la dynamique interne et la dynamique externe et l'étude des interactions surface/atmosphère. Ainsi l'étude de l'évolution de Mars doit prendre en compte les interactions entre les changements climatiques, le volcanisme, l'arrêt de la dynamo, l'échappement et l'interaction de l'eau et de l'atmosphère avec la surface.

Les prochaines missions martiennes, ExoMars et Mars Science Laboratory (MSL), dans lesquelles la France est très impliquée, apporteront des données nouvelles et complémentaires sur les intérieurs planétaires et l'évolution des surfaces en étroite interaction avec les changements climatiques planétaires. La mission BepiColombo fournira à partir de 2019 des données sur la géologie de Mercure, son exosphère, sa magnétosphère, et leurs complexes interactions. En outre, il y a clairement besoin de données précises sur les intérieurs planétaires, ce qui nécessite des réseaux sismiques, en première priorité sur Mars, mais

aussi sur la Lune, suivant les recommandations du colloque de prospective du CNES.
Enfin, il convient de réfléchir à une meilleure stratégie d'exploitation et de valorisation des données spatiales, qui passe sans doute par la mise en place de centres de données sur l'imagerie, les champs de données physico-chimiques et la spectroscopie des solides, et le développement d'outils y afférents.

Exobiologie

Dans le cadre du PNP, l'exobiologie doit être centrée sur, i) la cosmochimie organique et, ii), l'exploration planétaire. La cosmochimie organique vise à identifier les molécules et les structures organiques, à comprendre leurs relations avec l'encaissant minéralogique, à déterminer la nature chimique des constituants volatils qui leur sont associés et à caractériser les processus liés à leur formation et évolution. Ces travaux font appel à des techniques analytiques très variées (GCIRMS, RMN, MET, IR-Synchrotron, XANES, EPR, SIMS, ICPMS, HRMS, Pyrolyse/Dérivatisation-GCMS), mises en œuvre par des équipes spécialisées dans des laboratoires dédiés. L'interprétation de leurs données analytiques permettra peu à peu à ces équipes de formuler des problèmes spécifiques à l'organosynthèse dans les milieux extraterrestres. D'autre part, plusieurs laboratoires en France sont spécialisés dans des technologies qui apporteraient beaucoup à la cosmochimie organique. Il s'agit de la désorption laser couplée à la spectrométrie de masse organique et de l'analyse GC/MS des petites molécules solubles (M<500 g mol^{-1}) et HPLC/MS pour les plus grosses. Il faudrait encourager ces laboratoires de chimie du CNRS à participer à l'analyse de la matière organique extraterrestre.

Avec ces dispositifs analytiques, il s'agit avant tout de préparer les missions d'exploration planétaire, et en particulier l'interprétation des analyses des échantillons qui seront prélevés à la surface de Mars, de comètes et d'astéroïdes (MSL, ExoMars, Rosetta, Phobos-Grunt et Marco Polo si elle est sélectionnée). La première priorité des missions martiennes est la recherche de traces de vie passée et la compréhension de l'environnement primitif de la planète.

Un autre volet concerne les exoplanètes dont les observations spectroscopiques sont appelées à se développer. C'est une thématique concurrentielle où la communauté nationale doit rester bien positionnée. Modélisation des atmosphères, recherche de biomarqueurs, expérimentations en laboratoire (e.g. chimie de Titan ou des comètes) sont les directions qui permettront de proposer des systèmes planétaires cibles pour une nouvelle génération d'instruments au sol et dans l'espace. Il faut encourager les laboratoires de biologie et de biogéochimie à apporter leur expertise dans la recherche de biomarqueurs organiques et inorganiques (e.g. biominéralisations).

Les moyens d'étude

Missions spatiales

L'exploration spatiale du Système solaire joue bien sûr un rôle moteur pour la planétologie. Ci-dessous les missions avec implication française qui intéressent la discipline (voir aussi la table).

- Missions en opération : La mission Cassini/Huygens est actuellement prolongée jusqu'en 2010 et une nouvelle extension jusqu'en 2014 voire 2017 est probable. Mars Express et Venus Express sont aussi en phase de mission étendue. La mission CoRoT (transits exoplanétaires) a été prolongée au-delà de janvier 2010. Après un survol de l'astéroïde 21 Lutetia en 2010, la mission Rosetta va continuer sa croisière et commencer les observations de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko en 2014. Les équipes françaises sont très impliquées aux niveaux PI, co-I et IDS sur ces missions de l'ESA. Citons enfin la mission Dawn de la NASA, à participation française, qui rencontrera l'astéroïde Vesta en 2011.
- Missions en préparation : Les missions de l'ESA actuellement en phase B sont Gaia (2012), BepiColombo (2014) et ExoMars (2016). La mission de la NASA, Mars Science Laboratory (MSL), dont deux instruments sont à co-PI français, doit être lancée en 2011. On citera aussi les missions russe Phobos-Grunt vers Phobos (lancement en 2009) et américaine Juno vers Jupiter (lancement en 2011). D'autre part, la communauté participera largement aux observations effectuées par les satellites Herschel dès 2009 et JWST (lancement en 2013).
- Missions en phase d'étude : les missions Marco Polo (retour d'échantillons d'astéroïde), EJSM (exploration d'Europe et du système de Jupiter), PLATO (détection d'exoplanètes) et SPICA (observatoire infrarouge) sont en phase d'étude à l'ESA dans le cadre Cosmic Vision. De nombreuses missions en coopération avec d'autres agences spatiales sont aussi actuellement à l'étude, dont plusieurs projets sur la Lune et sur Mars. Il faut souligner l'intérêt de ces missions d'opportunité dont le rapport retour scientifique sur coût est excellent. Plusieurs projets sur la recherche d'exoplanètes habitables sont aussi à l'étude. Le groupe de travail EPRAT de l'ESA ainsi que le « Blue Dot team » visent à construire une communauté autour de cet objectif et proposeront une feuille de route.

Moyens au sol

Le PNP a évalué les dossiers sur l'évolution des moyens existants et nouveaux à 5-10 ans (voir compte-rendu de ce groupe de travail et Table ci-dessous). On peut noter que beaucoup d'objectifs concernent les systèmes extrasolaires. Pour cette thématique, SOPHIE (OHP), ASTEP (Dôme C), le VLT, le VLTI, ALMA (pour l'étude des disques protoplanétaires), SPIrou sur le CFHT, et l'instrumentation de l'E-ELT ont été jugées prioritaires (P0). L'étude du Système solaire, très nourrie de l'exploration spatiale, s'appuie aussi sur l'observation au sol, en particulier pour les objets peu lumineux (TNOs) mais aussi pour l'étude des atmosphères cométaires et planétaires. Dans ce cadre, ALMA, le VLT et l'instrument METIS proposé sur l'E-ELT ont été classés en première priorité (P0), suivi de près par les développements instrumentaux à l'IRAM (30m et Plateau de Bures) et le RTN (P0/P1).

Astrophysique de laboratoire

Les expériences de laboratoire jouent un rôle important pour la planétologie, notamment comme préparation et support d'interprétation aux données des missions spatiales (voir rapport

du groupe de travail « Astrophysique de laboratoire »). Comme axes prioritaires dans les années qui viennent, on peut citer la formation des roches et minéraux des météorites différenciées, les conditions de formation et les évolutions des diverses phases hydratées observées dans les météorites primitives, et la préparation des observations de Rosetta notamment pour l'interprétation des caractérisations minéralogiques. En ce qui concerne les surfaces planétaires, des travaux sur les interactions surface - atmosphère (planètes telluriques, Titan), eau - minéraux (Mars) et glace d'eau - hydrocarbures (Titan) sont à encourager.

L'étude des atmosphères s'appuie largement sur la spectroscopie moléculaire et des travaux restent nécessaires (e.g. CO_2 et H_2O à haute température pour Vénus et les Jupiters chauds, CH_4 pour Titan et les Jupiters chauds). Des mesures de cinétique chimique en phase neutre et ionisée sont indispensables pour mieux comprendre l'origine des espèces photochimiques observées. Enfin, la chimie hétérogène, qui joue probablement un rôle important sur Titan et sans doute sur Mars, est encore très mal connue (aérosols dans l'atmosphère, interactions gaz-minéraux et gaz-glace à la surface) et doit être étudiée en laboratoire.

	Formation des systèmes planétaires et émergence de la vie			**Fonctionnement global du Système solaire**			
	Systèmes exo-planétaires	Objets primitifs du Système solaire	Environnements primitifs, émergence de la vie	Atmosphères planétaires, magnétosphères	Surfaces, satellites, anneaux	Intérieurs planétaires	Astéroïdes
ESA Missions en opération, en développement, en phase B, en phase d'étude (0, A)	**Herschel** **JWST** **Gaia** PLATO SPICA	**Rosetta** **Herschel** **JWST** Marco Polo SPICA	**ExoMars** EJSM	**Cassini** **Venus Express** **Mars Express** **Herschel** **BepiColombo** EJSM	**Cassini** **Venus Express** **Mars Express** **BepiColombo** **ExoMars** EJSM	EJSM	(Rosetta) **Gaia** Marco Polo
Multi-latéral (non-ESA)	**CoRoT**		**MSL** Projets Lune, Mars	(MSL) **JUNO**	**MSL** **Phobos-Grunt**	**JUNO** Projets Lune, Mars	**DAWN**
Moyens Sol **P0** **P0/P1** **P1** **P2**	ALMA VLT OHP/SOPHIE Dôme C/ ASTEP VLTI CFHT/SPIrou E-ELT/EPICS Dôme C/ ALADDIN CFHT/FIRST TBL SKA, (LOFAR) E-ELT/EVE VLT/UltraPhot	ALMA VLT E-ELT/METIS RTN IRAM 30m IRAM PdB CFHT/IMAKA SKA CFHT/SITELLE VLT/UltraPhot		ALMA VLT E-ELT/METIS IRAM 30m IRAM PdB LOFAR			VLT (VLTI) LSST (SKA)

Modélisation et simulation

La simulation est aussi un outil important pour la planétologie. On citera tout d'abord la modélisation des disques protoplanétaires et planétaires en termes de formation des planétésimaux et de migration des planètes. Ces efforts doivent être poursuivis et structurés au niveau national. La modélisation des atmosphères des exoplanètes est aussi importante, notamment pour préparer les observations spectroscopiques des futurs instruments (transits ou observations directes). En ce qui concerne la dynamique du Système solaire, des travaux portent sur la formation des planètes en interaction avec le gaz de la nébuleuse, l'évolution précoce du Système solaire et la dynamique à long terme des orbites. Certaines phases mal comprises doivent faire l'objet d'un effort particulier. L'étude des atmosphères bénéficie du développement de modèles de circulation générale (GCM) qui accompagne les observations des sondes spatiales. Ces modèles sont complexes, couplent des processus dynamiques et physico-chimiques (Titan) et permettent l'étude des paléoclimats martiens et de la super-rotation de Vénus. Un autre volet concerne la convection thermique et les processus de différenciation dans l'intérieur des planètes telluriques et des gros satellites, avec les implications sur l'évolution géodynamique. La communauté française est en pointe sur ce créneau de la modélisation et se doit de le rester.

Interfaces et interdisciplinarité

Des interactions solides existent entre le PNP et les autres programmes nationaux de l'INSU/AA : le PNST pour les magnétosphères planétaires, le PNPS pour l'étude des exoplanètes, des disques (proto)planétaires et des vents stellaires, et enfin le PCMI pour la chimie des disques circumstellaires.

Une des forces du PNP est la synergie entre les communautés de l'astronomie et des sciences de la Terre en son sein. L'expertise des sciences de la Terre est indispensable pour l'analyse de la matière primitive et l'étude des surfaces et intérieurs planétaires, notamment Mars. Notons aussi que les modèles de circulations générales de Titan et des planètes telluriques sont développés par des chercheurs issus de la communauté de l'atmosphère terrestre. Enfin, les départements de physique et de chimie sont très présents au sein de la planétologie via les expériences de laboratoire visant à interpréter les données recueillies sur les objets du Système solaire (voir Physique du Soleil et de l'Héliosphère...).

Physique du Soleil et de l'Héliosphère, Relations Soleil-Terre

D. Fontaine, N. Vilmer, le CS du PNST et P. Louarn

La thématique des relations Soleil - Terre regroupe environ 225 chercheurs dont 150 permanents et 75 doctorants et postdocs, d'après une enquête réalisée au moment du renouvellement du PNST (2009).

Les thèmes scientifiques du PNST sont liés à l'étude du contrôle de l'environnement ionisé terrestre par l'activité solaire et ses variations. Ils vont donc du magnétisme et de l'activité solaires, en passant par le milieu interplanétaire, jusqu'à la dynamique de la magnétosphère et de l'ionosphère terrestres. Le programme ne couvre à l'heure actuelle ni l'étude de la structure interne du Soleil (thématique qui relève du PNPS), ni celle de l'atmosphère neutre terrestre en dessous d'une centaine de kilomètres d'altitude. L'exploration des plasmas et magnétosphères planétaires est à l'interface avec le PNP, la génération du champ magnétique solaire et le magnétisme des étoiles de type solaire à celle du PNPS et l'étude du Soleil à haute énergie à celle du PCHE.

*L'étude du système Soleil-Terre concerne un « objet » astrophysique qui est proche et qui offre donc l'avantage de permettre l'étude approfondie de mécanismes physiques et pour lequel nous disposons (possibilité unique en astrophysique) de mesures **in situ** ainsi que de possibilités d'**observations à haute résolution spatiale et temporelle**. Les mécanismes ainsi mis en évidence dans l'héliosphère forment un « corpus » théorique utile pour appréhender d'autres environnements ionisés : l'héliosphère est en quelque sorte un laboratoire « grandeur nature » pour l'astrophysique.*

Quelques faits marquants

Nous avons choisi de présenter ici quelques faits marquants de la thématique illustrant les synergies sol/espace ou théories/observations. Nous renvoyons au document de prospective du CNES (groupe SHM) pour d'autres faits marquants directement issus de données spatiales (premières détections de nano-poussières interplanétaires par STEREO, imagerie X/gamma/submm des sites d'accélération des particules énergétiques solaires, éjections de masse coronale par SOHO, mise en évidence de processus de reconnexion et d'accélération de plasmas à l'intérieur de la magnétosphère par la mission THEMIS (NASA), reformation des chocs sans collision par CLUSTER, …)

Magnétisme solaire et activité éruptive : de THEMIS à EST

Les premières déterminations des trois composantes du champ magnétique présent à différentes altitudes dans une région active et dans les protubérances viennent d'être obtenues (Bommier et al., Space Weather Week (2009); Casini et al., 2009) grâce au télescope THEMIS (voir Figure 1). En effet, THEMIS offre des possibilités uniques pour mesurer la polarisation du rayonnement (quatre paramètres de Stockes) dans un mode de spectro-polarimétrie multi-raies et grâce au développement de techniques d'inversions des paramètres de Stokes « multi-raies » simultanées. Dans le cas des régions actives, ces cartes de champ magnétique vectoriel couplées à des modèles d'extrapolation du champ magnétique ont permis d'obtenir une première évidence observationnelle de l'existence d'un tube de flux torsadé pré-éruptif (Canou et al., 2009). Les modèles MHD d'évolution de structures coronales précédemment développés dans la communauté prévoient un caractère éruptif de ces structures. La poursuite de ce type d'observations, effectuées de manière systématique (avec THEMIS puis avec EST), et couplées à des efforts de modélisation

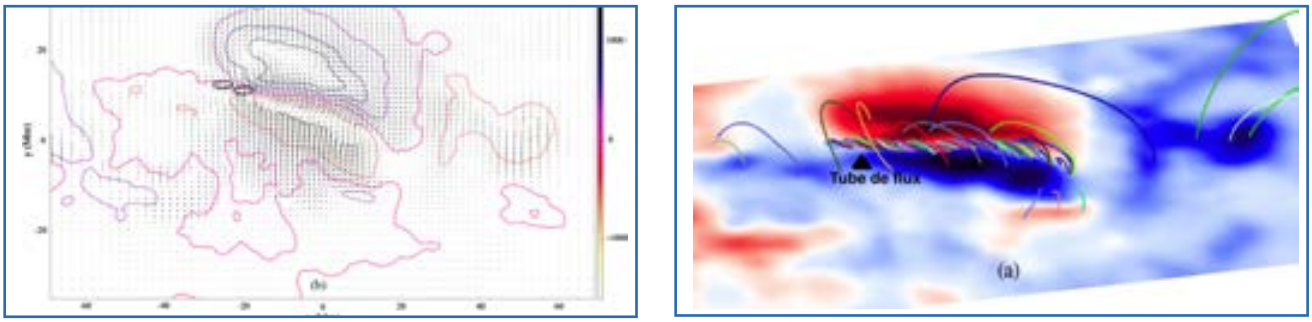


Figure 1: A gauche : carte de champ magnétique vectoriel B obtenue avec THEMIS/MTR, les courbes bleues et rouges indiquent les régions de polarités opposées. A droite : extrapolation de B mettant en évidence l'existence du tube de flux torsadé pré-éruptif. *Canou et al., 2009*.

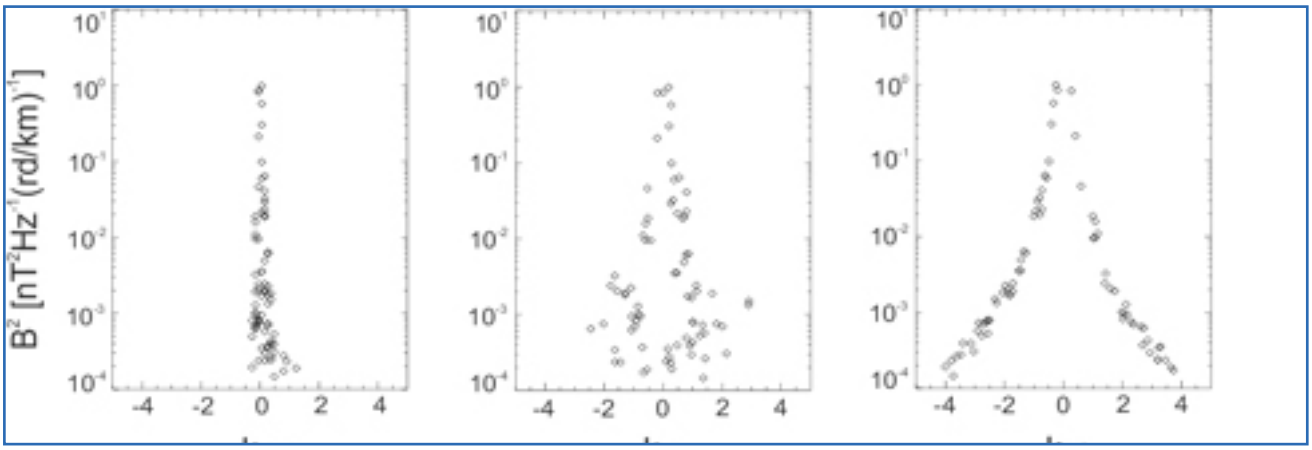


Figure 2 : Distribution de la densité d'énergie magnétique en fonction du nombre d'onde k (normalisé au rayon de Larmor ρ) dans les trois directions de l'espace. *Sahraoui et al. 2006.*.

pourrait permettre à plus long terme d'améliorer les techniques de prévision d'éruptions et d'éjections de masse coronale.

Première preuve expérimentale de l'anisotropie de la turbulence : CLUSTER

La mesure des fluctuations du champ électromagnétique de la magnétosphère en un seul point de l'espace ne permet pas de lever les ambiguïtés spatio-temporelles. C'est dans l'objectif de lever ces ambiguïtés qu'a été conçue la mission CLUSTER composée de 4 satellites en formation tétraédrique. Une technique de « filtrage en nombre d'onde k » a été préalablement mise au point (Pinçon et Lefeuvre, 1991) afin d'exploiter la mesure de toutes les composantes du champ électromagnétique sur les 4 satellites de la mission. Elle a permis, par exemple, d'identifier la source d'énergie à grande échelle et la nature de la cascade turbulente vers les petites échelles dans des structures de plasma situées à la frontière de la magnétosphère terrestre. Comme l'illustre la Figure 2, on a pu mettre en évidence la répartition tridimensionnelle de la densité d'énergie. Cette répartition est très organisée dans deux des trois directions de l'espace : elle révèle une absence de transfert d'énergie le long du champ magnétique moyen (à gauche) et un fort transfert le long de la direction de l'écoulement (à droite). Ces résultats démontrent pour la première fois la nature anisotrope de la turbulence magnétosphérique et marquent le démarrage d'études théoriques et expérimentales sur la turbulence.

Premières reconstructions tri-dimensionnelles en densité et température des trous coronaux à l'aide des missions STEREO A et B

Une nouvelle méthode de reconstruction tomographique tridimensionnelle des structures coronales polaires tenant compte de la variation temporelle du plasma a été développée

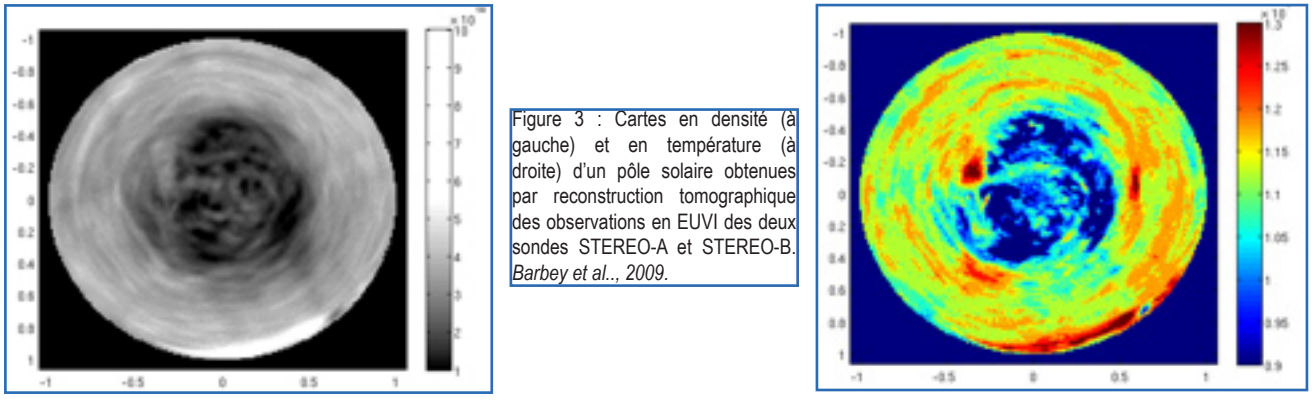


Figure 3 : Cartes en densité (à gauche) et en température (à droite) d'un pôle solaire obtenues par reconstruction tomographique des observations en EUVI des deux sondes STEREO-A et STEREO-B. *Barbey et al.., 2009.*

(Barbey et al., 2008) puis appliquée aux données d'observations stéréoscopiques des imageurs EUVI à bord des deux sondes équatoriales STEREO A et STEREO B (Barbey et al., 2009). La Figure 3 montre une vue reconstituée de la densité (à gauche) et de la température (à droite) au-dessus d'un trou coronal polaire (région sombre) à une altitude de l'ordre de 0,05 rayons solaires. Dans le trou coronal, on note la présence de structures allongées plus brillantes et plus chaudes, qui indiquent la présence de plumes solaires. Ce résultat semble conforter la connexion trouvée par Gabriel et al. (2009) entre plumes et réseau chromosphérique. Cette méthode de reconstruction tridimensionnelle est généralisable aux observations coronographiques, y compris celles des Ejections de Masse Coronale (CMEs).

Couplage surface, couronne, milieu interplanétaire : premières observations simultanées Radio-Héliographe de Nançay / STEREO

Les sursauts radioélectriques dans les longueurs d'onde décimétrique/métrique sont d'excellents traceurs des lignes de champ magnétique qui connectent la surface solaire avec la haute couronne, puis le milieu interplanétaire. Les premiers résultats d'observations coordonnées entre le radiohéliographe et STEREO

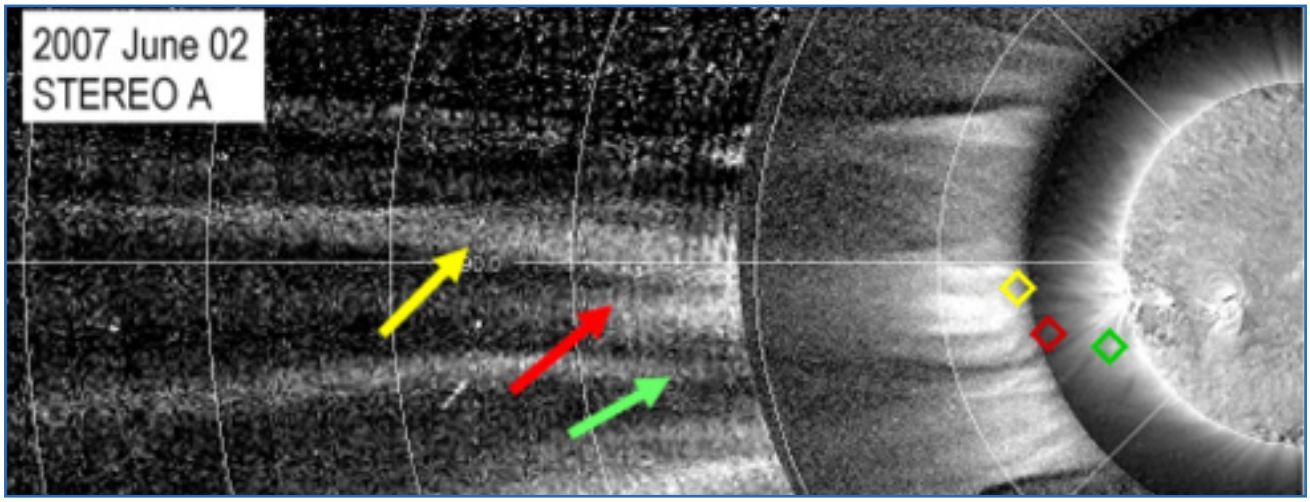
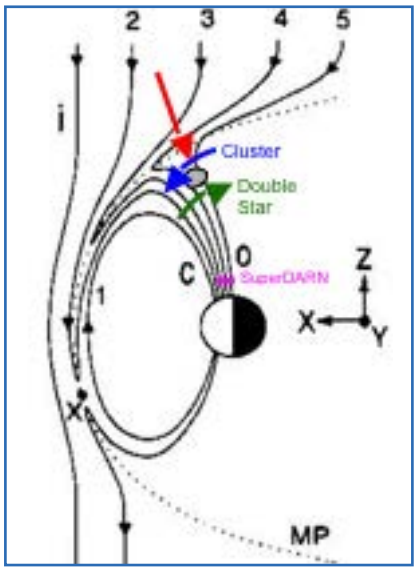


Figure 4 : Comparaison des positions de sursauts radio (type III) observés par le radiohéliographe de Nançay (losanges) avec les structures coronales observées par STEREO en lumière blanche (flèches). *Pick et al., 2009.*

ont permis de confirmer que les faisceaux d'électrons, à l'origine des sursauts radio de type III observés par le radiohéliographe, se propagent à partir de la région active dans des structures coronales divergentes observées par SECCHI sur STEREO (voir Figure 4). La Figure montre également l'étendue en héliolatitude des structures coronales dans lesquelles les électrons sont injectés (Pick et al., 2009). Ces résultats illustrent le rôle clé que joue et que pourra jouer l'imagerie de la couronne en ondes dm-m en synergie avec les projets spatiaux futurs dans les thématiques portant sur la connexion magnétique entre l'activité de surface, la couronne et l'héliosphère.

Pénétration de particules solaires dans la magnétosphère terrestre : synergie sol-espace SuperDARN / CLUSTER

Il est généralement admis que l'injection de particules solaires dans la magnétosphère résulte de la reconnexion magnétique entre les champs interplanétaire et planétaire sur la face avant de la magnétosphère (label (2) sur le schéma de gauche,



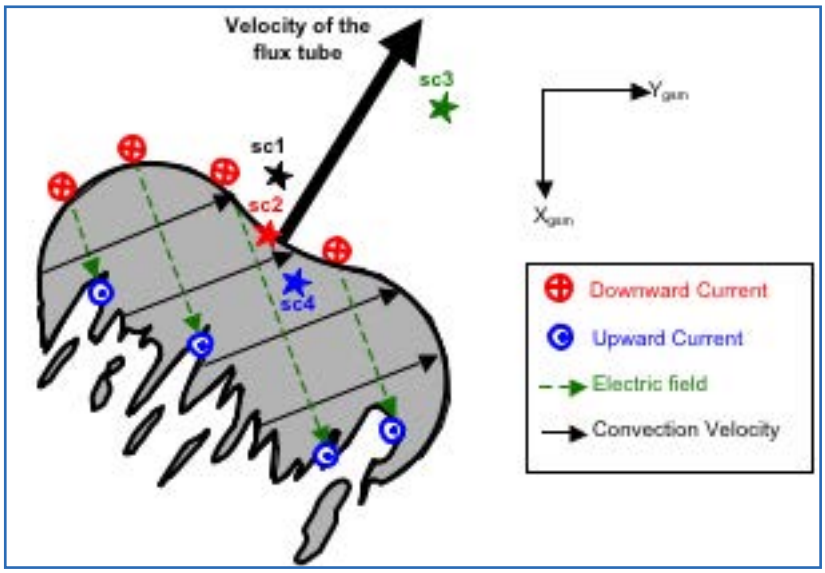


Figure 5 : A gauche, schéma de la conjonction sol – espace, et à droite, schéma de l'électrodynamique des tubes de flux reconnectés (Marchaudon et al, 2009) :

Figure 5). Les tubes de flux magnétiques sont ensuite entraînés par le vent solaire au-dessus des pôles de la Terre (labels (3), (4), (5)). De tels événements ont pu être étudiés lors d'une conjonction exceptionnelle des missions CLUSTER et DOUBLE STAR à différentes altitudes au-dessus du champ de vue du radar SUPERDARN (voir schéma de gauche). L'ensemble de ces observations a permis non seulement de reconstituer la topologie des flux reconnectés et mais aussi d'évaluer les propriétés électrodynamiques de ces tubes. Le schéma de droite montre notamment que le transport du plasma dans les tubes (flèches noires) ne suit pas la vitesse de dérive des tubes (flèche noire en gras). La synergie sol - espace fait partie intégrante des missions récentes comme la mission multi - satellites THEMIS (NASA) ou en projet.

Grandes questions

Les grandes questions de notre thématique sont incluses dans la question et les sous-questions du programme SCIENCE VISION d'ASTRONET :

> *"**How do we fit in ?** What can the Solar System teach us about astrophysical processes ? What drives Solar variability on all scales ? What is the impact of Solar activity on life on Earth ?"*

et du programme COSMIC VISION de l'ESA :

> *"**How does the solar system work ?** Why do the Sun and other stars generate magnetic fields ? Why do these fields result in high temperature corona and a solar (stellar) wind ? How do planetary atmospheres and magnetospheres respond to the interaction with the solar wind ?"*

Par ailleurs, les aspects de météorologie de l'espace, tels que les effets de l'activité solaire et des rayonnements sur l'environnement terrestre, représentent l'un des objectifs du programme SPACE SITUATIONAL AWARENESS (SSA) à l'initiative de l'ESA.

La proximité de l'héliosphère donne accès à la fois à des mesures détaillées à haute résolution spatiale et temporelle et aussi à des mesures *in situ*. Dans le cadre de l'exercice actuel de prospective du PNST, le questionnement de la communauté va maintenant au-delà de l'étude plus ou moins indépendante des différents milieux du Soleil à la Terre, et met l'accent sur les processus physiques fondamentaux qui se produisent dans les plasmas héliosphériques. Les grands axes se déclinent ainsi :

Comprendre les processus physiques à l'œuvre dans les plasmas héliosphériques

Quels sont les mécanismes à l'origine de l'activité éruptive dans les plasmas héliosphèriques ?

Les processus à l'origine de l'activité éruptive des plasmas sont des processus se produisant à petite échelle spatio-temporelle et donc difficilement observables. Par contre, leurs effets sont bien observés parce qu'ils bouleversent l'environnement à grande distance. Des activités théoriques et de modélisation sont souvent nécessaires pour faire le lien entre les observations et les processus physiques. Les questions générales qui se posent sont les suivantes : comment les champs magnétiques non-potentiels se forment ils ? Quels sont les mécanismes qui les conduisent à devenir instables ? Quelle est la nature des pertes d'équilibre et instabilités qui s'y développent ? Comment se déclenche le processus de reconnexion magnétique à l'origine de l'activité éruptive? Comment l'énergie magnétique est-elle convertie lors de la reconnexion ? Comment évolue la topologie magnétique pendant la reconnexion ? Ces questions concernent aussi bien les processus et mécanismes à l'origine de l'activité éruptive du Soleil (éruptions, éjections de masse coronale, …) que ceux à l'origine du déclenchement des sous-orages dans la queue de la magnétosphère ou de la pénétration du plasma du vent solaire vers la magnétosphère lors des « flux transfer events ».

Quels sont les mécanismes impliqués dans le chauffage et l'accélération des particules ?

L'accélération et le chauffage des particules sont des processus très répandus dans l'héliosphère qui concernent la couronne solaire, le vent solaire, les chocs, le plasma magnétosphérique, en particulier lors du développement des sous-orages ou dans les régions aurorales. On observe aussi des particules très énergétiques émises par le Soleil ou dans les ceintures de radiation terrestres. Les questions principales portent sur des mécanismes qui restent mal connus comme (i) la formation de la chromosphère et de la couronne chaudes, (ii) l'accélération des particules dans les éruptions solaires (iii) la partition de l'énergie incidente par les chocs ou (iv) la formation des couches de courant, leur stabilité, dynamique et filamentation.

Comment l'énergie injectée dans le plasma se transfère-t-elle aux différentes échelles et quelle est la dynamique turbulente dans ce milieu anisotrope ?

Cette question évoque les mécanismes turbulents impliqués dans la cascade des grandes échelles vers les petites, le rôle de l'anisotropie du champ magnétique dans la turbulence plasma, le rôle de cette turbulence dans le transport de matière et d'énergie, la formation par la turbulence de structures cohérentes… Une question importante concerne la détermination des échelles caractéristiques et la compréhension des mécanismes de dissipation de l'énergie. Les données du satellite CLUSTER ont récemment permis de montrer que les protons ne sont que partiellement chauffés et que la cascade turbulente semble se prolonger jusqu'aux échelles électroniques. De nombreuses questions restent en suspens.

Quels sont les mécanismes qui assurent les couplages entre les différentes enveloppes de plasma ?

Les interfaces entre les enveloppes de plasma représentent des lieux privilégiés où se produisent des mécanismes fondamentaux, assurant un transfert de masse, de flux, et d'énergie à travers l'interface, mais qui restent encore mal connus. Les couplages entre enveloppes sont nombreux dans l'héliosphère : par exemple, l'émergence du champ magnétique (engendré à l'intérieur du Soleil) et son impact sur l'atmosphère solaire, le couplage magnétique entre la photosphère et la chromosphère, la pénétration de particules solaires dans la magnétosphère, la fermeture des courants magnétosphériques dans l'ionosphère, les échanges d'énergie entre l'ionosphère et les ceintures de radiation. De nouvelles questions émergent, comme par exemple le rôle des transferts impulsifs d'énergie (Terrestrial Gamma-ray Flashess, TLEs, LEP) dans l'interaction ionosphère - atmosphère

Comprendre les processus des relations Soleil-Terre

En parallèle avec ces grandes questions sur les processus fondamentaux, il existe une thématique transversale qui porte sur les questions spécifiques liées aux relations Soleil-Terre :

Quelle est l'origine du cycle solaire et quel est son impact sur l'irradiance ?

Quels sont les liens entre la variabilité solaire et les caractéristiques de l'atmosphère terrestre ? Comment caractériser et prédire la variabilité solaire dans les rayonnements ionisants (XUV/UV) ? Comment la variabilité de l'irradiance totale contribue-t-elle au forçage climatique ?

Comment caractériser la réponse du système magnétosphère – ionosphère - thermosphère à l'activité solaire aux différentes échelles spatio-temporelles ?

Il s'agit d'une part de mieux caractériser et comprendre la propagation des perturbations d'origine solaire dans l'héliosphère, et ensuite d'évaluer l'impact dans l'environnement terrestre. Quelles sont les observables disponibles ? Quels sont les meilleurs proxys ? Ces questions sont l'une des clefs de la météorologie de l'espace.

Evolutions thématiques

Après plusieurs décennies d'observations et les premières explorations satellitaires du système Soleil-Terre et des plasmas héliosphériques, les thématiques du système Soleil-Terre évoluent vers l'étude approfondie des processus physiques dans le laboratoire de physique des plasmas naturels que constitue l'héliosphère et vers l'étude des couplages entre les différentes enveloppes des objets. Ces évolutions s'accompagneront de nouveaux moyens observationnels, mais aussi du développement de nouvelles simulations numériques et modélisations. Enfin, cette évolution thématique pourrait avoir des impacts très différents sur la communauté : on pourrait envisager par exemple la propagation des théories développées pour les plasmas du Système solaire vers d'autres environnements ionisés (planètes, pulsars, objets magnétisés, …) ou encore un rapprochement de notre communauté plasma avec la communauté des plasmas de laboratoire, en particulier les plasmas de fusion.

Vers l'étude des processus physiques dans le laboratoire héliosphérique

Le chauffage et l'accélération des particules et des vents, la reconnexion magnétique et les phénomènes éruptifs, les chocs, etc … représentent des processus généraux que l'étude des plasmas héliosphériques partage avec d'autres thématiques en astrophysique. Le laboratoire héliosphérique offre l'avantage d'observations *in situ*. Des résultats importants sont attendus des missions MMS (NASA) dédiées à l'étude des petites échelles et de la turbulence, et surtout du projet CROSS-SCALE proposé dans le cadre du programme COSMIC VISION de l'ESA et dédié à l'observation simultanée des processus aux trois échelles fondamentales de la physique, à savoir l'échelle fluide, l'échelle de la dynamique des ions, et celle de la dynamique des électrons. Le projet Solar Orbiter (SOLO) de COSMIC VISION permettra d'obtenir les premières mesures *in situ* combinées avec des observations d'imagerie à haute résolution spatiale, c'est-à-dire de faire le lien entre les processus à la surface du Soleil et dans l'espace interplanétaire. On en attend des avancées significatives sur l'étude des phénomènes éruptifs, le chauffage et l'accélération des particules. L'exploration des plasmas solaires au voisinage du Soleil devrait bénéficier par ailleurs des premières mesures *in situ* les plus proches du Soleil (une dizaine de rayons solaires) qui seront obtenues grâce aux projets de sondes solaires (projet NASA de SOLAR PROBE+ ou son alternative ESA, PHOIBOS).

Vers l'étude des couplages entre les différentes couches

La compréhension des processus physiques dans les plasmas du Système solaire nécessite de plus en plus la compréhension des couplages entre les différentes enveloppes des objets. Par exemple, la génération et l'émergence du champ magnétique impliquent une bonne compréhension du couplage entre l'intérieur et l'atmosphère solaires, entre la photosphère et la chromosphère, ... Ces objectifs recouvrent ceux du télescope solaire EST au sol et du projet Solar Orbiter (SOLO) dans l'espace. L'interaction des plasmas solaire et magnétosphérique est un objectif prioritaire du projet CROSS SCALE, en synergie avec les sondeurs ionosphériques EISCAT (en particulier dans sa configuration 3D) et SuperDARN pour le couplage ionosphère – magnétosphère. Le micro – satellite TARANIS permettra d'aborder une thématique en émergence sur le couplage entre les atmosphères neutres et ionisées. Un élément commun important à l'étude de ces couplages est le développement de nouvelles simulations numériques et modélisations qui permettront d'interpréter des observations différentes dans des milieux certes couplés mais différents.

Vers des études de planétologie comparée avec les magnétosphères des autres planètes du Système solaire

Une partie de la communauté magnétosphérique est déjà engagée dans des études de planétologie comparée avec les plasmas et magnétosphères d'autres planètes du Système solaire, notamment celles des planètes géantes, Jupiter et Saturne, respectivement visitées par les missions de la NASA, GALILEO et CASSINI. Ces magnétosphères présentent des facteurs communs comme la présence d'un champ magnétique qui isole l'environnement planétaire de l'écoulement du vent solaire, organise le transport du plasma magnétosphérique, induit une activité aurorale. Elles diffèrent aussi notablement de la magnétosphère terrestre, de par leur rotation rapide, la multiplicité des sources de plasma, les lunes, les anneaux, … Cette approche de planétologie comparée permet de mieux comprendre la nature et les interactions des différents processus qui existent dans les diverses magnétosphères mais dont l'importance varie. Pour l'avenir, l'investissement planétaire de la communauté magnétosphérique devrait s'accroître significativement suite à son fort engagement sur la mission BepiColombo de l'ESA, et les intérêts manifestés pour la mission EJSM/Laplace de COSMIC VISION vers Jupiter et ses Lunes. Les caractéristiques de Mercure et des Lunes joviennes induisent l'émergence de nouveaux sujets d'étude comme l'interaction des plasmas avec les exosphères planétaires et les surfaces planétaires.

Moyens et outils

Moyens au sol

Les avis scientifiques sur les instruments discutés dans le cadre de la prospective INSU concernant ou mentionnant le PNST sont donnés au chapitre sur « L'évolution des moyens ». Le tableau simplifié et les commentaires ci-dessous, reprennent **uniquement les objectifs prioritaires** du PNST.

Nouveaux moyens :

➢ **Le projet European Solar Telescope (EST)**, prévu aux Canaries, est un projet européen très ambitieux de télescope spectro - polarimétrique de 4 m fonctionnant dans le visible et l'infrarouge (comme THEMIS) avec une résolution spatiale 5 à 10 fois plus élevée que THEMIS. **EST a été classé en première priorité dans la classe des projets de taille moyenne dans l'Infrastructure Road Map d'ASTRONET.** De par ses choix techniques, dont une conception optique héritée de l'expérience de THEMIS et l'utilisation de spectroscopie multi - raies, le projet EST sera un instrument très différent et très complémentaire du projet américain ATST. Ses objectifs scientifiques se situent dans la continuité de THEMIS et répondent à des priorités affichées par ASTRONET : émergence du flux magnétique, stabilité des structures magnétiques à l'origine de l'activité solaire, champ magnétique des protubérances. **EST le projet nouveau que le PNST soutient en priorité.** La « Design Study » se terminera en 2011. Dans cette phase, la France est chargée de la conception optique du télescope, d'études pour la polarisation et les spectrographes à grand champ, et de la définition de la base de données. Il remplacera le télescope THEMIS à l'horizon 2020. Une phase de calibration croisée entre THEMIS et EST est nécessaire pour valider le fonctionnement de EST. Le coût à achèvement serait de l'ordre de 20 M€ pour la France (sur un total de 120 M€).

Tableau résumé des priorités du PNST

Nouveaux Moyens	Priorités	Commentaires
EST	**P0**	**Participation française à la « Design study » en cours.**

Moyens existants	Commentaires
THEMIS (télescope)	**Priorité : Une solution urgente doit être trouvée pour le fonctionnement de THEMIS dès 2010.**
EISCAT	Participation française au **Working Package « Science Planning »** de la « Preparatory phase » d'EISCAT 3D.
NRH	**Priorité : maintien du fonctionnement du NRH et extension vers les hautes fréquences.** Autres : Intérêt pour le cœur hollandais de LOFAR ; Synergie à développer
SuperDARN	**Responsabilité française du radar de Kerguelen** Achèvement des radars au Dôme C (2010-2011, sous responsabilité italienne)

➢ **PICARD – SOL** est la composante sol, située à l'OCA, de la mission PICARD (voir la rubrique « moyens spatiaux », ci-dessous). C'est un projet de petite taille, partiellement financé par le CNES, et soutenu par le PNST. Il comprend une réplique de l'instrument SODISM embarqué sur PICARD et un moniteur de seeing MISOLFA pour mesurer la turbulence atmosphérique. L'objectif est de mesurer le diamètre solaire au sol et dans l'espace de manière à séparer les effets solaires des effets atmosphériques, réinterpréter les mesures historiques et poursuivre sur le long terme après la fin de la mission.

Moyens existants

THEMIS est un télescope solaire implanté aux Canaries qui fonctionne en spectro-polarimétrie multi-raies dans le visible et l'infrarouge. C'est le seul instrument au monde capable de faire des mesures de polarimétrie solaire avec une précision de l'ordre de 10^{-5}. Il n'a pour l'instant aucun concurrent direct pour la spectro-polarimétrie solaire et ce jusqu'au fonctionnement opérationnel de l'Advanced Technolog Solar Telescope (ATST) ou du futur Télescope Solaire Européen EST. Bien que la spécialité de THEMIS soit la spectro-polarimétrie, il disposera à partir de 2010 d'une optique adaptive dédiée à l'imagerie haute résolution. Il est à souligner que THEMIS est aussi utilisé par la communauté planétologique pour mesurer les vitesses radiales et la polarisation de Vénus et ainsi que de Mercure dans la perspective de BepiColombo. THEMIS a été sorti des TGE fin 2007. La mise en liquidation en mai 2009 de la société THEMIS S.L. de gestion du télescope met en danger son fonctionnement si aucune solution n'est trouvée rapidement. ***Le PNST demande qu'une solution soit trouvée de façon urgente pour faire fonctionner le télescope pendant quelques années, pour permettre à la communauté française de travailler, de maintenir son expertise scientifique et instrumentale, et pour préparer sa participation au projet EST (prévu pour 2020).***

➢ **EISCAT - EISCAT-3D.** L'association européenne EISCAT (European Incoherent SCATter) exploite des sondeurs ionosphériques implantés dans le nord de la Scandinavie et au Spitzbzerg qui mesurent le plasma ionosphérique de 80 à 1000 km d'altitude, et ceci en synergie étroite avec des missions spatiales dont CLUSTER. EISCAT développe actuellement une nouvelle génération de sondeurs (EISCAT-3D) avec un système d'émission/réception très innovant qui permettra des mesures à 3D et à haute résolution spatio-temporelle du plasma ionosphérique. La «Design Study»est terminée, la phase préparatoire prévoit de tester un prototype. Le projet a été récemment (2009) intégré à la feuille de route de l'ESFRI (European Strategy Forum for Research Infrastructures) au titre des sciences de l'environnement. La communauté française ne fait pas partie de l'association

EISCAT mais exploite les données en achetant des heures d'observation. Du fait de ses compétences reconnues, elle a été sollicitée pour **participer à un « Work Package » de la phase préparatoire *d'EISCAT 3D. Il convient de soutenir ces efforts pour ménager un accès aux observations futures.***

➢ **Le Radiohéliographe de Nançay** (150 – 450 MHz) est le seul instrument qui fournit des images de la couronne solaire (sur le disque et au limbe) dans une gamme d'altitudes allant d'environ 0,1 à 1 rayon solaire au dessus de la photosphère. Cet instrument est largement utilisé aujourd'hui comme un instrument à statut de Co-I pour les observations spatiales (SOHO, STEREO, RHESSI) et devrait le rester pour les projets spatiaux futurs en physique solaire (SDO, Solar Orbiter, Solar Probe +). Il n'existe pas de remplaçant au radiohéliographe de Nançay à court terme (prochain cycle) et il y a un intérêt scientifique fort à maintenir la capacité d'imagerie de la couronne en ondes dm-m pour les prochaines missions, en complément des observations de LOFAR (pour les ondes métriques, décamétriques de la haute couronne) et en attendant la mise en service du radiohéliographe chinois (CSRH) et à plus long terme du projet américain Frequency - Agile Solar Radio – telescope FASR. Avec une bande très étendue en fréquences (50 MHz - 30 GHz), FASR présente l'intérêt de faire des images de l'atmosphère solaire depuis la chromosphère jusqu'à la haute couronne. FASR étant retardé et le financement américain espéré ne permettant de réaliser qu'un démonstrateur dans une autre bande de fréquences que celle du radiohéliographe, la communauté radio solaire française a revu sa stratégie instrumentale. Elle met ***la priorité sur (i) le maintien du bon fonctionnement du radiohéliographe et (ii) l'adjonction d'un canal à plus haute fréquence vers 610 MHz*** qui permettrait de cartographier le voisinage des régions d'accélération des particules, ce qui n'a jamais été fait.

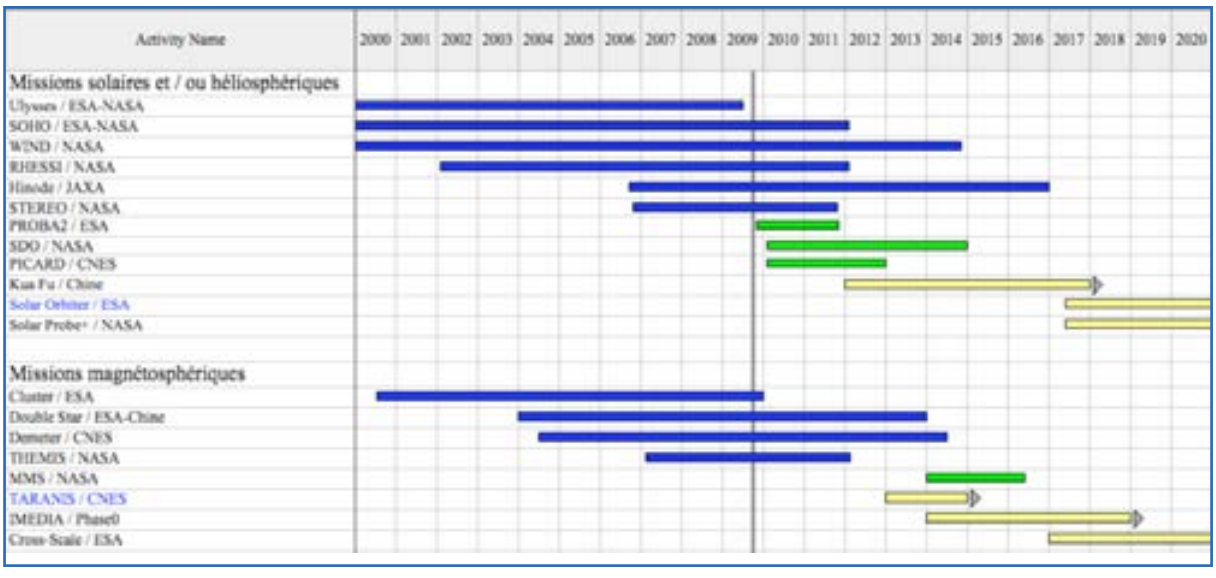
➢ **SuperDARN** est un réseau international de radars HF qui permet de cartographier le transport du plasma ionosphérique sur une grande partie de l'ionosphère aurorale et polaire. Il apporte un soutien sol aux missions spatiales comme CLUSTER (ESA), la mission THEMIS (NASA) et continuera avec les missions futures MMS (NASA), CROSS – SCALE (ESA). Les équipes françaises SuperDARN participent actuellement à 4 radars. Leur récente réorganisation met la **priorité sur le radar de Kerguelen**, dont le fonctionnement sera entièrement pris en charge par la France (IPEV et PNST). Les autres radars, dont ceux qui sont en construction au Dôme C, passeront progressivement sous la responsabilité d'autres participants au réseau SuperDARN.

➢ **Autres instruments exploités par le PNST.** La communauté française exploite et utilise également des instruments sol qui n'ont pas été discutés dans le cadre de la prospective INSU. Il s'agit des instruments d'observations systématiques du Soleil à Meudon et des instruments du Pic du Midi, comme la lunette Jean Rösch (LJR) avec ses programmes de spectro-polarimétrie complémentaires de ceux de THEMIS et son programme CALAS sur l'étude de la convection et le coronographe CLIMSO.

Moyens spatiaux

Nous renvoyons au document de prospective du groupe SHM (2009) pour plus de détails sur les priorités de la communauté en terme de missions spatiales et nous n'en rappelons ici que les grandes lignes. Le tableau ci-dessous présente un état des lieux des missions existantes (en bleu), décidées (en vert) et en projet (en jaune). Les missions aux interfaces d'autres programmes sont discutées dans la section suivante « Interface avec les autres programmes ».

La priorité de la discipline va au programme obligatoire de l'ESA qui contribue à structurer l'activité de la communauté. La première priorité de la discipline est la réalisation des dernières missions « pierres angulaires » du programme « Horizon 2000 » de l'ESA, à savoir BepiColombo (voir « Interface avec les autres programmes ») et Solar Orbiter, remise en compétition dans le cadre du programme « COSMIC VISION » de l'ESA. Avec des observations d'imagerie à haute résolution spatiale combinées à des mesures *in situ* très près du Soleil (0,22 UA) et des observations hors écliptique, elle permettra d'étudier notamment les processus de génération du champ magnétique, de chauffage du vent



solaire, et les processus d'accélération de particules énergétiques grâce à des périodes de rotation quasi-synchrones avec le Soleil. Après les missions SOHO et Ulysse, cette mission fédère l'ensemble des laboratoires de physique solaire et héliosphérique en France et en Europe.

La communauté soutient également fortement d'autres missions en compétition pour le programme Cosmic Vision de l'ESA dans lesquelles elle s'est engagée, à savoir les missions CROSS-SCALE et EJSM (voir la section suivante « Interface avec les autres programmes »). Dans la suite logique de CLUSTER, CROSS-SCALE vise l'étude des interactions entre les différentes échelles de la physique dans des processus fondamentaux comme les chocs, la reconnexion magnétique et la turbulence. Il s'agit d'un projet fortement soutenu par la communauté, mais qui n'a pas été retenu pour la première partie de COSMIC VISION. A cet égard, la communauté devra revoir ses objectifs.

Dans le cadre du programme multi-latéral, le micro-satellite PICARD du CNES, initialement porté par la communauté atmosphérique, devrait être lancée en 2010. En ce qui concerne les objectifs Soleil-Terre, il permettra d'étudier la variabilité solaire par la mesure simultanée de plusieurs paramètres solaires fondamentaux, dont l'éclairement total, le diamètre solaire, la forme du limbe, ... Le projet inclut un soutien au sol (cf. PICARD-SOL dans la rubrique « moyens au sol » ci-dessus) et en ballon. Le projet TARANIS est une priorité de la discipline depuis les 2 derniers colloques de prospective. Il est dédié à l'étude des transferts impulsifs d'énergie entre l'atmosphère et l'ionosphère terrestres et à leur rôle dans le couplage entre ces deux régions. Il a passé avec succès la revue de fin de phase B en 2009 ; ***la communauté soutient le dégel de TARANIS et son passage en phase A.*** A un horizon plus lointain, la communauté recommande le démarrage du projet bi-satellitaire IMEDIA (en phase 0) qui a pour objectif de comprendre les phénomènes d'accélération, de chauffage et de turbulence dans une des régions « sources » de la magnétosphère, c'est-à-dire au sommet de l'ionosphère aurorale.

Les missions d'opportunité jouent un rôle très important pour la communauté et permettent d'engager des études complémentaires aux axes prioritaires de l'ESA. Ainsi, la communauté magnétosphérique participera à la mission « Magetospheric Multi-Scale » (MMS) de la NASA (2013) dédiée à l'étude de la turbulence et des petites échelles spatio-temporelles. La communauté solaire est très intéressée par la mission SOLAR PROBE +, pour laquelle la NASA a émis un appel d'offre instrumental en 2009. C'est un projet très complémentaire de SOLAR ORBITER et spécifiquement destiné à l'étude de la couronne et du vent solaire naissant grâce à des mesures *in situ* très proches du Soleil. Il existe également des intérêts pour les aspects de météorologie de l'espace de la mission KUA-FU proposée par la Chine et de coronographie pour la mission technologique de l'ESA PROBA 3.

Bases et services de données

La communauté du PNST développe et exploite trois bases de données (BASS2000, MEDOC, CDPP) qui jouent un rôle important dans la valorisation des données et dans la collaboration entre équipes. Initialement dédiés à l'archivage des données, ces centres ont considérablement évolué en quelques années. Ils ont développé en parallèle des services à valeur ajoutée, des activités d'organisation de campagnes et d'ateliers de travail, et se sont impliqués dans un projet d'OV héliosphérique (HELIO) développé dans le cadre du programme européen FP7.

BASS 2000 est implanté à Tarbes avec une composante à Meudon. Il a été initialement créé dans le but d'archiver les données solaires des instruments au sol : THEMIS, le radiohéliographe de Nançay et les instruments solaires du Pic du Midi dont la Lunette Jean Rösch (LJR). Cet objectif a été rempli et même largement dépassé, puisqu'il héberge des données stellaires issues des spectropolarimètres ESPaDOnS et NARVAL. De plus, BASS 2000 a développé des outils d'exploitation systématique qui permettent d'accéder à des données traitées, directement exploitables, comme des cartes de champ magnétiques vectoriels issus des données de THEMIS. Enfin, le service FROMAGE propose des outils numériques, par exemple des extrapolations à la couronne de données magnétiques photosphériques. Le savoir-faire reconnu de BASS 2000 a permis à la communauté de prendre la responsabilité du « work-package » bases de données dans la Design Study d'EST.

Le centre MEDOC est la composante solaire du centre IDOC de l'IAS (IAS Data and Operation Center) à Orsay. Il était initialement dédié à la mission SOHO, en tant que centre européen pour les opérations de SOHO, centre de commandes de 2 instruments (SUMER et GOLF) et centre européen d'archivage des données de SOHO. Ces activités se sont ensuite étendues aux données d'autres missions spatiales en cours (TRACE, CORONAS, STEREO) ou à venir (SDO, PICARD). De plus, MEDOC a développé des outils d'analyse, de calcul et de visualisation qui sont mis à la disposition des utilisateurs. Ainsi, le logiciel FESTIVAL, développé pour STEREO, permet de visualiser et de traiter des composites d'images multi-instruments. MEDOC met à disposition des utilisateurs des produits à valeur ajoutée : films étalonnés d'instruments, films étalonnés de mosaïques d'images multi-instruments, cartes de paramètres, catalogues d'événements.

Le CDPP (Centre de Données de la Physique des Plasmas) est implanté au CESR (Toulouse) sous l'égide du CNES et de l'INSU. Il assure l'archivage à long terme des données plasma au « sol » et dans l'espace issues d'instruments français. Il s'est considérablement développé ces dernières années puisqu'il héberge actuellement plus de 600 jeux de données dont des données d'instruments actuellement opérationnels sur CLUSTER, STEREO, THEMIS et des missions planétaires (CASSINI, VENUS EXPRESS, …). Le CDPP a acquis un expertise reconnue : il est ainsi en charge de la définition des standards et des protocoles dans le cadre d'EUROPLANET. Enfin, le CDPP offre des services à valeur ajoutée : par exemple, le logiciel AMDA (Automated Multi-Dataset Analysis) est un service web intégré permettant l'extraction et la visualisation de données, mais aussi, la création de paramètres à partir des mesures, la recherche d'événements, …

Modélisations et simulations numériques

La modélisation et la simulation numériques représentent une branche majeure de la physique des plasmas héliosphériques, au service de la compréhension des processus. Elles jouent un rôle complémentaire des observations, qui permet de contraindre les modèles et aussi de corréler des observations limitées en

temps et en espace avec d'autres observations prises ailleurs dans le système et/ou ultérieurement. La physique des plasmas héliosphériques est caractérisée par différentes échelles allant des échelles globales fluides aux échelles cinétiques en passant par toutes les échelles intermédiaires (liées aux différentes espèces présentes dans le milieu étudié). Cette diversité d'échelles spatio-temporelles se retrouve en termes des codes numériques :

Les codes de type **fluide** et **magnétohydrodynamique** sont utilisés principalement pour étudier des questions de dynamique d'ensemble du plasma, comme l'émergence du champ magnétique solaire, les éruptions et les éjections de masse coronales, la génération du vent solaire, la dynamique du plasma magnétosphérique, le transport ionosphérique. Des développements récents visent la modélisation globale de la magnétosphère.

- Les codes dits « **hybrides** » décrivent généralement les électrons comme un fluide, mais traitent les ions comme des particules individuelles. Leur principal avantage est de décrire des processus se produisant à des échelles plus fines que l'échelle fluide. On les utilise par exemple pour étudier les frontières de plasma créées par l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre ou avec l'exosphère de Mercure.
- Les codes **particulaires** permettent de suivre l'évolution des particules du plasma sur toutes ses échelles spatio-temporelles caractéristiques.
- Les codes **dits de « Vlasov »** permettent d'aborder les questions de nature cinétique dans les plasmas sans collision qui nécessitent de connaître le détail des fonctions de distribution des particules, comme par exemple les processus d'accélération du vent solaire ou du plasma auroral, et les processus d'interactions ondes – particules.

La communauté PNST développe par ailleurs des codes de transfert radiatif (en particulier transfert polarisé) et d'inversion de raies optiques hors ETL, qui sont essentiels pour exploiter les données de THEMIS et préparer le projet européen EST.

Interfaces avec les autres programmes nationaux et interdisciplinarité

Des interfaces existent depuis la création du PNST avec le PNP et le PNPS (un conseiller commun dans les deux conseils) et continueront à se développer. Dans l'avenir, il semble intéressant de développer une interface avec le PCHE en ce qui concerne les éruptions solaires en X et gamma (prototypes d'éruptions stellaires) et l'accélération de particules énergétiques.

Interface avec le PNP :

➢ **Etude des plasmas et magnétosphères planétaires.** De manière très complémentaire avec l'étude des processus physiques dans la magnétosphère terrestre, une partie de la communauté s'est orientée vers l'étude comparée des plasmas dans les environnements ionisés des planètes du Système solaire et a participé aux missions de la NASA GALILEO vers Jupiter, CASSINI vers Saturne. L'engagement de la communauté des plasmas spatiaux se révèle important pour la mission BepiColombo (2014) et se poursuivra avec le projet EJSM vers Jupiter, présenté dans le cadre du programme COSMIC VISION de l'ESA (voir le paragraphe « Evolution des thématiques »).

Interface avec le PNPS :

➢ **Magnétisme et activité des étoiles de type solaire.** Le résultat marquant de ces 4 dernières années concerne l'étude comparative du magnétisme solaire et stellaire par les mesures directes de champs magnétiques obtenues grâce aux spectropolarimètres ESPaDOnS au CFHT et NARVAL au TBL. Ces résultats stimulent fortement le développement des simulations numériques de la dynamo des étoiles de type solaire. Dans les prochaines années, on s'attend à ce que la sismologie solaire et stellaire (PICARD, SDO, CoRoT, Kepler) apporte de nouvelles contraintes sur la dynamo à l'intérieur des étoiles de type solaire.

➢ **Les Relations Soleil –Terre et la météo de l'espace** fournissent des sujets interdisciplinaires, comme l'effet de l'irradiance solaire et sa variabilité sur le forçage climatique ou comme les couplages verticaux dans l'atmosphère ionisée et neutre de la Terre. Ces thématiques sont basées sur l'exploitation des projets existants au sol EISCAT, SuperDARN et dans l'espace DEMETER (CNES), PROBA 2 (ESA), PICARD et TARANIS (micro-satellites du CNES) et impliquent les bases de données (CDPP, MEDOC, BASS 2000). Notons enfin que les besoins en produits opérationnels pour la météorologie de l'espace a favorisé le développement d'outils d'analyse basés sur l'imagerie, le traitement du signal et l'intelligence artificielle.

Forces et faiblesses.

Forces

Parmi les points forts, on peut relever :

Une bonne coordination de la communauté
avec une très forte participation aux deux colloques nationaux organisés au cours du dernier mandat du PNST ;

Sa reconnaissance au niveau international
qui implique de nombreuses collaborations scientifiques et sollicitations dans le montage et la réalisation de très grands projets internationaux se traduisant par un excellent retour en terme de publications :

➢ **Dans le domaine de l'instrumentation spatiale**, la communauté française a une expertise reconnue dans la réalisation de détecteurs à particules, capteurs électriques, magnétiques et radio, spectroscopie et imagerie en UV et EUV, coronographie. Cette expertise se traduit par un nombre important de laboratoires français impliqués en tant que PI, Lead Co-I ou Co-I sur les grands projets opérationnels de l'ESA (SOHO, CLUSTER : plusieurs PI) ou en collaboration bilatérale (STEREO, THEMIS, MMS). Dans l'avenir, on note également une forte implication dans les missions futures de l'ESA, dont BepiColombo (plusieurs PI / Lead Co-I), et dans les propositions à COSMIC VISION dont : SOLAR ORBITER, EJSM, CROSS-SCALE, PHOIBOS, ... Notons enfin que la communauté spatiale du PNST a participé activement à la définition puis la réalisation des instruments pour les projets de micro - satellites du CNES (DEMETER

opérationnel, PICARD prévu pour mars 2010, TARANIS en attente de décision, SMESE arrêté lors du séminaire de prospective du CNES).

- **Dans le domaine de l'instrumentation au sol**, l'expertise de la communauté française se situe dans les domaines (i) de la spectro-polarimétrie optique et proche IR, avec les performances reconnues du télescope THEMIS et l'implication française dans la Design Study de EST, (ii) de l'interférométrie radio solaire (collaborations et/ou formation des équipes qui construisent les futurs radiohéliographes) (iii) de la coronographie, qui tend à s'orienter vers le spatial et (iv) des radars ionosphériques dont l'expertise française est sollicitée.
- **Dans le domaine de la théorie et des simulations numériques**, l'expertise de la communauté française s'est beaucoup développée (codes MHD, particulaires, turbulence, …) et fonde sa prospective sur la modélisation directe d'événements observés par les instruments.
- **des bases de données bien structurées** (CDPP, BASS2000, MEDOC), coordonnées entre elles et en évolution vers un observatoire virtuel héliosphérique ;

L'ouverture vers d'autres thématiques :

les plasmas planétaires, les interactions des plasmas avec les atmosphères neutres et les surfaces, et aussi les plasmas de laboratoire et de fusion.

Faiblesses

La communauté du PNST est affectée par :

- par **de très nombreux départs en retraite**. Dans tous les domaines, des chercheurs plus jeunes ont pris la relève, mais l'effectif de la communauté devient parfois critique pour mener à bien la conduite des projets et, dans le même temps offrir une exploitation scientifique optimale. Un indicateur de ce problème est l'implication de chercheurs de plus en plus jeunes dans la conduite de projets, ce qui nuit à leur développement scientifique personnel et à celui de leur laboratoire ;
- par **les fluctuations programmatiques** actuelles tant à l'ESA qu'au CNES. Les projets spatiaux mobilisent une organisation et des forces de travail importantes au niveau des laboratoires. Le retard, le gel (TARANIS), voire l'abandon soudain (SMESE) ou les remises en cause démobilisent et désorganisent les équipes, et obligent à une réorientation et restructuration parfois soudaine ;
- **le manque de personnel ITA permanent**, ponctuellement remplacé par des CDD, mais dont l'expérience et le savoir faire acquis sont perdus pour le laboratoire à leur départ ;
- **le manque de doctorants** en provenance les écoles doctorales d'Astronomie –Astrophysique.

Evolution des moyens et nouveaux moyens à 5 – 10 ans

P. Astier, J.L. Beuzit (groupe « R&D et moyens du futur »), J.G. Cuby, P. Drossart, Th. Encrenaz, Th. Forveille, M. Giard (coordinateur), S. Guilloteau, R. Ibata, G. Lagache (groupe « synergies sol espace »), A.M. Lagrange, F. Paletou, G. Perrin, J.L. Puget, Ph. Stee, L. Vigroux, Ph. Zarka.

Mandat du groupe :

- Compte tenu des grands enjeux scientifiques de la prospective thématique (groupe « Etat et évolution des thématiques / Place de la France ») identifier les évolutions majeures des moyens existants et les nouveaux projets en astronomie et astrophysique (AA) dans lesquels la France pourrait s'engager dans les 5-10 prochaines années.
- Instruire, évaluer et présélectionner les dossiers pour présentation et discussion au colloque de prospective en octobre 2009.
- Synthétiser les conclusions et les priorités pour la rédaction des actes du colloque de prospective.

La prospective nationale du domaine spatial ayant été réalisée dans le cadre du séminaire CNES de Biarritz (mars 2009) (interface spécifique par l'intermédiaire du groupe «*Prospective Spatiale : Synergies et comparaison sol-/espace*»), le groupe a travaillé sur la prospective des moyens AA sol.

Méthode de travail :

Le groupe a travaillé à partir :

1. des réponses au questionnaire qu'il avait envoyé aux responsables de projet ou d'infrastructure (on utilisera de terme « moyens » dans la suite du texte) (cf http://paa09.cesr.fr/pub/Main/InfosPubliquesG2/Questionnaire_Moyenss_v3.doc),
2. des priorités exprimées par les programmes et les actions spécifiques (cf http://paa09.cesr.fr/bin/view/Main/InfosPubliquesG2#Priorit_s_des_Programmes_et_Acti).

Chaque moyen a été instruit et évalué par une équipe restreinte sur la base d'une fiche d'évaluation commune. L'évaluation a porté d'une part sur la « performance » et d'autre part sur la « faisabilité » du projet.

Les critères pris en compte pour apprécier la « performance » sont l'apport scientifique, l'unicité dans le contexte international, le poids national dans le projet, la taille de la communauté intéressée (prise en compte des avis demandés aux programmes et actions spécifiques), et le bénéfice technique pour les laboratoires et/ou l'industrie.

En ce qui concerne la « faisabilité » nous l'avons évaluée selon trois plans : faisabilité technique, organisation du projet, faisabilité financière. L'ensemble des dossiers ont été présentés et discutés lors d'une réunion plénière du groupe au mois de juin, puis lors d'une réunion de la commission spécialisée astronomie et astrophysique de l'INSU (CSAA) au mois de septembre 2009.

Finalement les analyses et recommandations du groupe de travail ont été présentées et discutées lors du colloque de prospective de 'La Londe les Maures' du 19 au 22 octobre 2009. Ce document a été corrigé en fonction des recommandations issues des groupes de discussion du colloque, en particulier pour ce qui concerne l'évolution des moyens nationaux sur le territoire Français.

Remarques préliminaires :

L'ensemble des différents moyens instruits est très hétérogène puisqu'il incluait, au départ, aussi bien les projets d'équipe que des infrastructures nationales et internationales, ou bien simplement des participations à des niveaux très variés dans des projets ou infrastructures multilatérales. Nous avons finalement décidé de ne pas traiter des projets d'équipe qui sont laissés à la seule prospective thématique (groupe *« Etat et évolution des thématiques / Place de la France »*) pour nous concentrer sur les infrastructures communes (y compris les projets pour la station antarctique du Dôme C, ainsi que les instruments ouverts à la communauté.

L'astronomie a toujours consacré une très grande part de ses moyens à la mise en œuvre de grands instruments mutualisés dans des observatoires nationaux ou internationaux. La course à la sensibilité et à la résolution angulaire, ainsi que l'ouverture vers les messagers autres que la lumière (ondes gravitationnelles, neutrinos et rayons cosmiques), nécessitent de très grands instruments qui ne sont plus à la portée d'une seule nation. Ceux ci sont maintenant développés dans le cadre de sociétés ou d'organisations internationales (ESO, CFHT, IRAM, etc.). Nos moyens nationaux historiques et leurs sites d'implantation (Nançay, OHP et Pic du Midi) ont donc amorcé une profonde mutation lors de la précédente prospective. Celle-ci doit se poursuivre pour aboutir à un pilotage par les OSU responsables en partenariat avec l'INSU. L'objectif fixé lors du présent exercice de prospective est que ce nouveau pilotage soit opérationnel dès 2012. En revanche, le réseau temps-fréquence et le CDS sont des services qui justifient pleinement de porter le label de « moyen national » de l'INSU. Le premier, avec la prise en compte des aspects de construction du repère géodésique (VLBI et géodésie spatiale), a vocation à évoluer vers un service du référentiel espace-temps. La réflexion sur l'évolution des services d'observation pourrait faire apparaître d'autres infrastructures de ce type sur le territoire national.

Pour la décennie qui commence, la construction de l'E-ELT, télescope de 42 mètres de diamètre, est la toute première priorité qui a émergé de cet exercice de prospective en terme d'investissement lourds. Après plusieurs années de pré-études menées par l'ESO, c'est maintenant une perspective crédible qui doit être réalisée sans retard dans le contexte mondial très compétitif de la découverte des exoplanètes et de l'exploration de l'univers primordial.

Dans cette perspective, le CFHT devient un « petit » télescope qui bénéficie d'un site astronomique exceptionnel et qui doit se spécialiser pour exploiter quelques niches scientifiques bien ciblées : 1/ la spectro-polarimétrie stellaire et la détection d'exoplanètes avec l'instrument SPIRou, 2/ l'accompagnement de la mission spatiale GAIA avec le spectromètre GYES, et/ou 3/ les grands relevés photométriques, en bande u avec MEGACAM, ou en très grand champ moyennant une rénovation importante du télescope avec la construction de l'instrument 'IMAKA.

Evolution des moyens

Notre communauté a toujours été à l'avant garde de l'interférométrie visible et millimétrique. Avec la mise en service d'ALMA, observatoire submillimétrique mondial, l'extension de l'interféromètre millimétrique du plateau de Bure à l'IRAM est une priorité forte. Il deviendra ainsi un outil privilégié et complémentaire en longueur d'onde d'ALMA, avec des performances ouvrant la voie à l'exploration quantitative de la transformation en étoiles des grandes masses de gaz primordiales. Au VLTI, la communauté soutient fortement l'extension de 4 à 6 télescopes et la construction de VSI, instrument pour l'interférométrie infrarouge qui permettra de profiter pleinement des capacités d'imagerie du VLTI.

Il faut aussi garder la possibilité de s'associer de façon opportune à l'un des projets majeurs de l'astronomie américaine, au premier rang desquels figure le LSST, grand télescope destiné à effectuer des relevés du ciel profond au rythme de deux fois par semaines pendant dix ans. BigBOSS, projet de grand relevé spectral, et CCAT, télescope submillimétrique de 25 mètres, sont deux autres opportunités sérieuses qui pourraient s'ouvrir en fonction des priorités américaines et de nos possibilités financières.
Dans le domaine des astroparticules et de l'astronomie des nouveaux messagers, le grand observatoire des photons cosmiques de haute énergie CTA, est l'investissement lourd soutenu par notre communauté, derrière l'E-ELT, pour un engagement dans les 5 ans.
Enfin, il faut garder la capacité de préparer le long terme, avec des soutiens dédiés à la préparation du futur grand observatoire radio kilométrique SKA et du télescope solaire européen EST.

Les moyens lourds existants : état et évolution

Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

Nançay

La station de radioastronomie de Nançay est établie sur une propriété foncière de l'ENS et est opérée sous la responsabilité principale de l'Observatoire de Paris en association avec le CNRS (USR B704). Ce site vit actuellement une mutation importante avec d'une part son intégration récente dans l'OSU en région Centre (2007), et d'autre part l'installation de la station LOFAR.

Largement soutenu par la région Centre, le site accueille de nombreuses activités d'observation, de surveillance et de développement dans le domaine de la radioastronomie : le RadioTélescope centimétrique (RTN) qui est un moyen national, le RadioHéliographe (RH) pour l'étude du Soleil, le Réseau Décamétrique (émissions variables), l'Axe de Micro-électronique Appliquée en Région Centre (AMARC), ainsi que des outils et services de surveillance des ondes électromagnétiques (antenne très basse fréquence, antenne de surveillance de l'environnement radioélectrique).

L'ensemble des activités sur le site de Nançay concerne 41 personnes (CNRS et MEN). Le budget consolidé (personnels, soutiens de base et opérations scientifiques) du site est estimé à un peu moins de 3 M€.

➢ Recommandation pour le site de Nançay

Le site de Nançay doit continuer la modernisation de ses activités comme il l'a fait par le passé avec la mise en place de l'axe de micro-électronique et l'accueil de l'expérience LOFAR. Pour le long terme une implication dans la préparation de SKA doit être recherchée.

Les moyens mis en place à Nançay, essentiellement en personnel, sont comparables à ce que la France engage au CFHT. En dehors de LOFAR qui requiert un soutien opérationnel limité, il ne s'agit toutefois plus comme par le passé d'activités au service d'une large communauté qui justifient le label « instrument national » de l'INSU. Tous les instruments de Nançay, y compris le RTN, doivent donc envisager leur fonctionnement dans le cadre de projets scientifiques (ou projets de formation) portés principalement par l'OSU Centre et l'Observatoire de Paris.

Le RadioTélescope centimétrique (RTN)

Le radiotélescope de Nançay est un moyen construit dans les années 1960, qui a bénéficié d'une jouvence importante (projet FORT) dans la seconde moitié des années 1990. Le radiotélescope couvre la bande décimétrique (1 a 3,5 GHz), dans laquelle il reste a ce jour la troisième surface collectrice pour une antenne unique (équivalent à un diamètre de 95 m), et il peut observer une source donnée pendant 1h par jour. Les utilisateurs se recrutent au PNCG (observations de galaxies dans la raie à 21 cm de l'hydrogène), au PCHE (observations de pulsars, notamment en soutien d'observations en rayons gamma), et au PNP (mesure du dégazage des comètes par l'émission OH à 18 cm). Dans chacun des cas le public concerné est un petit sous-ensemble du programme national, et la pression moyenne sur le temps d'observation est un peu inférieure à 2. La moitié des utilisateurs sont des étrangers.

➢ Fonctionnement et production scientifique

Le coût de fonctionnement du radiotélescope est dominé par les salaires de personnels titulaires (110 k€/an et 17 etp, non compris le support logistique de la station de Nançay). Sur les dix dernières années le radiotélescope a produit environ 10 publications par an, qui se divisent à parts à peu près égales entre les articles entièrement basés sur des mesures du radiotélescope, et ceux où ces mesures ont un rôle de complément ou de soutien à des observations obtenues ailleurs. Cette dernière catégorie a, en moyenne, un taux de citation significativement plus élevé.
Il paraît raisonnable de continuer à faire fonctionner le télescope dont le rôle d'accompagnement est bien soutenu par les programmes nationaux correspondants tant que ces personnels sont disponibles. Il est toutefois recommandé de continuer l'effort d'automatisation et de réduction du personnel nécessaire au fonctionnement.

➢ Evolutions

Les évolutions envisagées a moyen terme sont, 1) une jouvence

des analyseurs pulsars sur la période 2012-2015 (160 k€ et 6,5 etp), 2) l'implication dans le réseau européen de VLBI (EVN) en utilisant la liaison internet rapide financée pour LOFAR, et 3) le développement de mosaïques de détecteurs focaux (financement ANR de 791 k€ à obtenir).

Parmi ces évolutions, la première est bien motivée (à la fois par la recherche d'onde gravitationnelles et par l'accompagnement des missions hautes énergies), et techniquement bien définie.

La contribution du radiotélescope de Nançay à l'EVN sera limitée par la restriction intrinsèque de son suivi en angle horaire à ±30mn du méridien, mais mérite probablement d'être soutenue si les coûts restent modestes.

Le développement de mosaïques de récepteurs est actuellement un projet de R&D, qui s'appuie sur des développements liés à LOFAR/SKA. Avant tout passage à un stade ultérieur, il est indispensable de développer un projet scientifique détaillé (la mesure à 21 cm des oscillations baryoniques est, par exemple, un créneau qui pourrait être exploré), de préciser à partir de quelle taille de mosaïque le système est susceptible de représenter un gain de sensibilité significatif, et d'évaluer les coûts.

Le statut de moyen national du RTN ne se justifie plus car il sert, de fait, une communauté scientifique réduite. La gestion du RTN doit donc évoluer vers un pilotage scientifique principal par l'OP et l'OSUC. Le transfert de compétence doit être négocié entre l'INSU, l'OSUC et l'OP pour devenir effectif au plus tard en 2012.

Le RadioHéliographe (RH)

Le RH est un ensemble de 47 antennes de 2 à 10 m, déployées suivant deux bras EO et NS de 3 200 m et 2 400 m. Il est dédié à l'étude de l'activité coronale solaire dans les bandes dm-m (150 à 450 MHz). Il a la particularité, par rapport aux autres radiohéliographes aussi bien en opérations qu'en projet ou en construction (USA avec FASR, CSRH Chine 2011+) de travailler à des fréquences plus basses. Le projet MWA (Australie-USA 2011+) donnera accès à des fréquences plus basses (80 à 300 MHz) tout comme LOFAR.

➢ Fonctionnement et production scientifique

En plus du support logistique de la station de Nançay, le RH fonctionne actuellement avec une ressource annuelle d'environ 25 k€ (Observatoire de Paris et CNRS-PNST) et 6 etp. La production scientifique pour la communauté française est d'une dizaine de publications référées par an.

Les fréquences accessibles au RH permettent une contribution originale à la physique coronale, par l'observation des électrons accélérés lors des éruptions solaires ou dans des perturbations à plus grande échelle, comme les CMEs (éjections de masse coronale), pouvant affecter le milieu interplanétaire. La diffusion des données, publiques, se fait par BASS 2000 ; elles procurent un soutien bien reconnu au niveau international aux missions spatiales (SOHO, STEREO, RHESSI et CORONAS pour les missions en cours).

➢ Evolutions

Deux actions de jouvence sont proposées par l'équipe du RH et soutenues par le PNST. La première consisterait pour un faible cout (25 k€ + main d'œuvre en interne) à fiabiliser les opérations actuelles par une réfection du corrélateur. La deuxième opération, plus ambitieuse, (300 k€ et 1 etp) consisterait à ajouter une fréquence, plus élevée (à 610 MHz), afin de mieux « encadrer » l'observation des zones d'accélération des particules lors des éruptions.

Ce projet de jouvence peu couteux et techniquement faisable apporterait de nouvelles potentialités scientifiques au RH. Il intéresse toutefois une communauté limitée et il devra trouver sa place dans le contexte de la mise en service attendue pour 2011 du nouveau radiohéliographe chinois.

Projet FASR

A l'origine FASR était un projet américain ambitieux de radiohéliographe très large bande (50 MHz à 30 GHz) ayant la possibilité de faire des images de l'atmosphère solaire depuis la chromosphère (altitude de quelques milliers de kilomètres) jusqu'à la haute couronne (altitude de 1 rayon solaire). Sa mise en service était prévue pour 2011 et un accompagnement de la préparation de FASR en vue d'une possible participation au projet avait déjà été discuté à la prospective de La Colle sur Loup (2003).

Aujourd'hui le projet américain n'a toujours pas démarré et a même été sérieusement retouché. Il n'est plus question que d'un démonstrateur aux capacités fortement limitées par rapport au projet initial. Il travaillerait avec 16 + 16 antennes dans des bandes cm et dm. Il pourrait être en opérations vers 2013, et sa suite est qualifiée d'incertaine par la communauté radio solaire.

Au vu des incertitudes programmatiques sur FASR, le groupe de travail ne recommande pas une implication de notre communauté dans la préparation de ce projet. Nous recommandons plutôt à la communauté concernée de donner la priorité au maintien et à l'amélioration des opérations du RH, aux synergies avec le projet LOFAR (co-observations multi-fréquence, étalonnage de LOFAR à 151 MHz) ainsi qu'à renforcer son implication dans les programmes clef solaires de LOFAR.

Projet LOFAR

LOFAR est un des précurseurs de SKA dédié aux bandes décamétrique et métrique (10-250 MHz). Il s'agit d'un interféromètre, qui utilise des antennes à bas coût et dont les signaux sont recombinés de manière numérique. Les domaines d'application sont nombreux et vont de la cosmologie à la physique solaire, en passant par les planètes et les exoplanètes (programme clef à PI-ship français), avec la possibilité d'ouvrir des champs d'investigation complètement nouveaux comme celui par exemple de la réionisation cosmologique. Le projet est piloté par les Pays-Bas, où est localisé le cœur de l'interféromètre et qui fabriquent l'ensemble du matériel et du logiciel. Un certain nombre de pays européens, dont la France, ont acheté aux Pays-Bas une à quelques stations, et par la même un ticket d'entrée dans le projet. Ces stations européennes sont localisées dans les pays correspondants (la station française est à Nançay), et allongent

donc considérablement les lignes de bases disponibles, améliorant en conséquence la résolution maximale de l'interféromètre. La contribution française est engagée (650 k€ pour l'achat d'une station LOFAR, et 1,2 M€ pour le raccordement à très haut débit du site de Nançay), et l'interféromètre est en train de démarrer (premières images à 3 stations obtenues fin Juillet 2009).

➢ Fonctionnement

La station LOFAR étant livrée « clef en mains », au-delà de la période d'installation le fonctionnement courant nécessite 82 k€/an (comprenant 70k€ de cotisation annuelle au consortium) et 0,5 etp, ainsi que la quote-part des moyens généraux à Nançay.

Nous recommandons de suivre l'évolution, l'utilisation et les résultats du projet et de vérifier qu'il avance conformément aux plans, mais sauf mauvaise surprise, il convient de le soutenir sur la durée couverte par l'exercice de prospective. Au delà de cette échéance, l'évolution dépendra des perspectives sur SKA, et des résultats déjà obtenus par la communauté française utilisatrice de LOFAR.

➢ Evolutions : LOFAR super-station

Le projet de super-station consiste à augmenter d'un ordre de grandeur la surface collectrice de la station LOFAR de Nançay, pour la seule bande basse fréquence 30-80 MHz (antennes peu couteuses). La motivation est de doubler à ces fréquences le nombre de lignes de bases longues, en ajoutant les bases Nançay-stations aux bases cœur-stations, au prix bien sûr d'une réduction du champ instantané. La super-station peut également, et toujours pour cette seule bande basse fréquence, jouer un rôle de cœur de repli (surface égale à la moitié de la surface du cœur hollandais) pour travailler avec les stations extérieures pendant que le cœur sera utilisé seul sur des applications où le couplage des stations extérieures dépasse largement les capacités du corrélateur (notamment survey rapide du ciel complet, et recherche de pulsars). La super-station ne sera par contre pas couplée à LOFAR dès que le réseau sera utilisé au dessus de 80 MHz, et ne pourra alors être utilisée que dans un mode « standalone » de (très) basse résolution angulaire.

Les études détaillées de LOFAR super-station sont financées par un projet ANR de 500 k€ et réalisées en interne à Nançay pour un total de 3,7 etp.

La phase de réalisation, à envisager à partir de 2012, nécessiterait 700 k€ et 9 etp.

Le gain en sensibilité attendu est variable suivant les modes d'utilisation de LOFAR, mais significatif (jusqu'à un maximum d'un facteur 2, pour les observations qui sont limitées strictement par le nombre de lignes de bases longues) en comparaison du coût incrémental. Il ne concerne par contre que la bande basse fréquence, dont le retour scientifique est plus incertain que pour la bande haute fréquence mais beaucoup plus varié thématiquement.

Il est trop tôt pour pouvoir évaluer l'intérêt de cette extension de LOFAR à Nançay. Il s'agit d'une option qui devra être évaluée à mi-parcours de la prospective au vu du cas scientifique présenté à ce moment-là et des études détaillées réalisées.

OHP

Le site de l'OHP est une propriété du CNRS exploitée scientifiquement dans le cadre de l'USR 2207 rattachée à l'OSU OAMP. Suite à une action volontariste de l'INSU, les activités non astronomiques menées sur le site se sont étendues de l'atmosphère (LIDARS, spectromètres et ballons sondes) à l'environnement (végétation locale, évolution de la biodiversité, etc.).

Pour ce qui concerne l'astronomie, suite aux recommandations des prospectives précédentes, seul le télescope de 193 cm a gardé le statut de station d'observation. Il excelle dans la détection et l'étude des exoplanètes avec le spectrographe SOPHIE. Le télescope de 152 cm quand à lui est utilisé dans le cadre du projet de R&D ELPOA (laser polychromatique).

Le site a de surcroît une activité importante de formation par l'accueil d'étudiants, d'ateliers et de séminaires.
L'ensemble des activités sur le site de l'OHP concerne 45 personnes (CNRS et MEN). Le budget consolidé (personnels, soutiens de base et opérations scientifiques) de l'ensemble des opérations sur le site est estimé à un peu plus de 3 M€.

➢ Recommandation pour le site de l'OHP

L'instrument SOPHIE fonctionne de manière satisfaisante, et ses mesures vélocimétriques des exoplanètes apportent une contribution significative dans un domaine très concurrentiel. La finalisation de la rénovation de la bonnette du T193 pour le spectromètre SOPHIE doit être la toute première priorité de l'OHP, qui doit impérativement mener cette opération à terme dans les meilleurs délais.

Tout comme le site de Nançay, le site de l'OHP est une infrastructure lourde. Le T193 n'a pas vocation à conserver sur le long terme le label de « moyen national » de l'INSU, toutes les activités d'astronomie menées sur le site devant être principalement portées par l'OAMP (OSU PYTHEAS à plus long terme).

T 193- SOPHIE

L'instrument SOPHIE, en service sur le télescope de 1,.93 m depuis 2006, est l'instrument principal accessible à la communauté française dans le domaine de la détection des exoplanètes par suivi de variations de vitesse radiale. Il est également un complément indispensable pour le suivi des candidats détectés par le satellite CoRoT. Des programmes liés à la détection et la caractérisation des oscillations stellaires bénéficient également des performances accrues apportées par SOPHIE.
SOPHIE représente en effet un gain significatif par rapport à l'instrument précédent, ELODIE, en termes de sensibilité (jusqu'à 3 magnitudes), de résolution spectrale et de précision sur les variations de vitesse radiale (de l'ordre de 3 à 4 m/s à ce jour). L'un des points forts de cet instrument est sa grande disponibilité, en particulier pour des programmes de suivi systématiques, utilisant plus de 90% des nuits du 1,93 m de l'OHP.

➢ Fonctionnement et production scientifique

Les ressources annuelles pour faire fonctionner le T193 et son

instrument SOPHIE sont de 118 k€ et 5,4 etp pour une production scientifique d'environ 17 publications référées en 2008. Depuis la mise en route de SOPHIE le facteur de pression est d'environ 2.

➢ Evolution en cours : nouvelle bonnette SOPHIE

La mise en place d'une nouvelle bonnette sur le télescope de 1,93 m sur la période 2009-2010 (co-financement ANR, CNRS) va permettre d'encore améliorer la précision et l'efficacité de SOPHIE. Grâce à ces améliorations, SOPHIE devrait atteindre une précision comparable à celle qu'atteint aujourd'hui le spectrographe HARPS dans l'hémisphère sud, mais avec une accessibilité nettement supérieure pour les communautés française concernées.

L'expérience ainsi acquise avec SOPHIE sera indispensable pour une implication des équipes françaises dans les projets instrumentaux futurs tels que SPIRou au CFHT, Expresso au VLT, et, à plus long terme, CODEC pour l'E-ELT.

SOPHIE sera en concurrence à partir de 2011 avec l'instrument HARPS-Nord développé par un consortium américano-suisse, mais HARPS-Nord ne bénéficiera pas d'un télescope dédié contrairement à SOPHIE, qui restera donc jusqu'à l'horizon 2015 un instrument essentiel pour la visibilité des équipes françaises.

Le statut de moyen national INSU du T193 ne sera donc plus justifié à cette date. Nous recommandons d'anticiper cette évolution et de négocier le transfert de compétences entre l'INSU et l'OSU pour qu'il soit, comme pour le RTN, effectif dès 2012.

Pic du Midi

Historiquement observatoire astronomique d'altitude, le Pic du Midi de Bigorre est devenu depuis la fin du XXème siècle une plateforme polyvalente gérée par un syndicat mixte sous la responsabilité de la Région Midi Pyrénées. Il héberge le Télescope Bernard Lyot (TBL), des instruments pour l'étude de la surface et de la couronne solaire, une antenne de radio diffusion, des locaux touristiques, ainsi que quelques coupoles confiées à des astronomes amateurs.

➢ Recommandation pour le site du Pic du Midi

Le TBL mis à part, l'OMP porte l'ensemble des opérations scientifiques d'astronomie sur le site du Pic du Midi. Comme le T 193 de l'OHP, le TBL n'a pas vocation à conserver le label de « moyen national » de l'INSU sur le long terme.

TBL

Le TBL est un télescope de 2 m de diamètre opéré par le CNRS et l'Université Paul Sabatier (OMP) dans le cadre de l'USR 5026. Conçu et exploité comme télescope multifonctionnel jusqu'aux années 1990, le TBL est devenu un télescope de petit diamètre à l'échelon international. Le TBL a donc été amené à effectuer une forte évolution, en se spécialisant au début des années 2000. Cette évolution s'appuyant sur les compétences et le rayonnement des équipes d'astronomes de l'Observatoire Midi Pyrénées, en synergie complète avec les programmes nationaux (PNPS, PNP, PCMI), a abouti en 2007 à la mise en service du spectropolarimètre Narval (fruit d'un financement FEDER, régional, local et national). Le TBL est désormais dédié aux thèmes de recherche du magnétisme stellaire, recherche sur les exoplanètes, et évolution des premières et dernières phases de la vie des étoiles.

Le TBL/Narval est un instrument spécialisé qui intéresse la communauté PNPS et dans une moindre mesure celle de PNP. Les autres communautés faisant ponctuellement des demandes sont les équipes canadiennes en synergie avec l'instrument Jumeau ESPaDOnS au CFHT et la communauté PCMI. Le TBL participe depuis sa fondation au programme européen d'accès OPTICON (renouvelé sur FP7), incluant des télescopes de la classe de 2-4 m, qui lui permet d'ouvrir jusqu'à 20% de son temps aux astronomes européens. Ce temps est très largement utilisé avec des pressions de 3-6 sur le temps OPTICON.

Sur les années 2007-2009 le TBL a bénéficié d'un plan de jouvence technique co-financé par le ministère (OMP) et le CNRS à hauteur de 200 k€ environ. Cette jouvence sera terminée en 2010 et assure le fonctionnement du télescope jusqu'en 2015.

➢ Fonctionnement et production scientifique

Les ressources de fonctionnement annuel du TBL sont de 150 k€ et 15 etp. Cette allocation permet d'assurer 240 nuits d'observations scientifiques par an. Depuis la mise en service de Narval le facteur de pression est de 2 à 3. 16 articles référés ont étés publiés en 2008.

L'instrument NARVAL est un succès et son exploitation scientifique doit être assurée jusqu'à l'horizon 2015. Pour la suite, le groupe s'inscrit dans la continuité des recommandations issues du colloque de La Colle sur Loup : donner la préférence à de nouveaux projets sur le site plutôt qu'à une remise à niveau du TBL (projets qui devront être portés par l'OMP et l'Université Paul Sabatier).

Comme pour le T193, nous recommandons que le transfert de compétences soit anticipé et négocié entre l'INSU et l'OMP pour être effectif en 2012.

Centre de Données de Strasbourg

Le CDS est un service de réputation internationale qui a maintenant plus de 30 ans d'histoire. Il fait partie des « Très Grandes Infrastructures de Recherche » labellisées par le MESR (TGIR) depuis 2008. Il propose de nombreux services très largement utilisés par la communauté internationale. Ses trois « produits phares » sont Simbad (nomenclature et bibliographie de plusieurs millions d'objets astronomiques), VizieR (catalogues et tables de données publiées) et Aladin (atlas interactif permettant de visualiser et de superposer des données provenant de catalogues et de bases de données). Aladin est aussi le portail d'entrée de l'Observatoire Virtuel (OV) Astronomique pour la visualisation des images. Le CDS héberge également des copies miroir de ressources bibliographiques importantes telles que l'ADS et le journal A&A.

Le CDS est l'un des principaux acteurs du développement de l'OV au niveau international. Il contribue largement dans la définition, indispensable pour le développement de l'OV, de standards au sein de l'IVOA. Il joue également un rôle majeur au sein de la communauté nationale par son rôle dans l'AS OV, la mise en

place de « tutoriels » et de toutes sortes d'aides à destination des opérateurs et des utilisateurs de l'OV.

➢ Fonctionnement et production scientifique

Le CDS fonctionne grâce à 28 permanents, 9 personnels en CDD, et un budget récurrent qui se montait à 430 k€ en 2008. Les sources de financement sont l'UdS, le CNRS, le CNES et le ministère pour environ 200 k€, et les contrats européen pour 230 k€ (contrat EuroVO AIDA). Il y a une inquiétude cependant quant à l'accès à ce type de financement européen pour le CDS, dans les années à venir.

De fait le CDS a un impact très important dans la communauté astronomique internationale et, au niveau national, ses services intéressent quasiment tous les programmes, avec des interactions au-delà des sciences de l'Univers (e.g., STIC). Ceci en fait une TGIR tout à fait légitime bien que d'un genre nouveau – et certainement précurseur - dans la communauté astronomique.

Les systèmes de référence espace/temps

Nous regroupons sous cet intitulé les trois moyens sol suivants :

- Le réseau temps-fréquence, moyen national regroupant les activités françaises de métrologie du temps et des fréquences des Observatoires de Paris (SYRTE), de Besançon (UTINAM) et de la Côte d'Azur (Géo-Azur).
- La télémétrie laser, qui fournit de manière régulière les contributions astro-géodésiques des données laser à la fois satellites et Lune sur l'évolution temporelle des repères de références, éphémérides des corps, et la cinématique terrestre.
- La VLBI, interférométrie à très longue base qui apparaît ici pour l'observation des radiosources lointaines, et diverses applications en astrométrie et en géodésie.

Ces moyens sont fortement interdisciplinaires (physique fondamentale, géophysique, océan-atmosphère, ST2I, etc) ; la thématique correspondante est donc discutée dans le groupe de travail "Interdisciplinarité". En terme de plateformes expérimentales, ils apparaissent également dans le groupe de travail "Astrophysique de laboratoire". Finalement, la métrologie (temps, fréquences, position) constitue un service d'observation et est donc discutée dans le groupe "SO".

➢ **Recommandation générale pour les « systèmes de référence espace/temps »**

Le domaine de recherche sur les systèmes de références espace/temps atteint un stade où des projets spatiaux approuvés voient le jour. Pour n'en citer que deux, après T2L2, PHARAO, élément central du projet spatial ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) prévu pour tester plusieurs horloges atomiques simultanément, volera en 2013, et sera installé sur la station spatiale internationale.

La composante spatiale, assez nouvelle, fourmille de projets en gestation/compétition/développement. Veiller à la place des chercheurs français dans ces projets et au bon retour scientifique des missions spatiales nécessite le développement d'une structure nationale, qui pourrait notamment servir d'interlocuteur pour le CNES. La mise en place d'une action spécifique ou programme national, en cours d'élaboration, est fortement encouragée.

Réseau Temps-Fréquence

Le réseau temps-fréquence est un des piliers de la réalisation et la maintenance des références nationales de temps et contribue au temps atomique international réalisé par le BIPM. Sa mission est d'établir les références nationales temps/fréquence, de les mettre à la disposition de tous les utilisateurs, de faciliter leur accès et leur utilisation, et, par des études, d'améliorer ces références. Le moyen national répond aux besoins de la communauté astronomique et remplit des obligations de cette communauté envers le pays, en terme de métrologie scientifique, légale, civile, etc. Le soutien dans les moyens mi-lourds de l'INSU assure la maintenance de base pour le fonctionnement et l'évolution des techniques des stations horaires. Cela couvre les horloges, les transferts de temps et le fonctionnement informatique des équipes.

Le réseau temps-fréquence correspond à un pôle d'excellence des équipes française. Le statut de moyen national doit être conservé et doit couvrir les dépenses liées à la maintenance et l'évolution du service temps-fréquence. La répartition des budgets entre moyen national et autres demandes de crédits TF demanderait à être clarifiée.

Télémétrie laser

La télémétrie laser a fait peau neuve avec la rénovation complète (entre 2005 et 2008) de la station MeO du plateau de Calern. La station a repris en 2008 les tirs lasers avec en priorité les expériences de transfert de temps par laser, la remise en route du programme laser-Lune et bien sûr, la participation au service international laser (ILRS, International Laser Ranging Service).

La télémétrie laser est un des éléments clef de la géodésie spatiale. Elle joue son rôle dans la détermination de la constante géocentrique GM qui sert de référence fondamentale et d'échelle, elle sert dans l'étude de la variation temporelle du champ de gravité terrestre, dans la détermination des coordonnées du pôle, dans l'étalonnage des altimètres radars, etc.

Le spatial a fait son entrée avec le lancement réussi du satellite Jason-2 le 20 juin 2008, avec à son bord l'instrument T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser). T2L2 permet de réaliser des transferts de temps avec une stabilité meilleure qu'une picoseconde et une exactitude sub-nanoseconde. Le Centre de mission scientifique est opéré par l'observatoire de la Côte d'Azur.

➢ Evolution : nouvelle station ultra mobile

Aujourd'hui, la principale source de difficulté de la télémétrie laser en réseau international est le manque d'une répartition géographique homogène. Pallier cette difficulté nécessite l'utilisation de stations laser ultra mobiles. La station française (plus déplaçable qu'ultra mobile) a été très utilisée (et est encore utilisée, cf tirs sur Jason-2) et on sait aujourd'hui le succès de ce système à travers les nombreuses campagnes internationales d'étalonnage des trajectoires des satellites altimétriques.

Une nouvelle station ultra mobile, automatisée et fiabilisée a besoin d'être développée. Elle est recommandée par le GRGS (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale) dans sa prospective

sur l'instrumentation en géodésie spatiale, avec un coût de 2,5M€ pour un couple de stations mobiles (prototype et son clone).

En plus du service reconnu, l'ouverture aux expériences astrophysiques de la station MeO est attendue avec grand intérêt. L'INSU doit prendre part à la discussion avec le CNES sur le développement d'une station laser ultra mobile. Enfin, il faut veiller à une bonne implication des communautés scientifiques intéressées par les produits de T2L2, principalement les communautés Temps-Fréquence et Physique Fondamentale, afin d'augmenter la richesse des résultats scientifiques de l'expérience.

L'interférométrie à très longue base (VLBI)

De part sa nature, la technique VLBI est unique par sa capacité à matérialiser le repère de référence céleste et à mesurer complètement et simultanément les 5 paramètres d'orientation de la Terre. Elle est donc cruciale pour assurer la stabilité des repères de référence terrestre et céleste et des séries de paramètres d'orientation de la Terre à long terme. L'implication française dans l'IVS (International VLBI Service for Geodesy And Astrometry) se limite aujourd'hui à l'analyse et l'archivage des données. Ne disposant pas d'une antenne VLBI (principalement à cause du coût jusqu'alors très élevé d'un tel système d'observation), la France n'est pas directement impliquée au niveau des observations.

➢ Evolution : une antenne VLBI 2010 à Tahiti

Le développement du système international VLBI2010, nouveau système d'observation VLBI, d'un coût moindre, offre l'opportunité d'équiper l'observatoire géodésique de Tahiti d'une telle antenne. Cet observatoire a une position stratégique dans un réseau d'antennes puisque unique car non couverte par aucun autre territoire dans le Pacifique sud. Le coût d'un équipement VLBI 2010 est estimé par le GRGS à 2M€ (hors coûts annuels de fonctionnement et de maintenance, et sans compter la présence d'un opérateur sur le site).

VLBI 2010 offrirait à la France la possibilité de s'équiper d'une antenne VLBI, ce qui lui permettra de participer aux observations et d'accroître sa contribution dans le contexte international. Nous recommandons que l'INSU, en partenariat avec le CNES, étudie le dossier.

Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

CFHT

Le télescope de 3,6 m du CFH est entré en service en 1979. Il est exploité par une société privée appartenant au NRC (Canada, 42,5%), au CNRS (42,5%), et à l'Université de Hawaii (15%) dans le cadre d'un accord qui met le site de Hawaii à notre disposition jusqu'en 2033. Des accords de collaboration ponctuels ont été passés avec des pays tiers pour aider au financement de l'instrument WIRCam, en échange de l'accès de leur communauté au temps d'observation : Corée (accord non renouvelé), Taïwan (2008A-2010B), et Brésil (2009B-2012A).

L'instrumentation disponible au CFHT est entrée en 2008 dans une phase de croisière avec trois instruments majeurs offerts en mode service : deux imageurs grand-champ dans le visible (MegaCam) et l'infrarouge (WIRCam), et un spectropolarimètre visible haute résolution (ESPaDOnS, semblable a NARVAL au TBL). Les anciens instruments, comme MOS, ne sont pas offerts en mode service mais ne sont pas décommissionnés, parce qu'ils présentent des options qui ne sont pas nécessairement disponibles ailleurs pour certaines des communautés servies par le CFHT.

Le CFHT est à mi-parcours de son plan de développement sur 8 ans (GAP : *Golden Age Plan*) couvrant [2005-2012], dont l'objectif principal est d'offrir aux communautés, qui ont accès au télescope, les meilleurs services de la manière la plus efficace possible de sorte que la Société du télescope soit dans une situation financière saine à la fin du plan sans compromettre l'excellente qualité de ses prestations.

➢ Fonctionnement et production scientifique

La contribution française à la société CFHT est d'environ 2,5 M€ par an. Le nombre de publications référées issues d'observations du CFHT a doublé au cours des quatre dernières années passant de 55 en 2005 à un peu plus de 100 en 2007 et 2008. Une bonne moitié, soit environ 50/an, impliquent des scientifiques français. Ce succès, qui place de CFHT en tête des télescope de sa catégorie (4 m), est en bonne partie dû à la mise en place du grand relevé CFHTLS (*CFHT Legacy Survey*) qui utilisait environ 100 nuits par an. Le CFHTLS est maintenant terminé côté CFH, avec les dernières observations faites au second semestre 2008 et les données réduites disponibles pour la communauté. En 2008 quatre nouveaux grands programmes ont été sélectionnés pour un peu moins de 100 nuits annuelles : deux sur MegaCam (NGVS : New Generation Virgo Survey ; PanDaS : Pan-Andromeda Archaeological Survey) et deux sur ESPaDOnS (MaPP : Magnetic Protostars and Planet ; MiMeS : Magnetism in MassiveStars). Néanmoins la pression sur le temps ouvert s'est érodée au cours des derniers semestres pour se rapprocher de 2. Le CFHT envisage donc de lancer un autre appel à grands programmes.

➢ **Recommandation générale pour le CFH**

Il semble clair que nous recueillons aujourd'hui au CFH les fruits des opérations de rationalisation qui ont été menées au cours des 15 dernières années : optimisation par le choix de quelques instruments et de configurations focales adaptés à une utilisation scientifique dédiée, grands programmes, plan d'automatisation des observations (GAP). On peut raisonnablement espérer que cette moisson va durer quelques années encore, par exemple jusqu'à l'horizon 2015. Au delà, la multiplication des 8-10 m et l'émergence des ELTs va reléguer les télescopes de cette catégorie au rôle joué aujourd'hui par les télescopes de 2 m. Cette échéance est proche.

Le site du CFHT, qui est à notre disposition jusqu'en 2033, est incontestablement exceptionnel par la qualité de son « seeing ». Pour continuer à l'exploiter jusque là nous devons dès aujourd'hui travailler à l'élaboration d'un plan stratégique de renouvellement et d'évolution du CFHT vers un télescope encore plus spécialisé que ce qu'il est actuellement, avec recherche de nouveaux partenaires si nécessaire.

L'instrument SPIRou (voir ci dessous) est dans l'immédiat le projet d'instrumentation le plus abouti et il pourrait constituer

l'un des éléments de cette rénovation. 'IMAKA est extrêmement attrayant, mais n'étant pas mûr devrait être soutenu pour les phases d'études préparatoires et de R&D. Il existe aussi un fort intérêt de la communauté PNCG pour utiliser le CFHT afin de réaliser des relevés massifs en bande u avec l'instrument MegaCam.

➢ **Evolutions : SPIRou, 'IMAKA, FIRST, SITELLE**

Suite à l'appel à idées lancé en 2008 pour les instruments de l'après 2012, cinq instruments ont été proposés : SPIRou (seul retenu pour une étude de phase A), 'IMAKA, SITELLE (sera financé par le Canada et accueilli au CFH), FIRST et MegaMOS. Ce dernier est un concept de spectrographe multi-objet qui se justifie surtout pour le suivi des missions spatiales GAIA et Energie Noire. Nous le discuterons plus bas dans une section dédiée (cf « Spectrographe multi-objets »).

SPIRou

Il s'agit d'un spectro-polarimètre dans le proche infrarouge développé sur le savoir-faire acquis avec la réalisation d'ESPaDOnS et NARVAL. Cryogénique, le spectrographe est aussi ultra-stable et SPIRou se propose, au-delà de l'étude des champs magnétiques dans le proche infrarouge, de détecter des exoplanètes autour d'étoiles de faible masse.

Le coût total de construction de SPIRou (non consolidé) est estimé à 3 M€ (qui serait financé sur le budget d'investissement du CFHT). Il faut ajouter le personnel qui s'impliquera dans la construction de l'instrument, c'est à dire un total d'environ 43 etp (environ 0,86 M€).

SPIRou est le plus "mûr" des projets présentés pour le CFH. Il demande néanmoins une phase d'étude et une consolidation du plan de développement. Il exploite le créneau (non exploité encore) de la spectropolarimétrie haute précision dans le proche IR. Ce créneau est très important pour plusieurs communautés (PNP, PNPS), et pour des thèmes scientifiques dans lesquels la communauté française est très bien positionnée aujourd'hui. SPIRou apparaît comme une solution solide, prometteuse pour le CFH post 2015, qui servirait très bien les intérêts de la communauté française. Nous proposons de le soutenir en toute première priorité dans la catégorie des investissements de 1 à 5 M€ (cf dernière partie du document : Synthèse).

'IMAKA

'IMAKA est un concept d'imageur visible et infrarouge proche à très grand champ (de l'ordre d'un degré de diamètre) utilisant une caméra OTCCD (Orthogonal Transfer CCD) comme celle développée pour le projet Pan-STARRS par l'Université d'Hawaii, qui permet une correction de tip-tilt local par zones sur le plan focal. `IMAKA se double d'un système d'optique adaptative de couche limite atmosphérique (GLAO), l'ensemble permettant, dans de bonnes conditions d'image, d'atteindre une qualité d'image de l'ordre de 0,2 à 0,3" sur tout le champ. `IMAKA nécessite des modifications du télescope (nouveau secondaire, peut-être adaptatif) et des optiques d'excellente qualité. 'IMAKA intéresse les communautés de PNCG et PNPS. Le projet est pour l'instant principalement porté par la communauté canadienne. Son coût total est évalué à 12 M€, mais dépendra beaucoup de l'ampleur des réfections optiques nécessaires sur le télescope de 3,6 mètres.

Le potentiel d'IMAKA est très important, en particulier pour les communautés PNCG et PNPS. Pour les objectifs scientifiques visés, il est toutefois essentiel d'atteindre une qualité d'image meilleure que 0,3" sur l'ensemble du degré carré. Le site du CFH permet à coup sûr de l'envisager, mais la faisabilité n'est pas démontrée et la traduction en terme de coûts, même approximatifs, est loin d'être faite. Le concept d"IMAKA nécessite la poursuite des études/développements R&D sur la GLAO, afin de dépasser les performances actuelles de Pan-STARRS et de ses successeurs prévus. Le groupe reconnaît l'intérêt d'un tel instrument pour le CFH, susceptible, si les performances attendues sont effectivement atteintes, de fournir, dans la lignée de MEGACAM et WIRCAM, des résultats de premier ordre.

Le groupe de travail a retenu 'IMAKA pour un affichage prioritaire dans le cadre des programmes préparatoires aux futurs TGEs (cf dernière partie du document : Synthèse).

FIRST

Il s'agit d'un imageur à haute résolution spectrale et haute dynamique pour la détection d'exopanètes et l'imagerie d'objets compacts. Plus qu'un projet d'instrument CFH, le document présenté au groupe de prospective décrit une « roadmap », qui passe par un stade de R&D et prototypage (en cours), l'installation sur des télescopes de classe 3-4m, puis sur de plus grands télescopes (10m, ELTs).

Le groupe « moyens » reconnaît l'intérêt potentiel de FIRST pour le CFH, mais dans l'état actuel (R&D) il serait évidemment prématuré de le recommander comme instrument pour le CFHT. Ce projet doit être expertisé par le groupe de prospective « R&D et moyens du futur ».

SITELLE

SITELLE (« Spectromètre Imageur à Transformée de Fourier pour l'Etude en Long et en Large de raies d'Emission ») est un FTS grand-champ (15') basé sur un instrument opérationnel au Mont Mégantic, SpIOMM. Il intéresse la communauté PCMI.

Non évalué par le groupe de travail car il s'agit d'un instrument canadien de type « invité » à faible participation française.

THEMIS

THEMIS, fondé par le CNRS et exploité avec le CNR (Italie), est un télescope installé aux Canaries spécialisé dans les observations spectropolarimétriques à haute résolution angulaire de la surface

du Soleil. Il permet d'étudier le magnétisme (et l'activité) solaire. Mis en service en 1999, son développement a été plus long que prévu, et n'a pas permis d'atteindre la totalité des objectifs fixés au départ, avec notamment l'optique adaptative qui a été réduite à un « tip-tilt ».

Depuis la prospective de La Colle sur Loup (2003) qui avait recommandé un audit en urgence, les agences ont considérablement revu leur soutien à ce télescope. L'Italie a annoncé son retrait du consortium pour 2009, et au CNRS, le financement de THEMIS est sorti de la ligne TGE en 2008. Le CNRS a demandé à l'IAC de reprendre la propriété complète de THEMIS, posant cette condition comme préalable à toute discussion concernant l'exploitation future de THEMIS.

➢ **Fonctionnement et production scientifique**

La contribution consolidée du CNRS au télescope THEMIS est d'environ 800 k€ par an. THEMIS alimente en moyenne ~8 publications à referee par an depuis 1999, à majorité française. Il est à noter que la production espagnole (IAC) est faible malgré une utilisation d'environ 20% du temps d'observation. THEMIS est également utilisé depuis 2005 par la communauté de planétologie pour des observations diurnes de Mercure, Vénus, et de comètes proches du périhélie.

➢ **Evolutions**

Il s'agit essentiellement de la fin de la réalisation, sur personnels internes, de 3 projets instrumentaux : le système d'Optique Adaptative (au lieu du Tip-Tilt actuel), un spectro-imageur de conception nouvelle TUNIS (à grand champ et bande étroite accordable, fondé sur la spectroscopie soustractive utilisée par le DPSM), et l'installation du spectropolarimètre ZIMPOL (instrument à modulation rapide développé par l'ETH de Zurich). Un budget d'investissement d'environ 200 k€ est demandé pour mener à bien ces trois opérations.

Même si c'est avec plusieurs années de retard sur le calendrier initial, le télescope THEMIS est aujourd'hui capable de produire des résultats de tout premier plan concernant le magnétisme à la surface du Soleil. Moyennant un surcoût modeste, la finalisation des projets en cours devrait conforter la position de THEMIS comme leader du domaine. THEMIS n'a pas de réel concurrent accessible et performant (VTT, tour suédoise, NSO/DST – instruments vieillissants, Gregor reporté d'année en année), jusqu'à l'ATST et les autres télescopes solaires de nouvelle génération comme l'EST.

Avec le retrait de l'Italie du consortium, et les conditions posées par la direction du CNRS, la poursuite de l'exploitation de THEMIS passe par une refondation du consortium.

L'avenir de l'astronomie solaire française se joue aujourd'hui dans la préparation du télescope européen de 4 m (EST, voir plus bas EST). L'expérience et les savoir faire acquis sur THEMIS doivent être mise à profit pour élaborer notre participation au consortium EST.

IRAM

Fondé en 1979, l'Institut de Radioastronomie Millimétrique est une société internationale soutenue par le CNRS (45%), le MPG (45%, Allemagne) et l'IGN (10%, Espagne). Il développe et fait fonctionner deux observatoires millimétriques : le télescope de 30 m au sommet de Pico Veleta en Espagne, et l'interféromètre du Plateau de Bure en France qui comprend 6 antennes de 15 mètres. L'un comme l'autre sont chacun dans sa catégorie le plus grand instrument à l'échelle mondiale. L'instrumentation focale permet des études à très haute résolution spectrale dans les fenêtres atmosphériques à 3, 2, 1 et 0,8 mm, avec une résolution angulaire de l'ordre de 10 à 15 secondes d'arc pour le télescope de 30 m, et de la seconde d'arc pour l'interféromètre de Bure. Le télescope de 30 m permet aussi de faire de l'imagerie large bande multi pixels avec la même résolution. Instruments généralistes, les télescopes de l'IRAM intéressent une vaste communauté : PCMI, PNCG, PNPS et PNP.

Grâce à une politique volontariste, l'IRAM a développé une instrumentation et une expertise mondialement reconnues dans le domaine de la détection hétérodyne. Pour preuve, les contrats que l'ESO a signé avec l'IRAM pour la préparation, et maintenant la construction des têtes de détection de la bande n°7 de l'interféromètre ALMA.

La période couverte par le précédent exercice de prospective a vu l'IRAM confronté au problème de la reconstruction de l'accès au Plateau de Bure suite à la destruction du téléphérique lors de l'accident de 1999. Le projet a rencontré de nombreux obstacles techniques, budgétaires et politiques qui ont finalement été surmontés avec succès et la mise en service du nouveau téléphérique est prévue pour 2010. Dans le même temps le MPG, le CNRS et l'IGN reconduisaient l'accord qui les lie pour une période allant jusqu'au 31 décembre 2014.

➢ **Fonctionnement et production scientifique**

Le fonctionnement de l'IRAM, ainsi que les investissements planifiés à 5 ans pour le télescope de 30 m (cf ci-dessous), nécessitent un budget dont la contribution française se monte à un peu plus de 5 M€ par an.

Les publications référées issues des observations de l'IRAM sortent à un rythme d'environ 150 par an, à peu près équitablement réparties entre la production du T30m et celle de l'interféromètre. En 2007 la communauté française représentait 28% des premiers auteurs, 21% pour l'Allemagne, 14% pour l'Espagne, 27% pour les pays extérieurs et 10% pour le personnel IRAM.

➢ **Recommandation sur l'IRAM**

Le groupe de travail considère que l'IRAM met à notre disposition des moyens d'observation absolument uniques qui n'ont pas d'équivalent dans le monde et qui permettent à notre communauté de s'illustrer dans un domaine spécifique : celui de l'Univers froid, la complexité moléculaire et les galaxies infrarouge à très grands z. Il faudra maintenir et renforcer cette spécificité en astronomie millimétrique même lorsque ALMA, qui est spécialisé en submillimétrique, sera entré en service. Un interféromètre millimétrique qui aura été adapté afin de rester le meilleur au monde pour répondre aux besoins scientifiques complémentaire de ceux d'ALMA doit rester une toute première priorité de la communauté française.

Evolution des moyens

De façon générale, l'IRAM doit continuer et accélérer les développements qui permettent un archivage et une mise à disposition systématique du plus grand nombre d'observations possible.

➢ **Evolutions**

Télescope de 30 m

Les instrument actuels disponibles au télescope de 30 m sont : EMIR (A) un récepteur polarisé double bande 76-365 GHz pour la spectroscopie à haute sensibilité et la recherche de raies moléculaires, HERA un récepteur multi-beam 2x9 pixels pour la cartographie rapide des raies dans la bande à 1,5 mm , et MAMBO une matrice de bolomètres de 117 éléments à 1,2 mm.

Le télescope de 30 m est engagé dans un plan d'investissement à 5 ans (2009-2014) dont l'objectif est une rénovation et une montée en puissance de ses capacités d'observation/

- upgrade de EMIR (B) pour qu'il soit capable d'observer dans 4 bandes simultanément (au lieu de 2) et sur une largeur de 8 GHz ;
- reconstruction du backend corrélateur en technologie FFT pour qu'il puisse analyser l'ensemble de la bande et des récepteurs disponibles ;
- - construction d'une matrice hétérodyne 5x5 (double polarisation) à 3 mm ;
- remplacement de HERA (récepteur 1,5 mm) par SHERA (7x7 double polarisation) ;
- remplacement de MAMBO par un récepteur à matrice de détecteurs de nouvelle génération de grande dimension couvrant deux bandes de fréquence.

Tous ces investissements seront financés en totalité sur le budget IRAM courant, à raison d'environ 1 M€ par an, à l'exception de l'instrument bolométrique dont il est prévu qu'il sera en grande partie financé par retour de temps garanti au partenaire scientifique qui l'aura construit.

En ce qui concerne le plan d'investissement à 5 ans sur le télescope de 30m, le groupe de travail considère que l'IRAM, comme par le passé, excelle dans le développement de systèmes hétérodynes, mais n'est pas assez ambitieux en ce qui concerne le développement de l'instrumentation pour la détection bolométrique. La communauté PNCG est particulièrement demandeuse de ce type d'outil pour l'exploration de l'Univers lointain. L'expérience passée de développement par instrument visiteur n'est pas complètement satisfaisante et ne devrait pas être reproduite en l'état. Nous recommandons donc la mise en chantier d'une caméra bolométrique de nouvelle génération. Cette caméra devrait être réalisée sous la responsabilité de l'IRAM, mais avec un fort engagement de groupes extérieurs ayant déjà l'expérience de ce type d'instruments. Le schéma de management devrait s'inspirer de celui mis en œuvre pour les instruments du VLT et du VLTI.

Plateau de Bure : projet NOEMA

Le projet NOEMA (Northern Extended Millimeter Array) consiste à 1) augmenter le nombre d'antennes du Plateau de Bure jusqu'à 12 (double du nombre actuel), 2) allonger la ligne de base est-ouest de 0,8 à 1,6 km et rajouter une station au sud du site, et 3) étendre la bande d'analyse de 8 à 32 GHz, ce qui augmentera considérablement l'efficacité et la sensibilité et rendra l'interféromètre très compétitif pour la détection et l'imagerie des objets très lointains.

Le coût total de cet investissement est d'environ 43 M€ (2010-2015). Le coût supplémentaire pour la France (en sus du budget IRAM courant actuel) est estimé à 10 M€, le reste du surcout étant financé par les partenaires habituels avec une montée en puissance de l'Espagne, ainsi que des partenaires « silencieux » et si possible par de nouveaux mécénats.

Les bénéfices de cet investissement pour la communauté IRAM seraient les suivants :

- maintien du leadership mondial de l'IRAM dans le domaine millimétrique : à l'heure ou ALMA sera opérationnel mais surtout utilisé dans les fenêtres submillimétriques pour lesquelles il a été optimisé (au mieux une semaine par an de temps millimétrique pour toute la communauté IRAM), mettre à la disposition de notre communauté un interféromètre millimétrique à quasi plein temps. C'est pour la communauté PNCG le domaine de longueur d'onde privilégié pour l'étude des premiers objets ;
- qualité d'image améliorée : une meilleure résolution angulaire de l'interféromètre (0,2 seconde d'arc), et surtout une meilleure qualité du « faisceau synthétique » ;
- meilleure efficacité d'observation : augmenter l'efficacité d'observation de l'interféromètre d'environ un facteur 2 par la diminution du nombre de configurations des antennes (les déplacements d'antennes se font par beau temps et donc réduisent d'autant le temps disponible pour les observations).

En ce qui concerne le développement de l'interféromètre du Plateau de Bure pour la période où ALMA sera entré en service, le groupe adhère à l'objectif proposé par l'IRAM d'un grand interféromètre millimétrique pour notre communauté. Cette évolution peut se faire dans deux directions : 1) augmenter le nombre d'antennes et la bande de fréquence couverte instantanément (c'est-à-dire réaliser le projet NOEMA) et 2) équiper chaque antenne d'un récepteur multi-beam. L'analyse détaillée des performances de chaque cas (document remis par l'action spécifique ALMA : {http://paa09.cesr.fr/pub/Main/InfosPubliquesG2/priorites_asa.pdf}) montre que le cumul des deux évolutions permet de disposer à terme d'un interféromètre d'une puissance collectrice équivalente à celle d'ALMA, mais dédié au domaine millimétrique. La résolution angulaire moindre, mais le champ de vue plus large, en feraient un outil a priori bien adapté pour les sondages étendus. Commencer par la phase 1) (NOEMA) sur la période 2010-2015, pour envisager la phase 2) dans une période ultérieure (2015-2020) est une stratégie optimale en terme de

faisabilité et de coûts puisque la première ne pose pas de problèmes technique particulier, alors que la deuxième pourra bénéficier des progrès technologiques sur les récepteurs et de la montée en puissance des électroniques numériques au cours des cinq prochaines années.

Dans la catégorie des meso-investissements (5 à 15 M€), le groupe de prospective a retenu le projet NOEMA en toute première priorité (P0, cf dernière partie du document : Synthèse).

ESO

L'ESO est maintenant soutenu par 15 pays (Chili inclus) pour un budget annuel d'environ 135 M€, dont la moitié pour le fonctionnement (siège, La Silla, Paranal-VLT et VLTI, Chajnantor-APEX), et l'autre moitié pour les développements et investissements (ALMA, E-ELT).

Le rythme des publications référées s'appuyant sur des observations avec les instruments de l'ESO se monte à environ 700 par an. La contribution de la France se monte à 20 M€ par an (15%) et environ 12% des publications référées sont à premier auteur français.

Comme dans d'autres secteurs, en particulier le spatial, la France démontre à l'ESO sa force en matière d'instrumentation pointue par des prises de responsabilité sur les instruments au-delà de la proportion de son engagement dans l'organisation. Par ailleurs, le retour en terme de publications à premier auteur français (12%) est conforme à son engagement (15%) compte tenu de ce que le volume de publication du staff ESO lui même est comparable à celui d'un grand pays contributeur.

Le principal enjeu à l'ESO pour les 6 années à venir est l'achèvement et la mise en service d'ALMA en 2012, de façon concomitante avec l'engagement de l'E-ELT, tout en maintenant un excellent niveau opérationnel accompagné de quelques évolutions sur les instruments existants (VLT et VLTI). En 2012 se posera la question de l'avenir de l'accord de collaboration liant l'ESO au MPG pour l'antenne APEX (ALMA Pathfinder EXperiment Telescope).

VLT et VLTI

Avec le VLT/VLTI, l'Europe, au travers de l'ESO, dispose du meilleur observatoire au sol en astronomie optique et infrarouge. Depuis le début des opérations scientifiques du VLT en 1999 le nombre de pays membres de l'ESO est passé de 8 à 14, avec l'accession de grosses communautés comme l'Angleterre et l'Espagne, réduisant d'environ 25 % à 16% notre part dans l'ESO. Les télescopes du VLT sont les seuls de la classe 8-10 mètres auxquels ont accès les astronomes français, alors que les anglais ont accès à Gemini, les Espagnols au GTC, les Italiens et les Allemands au LBT. Le VLTI, qui doit tant à la communauté française, offre quant à lui des performances uniques au monde, que ce soit en combinant les télescopes de 8 mètres ou les télescopes auxiliaires de 1,8 mètres actuellement au nombre de quatre. Le VLT et le VLTI ont donc une importance tout a fait particulière pour la communauté française.

L'implication française sur l'instrumentation du VLT et du VLTI aura été, lorsque la deuxième génération d'instruments VLT et VLTI sera complétée, majeure. En effet, en ignorant les instruments développés en interne à l'ESO pour ne considérer que ceux développés par la communauté, la France aura été PI de près de la moitié d'entre eux (7 fois PI sur 14 ou 15 instruments selon que l'on compte FORS comme un ou deux instruments) et Co-I de 3 d'entre eux. Notre communauté aura donc consenti environ le tiers de l'effort de développement instrumental, hors ESO, du VLT/VLTI et la moitié de l'effort de maîtrise d'œuvre, bien au-delà donc de la contribution française à l'ESO sur la même période. La communauté française est aujourd'hui fortement mobilisée sur la construction de MUSE (PI) et SPHERE (PI) pour le VLT, et GRAVITY (Co-I) et MATISSE (PI) pour le VLTI. Un autre instrument, VSI (encore à PI français), est également dans le panorama pour le VLTI et pourrait être lancé d'ici une année ou deux.

Evolutions

Avec la mise en place de la seconde génération de l'instrumentation VLT/VLTI et l'apparition de l'E-ELT le développement de nouveaux projets pour le VLT va naturellement marquer un tournant. Toutefois, l'objectif pour la communauté ESO, exprimé par la feuille de route ASTRONET et le Conseil de l'ESO, est clairement de maintenir le VLT dans la position de leader qu'il a acquise jusqu'à l'avènement de l'E-ELT, et de maintenir un très haut niveau de productivité scientifique jusqu'au-delà de 2030. Certains instruments feront très certainement l'objet de mises à niveau ou d'améliorations significatives, et quelques nouveaux développements ciblés pourront avoir lieu. Des évolutions dans le mode opérationnel du VLT/VLTI peuvent également être envisagées, par exemple avec la mise en place de grands relevés systématiques («surveys») avec le VLT/VLTI. Des développements instrumentaux majeurs qui demanderaient des modifications structurelles des télescopes, comme par exemple la construction d'un instrument multi-objet grand champ pour la spectroscopie sont par contre peu vraisemblables (cf ci-dessous Spectrographe multi-objets).

Sont par exemple actuellement envisagés pour le VLT un spectrographe visible haute résolution et ultra-stable (HRUSS-ESPRESSO, précurseur de CODEX pour l'E-ELT), une extension significative du spectrographe FLAMES qui pourrait inclure un gain significatif en capacité multiplex (jusqu'à 500) ainsi qu'une extension vers la bande J, ou, toujours pour FLAMES, la possibilité de lui adjoindre un mode photométrique rapide. De nouveau, les français sont présents à haut niveau (PI) sur deux de ces projets en attente de décision de l'ESO : OKAPI qui est l'extension de FLAMES, dont quelques-uns des objectifs scientifiques sont l'étude des populations stellaires dans la Voie lactée, la dynamique des galaxies à décalage spectral intermédiaire, la tomographie du milieu intergalactique ou encore la recherche d'exoplanètes dans les amas stellaires, et UltraPhot, le photomètre rapide de FLAMES dont les objectifs scientifiques prioritaires sont l'étude des objets de la ceinture de Kuiper et les transits exoplanétaires.

Quant au VLTI, après quelques soucis de jeunesse qui ont pu ralentir sa productivité scientifique initiale, il devrait atteindre d'ici 2012-2014 sa pleine puissance et productivité scientifique avec son instrumentation de deuxième génération et une infrastructure rénovée. Notons que la résolution spatiale offerte par le VLTI restera un facteur ~ 5 supérieure à celle de l'E-ELT lorsque celui-

ci sera opérationnel, toutefois pour des objets très sensiblement plus brillants. La cartographie et l'imagerie des surfaces stellaires restera un des objectifs scientifiques essentiels du VLTI, mais l'amélioration des performances en magnitude limite et en contraste devrait permettre une diversification importante des programmes scientifiques qui y sont menés, avec par exemple l'observation d'exoplanètes (Jupiter chauds) et des environnements circumstellaires dans les zones de formation stellaire, l'étude des noyaux actifs de galaxies, et la caractérisation du trou noir central de la Voie lactée qui par ses effets sur son environnement proche est un laboratoire idéal pour tester la relativité générale. GRAVITY, qui est un imageur dans l'infrarouge proche à très grande précision astrométrique, et MATISSE, qui est un spectro-imageur dans l'infrarouge moyen (5 – 20 µm) sont actuellement en cours de développement et devraient être opérationnels entre 2012 et 2014. VSI, spectro-imageur dans l'infrarouge proche pouvant combiner jusqu'à 6 faisceaux, est en cours de discussion et pourrait être démarré prochainement par l'ESO. Il est fortement lié à l'ajout de deux télescopes auxiliaires supplémentaires qui à ce jour ne sont pas encore financés par l'ESO.

La contribution française approuvée aux projets MUSE, SPHERE, GRAVITY et MATISSE est de ~ 3 M€. L'effort ETPs/an est de l'ordre de 30 – 40. La majeure partie de ces projets devrait être opérationnels en 2012.

Au-delà, la France pourrait contribuer à VSI et au financement des télescopes auxiliaires additionnels pour le VLT (1,5 M€ pour VSI et 5 M€ par AT supplémentaire). Cette opération doit s'intégrer dans les efforts de coordination au niveau européen, pour lesquels les Français sont très actifs. La contribution financière au développement d'instruments tels qu'OKAPI ou UltraPhot devrait rester faible. Disons donc une estimation globale de 2 M€ au-delà des engagements déjà pris sur la période 2010-2015.

Les contributions en personnel pourraient atteindre sur les seuls projets VSI et OKAPI ~ 10 ETPs/an sur la période 2011-2015 environ.

En conclusion, le maintien des capacités scientifiques au meilleur niveau du VLT et du VLTI est absolument essentiel pour la communauté française qui a consacré des efforts considérables à l'instrumentation de cet observatoire. Ceci doit rester une priorité de l'ESO pendant toute la phase de construction de l'E-ELT, et au-delà.

Sur le VLT, le groupe de travail recommande une participation limitée au développement d'OKAPI et/ou Ultra-Phot. En ce qui concerne le spectromètre de haute précision vélocimétrique HRUSS (ESPRESSO) une participation a minima au consortium doit être trouvée compte tenu de la spécificité de ce genre d'instrument et de la forte visibilité de la communauté française active en matière d'étude des exoplanètes.

Sur le VLTI, l'ajout de deux télescopes auxiliaires serait un apport considérable pour l'imagerie avec GRAVITY et MATISSE et consoliderait le démarrage du projet VSI pour des performances astrophysiques supérieures en terme de résolution et de couverture spectrale ainsi qu'en capacité d'imagerie. Dans la catégorie des méso-investissements (5 à 15 M€) le groupe de travail a retenu cette opération en priorité P1 (cf dernière partie du document : Synthèse).

L'exploitation des instruments VLTI est encore réservée aux initiés. La communauté doit exiger de l'ESO la mise en place d'un support aux utilisateurs, pour lequel le JMMC joue un rôle reconnu.

A l'ère de l'E-ELT, des évolutions seront nécessaires quant aux priorités du VLT et du VLTI dont l'instrumentation sera en partie vieillissante. Ces évolutions devront être anticipées et la réflexion devra débuter plusieurs années avant la mise en opération de l'E-ELT. On peut noter à ce titre la réflexion engagée par l'ASHRA sur la feuille de route dans le domaine de l'interférométrie optique.

ALMA

L'interféromètre ALMA est en cours de construction sur le site de Chajnantor dans le cadre d'une collaboration entre l'ESO, le NRAO (USA), le NAOJ (Japon) et le Chili. C'est un interféromètre qui comprendra jusqu'à 64 antennes de 12 mètres (50 pour la mise en service) pour des observations submillimétriques et millimétriques (de 84 à 720 GHz) et dont la mise en service progressive s'échelonnera de 2010 à 2013. Le coût total de la construction de l'interféromètre principal a été contractualisé entre l'ESO et le NRAO à hauteur de 750 M€ (coût actualisé 2009), partagés à parts égales. Le Japon construit principalement l'Atacama Compact Array (ACA = 4 antennes de 12 mètres et 12 antennes de 7 mètres) et le corrélateur de seconde génération. Il développe aussi le récepteur pour la bande de plus haute fréquence d'ALMA (bande 10).

Une unité mixte internationale (UMI) devrait être crée en 2010 par le CNRS à Santiago; l'objectif visé est de renforcer la collaboration avec le Chili, notamment - mais pas exclusivement - dans le domaine de la radioastronomie millimétrique et submillimétrique. Les chercheurs français et chiliens affectés à cette unité auront accès au temps chilien ; ils pourront également bénéficier des mêmes possibilités que les chercheurs d'une UMR standard (accès aux moyens tels que IRAM, ANR, etc.).

L'IRAM héberge à Grenoble l'un des centres nationaux du centre régional européen d'ALMA (ARC). Il y en aura 6 au total en Europe, les autres « arclets » étant localisés en Italie, Grande Bretagne, Allemagne, Hollande et Suède. Le rôle de cette structure est de fournir un soutien direct « face-à-face » aux utilisateurs dans la préparation des propositions d'observation et dans l'accès aux données et leur exploitation.

L'arclet IRAM sera donc le portail d'accès et de soutien à l'observatoire ALMA pour notre communauté. Ses ressources actuelles se comptent essentiellement en personnel : 2 personnes pour un total de 1 etp.

La demande formulée par l'arclet est de se renforcer par la mise à disposition de 3 postes d'astronomes du CNAP qui assureraient leur tâche de service au sein de l'ARC pour un total de 1,5 etp.

La durée couverte par l'exercice de prospective verra l'achèvement d'ALMA et sa mise en service progressive. Ce

doit être la toute première priorité de l'ESO. La communauté nationale quand à elle devra se mobiliser sur l'exploitation scientifique d'ALMA, qui couvre un très grand éventail de domaines scientifiques et a la capacité de servir une communauté beaucoup plus large que celle des utilisateurs habituels de l'IRAM.

Le groupe de travail a jugé que la mise en place d'un « arclet » à l'IRAM est un facteur qui favorisera beaucoup les possibilités d'exploitation scientifique d'ALMA par notre communauté.

L'arclet IRAM doit être renforcé non seulement au niveau ses moyens (essentiellement en personnels), mais aussi au niveau de son organisation (il doit se structurer en projet, clarifier ses objectifs et établir un plan de travail pour les atteindre). En ce qui concerne ses moyens, nous proposons de reconnaître les activités de l'arclet comme tâche de service du corps des astronomes du CNAP et d'appuyer la mise à disposition de quelques postes au sein de l'ARC.

EISCAT

EISCAT est un dispositif radar à diffusion incohérente destiné à l'étude de l'ionosphère terrestre ainsi que ses interactions avec la haute atmosphère, la magnétosphère et le vent solaire. Il est installé à Trosmø, au nord de la Norvège. Les trois stations de réception sont déployées en Norvège, Finlande et Suède. La communauté française a décidé de se retirer de l'association internationale EISCAT fin 2006. Cependant, elle garde un accès à EISCAT par l'achat d'heures d'observations. En 2009, cela représente 150 k€. En ce qui concerne la participation française à EISCAT, il faut aussi considérer que le CDPP permet l'accès aux données de l'instrument. La continuation de l'exploitation des données EISCAT, complémentaires de celles issues de nombreuses missions spatiales, est une des priorités du PNST. Celle-ci est accompagnée d'un effort de réorganisation de la communauté ionosphérique.

➢ Fonctionnement et production scientifique

Environ 200 k€/an = 150 k€ de frais d'accès + 50k€ de missions.
Environ 3 articles référés par an.

➢ Evolutions : EISCAT 3D

EISCAT-3D est une évolution très significative des outils de sondage ionosphérique à diffusion cohérente. Il est destiné à l'étude fine des processus physiques à l'œuvre dans la haute atmosphère et l'ionosphère, et contribuera à la « météorologie de l'espace » d'un point de vue plus environnemental. EISCAT-3D est un projet lourd (60 à 250 M€ au total) qui utilisera bien plus de stations de réceptions à antennes multiples, et fonctionnera dans d'autres bandes de fréquences, plus basses, que celles utilisées par EISCAT (UHF principalement). Des antennes à commande de phase seront largement utilisées. Une amélioration d'un ordre de grandeur est attendue en terme de résolutions temporelle et spatiale. EISCAT-3D disposera donc d'une capacité d'imagerie « volumétrique » de la haute atmosphère et ces installations nécessiteront également une infrastructure réseau de haute capacité pour la distribution des données et leur utilisation en quasi-temps réel.

Une design study FP-6 (SU+NO+UK) vient de s'achever ; la communauté FR tâchera de participer dans la « preparatory phase » qui suivra.

L'implication de la France dans le EISCAT 3D n'étant pas effective, et la communauté française concernée très réduite, le groupe de travail ne recommande pas d'investissements lourds dans ce domaine, mais soutient les efforts des équipes pour obtenir un accès à l'exploitation des données.

L'astronomie au Dôme C

La station du Dôme C est située sur le continent Antarctique. Son exploitation se fait dans le cadre d'une collaboration bi-latérale impliquant la France (IPEV) et l'Italie (PNRA). Si l'on considère que la station bénéficie pour moitié à des expériences d'astronomie, la contribution française AA à son fonctionnement se monte alors à environ 2 M€ par an.

Le groupe de travail a examiné d'une part les opérations de caractérisation du site, une expérience engagée, ASTEP, et 7 propositions d'instruments nouveaux. Pour les projets les plus convaincants le groupe a dégagé deux niveaux de recommandation : P0 et P1. Certains projets pour le long terme, KEOPS et ALLADIN, ont été renvoyés au groupe « évolutions à long terme et R&D ». SUPERDARN n'a pas été considéré dans cet exercice, c'est un projet engagé dont la dernière évolution au Dôme C a été prise en charge par l'Italie.

➢ **Recommandations en P0**

La caractérisation du Dôme C est l'opération à finaliser en toute première priorité.

Le CEA-IRFU (Saclay) mène quelques opérations de préparation bien ciblées qui concernent le dégivrage des optiques et l'astronomie submillimétrique (CAMISTIC).

Par contre l'organisation des opérations de caractérisation menées sous la responsabilité du laboratoire Fizeau n'est pas satisfaisante, et la visibilité pour la CSAA et l'INSU est insuffisante. Même si certains instruments ont été arrêtés ou abandonnés, leur nombre est trop grand (plus d'une dizaine). Il y a urgence à 1) clarifier les objectifs, 2) rationaliser le programme, et 3) extraire et rendre publics les résultats obtenus.

Nous recommandons que se tienne avant le prochain hivernage (2010) une revue de projet INSU sur l'ensemble des opérations de caractérisation du site du Dôme C.

ASTEP est une expérience légère de détection d'exoplanètes et de sismologie stellaire. Son développement nécessite 365 k€ et 13,3 etp.

C'est un projet engagé par la CSAA en 2006 et qui ne présente pas de problème technologique majeur. Il doit être mené à bien en toute première priorité.

QUBIC est une expérience de cosmologie principalement soutenue par l'IN2P3 qui utilise un petit interféromètre millimétrique pour détecter les modes polarisés B du CMB aux grandes échelles

angulaires (signature des ondes de gravitation issues de l'inflation). Son coût consolidé est estimé à 2,5 M€ pour le premier module, plus 1 M€ pour chacun des 5 modules supplémentaires.

C'est un projet qui est en phase préliminaire. Il devra être poursuivi si son intérêt scientifique est confirmé par la mission Planck et si sa faisabilité est démontrée (développements en technologie planaire).

➢ **Recommandations en P1**

SIAMOIS est une expérience d'astérosismologie stellaire utilisant un petit interféromètre Doppler à base fixe. La cible scientifique en sont les étoiles de type G. Son coût consolidé est estimé à 3 M€.

Il s'agit d'un projet de taille réduite bien adapté pour le Dôme C. A considérer en fonction de l'évaluation par les programmes (PNPS) et par la CSAA.

PLT consiste en un télescope « généraliste » de 2,5 m de diamètre, multi-instrumenté, et dont l'optique refroidie à -80°C par les conditions thermiques au sol de la nuit polaire permet de gagner 3 magnitudes de sensibilité en bande K. C'est un projet potentiellement intéressant. Il est toutefois ambitieux (cout total d'environ 11 M€). Il a pour l'instant bénéficié d'une phase de pré-étude extrêmement complète menée essentiellement par l'Australie (projet PILOT).

La proposition française doit mûrir avant de pouvoir être soutenue en toute première priorité. A cet effet nous émettons trois recommandations : 1) construire le cas scientifique, 2) établir le plan de travail qui permettra de faire les choix techniques (e.g. sous-système GLAO), 3) clarifier l'implication et les contributions françaises.

➢ Long terme

ALLADIN est un interféromètre en frange nulle destiné à caractériser les disques exo-zodiacaux des étoiles proches candidates pour la détection d'exoplanètes de type terrestre. C'est à ce titre un moyen d'accompagnement de la mission spatiale Darwin.

KEOPS est un interféromètre de taille kilométrique pour la détection des exoplanètes.

ALLADIN et KEOPS sont deux projets très lourds (> 20 M€) candidats sur le site du Dôme C. Ils nous ont paru relever d'un calendrier prospectif à plus long terme. Nous renvoyons donc leur examen au groupe de travail « R&D et les moyens du futur ».

➢ **Projets non recommandés pour le site du Dôme C**

Les projets AST et AFSIIC ne nous ont pas parus pertinents pour le Dôme C.

AST est une antenne submillimétrique « généraliste » de 12 m de diamètre visant à exploiter les fenêtres atmosphériques submillimétriques.

Ces fenêtres sont accessibles pour une fraction suffisante du temps météorologique (5 à 10%) depuis des sites comme celui d'ALMA. Compte tenu de la complexité logistique, il n'est pas justifié de viser une installation au Dôme C pour un tel instrument.

AFSIIC est un télescope solaire qui rassemble 3 ouvertures travaillant en interférométrie sur une base de 2 m.

Le groupe de travail n'a pas compris l'utilité d'un tel schéma optique. Celui proposé pour l'EST (diamètre 4 m) par exemple nous paraît beaucoup plus pertinent.

En conclusion, le groupe considère que la priorité immédiate des activités Dôme C est l'évaluation et la rationalisation des opérations de caractérisation du site. L'expérience ASTEP doit être menée à bien, et à moyen terme quelques instruments d'équipe d'un coût de quelques millions d'euros (Qubic et éventuellement SIAMOIS si le dossier est évalué favorablement par le PNPS) pourraient justifier et bénéficier d'une installation au Dôme C. Le télescope généraliste de 2,5 m, PLT, est un projet lourd (11 M€) qui doit mûrir avant de pouvoir être considéré.

L'astronomie des « Astroparticules »

Depuis toujours l'astronomie des hautes énergies au sol est portée en grande partie par la communauté de physique des particules (IN2P3) : ondes gravitationnelles (VIRGO), neutrinos (ANTARES), particules et photons de très haute énergie (HESS et AUGER). Si tous ces instruments étaient il y a 5 ans encore essentiellement des plateformes de développement pour l'astronomie du futur et son ouverture aux messagers non photoniques, un pas très important a été franchi depuis l'exercice de prospective de La Colle sur Loup par la mise en service de HESS comme un véritable observatoire avec une capacité d'imagerie des objets astrophysique. De fait l'astronomie sol est aujourd'hui, et sera de plus en plus à l'avenir, partagée entre l'INSU et l'IN2P3.

VIRGO

Virgo est un interféromètre international destiné à détecter des ondes gravitationnelles. Il est le fruit d'une collaboration entre le CNRS et l'INFN (Italie) avec des contributions de la Hongrie, des Pays-Bas et de la Pologne, et est installé près de Pise. Il utilise dans plusieurs domaines des techniques « extrêmes ». Il s'approche aujourd'hui de sa sensibilité anticipée sur l'essentiel de la gamme en fréquence et dépasse ses concurrents aux basses fréquences (10-50 Hz). Pour augmenter les chances d'une détection en coïncidence sur plusieurs antennes, Virgo et son concurrent américain Ligo on signé en 2007 un accord qui organise la synchronisation des interruptions et l'échange des données. Quoique remarquable, la sensibilité obtenue avec Virgo limite ses détections possibles à une distance de l'ordre de 3 Mpc pour une coalescence de binaires.

➢ **Fonctionnement et production scientifique**

La contribution annuelle de la France au projet Virgo est d'environ 5 M€ par an. Le projet mobilise en France 40 etp (fonctionnement et exploitation scientifique), principalement à l'IN2P3. Pour l'INSU il s'agit de 10 etp au laboratoire ARTEMIS de l'OCA.
La production scientifique est d'environ 7 articles référés par an.

➢ **Evolutions : Advanced VIRGO**

Augmenter la sensibilité d'un ordre de grandeur multiplie le volume sondé par mille et permettrait à Virgo de détecter les coalescences au delà de l'amas de la Vierge. C'est ce que visent le projet « Advanced Virgo » et son pendant « Advanced Ligo » aux États-Unis.

Les améliorations ciblent essentiellement les miroirs de l'interféromètre et leur suspension. Le Technical Design Report pour Advanced Virgo a été approuvé par un comité de revue international, qui a présenté ses conclusions aux agences, qui doivent rendre leur décision rapidement. L'implémentation doit s'étaler sur 2010-2015.

Le coût de construction d'Advanced Virgo est d'environ 22 M€ + 460 etp, dont 10 M€ + 110 etp (~ 16 M€) pour la France. Les frais de fonctionnement ne devraient pas significativement changer.

Virgo est, avec son pendant américain Ligo, l'un des deux bancs de développement technique pour la détection des ondes de gravitation. Avec la mise en place effective de la collaboration entre les deux expériences, les chances d'une première détection dans les années proches deviennent réelles.

Advanced Virgo a été évalué par le groupe de travail comme un projet très attractif scientifiquement puisqu'il ouvrirait enfin l'astronomie à la détection d'ondes gravitationnelles, mais très risqué puisque les techniques mises en œuvre pour cette augmentation de sensibilité sont extrêmes. Il paraît présomptueux d'estimer les chances de succès.

ANTARES

Antares consiste à instrumenter la mer profonde pour observer les secondaires (principalement des muons) d'interactions de neutrinos de haute énergie, via la lumière Cerenkov émise dans l'eau, dans le but d'entamer l'astronomie des neutrinos. Il s'agit d'une collaboration internationale qui implique la France, l'Italie, l'Allemagne, l'Espagne, les Pays-Bas, la Roumanie et la Russie. L'instrumentation consiste essentiellement en tubes photo-multiplicateurs (protégés de la pression, ...) et leur environnement. Courant 2008, Antares a fini de déployer 12 lignes d'instrumentation au large de Toulon, qui fonctionnent convenablement : l'instrument détecte en particulier les muons « descendants » avec la résolution angulaire anticipée. Le volume instrumenté est trop faible pour détecter des neutrinos d'origine astrophysique. Ce projet constitue donc une plate forme de développement pour un projet plus grand, de l'ordre du km-cube, appelé KM3NeT. KM3NeT fédère les projets analogues à Antares de l'hémisphère nord, parmi lesquels Antares est le plus avancé.

➢ **Fonctionnement et production scientifique**

La collaboration Antares regroupe plus de 100 chercheurs, parmi lesquels une cinquantaine de français, dont 5 pour l'INSU-AA au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (à noter que l'INSU-OA est aussi impliqué avec 5 personnes de l'observatoire océanologique de Villefranche sur Mer et 5 personnes du centre d'océanologie de Marseille). Le coût de fonctionnement est de 200 k€ par an pour la France, dont 60 k€ pour l'INSU-AA.
La production scientifique est d'environ 1 article référé par an sur la période 2004-2008.

De façon similaire à Virgo, Antares est le banc de développement des techniques de détection des neutrinos astrophysiques, mais avec des perspectives incertaines de concrétiser de vraies observations astrophysiques avec les sources connues. C'est un effort lourd de l'IN2P3, qui prépare la réalisation de la prochaine génération des observatoires à neutrino (cf KM3NeT). Compte tenu de l'absence de perspective pour l'astronomie, la participation de l'INSU doit rester modeste.

AUGER

L'Observatoire Pierre Auger (installé en Argentine) détecte les rayons cosmiques d'énergie "ultime" (son seuil se situe vers 10^{18} eV) pour tenter d'en déterminer l'origine et la composition. Il est le fruit d'une collaboration internationale qui rassemble une vingtaine de pays (cf http://www.auger.org/collaboration/). Son instrumentation est double : des cuves d'eau tous les 1,5 km qui détectent les particules chargées atteignant le sol, et des imageurs rapides qui détectent la fluorescence de l'atmosphère due à chaque gerbe pendant les nuits claires sans Lune. L'alliance des deux approches permet d'assurer la calibration en énergie des gerbes détectées uniquement avec le réseau de cuves. La collaboration Pierre Auger a été plus particulièrement remarquée récemment, d'une part pour la mesure de la coupure GZK à très haute énergie, et d'autre part pour la publication de la détection d'une possible corrélation des directions d'arrivée des rayons cosmiques de très haute énergie (au dessus de la coupure GZK) avec les galaxies à noyaux actifs. La réalité et la signification de cette corrélation sont toutefois largement discutées.

➢ **Fonctionnement et production scientifique**

L'implication française concerne 25 chercheurs, tous dans des laboratoires de l'IN2P3, pour un budget de fonctionnement de 150 k€. Le rythme des publications référées est de 3 à 4 par an.

➢ **Evolution : Auger nord**

Le projet Auger nord vise à significativement augmenter la surface sensible en répliquant Auger sud avec un espacement entre cuves plus élevé (avec là aussi un réseau d'imageurs atmosphériques), dans le but de caractériser les sources des rayons cosmiques au delà de la coupure GZK. Les contributions françaises possibles à Auger nord restent ouvertes et seraient naturellement dans la ligne de celles à Auger sud : électronique des cuves, télécommunications, déclenchement central.

Le coût estimé d'Auger nord est de 120 M$ et le temps de déploiement est estimé à 5 ans. Le projet n'est pas encore approuvé aux États-Unis, où il est présenté au « Decadal Survey ».

Avec la mesure effective de la coupure GZK, Auger sud produit enfin un résultat astrophysique de premier plan.

Auger nord, dont la sensibilité anticipée est sûre, semble représenter le projet ultime au sol. L'avenir dans le domaine des très hautes énergies passe probablement par l'imagerie des gerbes depuis l'espace : le projet JEM-EUSO de l'agence spatiale japonaise, réincarnation du projet EUSO passé par la NASA et l'ESA, se positionne aujourd'hui comme concurrent

d'Auger nord.

HESS

HESS I est un réseau de 4 télescopes Cerenkov installé en Namibie observant les gerbes atmosphériques, dans le but de mesurer les photons au-delà d'environ 100 Gev. L'observatoire a commencé ses observations en 2002 et dispose de ses 4 télescopes depuis 2004. HESS est essentiellement une collaboration germano-française et domine ce champ de science depuis sa mise en route, grâce à des choix judicieux : plus de la moitié des sources au TeV connues ont été détectées par HESS, qui vise aussi la détection de manière noire par co-annihilation. HESS est un des tous premiers instruments européens du domaine des « Astroparticules » en termes de visibilité scientifique. Construction, déploiement, observations, maintenance et analyse sont assurés par les membres de la collaboration.

Les avancées en astronomie gamma de très haute énergie ont été récompensées par l'attribution du prix européen Descartes au projet HESS.

➢ **Fonctionnement et production scientifique**

HESS implique en France 40 chercheurs permanents, dont une dizaine dans des laboratoires de l'INSU : LUTH, CESR et LAOG. Le fonctionnement de HESS se monte à 300 k€ par an pour la France dont les 2/3 pour les frais de mission des observateurs. La production scientifique a atteint 15 articles référés en 2008.

➢ **Evolution : HESS II**

HESS II est en construction. Il consiste en l'ajout d'un grand télescope qui doit voir sa première lumière fin 2010, pour abaisser le seuil d'énergie des particules détectées vers 30 GeV, faisant ainsi de HESS le complément à haute énergie des observatoires spatiaux comme Fermi, et lui permettant aussi de creuser l'écart avec ses concurrents. La France aura fourni les caméras de HESS I et II (caméra rapide à tubes photomultiplicateurs et électronique rapide). L'avenir de ce domaine de science est dans le projet CTA (voir plus loin dans le document).

La contribution française à la construction de HESS II est de 5 M€ (sur un total de 14 M€) et de 90 etp pris essentiellement à l'IN2P3.

HESS est l'un des grands succès des « Astroparticules » qui voient enfin leurs développements contribuer réellement à l'astrophysique. L'extension aux énergies plus basses qui sera offerte par HESS II est, par étude comparée avec FERMI, l'une des rares façons de pouvoir espérer dévoiler les sources de l'accélération hadronique des rayons cosmiques.

Tout comme nous l'avions fait à l'issue de la prospective de La Colle sur Loup vis à vis du projet HESS I, il faut à nouveau encourager et soutenir la communauté AA de l'INSU pour s'impliquer dans l'exploitation de l'observatoire HESS II.

Les nouveaux moyens lourds à 5 – 10 ans

E-ELT

Le Conseil de l'ESO a mis la construction d'un European Extremely Large Telescope (E-ELT) en première priorité à la suite du projet ALMA. Cette priorité a été confirmée par la communauté astronomique européenne dans son ensemble, dans le plan stratégique sur les nouvelles infrastructures élaboré dans le cadre de l'ERA-NET, ASTRONET. L'E-ELT fait également partie des priorités définies dans le cadre de ESFRI. Par son ampleur et ses buts scientifiques, l'E-ELT est le projet phare de l'astronomie au sol dans les dix prochaines années. On peut rappeler que un ELT européen était la première priorité ressortie du dernier colloque de prospective de l'INSU.

➢ **Buts scientifiques de l'E-ELT**

L'E-ELT a 4 buts principaux :

- l'imagerie directe d'exoplanètes de type Terre ou super Terre (masse inférieure à 5 fois la masse de la Terre située dans la zone habitable) ;
- l'étude des populations stellaires dans les galaxies à la distance de l'amas de la Vierge, pour comprendre comment ont évolué les galaxies et comment se sont formés les éléments comme le carbone, l'azote et l'oxygène dont nous sommes formés ;
- l'étude des premières galaxies à des décalages vers le rouge ≈ 6 (à un âge de l'Univers de seulement 4 millions d'années) qui seront détectées en nombre important par le James Web Space Telescope, successeur du Hubble Space Telescope, à partir de 2013 ;
- la mesure directe de l'accélération de l'expansion de l'Univers en mesurant à une vingtaine d'années d'intervalle la vitesse de récession des galaxies lointaines avec une précision de quelques cm/s.

Ces quatre questions majeures nécessitent la construction d'un télescope d'un diamètre d'une quarantaine de mètres, équipé de systèmes d'optique adaptative très puissants.

➢ **Le projet E-ELT**

L'E-ELT est un télescope de 42 m de diamètre, avec un miroir primaire segmenté, composé de quelques 1 000 segments de 1,4 m de coté. Le schéma optique comprend 5 miroirs, dont un secondaire de 6 m de diamètre et un miroir actif (M4). Il est prévu plusieurs foyers permettant l'installation de six instruments. Le télescope sera équipé d'étoiles laser pour un fonctionnement de l'optique adaptative sur tout le ciel, et le champ de vue sera de 10 minutes d'arc de diamètre.

Le coût de ce télescope est estimé à 900 M€, auquel il faut rajouter 100 M€ et 600 hommes/an pour les instruments.

Le projet serait réalisé avec une maîtrise d'œuvre de l'ESO et une participation des états membres en ce qui concerne le personnel nécessaire à la construction des instruments, sur le modèle qui fut utilisé pour le VLT. Ce personnel sera compensé par du temps garanti.

Le site n'est pas encore choisi, mais sera très vraisemblablement au Chili, surtout après la décision des Universités Californiennes d'installer leur télescope de 30 m (le TMT) à Hawaii. L'autre possibilité serait une installation aux Canaries. Les études de sites se poursuivent sur deux sites au Chili et sur le site des Canaries. Un rapport technique sur la qualité de ces sites sera présenté à la fin 2009.

Une étude détaillée du télescope et des infrastructures associées est en cours à l'ESO, financée par le budget normal de l'ESO (55 M€) et un soutien de la Commission Européenne dans le cadre des Design Studies du FP7 (7 M€). Elle implique de nombreux industriels qui, en plus de l'étude technique et de la réalisation de prototypes, devront fournir des estimations des coûts de construction. Ces études seront finalisées à la mi 2010. Plusieurs revues auront lieu à l'automne 2010, et une proposition formelle d'engagement de la construction du télescope sera faite au Conseil de décembre 2010.

Les équipes scientifiques et les industriels français sont très impliqués dans ces phases d'études du télescope et des instruments.

Les conditions d'acceptation du projet par le Conseil de l'ESO sont les suivantes :

1. la phase d'études en cours est finie et réussie ;
2. le site a été identifié, et un accord avec le pays hôte obtenu ;
3. une solution a été trouvée pour le financement. L'ESO dispose dans son budget environ du tiers du coût du télescope. Le financement nécessite donc une augmentation substantielle de la contribution des états membres : 15 à 25% suivant les hypothèses prises, soit entre 3 et 5 M€/an pendant 10 ans pour la France. Le moyen de diminuer cette augmentation serait de trouver des partenaires supplémentaires. Des discussions sont en cours avec plusieurs pays ;
4. une assurance sur la bonne fin d'ALMA - sur les délais, les coûts à achèvement et les coûts d'opérations, pour être sur que l'ESO pourra finir ALMA dans de bonnes conditions, tout en démarrant les phases de construction de l'E-ELT.

Si tout se passe suivant le calendrier actuel, la décision d'engager la construction du télescope pourrait être prise à la mi 2011, et le télescope serait opérationnel en 2017 – 2018.

➢ **Les instruments de l'E-ELT**

Des études préliminaires sont en cours pour plusieurs concepts d'instruments (cf table ci-dessous). Une sélection des premiers instruments aura lieu après l'acceptation de l'E-ELT. Le nombre de ces premiers instruments n'est pas encore figé. Nous détaillons plus bas les particularités des instruments pour lesquels la possibilité d'une contribution française importante a été identifiée.

EAGLE

EAGLE est un spectrographe multi-objet dans l'infrarouge proche assisté par optique adaptative. Il consiste en une vingtaine de spectrographes de type intégral de champ (IFU), d'environ 1,6" x 1,6" de champ individuellement, patrouillant dans le champ total de vue de 7' environ. La résolution spatiale est de 75 mas et la résolution spectrale R = 5000. L'optique adaptative intégrée dans l'instrument (combinée à l'OA de l'ELT) permet d'atteindre localement cette qualité d'image en n'importe quel point du champ. C'est un instrument généraliste mais optimisé pour l'études des propriétés des galaxies lointaines et de leur évolution. Il intéresse donc tout particulièrement la communauté PNCG.
Le coût total consolidé d'EAGLE est estimé à 25 M€ et la participation française impliquera un total de 200 etp.

EPICS

EPICS (Exo-Planet Imaging Camera and Spectrograph) est un instrument destiné à l'étude d'objets faibles dans l'environnement proche d'étoiles. Le contraste visé est de 10^9, avec comme objectif

Instruments	Description sommaire	PI et principaux laboratoires	Date revue fin de phase d'étude	Etudes antérieures
EAGLE	Multi IFU, IR proche	J.G. Cuby/LAM, OP GEPI et LESIA, ONERA, Durham	Octobre 2009	Suite des études FP6
CODEX	Très haute résolution spectrale, visible	L. Pasquini/ESO, INAF Triestre et Brera, IAC, IOA Cambridge, Obs Geneve	Décembre 2009	Suite des études FP6
MICADO	Caméra haute résolution angulaire	R.Genzel/ MPE, MPIA, Univ Munchen, INAF Padova	Novembre 2009	Nouvelle étude
EPICS	Imagerie et spectroscopie d'exoplanètes	M.Kasper/ ESO, LAOG, LESIA, FIZEAU UNSA-OCA., LAM, ONERA, Univ. Oxford, INAF Padova, ETH Zurich, ASTRON-NOVA, Univ. Amsterdam & Utrecht	Février 2010	Suite des études FP6
HARMONI	Spectrographe a très grand domaine spectral	N.Thatte/ Oxford University, CRA Lyon, DAMI Madrid, IAC, UK ATC	Décembre 2009	Nouvelle étude
METIS	Instrument infrarouge thermique et optique adaptative associée	B.Brandl/ NOVA-Leiden and ASTRON, MPIfA, CEA Saclay DSM/IRFU/Sap, KU Leuven, ATC UK	Décembre 2009	Suite des études FP6
OPTIMOS	Spectrographe multi-objet du visible à la bande J	G.Dalton, F.Hammer, O.LeFevre/ STCF RAL, Oxford, LAM, IASF-MI, OP-GEPI, NOVA,Univ. of Amsterdam , INAF Oss. Brera and Trieste, Nils Bohr Institute- Copenhagen University , LSH, AIP, IAC	Janvier 2010	Nouvelle étude
SIMPLE	Spectrogrpahe infrarouge proche à haute résolution angulaire	I.Origlia/ INAF OA Bologna, Arcetri, Roma, UAO, TLS, PUC (Chile)	Janvier 2010	Nouvelle étude
MAORY	Module MCAO	E.Diolaiti/ INAF-OABo, OAA, OAP; Univ.Bo, ONERA	Janvier 2010	Suite des études FP6
ATLAS	Module LTAO	T. Fusco/ ONERA, OPM LESIA, GEPI	Janvier 2010	Nouvelle étude

principal la détection directe et la caractérisation des exoplanètes, des planètes jeunes et chaudes jusqu'aux planètes rocheuses massives en passant par les géantes gazeuses matures de type Jupiter. EPICS permettra également l'observation et l'étude des disques circumstellaires. Il intéresse donc tout particulièrement les communautés PNPS et PNP.

Le concept étudié pendant la phase A rassemble plusieurs dispositifs : i) une optique adaptative extrême, ii) un ou plusieurs dispositifs coronographiques, iii) un analyseur de front d'onde post-focal qui pourra éventuellement alimenter le système OA extrême ou bien un second étage de correction, iv) un spectrographe intégral de champ dans l'infrarouge proche (émission thermique des planètes), et v) un polarimètre imageur différentiel dans le visible (lumière réfléchie des planètes).

Le coût total d'EPICS est estimé à 20 M€, mais la contribution française n'est pas chiffrée. On peut toutefois anticiper un engagement des personnels comparable à celui d'EAGLE.

HARMONI

HARMONI est un spectrographe intégral de champ (IFU) pour l'infrarouge proche. Il procurera une résolution spectrale R = 4 000 à 2 000 sur un champ d'au maximum quelques secondes d'arc avec un échantillonnage spatial de 4 à 40 mas. Il s'agit d'un instrument généraliste de base envisagé pour la première génération d'instrumentation de l'E-ELT.

On ne dispose pas pour l'instant d'une évaluation de la contribution française.

METIS

METIS est un spectro-imageur généraliste limité par la diffraction pour l'infrarouge moyen (bandes L, M et N). Le champ de vue de l'imageur sera de 18''x18'' avec des possibilités de spectroscopie à résolution modérée (R = 3 000), un polarimètre et un masque de phase à 4 quadrants en bande N. Le spectromètre procurera une haute résolution spectrale (R = 100 000) sur un champ IFU de 0,4'' x 1,6'' (résolution spatiale de 20 à 72 mas). Les principaux objectifs scientifiques concernent l'histoire de la formation du Système solaire, les disques proto-planétaires, la physicochimie des exoplanètes, et les tores d'AGN. Il concerne donc les communautés PNPS, PNP, PCMI et PNCG.

La contribution française concerne la caméra détecteurs. Ceux-ci font actuellement l'objet d'une R&D financée par l'ANR. Pour la construction de l'instrument la contribution française en terme de personnels est estimée à 35 etp.

OPTIMOS : EVE et DIORAMAS

L'instrument OPTIMOS est un spectromètre multi-objets pour l'infrarouge proche.
OPTIMOS est placé sous la responsabilité de l'ESO qui finance deux études de phase A compétitives : EVE (PI GEPI, fibres) et DIORAMAS (PI LAM, fentes). Comme pour EAGLE et EPICS le coût total d'OPTIMOS atteint les 25 à 28 M€, pour une contribution française supérieure à 100 etp.

EVE est un spectrographe à fibres optiques qui met l'accent sur la résolution spectrale puisque celle-ci pourra atteindre R = 60 000 sur 300 objets limités par le seeing. EVE est donc un instrument adapté pour la physique de l'Univers proche et celle de l'Univers lointain, avec la possibilité de détecter des exoplanètes en dehors de notre Galaxie. Il peut intéresser les communautés PNPS et PNCG.

DIORAMAS est un spectrographe à « fentes » qui met l'accent sur la puissance de multiplexe mais pour une résolution spectrale limitée à R = 1 000. Il comporte aussi une fonction d'imageur dans les bandes photométriques. C'est donc un instrument optimisé pour les sondages ultra-profonds de grands volumes de l'Univers. Il intéresse surtout la communauté PNCG.

MICADO

MICADO est un instrument imageur infrarouge (0,8-2,3 microns) généraliste de première génération pourvu d'une capacité spectroscopique de moyenne résolution (~3 000). MICADO peut être vu comme le pendant de NACO au VLT pour l'E-ELT. Il intéresse les communautés PNPS et PNCG.

La contribution française envisagée concerne le module de SCAO (Single Conjugate Adaptative Optic) capable de fournir une correction optimale sur l'axe de 40-50% de Strehl.

Le groupe de travail considère que les perspectives scientifiques offertes par l'E-ELT sont vraiment novatrices et que l'implémentation proposée par l'ESO est crédible. Il recommande que la communauté réaffirme que l'E-ELT est sa toute première priorité en terme d'engagements nouveaux.
Il est important que l'agenda pour une mise en service en 2018 soit respecté afin de rester dans la compétition avec les autres projets du même type (TMT, GMT).

Comme pour le VLT, les équipes françaises sont très impliquées dans la préparation des instruments de l'E-ELT. Il faut s'en féliciter et recommander un soutien renforcé de l'INSU sur la ligne TGE dédiée.
Pour toutes ces raisons, le groupe de travail a affiché l'engagement de l'E-ELT comme la toute première priorité, P0, dans la catégorie des engagements supérieurs à 15 M€ (cf dernière partie du document : Synthèse).

SKA

SKA est un interféromètre qui couvrira les bandes radio astronomiques métriques à centimétriques avec une surface collectrice de 1 kilomètre carré. C'est un des projets majeurs (1,5 milliard d'euros) de la discipline au niveau mondial. Il représente un saut en sensibilité de deux ordres de grandeur par rapport à l'instrument de référence actuel : le VLA.

Un consortium européen s'est constitué autour de 4 partenaires majeurs (Pays-Bas, Royaume-Uni, France, Italie). Il propose un concept spécifique de réseau phasé dense pour SKA, qui permet, grâce à un pointage entièrement électronique, l'observation simultanée dans des directions complètement indépendantes du ciel.

Des résultats majeurs sont attendus dans la plupart des

domaines de l'astronomie, comme on peut s'y attendre pour un projet de cette ampleur, mais la motivation principale apparaît cosmologique (époque de ré-ionisation, oscillations baryonique en HI) et intéresse la communauté PNCG.

La France est actuellement impliquée dans des études préparatoires financées sur programmes européen (FP7 PrepSKA 2008-2011) et sur une ligne TGE INSU commune avec les préparations de l'E-ELT (96 k€ et 11 etp en 2009). Nos contributions concernent notamment l'élimination des parasites et la conception de récepteurs intégrés et leur amplificateurs à faible bruit (LNA).

Le projet est clairement très intéressant et a été jugé prioritaire par ASTRONET, mais en suggérant un phasage avec celui de E-ELT (probablement en partie à cause d'un moindre avancement des études et de l'organisation). Il n'y a pas d'éléments nouveaux justifiant d'aller contre ces priorités. Il n'est pas réaliste d'espérer financer les deux projets en parallèle.

La principale question paraît donc de savoir comment maintenir la motivation des équipes, pour continuer à avancer sur la préparation d'un projet très intéressant, mais dont l'aboutissement est nécessairement à (très) long terme (2020 ++).

Concrètement, la ligne TGE de préparation à SKA doit être maintenue à l'INSU car c'est l'outil qui permet de construire notre stratégie nationale de participation à SKA.

En ce qui concerne la communauté scientifique française intéressée par SKA, elle n'est pas nombreuse aujourd'hui. Le soutien à l'exploitation scientifique de LOFAR est probablement la meilleure façon de la faire émerger.

Dans le cadre des actions préparatoires aux futurs TGEs, le groupe de prospective a retenu SKA pour le proposer comme l'une des toutes premières priorités de la communauté (cf dernière partie du document : Synthèse).

EST

EST est le projet de grand télescope solaire européen (classe 4 m), susceptible d'être construit aux Canaries à l'horizon ~2018. Profitant de l'expérience accumulée avec THEMIS (par ex. avec le spectro-imageur grand champ x,y,λ TUNIS), il en améliorera la résolution angulaire et la sensibilité (important pour la photométrie différentielle, i.e. forts flux mais faibles contrastes) d'un facteur de l'ordre de 30. EST requiert de relever plusieurs défis techniques : OA (MCAO) diurne sur un 4 m (de difficulté équivalent à une OA nocturne sur un ELT), problèmes thermiques, utilisation simultanée des instruments focaux, etc.

EST pourra étudier avec une précision inédite les mécanismes de formation et d'évolution du champ magnétique à la surface du Soleil, la façon dont ils interviennent dans l'éjection de matière (CME), et comment ce flux d'énergie est transporté depuis la photosphère à travers la chromosphère pour chauffer la couronne.

Aujourd'hui le consortium EST rassemble plusieurs pays européens et a pour principaux contributeurs l'Espagne (PI), l'Italie, l'Allemagne, les Pays Bas, la France, le Royaume Uni, et la Suède. Le consortium est financé sur 2008-2011 par l'Union Européenne pour des études de « design ». Les laboratoire français impliqués en France dans cette phase d'étude sont le LESIA/PPS, le LERMA, le LATT, et l'UPS 853 (THEMIS). Ils y contribuent en terme de personnel pour un total de 4,3 etp.

La construction d'EST est estimée pour un budget consolidé total d'environ 120 M€, et la contribution française s'élèverait à 21 M€ et 66 etp sur la période 2015-2020.

Très bien jugé par la prospective ASTRONET, EST est vital pour la physique solaire « sol » européenne. La communauté solaire européenne est formée de groupes nationaux de taille réduite (20 à 30 personnes en France dont plusieurs « seniors ») qu'il peut/doit contribuer à rassembler et dynamiser. Le seul instrument comparable sera le projet de 4 m solaire américain ATST, plutôt focalisé sur l'imagerie HRA, tandis qu'EST mettra l'accent sur la spectro-polarimétrie (magnétisme). EST sera donc complémentaire à ATST (bases de données interopérables prévues), tout en assurant l'indépendance européenne sur cette thématique. Son calendrier permet également des synergies avec des projets spatiaux comme Solar Orbiter.

Toutefois, l'analyse du tableau des personnels impliqués en France dans la préparation de l'EST fait apparaître un déficit d'engagement préoccupant : 18 personnes dont aucune n'y est à plus de 30% de son temps de travail. Or s'il est engagé, l'EST nécessitera pour sa construction une contribution française estimée à hauteur de 4 M€ par an. Pour que cette contribution soit envisageable il semble indispensable que la communauté solaire dans son ensemble s'implique plus dans la préparation du projet dès le démarrage de la phase préparatoire.

Le groupe de travail a donc retenu la préparation de l'EST comme l'une des actions prioritaires à soutenir dans le cadre des programmes préparatoires aux futurs TGEs (cf dernière partie du document : Synthèse).

LSST

Le LSST (Large Synoptic Survey Telescope) est un projet très ambitieux de télescope de 8,4 mètres pour l'imagerie dans un champ extrêmement large de 9,6 degrés carrés muni d'un plan de détection de 3,2 milliards de pixels. Il sera installé sur le Cerro Pachon au Chili. Il fonctionnera à partir de poses élémentaires courtes, 15 secondes, mais qui compte tenu de l'ouverture sont suffisantes pour atteindre une magnitude limite r = 24,5. En 10 années d'opérations toutes les sources sur les 20 000 à 25 000 degrés carrés accessibles seront vues 2 000 fois chacune dans les bandes u, g, r, i, z et Y, permettant des études de variabilité, de mouvement propre, et donnant aussi des mesures très robustes de leur forme. Le relevé final atteindra une magnitude limite r = 27,5.

Il s'agit d'une collaboration américaine à laquelle participent 25

chercheurs français appartenant à 6 laboratoires de l'IN2P3. La contribution de la France serait dans la construction de la caméra et son électronique de contrôle, ainsi que pour 25% du coût des CCDs. La France a aussi l'expertise dans les systèmes de calibration automatique avec LEDs, comme cela a été fait pour la caméra MegaCam au CFHT. Le retour industriel en Europe sera important puisque les CCDs seront achetés chez EEV et les filtres chez SAGEM. Le projet attend l'approbation du « decadal survey » US, mais il est déjà financé à hauteur de 30 M$ par « Gates et Simonyi ».

En ce qui concerne la participation à l'exploitation scientifique, les laboratoires de l'IN2P3 se sont associés à 3 laboratoires de l'INSU : IAP, LAM et Cassiopée.

Le budget total est estimé à 450 M$ pour une contribution française de 6,9 M€ et 190 etp (2009 – 2016).

Le LSST va complètement révolutionner l'astronomie dans plusieurs domaines. Ce relevé vaste et très profond va nous faire faire un bond en avant similaire à celui que le SDSS a permis par rapport aux relevés photographiques. Par ailleurs, le monitoring temporel qui sera offert par le LSST est en lui même un territoire d'études pratiquement vierge.

Toutefois, compte tenu de l'aspect minoritaire de la contribution de la France au LSST, environ 5%, on doit se poser la question de notre visibilité lors de son exploitation scientifique. La politique d'accès et de mise à disposition des données doit être clarifiée.

Le groupe de prospective a retenu une participation au LSST en priorité (cf dernière partie du document : Synthèse). L'INSU doit encourager et soutenir les équipes dans ses laboratoires qui s'associent à celles de l'IN2P3 pour participer à l'exploitation scientifique du LSST.

CCAT

CCAT (Cornell Caltech Atacama Telescope) est un projet de télescope submillimétrique de 25 mètres de diamètre, qui comme son nom l'indique est porté principalement par l'Université de Cornell et Caltech. D'autres partenaires sont au Canada (British Columbia et Waterloo), en Grande Bretagne (Edinburgh), et en Allemagne (Cologne et Bonn). Une proposition de participation de la France est portée par l'IAS, l'IAP et le LERMA.

Avec un champ de vue de 20 minutes d'arc CCAT fournira une résolution angulaire de 2'' à 35'' entre 200 et 3 500 µm, avec des possibilités d'analyse en imagerie (caméras bolométriques) et en spectroscopie haute résolution. Ce sera un outil de premier plan pour découvrir de façon extensive les sources qui seront pointées par l'interféromètre ALMA.

Les objectifs scientifiques couvrent l'histoire cosmique de la formation d'étoiles et des galaxies, la complexité moléculaire, l'origine de la fonction de masse initiale des étoiles, et les petits corps du Système solaire (astéroïdes et trans-neptuniens). Il peut donc intéresser les communautés PCMI, PNCG, PNPS et PNP.

Le coût total du projet est de 110 M$, et la contribution française est envisagée à hauteur de 3 à 5 M€. Concrètement il pourrait s'agir de la construction d'un instrument de première lumière, d'une contribution industrielle à l'ajustement de la surface du télescope, et/ou d'une contribution au centre de traitement et d'archivage des données.

CCAT est un instrument similaire à l'instrument AST proposé pour une installation au Dôme C. Le choix du site chilien est tout à fait opportun puisqu'il offre un accès suffisant dans les fenêtres submillimétriques, et qu'il est d'un accès beaucoup moins couteux que le site Antarctique. Une participation à CCAT s'inscrirait dans la continuité des recherches entreprises avec Herschel et ALMA, avec un fort intérêt pour l'étude des galaxies lointaines.

Toutefois, le dossier présenté pour l'exercice de prospective est trop préliminaire en ce qui concerne la participation française. Il ne peut pas être soutenu en l'état et demande à être approfondi, pour être revu en temps utile par les instances (programmes nationaux, CSAA, prospective à mi-parcours).

KM3NET

KM3NeT est un consortium européen qui a pour objectif de produire une proposition (techniquement) détaillée d'observatoire sous-marin de neutrinos de haute énergie. Il s'agit d'instrumenter 1 km^3 quelque part au fond de la mer Méditerranée. Ce consortium réunit 3 collaborations qui visent chacune à déployer des démonstrateurs. Le plus avancé des trois est Antares, le projet à leadership franco-italien qui instrumente une fosse au large de Toulon et détecte des traces chargée depuis plusieurs années.

Le projet est actuellement dans une phase préparatoire financée par l'UE (FP7 2008-2011). L'objectif de cette phase est de rédiger un « Technical Design Report » avec des estimations de prix et de performances réalistes. Ce consortium coordonne les efforts de R&D destinés majoritairement à limiter les coûts.

Les personnes impliquées en France dans la préparation de Km3net sont à peu près les mêmes que celles impliquées dans Antares moins les personnels des deux laboratoire de l'INSU.

Le coût total du projet est estimé à 250 M€.

KM3NeT est l'une des priorités des prospectives ASTRONET et ASPERA. Pour l'instant aucun laboratoire de l'INSU ne participe à la préparation du projet. Ceci est probablement justifié par le fait que les capacités d'observations astrophysiques de KM3NeT ne semblent pas encore complètement établies. A minima, l'INSU-AA se doit de maintenir une veille active sur le projet.

CTA

CTA est un projet d'observatoire dans le domaine des photons au-delà d'environ 30 GeV, via la détection du rayonnement Cerenkov des gerbes atmosphériques. Il vise à améliorer la sensibilité des projets en fonctionnement (HESS, Magic, Veritas) en augmentant le nombre de télescopes. Cela doit significativement augmenter

le nombre de sources détectées et la précision des spectres obtenus, mais permettra aussi d'entrer dans le domaine de sensibilité permettant d'espérer la détection de matière noire super-symétrique. Le projet est dans une phase de R&D qui vise à réduire les coûts, en vue de produire un « Technical Design Report » solidement argumenté. Il s'agit d'un projet essentiellement européen, car l'Europe domine ce domaine avec Magic et surtout HESS. La structure européenne ASPERA coordonne les efforts du consortium et la collecte des fonds.

A la fin de la phase actuelle de « design studies » (courant 2010), les scénarios de construction resteront à élaborer, les financements à obtenir, et la répartition des charges de construction à définir.

Le coût de l'instrument (nord et sud) est évalué autour de 250 M€ (consolidés), pour une contribution française de 45 M€ et 470 etp.

En 2009, 9 laboratoires (dont 3 de l'INSU : LUTH, LAOG et CESR) sont impliqués en France dans la préparation de CTA. Ces activités concernent 87 personnes pour un total de 30 etp (dont 7 etp dans les laboratoires de l'INSU).

Contrairement aux précédentes expériences du domaine des astroparticules, CTA fonctionnera véritablement en mode observatoire, c'est-à-dire qu'il sera ouvert aux communautés scientifiques des pays contributeurs.

CTA est une occasion scientifique de choix, car cet observatoire va ouvrir un domaine de sensibilité inexploré dans un domaine d'énergie où l'on ne connaît pas aujourd'hui d'approche alternative efficace. L'instrument améliore aussi la qualité par rapport aux instruments actuels. Le potentiel de découverte semble important, et on peut certainement en attendre une amélioration significative de notre compréhension des accélérateurs cosmiques dans la Voie lactée et au-delà. Il s'agit sans nul doute d'astronomie au sens propre. Il est donc très important, comme dans le cas de HESS I et II, de soutenir et d'encourager la participation des laboratoires de l'INSU.

Le groupe de prospective a par conséquent tenu à classer cet équipement lourd en priorité P1, derrière l'E-ELT, dans la catégorie des engagements supérieurs à 15 M€ (cf dernière partie du document : Synthèse).

Spectrographe multi-objets

Un spectrographe multi-objet grand champ est un besoin qui est apparu récemment dans deux champs d'investigation distincts : la cosmologie et la structure de notre Galaxie. Les cosmologistes sont intéressés à utiliser la mesure des oscillations baryoniques (BAO) pour caractériser l'évolution de la taille de l'Univers et tester ainsi les différents modèles concernant la nature de l'énergie noire. Les spécialistes de notre Galaxie voudraient déterminer comment les différentes composantes stellaires se sont assemblées en mesurant les vitesses radiales et les compositions chimiques de très grands échantillons d'étoiles (eg. suivi GAIA).

Pour la cosmologie des résolutions spectrales modérées sont suffisantes, R < 5 000, alors que la mesure précise des abondances chimiques dans les étoiles demande une résolution spectrale R > 20 000 et un grand rapport signal à bruit. En pratique il faut trouver le meilleur compromis entre la profondeur et la résolution spectrale, et un cas scientifique fort peut être à coup sûr construit pour des relevés utilisant des télescopes de 4 m ou 8 m.

Plusieurs scientifiques français ont contribué au projet Gemini de WFMOS qui visait à équiper le télescope Subaru d'un spectromètre à 4 000 fibres (implémentation impossible sur Gemini). Un quart des fibres dans cet instrument étaient dédiées à la spectroscopie à haute résolution pour « l'archéologie galactique ». Ce projet a été abandonné par le « board » de Gemini.

Un groupe de 26 cosmologistes français a proposé de participer au projet américain BIGBOSS prévu pour succéder à la troisième génération de relevé SDSS « BOSS » (au LAM et au LATT pour l'INSU). L'objectif de BIGBOSS est de positionner à volonté 4 000 fibres n'importe où dans les 7 degrés carrés du télescope de 4m de Kitt Peak. La contribution française serait dans la construction du spectrographe. Après 6 ans de fonctionnement à Kitt Peak l'instrument serait transporté au 4 m de CTIO pour couvrir l'hémisphère sud. Le budget total du projet est de 71 M$ pour une contribution française de 7,8 M€.

Le besoin en spectrographe grand champ multi-objets est aussi clairement ressorti de la prospective ASTRONET qui a mis en place un groupe de travail sur le sujet.

En comparaison de l'investissement demandé, la proposition de participation à l'instrument BIGBOSS ne présente pas suffisamment d'atouts pour pouvoir être soutenue devant les autres investissements proposés à notre communauté dans la catégorie des méso-investissements (5 à 15 M€) : l'instrument ne répond pas au besoin de la communauté stellaire française en général, ni au besoin particulier pour le suivi sol de la mission GAIA.
La communauté stellaire a identifié et exprimé un besoin clair. Elle doit maintenant se mobiliser pour traduire ce besoin en instrument et ne pas perdre de terrain dans la compétition internationale (cf instrument HERMES sur l'AAT). Il est en particulier crucial que le cœur de l'exploitation scientifique de GAIA reste en France.

Pour toutes ces raisons, le groupe de travail recommande de considérer la participation à un spectrographe multi-objets grand champ comme l'une des priorités de la communauté pour les engagements inférieurs à 5 M€. Il l'a classé en P1 dans cette catégorie (cf dernière partie du document : Synthèse). Une implémentation de cet instrument sur le CFHT est une bonne option à étudier. Elle participerait à renforcer notre stratégie pour conserver l'exploitation future du site.

Synthèse et priorités proposées

Dans ce chapitre nous reprenons les grandes lignes des recommandations issues du travail du groupe en terme d'évolution des TGE et des moyens nationaux, qui, en discussion avec la CSAA et les responsables des programmes nationaux et actions spécifiques, a proposé de mettre en avant quelques priorités fortes, amendées suite aux discussions du Colloque de La Londes les Maures qui les a endossées pour l'essentiel.

Evolution des sites et moyens nationaux

Le label « moyen national » de l'INSU n'est plus adapté aux outils d'observation astronomique sur les sites nationaux. En effet nos moyens lourds sont le plus souvent pris en charge dans le cadre de collaborations ou de sociétés internationales, et les activités d'astronomie sur le territoire national ont vocation à évoluer vers des projets portés par les OSUs.

En ce qui concerne les sites nationaux, TBL, OHP et Nançay, ils doivent donc tous évoluer vers un pilotage complet de leurs activités par leur(s) OSU(s) de rattachement (respectivement OMP, OAMP/PYTHEAS, OSUC et l'Observatoire de Paris). La montée en puissance des OSUs par la prise en main de la stratégie scientifique développée sur leurs sites ne doit pas signifier un désengagement de l'INSU qui doit continuer à appuyer les OSUs tout en conduisant la stratégie nationale de la discipline.

La question de l'évolution du dispositif « moyens nationaux » est donc une question importante qui a été discutée au Colloque de Prospective. La recommandation est que des négociations soient menées dès à présent entre l'INSU et les OSUs concernés pour que le transfert de compétences concernant le RTN, le T193 et le TBL devienne effectif au plus tard en 2012.

En revanche, le réseau temps-fréquence et le CDS sont des services qui justifient pleinement de porter le label de « moyen national » de l'INSU. La réflexion sur l'évolution des services d'observation pourrait faire apparaître d'autres infrastructures de ce type sur le territoire national.

Priorités pour de nouveaux TGE

En ce qui concerne les nouveaux investissements discutés, nous proposons de mettre en avant quelques opérations lourdes par ordre de priorités décroissantes, P0, P1, P2, et selon quatre catégories :

- - investissements supérieurs à 15 M€
- - investissements de 5 à 15 M€
- - investissements de 1 à 5 M€
- - projets à murir dont il faut soutenir la préparation

Dans les trois premières catégories les opérations que nous proposons d'afficher sont celles qui nous ont paru présenter le plus d'atout selon notre grille d'évaluation : intérêt scientifique, participation/structuration de la communauté française, faisabilité.

Pour la dernière catégorie il s'agit de projets moins mûr, ou à plus long terme, mais présentant un intérêt scientifique très fort, et que nous proposons d'afficher pour qu'ils soient soutenus prioritairement par l'INSU dans leur phase de préparation.

Les opérations plus légères (coût inférieur à 1 M€) ne sont pas discutées ici, elles dérivent directement de la prospective thématique. Leur engagement éventuel relèvera directement des tutelles, des programmes et de la CSAA.

Investissements supérieurs à 15 M€

- P0 : l'E-ELT

La course à l'ELT est engagée entre l'Amérique du nord et la communauté ESO. Le concept de l'E-ELT soutenu par l'ESO est maintenant crédible pour une première lumière en 2018 s'il est soutenu par tous les pays partenaires. Ce devrait être l'une des priorités de notre communauté, que ce soit en terme politique, ou en terme de préparation technologique.

- P1 : CTA

Successeur de HESS, sans compétition véritable au niveau mondial, CTA sera l'observatoire astronomique des photons de très haute énergie. Même si la participation française au niveau technique est principalement porté par l'IN2P3, la communauté AA de l'INSU a un rôle important à jouer dans le développement des moyens d'exploitation des données (logiciels, archivage, OV) et devrait en faire une de ses priorités pour l'exploitation scientifique.

Investissements de 5 à 15 M€

- P0 : IRAM/NOEMA

L'augmentation des capacités de l'interféromètre du Plateau de Bure permettrait à la communauté IRAM (Allemagne, France, Espagne) de garder sa prééminence dans le domaine de l'astronomie millimétrique. Au moment de la mise en service d'ALMA, ce serait un outil complémentaire qui avantagerait considérablement notre communauté dans la compétition internationale pour l'accès au temps d'observation d'ALMA.

- P1 : VSI et 2 télescopes auxiliaires

L'instrument VSI sur le VLTI ferait entrer l'interférométrie optique dans l'ère de l'imagerie. Il nécessiterait la construction de 2 télescopes auxiliaires en plus des 4 existants. La communauté française devrait pouvoir porter ce projet à l'ESO avec une contribution essentielle.

- P2 : participation au LSST

Le LSST est un concept de télescope révolutionnaire non pas par sa taille, mais par la taille de son champ de vue et son mode opératoire (relevé systématique dans les bandes photométriques visibles). Les participations techniques de la France sont portées principalement par l'IN2P3, mais la communauté AA devrait légitimement prendre sa place dans l'exploitation scientifique.

Investissements de 1 à 5 M€ :

- P0 : CFHT/SPIRou

Le spectro-polarimètre infrarouge SPIRou est le nouvel instrument

le plus convaincant pour le CFHT. Il exploite un créneau scientifique qui est une spécificité française : le magnétisme stellaire. Il devrait être engagé en toute première priorité.

- P1 : Spectrographe multi-objet grand champ et suivi GAIA

Le besoin d'un spectrographe multi-objet grand champ a été clairement identifié par ASTRONET, par nos communauté PNCG et PNPS, et mis en avant pour l'accompagnement de la mission spatiale GAIA. Le besoin pour le suivi de GAIA devient particulièrement urgent (lancement en 2012), et les projets concurrents se matérialisent. Notre communauté doit rapidement définir sa stratégie dans le domaine et l'engager effectivement. Il est bien évident qu'une implémentation sur le CFHT est intéressante car cela renforcerait notre stratégie pour conserver l'exploitation future du site.

Projets à mûrir dont il faut soutenir la préparation

Cette rubrique regroupe trois projets de nature très diverse qui ne peuvent être interclassés.

- préparation SKA

SKA est le grand projet de radioastronomie soutenu par l'ensemble de la communauté de radioastronomie au niveau mondial. Il a été classé après l'E-ELT par ASTRONET pour des raisons de faisabilité et de disponibilité des ressources. La préparation de SKA est déjà soutenue par la ligne de préparation des TGE futurs. Il faudrait continuer cette action et soutenir aussi la constitution d'une communauté scientifique utilisatrice en encourageant l'exploitation du projet LOFAR.

- préparation EST

L'EST sera le grand projet européen d'astronomie solaire. Il faudrait soutenir les équipes françaises qui préparent ce programme sur le budget de préparation des TGE futurs.

- CHFT/'IMAKA

L'imageur grand champ 'IMAKA présente un énorme potentiel scientifique. Il permettrait à notre communauté de continuer à profiter de la qualité astronomique exceptionnelle du site du CFHT. Ce projet devrait aussi pouvoir bénéficier du budget de préparation des TGE futurs.

R&D et les moyens du futur

J.-L. Beuzit (coordination), J.G. Cuby, N. Dimarcq, M. Giard, S. Guilloteau, R. Ibata, P. Kern, F. Pajot, G. Perrin, P. Von Balmoos

La R&D en astronomie-astrophysique couvre un large domaine de technologies.
Une partie importante des actions menées concerne le domaine optique depuis l'infra-rouge, le visible, et jusqu'à l'ultra-violet, sur les détecteurs, l'optique active et adaptative, la spectroscopie, les lasers, les fibres, et les revêtements des optiques. Le domaine radio, du submillimétrique au métrique, est l'objet d'actions de R&D notamment sur les détecteurs, les corrélateurs, et les circuits électroniques intégrés spécialisés. Des travaux sur les collecteurs, les spectromètres, et les détecteurs sont menés dans le domaine des hautes énergies. La physique fondamentale regroupe des actions de R&D sur la métrologie du temps, les systèmes de référence, et la gravitation. La R&D sur les logiciels concerne les outils de simulations pour l'aide à la conception, l'analyse de données y compris embarquée, le contrôle des processus temps réel ou non. Enfin sont étudiés des domaines technologiques connexes à la mise en oeuvre de l'instrumentation comme les matériaux, la cryogénie à très basse température, les senseurs.

Le bilan provisoire établi lors de cet exercice de prospective montre un niveau français de développement de R&D en astronomie élevé en regard de la moyenne européenne. Les actions menées sont bien adaptées aux projets en cours en astronomie, mais ne sont pas assez valorisées par ailleurs. Les phases de R&D amont doivent être préservées, et la coordination avec la R&D menée par le CNES doit être développée.

L'exercice de prospective a identifié le besoin d'organiser un colloque spécifique dédié à la R&D en astrophysique. Ce colloque se tiendra en 2012 et aura pour objectifs :

- d'établir le bilan de la R&D existante,
- d'en tirer des conclusions par grands domaines, en lien avec les priorités instrumentales définies par l'exercice de prospective en astronomie astrophysique ici présenté,
- d' assurer une meilleure visibilité des actions de R&D vis-à-vis de l'INSU,
- de mettre en valeur et développer les collaborations interdisciplinaires, en assurant une meilleure coordination avec les autres instituts et partenaires, et en négociant un meilleur accès aux plateformes technologiques,
- d'étudier l'opportunité de mettre en place un groupe de coordination et de suivi sur une base permanente pour INSU et la CSA.

Astrophysique de Laboratoire

M. Armengaud, Y. Bénilan, A. Canosa, L. d'Hendecourt, C. Joblin, (coordinatrice) I. Kleiner, P. Lemonde, F. Spiegelman, C. Stehlé, F. Thais

L'« Astrophysique de Laboratoire » a acquis en France une bonne visibilité internationale. C'est une activité incontournable d'accompagnement à l'exploitation scientifique des données astronomiques incluant maintenant l'analyse de la matière extraterrestre, in situ et en laboratoire. Elle s'appuie sur le développement de dispositifs expérimentaux dédiés et d'approches interdisciplinaires impliquant l'astrophysique, la physique et la chimie avec une interface notable avec les sciences de la Terre et de l'atmosphère. Cette diversité contribue à la pertinence des études réalisées. Pour les thématiques -- spectroscopie, plasmas chauds, microphysique, matière extraterrestre et analogues, et temps-fréquences --, on recense environ 140 ETP/an pour les chercheurs et 86 ETP/an pour le personnel technique pour un total de 55 M€ d'équipement et ~2,6 M€/an de fonctionnement. L'INSU fournit un soutien et une coordination en particulier par l'intermédiaire des programmes nationaux. Néanmoins, c'est une activité fragile qui ne s'inscrit pas suffisamment dans les missions des agences spatiales et repose souvent sur le dynamisme de quelques chercheurs motivés. Afin de limiter les effets de mode et pouvoir mener une véritable politique de fond, il est important que cette activité puisse constituer par elle-même un véritable champ disciplinaire et qu'une réflexion générale sur l'état de l'art et les évolutions souhaitées soit menée au niveau européen. De plus, la pérennisation de cette activité implique un soutien au financement récurrent du fonctionnement et de la jouvence des dispositifs expérimentaux, à la mise en place de chercheurs à profils interdisciplinaires et de personnels techniques permanents spécialisés, ainsi qu'à la reconnaissance, comme activité de service, de la collecte de données fondamentales validées expérimentalement qui enrichissent les bases de données au service des sciences de l'Univers. C'est un domaine où l'INSU a clairement la maîtrise d'œuvre et se doit de mener une politique inter-Instituts avec l'INP et l'INC ainsi qu'une politique européenne active.

Introduction

L'astrophysique de laboratoire est un outil incontournable d'accompagnement à l'exploitation scientifique des données astronomiques et à l'analyse de la matière extraterrestre. Son rôle ne peut que croître avec le développement d'observatoires au sol et dans l'espace qui permettent une couverture complète du spectre électromagnétique, ainsi qu'avec celui des sondes spatiales *in situ* qui sont de véritables laboratoires volants, capables d'orbiter longuement autour d'une planète, de prélever des échantillons solides et gazeux pour analyse et, plus rarement de les ramener sur Terre. Le besoin en données fondamentales (spectroscopie, réactivité, …) et dans la simulation des processus (jets stellaires, évolution de la matière, surfaces planétaires, …) est particulièrement important. Par exemple, il existe un manque crucial de données spectroscopiques dans le domaine sub-mm que ce soit pour le gaz ou les solides. Or ce domaine spectral est actuellement exploré par les missions européennes Herschel et Planck. La complexité de certains phénomènes attendus (physique des grains interstellaires, chimie de gaz froids, processus d'évolution chimique dans une atmosphère planétaire ou sur une surface, …), a rendu nécessaire le développement d'études en laboratoire de ces phénomènes avec des expériences dédiées de simulations et des approches interdisciplinaires impliquant l'astrophysique et d'autres domaines de la physique et de la chimie. Certaines de ces études ont une forte interface avec les sciences de la Terre et de l'atmosphère.

L'astrophysique de laboratoire est une activité attractive, dont l'apport à l'analyse des données en astronomie et en planétologie est essentiel. Cette activité a donc connu un développement notable depuis une dizaine d'années et la communauté française a acquis dans ce domaine une visibilité internationale forte (cf. par ex. la participation très importante de la France dans le réseau européen de formation *Molecular Universe*). Néanmoins, c'est une activité fragile. Elle ne s'inscrit pas suffisamment dans les missions des agences spatiales CNES et ESA alors qu'elle est traditionnellement fortement soutenue par la NASA. Il y a certes l'exception pour le CNES des dispositifs qui peuvent être présentés en accompagnement direct aux missions spatiales. L'INSU fournit un soutien et une coordination à l'astrophysique de laboratoire par l'intermédiaire des programmes nationaux (PCMI, PNP, PNPS).Toutefois, il convient de préciser que les PN ne disposant pas d'un budget suffisant pour mettre en place une véritable politique incitative en termes de développements instrumentaux, leur rôle est plutôt de structurer les activités, de leur donner un label scientifique et de soutenir le fonctionnement des expériences souvent sur une base pluri-annuelle. Au cours du temps, cette structuration a fini par converger vers une approche en réseau impliquant des laboratoires extérieurs à l'INSU dans lesquels un petit nombre d'équipes est intéressé pour trouver des débouchés « appliqués » au voisinage de leurs thèmes habituels, qui sont bien souvent ultra-spécialisés et manquent parfois de visibilité. L'apparente dispersion géographique et institutionnelle qui résulte du fonctionnement actuel de cette communauté est un handicap pour sa visibilité nationale dans notre discipline (AA). Cependant, la profonde immersion des équipes dans des laboratoires se situant plus dans « le cœur de métier », qu'il s'agisse de l'astrophysique, de la physique ou de la chimie, est un atout scientifique fort car elle contribue à la pertinence et à l'excellence des études réalisées. Dans les laboratoires INSU, la mise en place de nouveaux dispositifs expérimentaux relève rarement d'une stratégie politique globale de soutien de la composante et nécessite un investissement fort du chercheur responsable de l'opération pour trouver ses financements auprès de multiples partenaires (Régions, Universités, ANR, …). Il en est

souvent de même pour les ressources en personnels. Enfin, il apparaît nécessaire que les bases de données de type « physique de laboratoire », au sens très large, évoluent pour créer en quelque sorte un « laboratoire virtuel » accessible à tout astrophysicien cherchant à comprendre ses observations. Cependant le travail associé de collection, validation et mise à disposition des données de laboratoire implique un investissement humain lourd qui est souvent trop peu soutenu, aussi bien au niveau du recrutement que de la valorisation de carrière des chercheurs impliqués.

Ce document vise à dresser un bilan de l'activité d'astrophysique de laboratoire en France, en soulignant son potentiel, ses points forts et ses points faibles. Il fait des propositions concrètes sur les moyens indispensables à la structuration, au fonctionnement et à la pérennisation de cette activité. Pour alimenter cette réflexion, un questionnaire a été envoyé aux directeurs des laboratoires et aux équipes impliquées afin de recenser dans ce domaine, -i- les équipes, les thématiques et leur évolution, -ii- les moyens humains et financiers et identifier les besoins, et -iii- amener des éléments de réflexion sur l'amélioration du développement et de la structuration de cette activité par rapport aux enjeux astrophysiques. Ce questionnaire concerne les activités expérimentales et les activités théoriques qui sont souvent menées en lien étroit avec l'expérience. Ce travail a permis d'identifier cinq thématiques principales : 1) spectroscopie moléculaire et des solides, 2) plasma chauds/dynamique et propriétés microscopiques de la matière dense et chaude, 3) études des processus microphysiques, 4- matière extraterrestre : analyse *in situ* et analogues / simulations en laboratoire, et 5) métrologie temps-fréquence. Cette dernière thématique a été prise en compte dans cette étude car elle est essentiellement rattachée à l'INSU. Elle devrait néanmoins à terme se rapprocher de la physique fondamentale (voir chap. « Interdisciplinarité »).

Certaines activités, plus ancrées dans d'autres communautés, n'ont pas été détaillées, mais doivent être mentionnées. Il s'agit des activités liées à la physique nucléaire et les astroparticules (par exemple les calculs et mesures de sections efficaces), portées principalement par l'IN2P3, ou encore les études expérimentales de la dynamo naturelle (expérience en sodium liquide VKS du CEA, écoulement forcé par précession ATER au LUTH, …), à l'interface entre l'astrophysique et les sciences de la Terre et des planètes.

Positionnement des thématiques

Spectroscopie atomique, moléculaire et des solides

La spectroscopie joue un rôle très important en astrophysique puisqu'une très grande partie de l'information sur les milieux astrophysiques (composition, température, pression) provient de l'absorption, de l'émission ou de la diffusion des photons par la matière (gaz et solides). Ainsi, l'interprétation optimale des observations nécessite une parfaite maîtrise des modèles théoriques et des techniques d'analyse spectroscopiques, confrontés à des données expérimentales soigneusement recueillies en laboratoire, puis collectées dans des bases de données. Parmi les axes les plus importants, les efforts de la communauté spectroscopique se sont portés ces dernières années sur:

— L'élaboration d'inventaires complets des raies (contenant les positions, intensités, et largeurs de raies) de très nombreuses espèces, depuis les molécules diatomiques jusqu'aux molécules organiques plus complexes et leurs isotopes, ions, radicaux, …, dans le domaine sub-mm et IR lointain, jusqu'à environ 5 THz, domaine spectral peu étudié jusqu'à présent. Cet inventaire répond au besoin lié à la mission spatiale Herschel et plus spécifiquement au spectromètre hétérodyne HIFI ainsi qu'à l'interféromètre international ALMA qui va être mis en service. Ces instruments vont accroître spectaculairement le nombre de raies mesurées lors de relevés spectraux jusqu'à un niveau appelé « limite de confusion » où les raies faibles deviennent indénombrables. Ces travaux de spectroscopie ont déjà permis la détection de nombreuses nouvelles espèces, telles que les espèces isotopiques ^{13}C du formate de méthyle $HCOOCH_3$ (Fig. 1). Ces observations apportent des contraintes précises sur les processus de formation de molécules organiques, et rendent possibles l'identification d'autres espèces en identifiant un des porteurs de nombreuses raies faibles.

— Les analyses de spectres atmosphériques dans le domaine de l'infrarouge et de l'UV/visible tels ceux de l'atmosphère de Titan obtenus par la mission Cassini/Huygens, qui ont permis de nombreuses nouvelles détections correspondant principalement à des espèces organiques précédemment identifiées, à leurs isotopes ou à des états vibrationnels excités pour certaines bandes infrarouges. Cette approche multi longueurs d'onde permet de caractériser l'atmosphère depuis les très hautes altitudes jusqu'au sol. Des besoins subsistent, dans l'infrarouge et l'UV/visible, sur le spectre de molécules simples comme CH_4, CO_2 ou H_2O et de molécules organiques plus complexes pour interpréter les mesures de missions en cours telle que Cassini/Huygens ou la mission Venus Express. Les mesures de bandes induites par collisions et des profils de raies (surtout dans les ailes lointaines) sont importantes pour l'étude des atmosphères planétaires, notamment dans les fenêtres de transparence. L'ensemble de ces travaux est aussi pertinent pour l'observation et la modélisation des « Jupiters » chauds et des naines brunes.

— La spectroscopie infrarouge a permis de montrer la présence d'une phase solide abondante dans les nuages moléculaires, communément appelée « glaces sales » où l'eau domine ainsi que de nombreuses espèces (CO, CO_2, CH_4, CH_3OH, NH_3, mais aussi le formaldéhyde, l'acide acétique, l'urée, …). Ces glaces sont observées communément dans les protoétoiles et leur composition globale correspond tout à fait à ce qui est observé dans les comètes. Ce domaine important fait partie de l'exobiologie, une discipline en pleine expansion. Il s'agit d'élaborer des scénarios précis, sur le plan astrophysique, où l'arrivée de molécules organiques à la surface de planètes telluriques aurait ensuite contribué à l'apparition de la vie sur Terre et, pourquoi pas, sur d'autres « exo »planètes ?

— La spectroscopie infrarouge révèle en outre la présence de grains réfractaires à base de silicates, d'oxydes métalliques

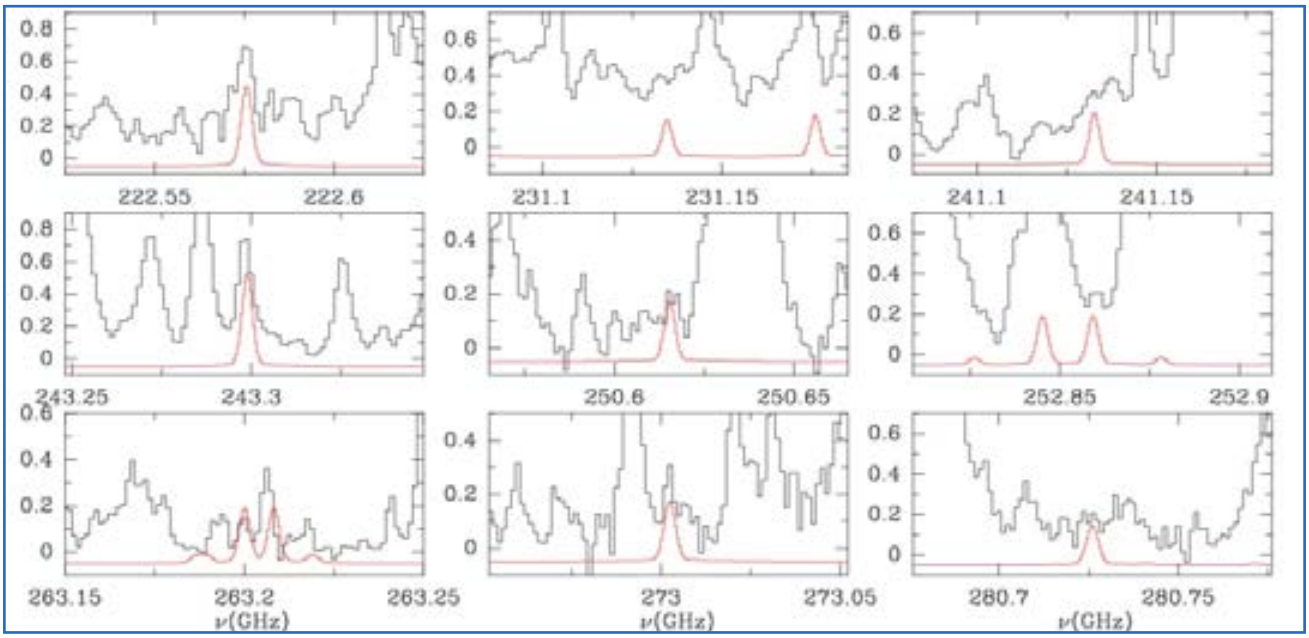


Fig. 1 : Première détection de l'espèce isotopique ^{13}C du formate de méthyle $HCOO^{13}CH_3$ dans Orion à l'aide du radiotélescope IRAM. Cette détection n'a pu être effectuée que grâce à une modélisation précise du spectre microonde de cette molécule, réalisée grâce à des études expérimentales et théoriques de laboratoire menées notamment au PhLAM, CESR et LISA. Spectre observé (en noir) comparé à la modélisation des raies de type A (en rouge). *Carvajal et al, 2009, A&A. 500, 1109.*

ou à base de carbone comprenant pratiquement toutes les phases du carbone (macromolécules polycycliques aromatiques hydrogénées, carbones amorphes, suies, diamant, matière organique complexe mais contenant de nombreuses fonctions chimiques, matière organique labile, …). L'observation de l'émission sub-mm de ces grains, incluant la polarisation, est actuellement en cours avec les missions Herschel et Planck et permettra d'avancer dans notre compréhension de leur nature à condition de disposer de mesures pertinentes en laboratoire.

— La spectroscopie atomique est un champ d'intérêt traditionnel pour les observations et la modélisation des milieux astrophysiques, en particulier les atmosphères stellaires et les environnements d'objets compacts. Elles mettent en jeu, en France, à la fois des études spectroscopiques (VUV et plasmas laser), des calculs d'élargissement des raies atomiques (rassemblés en particulier au sein de la base STARK B), et d'opacités monochromatiques ou intégrées sur la fréquence, d'accélération radiative pour les intérieurs stellaires, ainsi que des études sur la polarisation par impact, dédiées principalement à la physique solaire.

C'est un domaine qui bénéficie du positionnement d'excellence au niveau international de la spectroscopie atomique et moléculaire française. Un avantage supplémentaire est celui de la couverture spectrale multi-longueurs d'onde de l'UV lointain au mm. Un des risques, néanmoins, est le fort attrait des équipes de spectroscopie pour les études dédiées à l'atmosphère terrestre en raison des financements conséquents et des enjeux climatiques associés. Il faut donc s'assurer de ne pas perdre ces études pour l'astrophysique.

plasmas chauds/dynamique et propriétés microscopiques de la matière dense et chaude

Les plasmas concernent tous les milieux astrophysiques. A l'exception des plasmas du système solaire, traités dans la thématique « les relations Soleil-Terre », ils ne peuvent pas être étudiés *in situ*. C'est pourquoi s'est développé récemment un nouvel axe de recherches, concernant les études au laboratoire de plasmas dans les conditions *in situ* ou dans des conditions mises à l'échelle. L'approche fait en particulier appel aux grands lasers de la classe du kilojoule et à des installations électriques pulsées de puissance, de la classe du méga-ampère, en France et en Europe[1]. Les développements sont très liés aux problématiques de la fusion contrôlée par laser (HiPER en UE) et sont également soutenus par une forte activité numérique. Parmi les axes les plus visibles, citons :

— L'étude expérimentale, sur les grands lasers, des opacités de plasmas denses et chauds, permettant de valider et d'améliorer les calculs complexes d'opacité (OPACITY project, OPAL et LEDCOP pour les plus utilisés) et leurs produits dérivés tels que les accélérations radiatives, en lien avec la problématique de l'excitation des modes par « kappa mécanisme » et de transport d'énergie par rayonnement dans les intérieurs stellaires (COROT, KEPLER, PLATO, SoHO, PICARD). Il s'agit par exemple des opacités du fer et du nickel, moteurs essentiels de la pulsation des b-Céphéides. Parmi les perspectives citons les mesures d'opacité du fer, de l'oxygène et d'éléments intermédiaires pour mieux comprendre les phénomènes de transport de la région profonde du Soleil révélée par la sismologie. Ces mesures de spectres pourront aussi lever certaines ambiguïtés sur les spectres X (CHANDRA, IXO/XEUS).

— La question toujours non tranchée de la transition de phase de l'hydrogène dans les conditions des intérieurs de planètes géantes, avec une très bonne implication théorique de la France. Les études expérimentales sur installations lasers relatives aux équations d'état de l'hydrogène, du fer, …, sont fondamentales pour la planétologie et touchent les projets

1 les grandes installations de puissance sont pour la France : les lasers du LULI, de la LIL et bientôt PETAL et les installations électriques pulsées SPHINX/OEDIPE de la DGA à Gramat.

COROT, PLATO pour les exoplanètes et une grande partie des missions de planétologie.

— L'étude expérimentale des mécanismes de lancement des jets stellaires et de leur propagation dans un milieu ambiant réalisée sur des installations électriques pulsées (Z-pinch) à Londres et bientôt à Gramat, et surtout sur des lasers de puissance en France et à l'étranger. De nouveaux mécanismes de lancement des jets ont été proposés (Fig. 2), permettant d'expliquer la pulsation et la collimation.

— L'étude expérimentale et théorique des chocs radiatifs, présents dans les enveloppes stellaires ou dans le cadre de la formation stellaire et dans laquelle la communauté joue un rôle de leader. Les questions clefs sont ici la compréhension des mécanismes d'accrétion/éjection des étoiles et l'évaluation de leur taux de perte de masse et d'accrétion (JWST, ALMA, Herschel) ainsi que l'injection de turbulence dans le MIS.

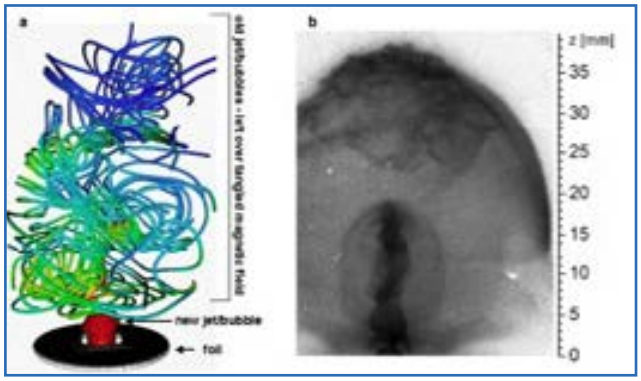


Fig. 2 : Bulles magnétiques et formation de jets pulsés : la question de la variabilité des jets stellaires pose la question de savoir si le jet est lancé de façon continue et modulée ou s'il est fragmenté. L'origine de la variabilité est inconnue. Les expériences menées sur des jets magnétisés produits par Z pinch et leur modélisation MHD montrent qu'il existe des mécanismes permettant de produire des jets MHD collimatés, et pulsés. De nouvelles expériences sur l'installation plus puissance de Gramat sont en cours. *Ciardi et al., 2009, ApJ, 691, L147*

La France a, dans ce domaine, un positionnement d'excellence au niveau international sur quelques niches (chocs, équations d'état, opacités). On peut citer par exemple sa contribution au réseau européen de formation JETSET. C'est une activité à l'interface avec les plasmas de fusion (confinement inertiel : projet HiPER) qui fait appel aux compétences techniques du CEA/DAM. Elle doit bénéficier prochainement d'un accès à des installations de classe mondiale (LIL/LMJ et Z pinch/Gramat). Néanmoins, c'est un sujet fragile de par i) les problèmes d'accès à certaines données sensibles et ii) la difficulté de maintenir dans le civil des compétences sur des sujets et des outils cruciaux pour l'astrophysique, mais parfois bien arides et à long terme (maintenance d'un code par exemple). C'est un domaine où il est indispensable d'assurer la visibilité astrophysique et d'en faire vivre les thématiques.

Etudes des processus microphysiques

Les études de microphysique visent à enrichir et à mieux contraindre les modèles physiques ou/et chimiques décrivant les différents environnements ou objets astrophysiques tels que les nuages interstellaires, les disques circumstellaires, les atmosphères stellaires ou planétaires ou encore la poussière interstellaire. Les questions abordées par cette thématique ont pour objectif l'amélioration de la compréhension de la formation et du devenir des nombreuses molécules interstellaires et planétaires observées depuis une quarantaine d'années grâce notamment à la radioastronomie, aux sondes spatiales et aux télescopes en orbite.

Elles traitent en particulier des vitesses de réaction et des voies de sortie des processus chimiques (réactions en phase gazeuse ion-molécule et neutre-neutre) sur un large domaine de température (5 - 1 000 K). Il est bon de noter par exemple que les modèles photochimiques les plus élaborés pour décrire la chimie au sein des nuages moléculaires, berceau des étoiles, contiennent plus de 4 000 processus et environ 450 espèces différentes. Seulement un tiers de ces processus a été étudié en laboratoire expérimentalement ou bien théoriquement.

Même si la phase gazeuse a été la plus étudiée, la chimie des milieux astrophysiques et des atmosphères planétaires s'accompagne d'une contribution tout aussi fondamentale de la chimie hétérogène impliquant des grains solides. Pour l'astrochimie, le cas le plus évident concerne la formation de H_2 mais également celle de molécules plus complexes comme le méthanol CH_3OH. Il est aussi reconnu que les grains jouent un rôle important dans l'enrichissement isotopique de molécules, des espèces doublement ou triplement deutérées ayant été observées. Ainsi des travaux sur la réactivité à l'interface gaz-surface ; sur la composition chimique des grains interstellaires et la caractérisation de leurs propriétés optiques (émissivité, opacité, …) sont indispensables.

L'étude du transfert d'énergie par collisions est également nécessaire pour réaliser une analyse correcte du transfert radiatif dans ces milieux où les observations ont montré que les molécules pouvaient être présentes dans des états fortement excités en particulier pour ce qui concerne leur rotation. Ces mécanismes jouent un rôle essentiel dans le refroidissement des nuages interstellaires et par extension dans l'effondrement gravitationnel conduisant à la formation de nouvelles étoiles. Ils interviennent également dans le refroidissement des hautes atmosphères planétaires.

Enfin, l'interaction entre la matière et d'une part les photons UV venant des étoiles et d'autre part les particules énergétiques, joue un rôle capital dans le taux d'ionisation des différents environnements et, de ce fait, a une influence directe sur la chimie qui peut ensuite s'y dérouler. Ainsi les sections efficaces d'irradiation dans l'UV (photodissociation et photoionisation) sont un sujet d'étude essentiel. Pour la dissociation, il est également important de déterminer les produits ou voies de sortie avec les rapports de branchement correspondants.

Notons que les processus moléculaires en phase gazeuse sont de nature essentiellement quantique : la compréhension des propriétés statiques et dynamiques des molécules (stabilité, réactivité, collisions, fragmentation, évaporation), des processus d'excitation électronique sous rayonnement et de relaxation sous forme électronique et ou vibrationnelle font de plus en plus appel de manière intensive, en complément des expériences, à la

simulation numérique impliquant des codes de chimie théorique et/ou de dynamique moléculaire quantique, semi-classique ou classique. Il en est de même pour les propriétés des particules à l'échelle nanométrique, ainsi que pour la compréhension des mécanismes d'interaction gaz-grain : processus inélastiques et réactivité à la surface des grains. La description d'un certain nombre de ces processus d'intérêt astrophysique/astrochimique reste un enjeu en simulation théorique. L'activité simulation implique notamment les laboratoires GRAAL, LAOG, LERMA, ISMO, LCT, LCPQ, LSMB, PIIM, UTINAM, MSME, ISM, PhLAM, LPMA, LASIM.

C'est une activité avec une reconnaissance internationale très forte, ce qui s'est traduit par exemple par un rôle moteur dans le réseau européen Molecular Universe. Elle s'appuie sur des dispositifs expérimentaux uniques au monde. Il y a également une forte implication en simulation et dynamique moléculaire quantique avec un assez large éventail de systèmes traités (diatomiques, petites polyatomiques, agrégats et grains, interaction molécule-grain). Beaucoup d'études concernent les molécules et grains carbonés, peu les silicates. L'implication de l'INSU et de l'INP dans ce domaine est indispensable en raison du coût significatif de fonctionnement et de jouvence des équipements et du personnel technique associé. Cette action reste néanmoins mal ou non coordonnée entre les deux Instituts.

Fig. 3 Des expériences de simulation de la réactivité chimique des glaces réalisées au PIIM (photo) ont permis de montrer qu'à partir de précurseurs CO_2 et méthylamine (CH_3NH_2), il est possible de produire au-delà de 50 K l'acide méthylcarbamique ($CH_3NHCOOH$) et son dérivé le méthylammonium méthylcarbamate [$CH_3NH_3^+$] [CH_3NHCOO^-]. Sous l'effet de rayonnement VUV ce dernier est converti en glycine qui se trouve sous la forme d'un sel réfractaire qui pourrait donc être présent dans les comètes. *Bossa et al., 2008, J. Phys. Chem. A, 112, 5113.*

Matière extraterrestre : analyse in situ et analogues / simulations en laboratoire

Le cycle de vie de la poussière, de sa naissance dans les étoiles évoluées (AGB), à son évolution dans le milieu interstellaire, puis à son incorporation dans les nuages moléculaires, passe ensuite par l'effondrement de ces nuages, la formation de disques à l'intérieur desquels planétésimaux, comètes et finalement planètes se forment. Les populations de grains interstellaires changent (a) sous l'action de la dynamique du gaz (chocs, turbulence), du rayonnement UV et des particules énergétiques dans le MIS diffus et, (b) par coagulation et formation de manteaux de glaces moléculaires dans les régions denses. Ces processus modifient la distribution de taille des grains ainsi que les abondances de leurs différentes populations, en particulier celle des petits grains nanométriques qui ont les plus fortes interactions avec le gaz. Ils modifient également les grains, chimiquement et structurellement, par exemple entre formes amorphe et cristalline des minéraux. Cette évolution des grains a des conséquences observables sur leur émission dans le domaine IR-submm, émission que l'on cherche à analyser à l'aide de modèles de la physique microscopique des grains et des processus astrophysiques affectant leurs propriétés. Dans ce domaine, les simulations en laboratoire sont indispensables pour avancer dans notre compréhension des observations. Ces simulations mettent en jeu des instruments mi-lourds dans des laboratoires INSU avec des ramifications extérieures vers des laboratoires de l'INP et de l'INC. Elles ont toujours fortement dépendu des nombreuses observations des objets du milieu inter/circum-stellaire et donc presque exclusivement de moyens de spectroscopie. Cependant, avec les développements rapides d'observations plus précises en résolutions spatiale et spectrale, se pose le problème incontournable de la comparaison avec des « objets » réels de notre système solaire, témoins privilégiés des premiers instants de la formation de celui-ci. Ainsi donc, l'étude des échantillons extraterrestres, une activité très importante chez les géochimistes, rejoint les préoccupations des astrochimistes des milieux inter et circumstellaires.

La sonde américaine *Stardust* a, pour la première fois ramené sur Terre, des échantillons en provenance d'une comète. Un des résultats marquants de Stardust concerne la minéralogie de la matière collectée qui est, pour partie celle provenant de condensation de minéraux à haute température et montre ainsi un important mélange radial de la matière du disque de l'intérieur vers l'extérieur, beaucoup plus froid. Ces analyses, complexes et originales sur de la matière extraterrestre *naturelle* permettront donc des confrontations avec ce qui peut être connu à distance des disques protostellaires par l'observation directe et donc par des méthodes astrophysiques classiques. Des efforts importants ont aussi été entrepris pour collecter sur Terre des grains de poussières interplanétaires, en particulier en Antarctique par la communauté française. La moisson est très riche en termes de quantité et est encore relativement peu exploitée. ***La très faible quantité de poussières collectées (environ dix millionnièmes de gramme) par Stardust a entraîné la mise au point d'instruments analytiques à l'échelle nanométrique, un développement pour lequel la France a largement participé. Ces études ont progressivement favorisé la convergence d'intérêts entre astrochimistes et géochimistes.*** Ceux-ci se sont dotés de dispositifs d'analyse mi-lourds telles les sondes ioniques (e.g. la NanoSIMS du Muséum) pour la mesure précise des fractionnements isotopiques à même de révéler les processus physico-chimiques à l'œuvre dans la nébuleuse primitive, et la spectrométrie de masse des gaz rares à Nancy dont les mesures apportent des informations précieuses sur les conditions physiques et de primo-évolution de la nébuleuse solaire. *Stardust* a ainsi réussi

à fédérer considérablement la communauté française intéressée par l'analyse de ce type d'échantillons ce qui s'est concrétisé par la création d'un consortium « Stardust » soutenu par le CNES. Les techniques analytiques complémentaires (microscopie IR sur SOLEIL, micro-Raman, analyse EDX sur l'ESRF à Grenoble,…) et des expériences plus ciblées vers l'exploration future d'un noyau cométaire par la sonde *Rosetta* (spectres de masse à temps de vol, GC-MS) ont foisonné ces dernières années. La complexité de cette dernière mission en termes d'analyse *in situ* justifie très certainement un effort particulier de simulations en laboratoire pour l'interprétation des futures données. Notons que ces missions cométaires apportent une contribution importante aux problématiques de l'exobiologie.

Un thème porteur pour l'avenir pourrait donc être celui de retours d'échantillons de matière extraterrestre : cométaires, astéroïdaux puis, rejoignant les problèmes de planétologie mais aussi d'exobiologie, d'échantillons martiens. Cependant, la perspective de futurs retours ne semble pas aussi brillante qu'on aurait pu le supposer il y a cinq ans. Les échantillons de *Stardust* constituent une réserve vraiment très faible et les futures missions ne sont pas pour l'instant très bien définies. Le retour sur Terre d'un échantillon important en masse (100 g) de Phobos vers 2012 semble être la mission à court terme la plus réaliste. La mission Marco-Polo qui rapporterait là encore une quantité importante d'échantillons (100 g) n'est pas prévue avant 2018. Finalement, un retour d'échantillons martiens, avec des quantités importantes et bien sélectionnées d'échantillons (500 g) serait un événement majeur dans les domaines de l'étude de la formation et de l'évolution planétaire ainsi que celui de l'exobiologie. Devant l'importance de ces possibilités et l'intérêt et la structuration de la communauté, la question de l'installation en France d'un centre de réception des échantillons (protection planétaire comprise) pourrait se poser. ***Toutefois, il est bon de souligner que les meilleures***

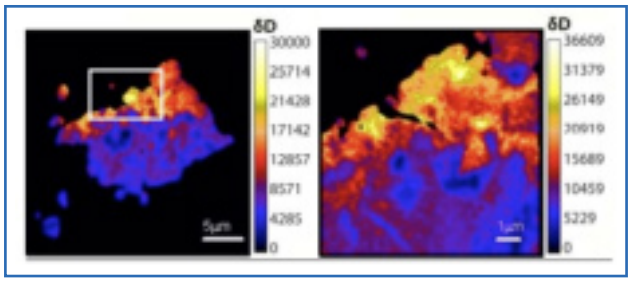


Fig. 4 : Image d'une micrométéorite ultracarbonée, écrasée sur une feuille d'or et montrant l'enrichissement en deutérium de la matière organique, résolu spatialement. Cliché obtenu à l'aide de la NanoSIMS du MNHN. *Duprat et al. 2009, LPI, 40, 1724.*

prévisions de retour d'échantillons martiens ne sont pas avant 2025 et donc ces développements ne pourront se faire que sur le long terme et probablement à l'échelle européenne compte tenu du coût prévisible d'un laboratoire de type P4.

Il faut ajouter aux simulations de laboratoire celles relatives aux surfaces planétaires qui ont elles aussi un potentiel exobiologique indéniable lorsque l'on considère la surface de Mars et les problèmes de l'atmosphère de Titan. L'une Mars, représente une surface qui a peu évolué au cours du temps et a connu des conditions initiales semblables à celles de la Terre. La découverte de phyllo-silicates suggère la présence de l'eau liquide mais d'autres processus d'altération de la surface sont à étudier, en étroite relation avec les nombreuses observations, en particulier minéralogiques de Mars et les simulations en laboratoire sont ici précieuses. Les processus de production d'aérosols organiques dans l'atmosphère de Titan sont également directement accessibles à la simulation et peuvent être confrontées aux données *in situ*. Finalement les surfaces de petits corps en tous genres (astéroïdes de différents types), qui ont subi de nombreuses altérations dues à un environnement spatial particulier (irradiations par des particules chargées, bombardement météoritique, …) ne peuvent être expliquées que par des simulations dont le résultat est essentiel pour la meilleure exploitation possible des missions spatiales en cours ou futures.

La communauté française a clairement un potentiel important pour l'étude de la matière extraterrestre. L'étude de cette matière bénéficie de l'implication des géochimistes/cosmochimistes qui étudient les conditions initiales de formation de notre système solaire avec des moyens analytiques plus fins et plus divers. Une activité d'astrophysique de laboratoire s'est développée dans certains laboratoires spatiaux en accompagnement à la préparation et à l'exploitation des missions spatiales. Celle-ci peut néanmoins se trouver fragilisée par rapport aux vocations premières du laboratoire.

Métrologie temps-fréquence

Le temps-fréquence (TF) constitue un des piliers traditionnels de plusieurs champs astrophysiques : il fournit ainsi les données de référence pour les applications liées au VLBI, aux systèmes de navigation par satellites (GPS aujourd'hui, Galileo demain), au suivi des pulsars, au laser Lune, au contrôle du déplacement des sondes du système solaire (via le DSN). Pour l'avenir plusieurs

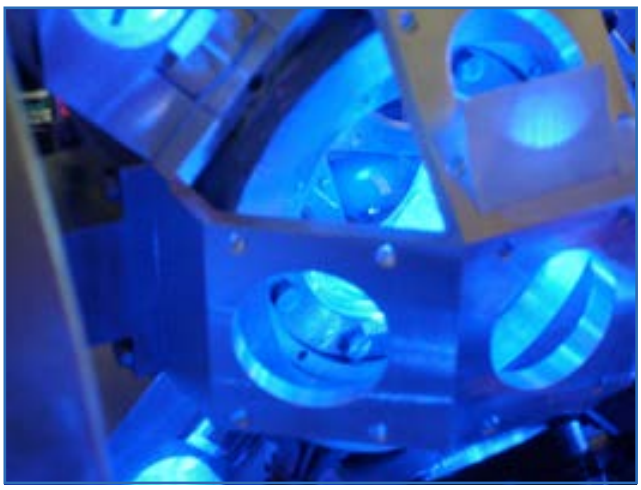


Fig. 5 : Atomes froids de strontium dans une horloge optique à atomes piégés (SYRTE). Les horloges optiques en cours de développement constituent la nouvelle génération d'horloges à atomes froids, avec des performances attendues 1 à 2 ordres de grandeur meilleures que celles de la première génération, les fontaines atomiques. La France possède un parc unique au monde de fontaines atomiques opérationnelles et prend de ce fait un poids prépondérant dans la réalisation de la seconde et des échelles de temps internationales.

applications nouvelles sont envisagées qui nécessiteront ou nécessitent déjà l'emploi de techniques TF à l'état de l'art du domaine. C'est le cas par exemple de la synchronisation

des différentes antennes du SKA ou du référencement de spectrographes au moyen de peignes de fréquence femto-seconde (avec des applications en particulier à la détection d'exoplanètes par la mesure de la modulation de l'effet Doppler de l'étoile autour de laquelle gravite la planète). Le développement de ce dernier point pourrait évoluer vers la détection, cohérente en phase, de la lumière reçue par les télescopes, permettant d'abaisser les seuils de détectivité ou de progresser vers un VLBI dans le domaine optique. Enfin, les techniques de TF, en particulier en ce qui concerne la stabilisation en fréquence des lasers, sont un des éléments clés des détecteurs d'ondes gravitationnelles. C'est le cas pour les détecteurs terrestres existants (VIRGO, LIGO, ...) et sans doute plus encore pour le détecteur spatial LISA dont la fenêtre de détectivité se situe à très basse fréquence (typiquement 100 µHz - 10 mHz), c'est-à-dire là où l'utilisation de références atomiques est pertinente.

Par ailleurs, les activités plus spécifiquement de laboratoire permettent d'extraire des données complémentaires de mesures astrophysiques. C'est le cas par exemple des tests de stabilité des constantes fondamentales réalisés par comparaison d'horloges atomiques utilisant des atomes de nature différente. Outre le fait de fournir de nouvelles transitions atomiques de référence, ces mesures sont aux confins de la physique fondamentale et de la cosmologie.

De manière générale, la communauté française est particulièrement bien positionnée au niveau international. En particulier, elle joue un rôle leader depuis plus de 15 ans dans le développement d'horloges à atomes refroidis par laser (fontaines atomiques puis horloges optiques à atomes froids depuis le début des années 2000) et de nouvelles méthodes de comparaison d'horloges en particulier les comparaisons à distance par fibre optique. Son parc d'étalons primaires est unique au monde et prend une part prépondérante dans la réalisation de la seconde et des échelles de temps internationales. ***En revanche, malgré des progrès très significatifs au cours des deux dernières années, la communauté française a un poids plus faible dans le développement de peignes de fréquence femto-seconde et applications, en particulier vis-à-vis de l'Allemagne (ou sont nés les peignes de fréquence) et des Etats-Unis. Enfin, la France est quasi-absente du développement d'horloges optiques à ion piégé dont les performances attendues aujourd'hui sont comparables à celles des horloges optiques à atomes piégés.***

Etat des lieux

Les laboratoires

La répartition des laboratoires impliqués (Fig. 6) montre que l'Institut de Physique (et l'INSU-AA) domine l'activité de spectroscopie et est aussi largement impliqué dans les thématiques plasmas chauds et microphysique. Pour la partie temps-fréquence, le rattachement des laboratoires est uniquement INSU-AA alors que le personnel est principalement rattaché à la physique.

Les personnels

L'activité concerne environ 140 ETP/an pour les chercheurs et enseignants chercheurs sur les thématiques –(1)- a –(5) : spectroscopie, plasmas chauds, microphysique, matière extraterrestre et analogues, et temps-fréquences. Dans les thématiques –(1)- à –(3)- : spectroscopie, plasmas et microphysique, les chercheurs sont principalement rattachés à la section 4 du CNRS et à la section 30 du CNU. Les autres sections concernées sont 17, 14, 13, 6, 10 pour le CNRS et 34, 31, 32 et 28 pour le CNU. Pour la thématique matière extraterrestre, on peut noter au CNRS un rattachement important à la section 18 et une participation des sections 3, 12, 13, et 16 ainsi qu'une participation de personnel MNHM (Muséum). Pour la thématique -(5)- temps-

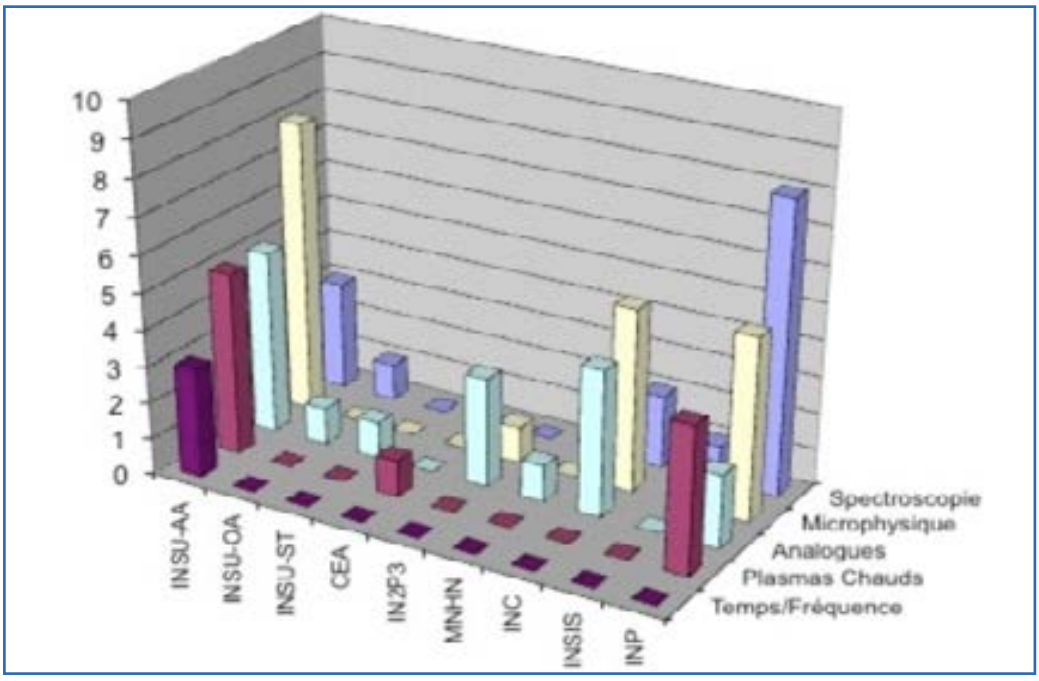


Fig. 6 : Répartition des laboratoires impliqués dans l'astrophysique de laboratoire selon leur origine (Instituts du CNRS ou autres organismes) établie sur la base des questionnaires reçus.

fréquence, les chercheurs sont principalement rattachés aux sections 4 et 8 du CNRS ou au LNE.

Le personnel ingénieur et technicien a une implication importante avec environ 86 ETP / an hors services généraux. Cette activité concerne principalement l'instrumentation et le fonctionnement des plateformes d'analyse avec une participation à l'informatique en particulier pour le développement de codes et les bases de données. La répartition est de 64 / 22 / 14 % dans la BAP C, E et B respectivement avec une répartition selon le grade de 30 / 28 / 15 / 27 % pour IR/IE/AI/T. La division AA de l'INSU ne fournit que 23 ETP / an pour les activités d'astrophysique de laboratoire, les instituts de physique et de chimie fournissent l'essentiel des moyens en ITA. Il y a 8 ETP / an sur CDD.

Equipements, codes numériques, bases de données et fonctionnement

Les moyens expérimentaux mis en jeu sont : -(i)- l'utilisation de très grandes infrastructures de recherche (TGIR), -(ii)- des dispositifs spécifiques implantés dans les laboratoires avec souvent une part importante de développements instrumentaux et –(iii)- des plateformes analytiques. Les TGIR concernées sont le rayonnement synchrotron (SOLEIL avec en particulier les lignes AILES et SMIS pour l'IR/FIR et DESIRS pour l'UV, l'ESRF), les sources de particules énergétiques (le GANIL ; à noter TANDEM même si hors TGIR) et les lasers de puissance (LULI, ALISE, LIL/LMJ, OEDIPE/SPHINX, et des installations européennes).

Concernant les dispositifs expérimentaux dans les laboratoires :

- (1) La spectroscopie est dotée d'un parc instrumental d'excellente qualité et couvre du domaine micro-onde à l'UV lointain. Alors que les moyens de spectrométrie micro-onde, sub-mm, mm et THz de pointe sont centralisés dans un ou deux laboratoires de l'INP (PhLAM, LPCA) il existe un certain nombre de dispositifs de spectroscopie infrarouge et UV incluant les techniques de Transformée de Fourier TF et lasers ainsi que quelques dispositifs de *Cavity Ring Down Spectroscopy* (LSP, LPM, LISA, LADIR, LPMAA, GSMA, LERMA, IAS, CESR, …). Le coût de l'ensemble de ces équipements est estimé à ~6 M€ avec un fonctionnement de ~220 k€/an Beaucoup de ces équipements sont cependant cofinancés par des organismes de recherche ou des projets liés aux études sur l'atmosphère terrestre.
- (2) Les études sur les plasmas chauds reposent sur l'utilisation des TGIR avec un coût annuel pour 4 à 5 campagnes expérimentales de 70 k€ en développement d'instrumentation et de 50 k€ en fonctionnement.
- (3) Les études de réactivité en phase gazeuse ou sur surface dédiées à l'astrochimie et à la planétologie ont amené un certain nombre de développements spécifiques comme FORMOLISM (LERMA), Faisceaux Croisés (ISM), PIRENEA (CESR), SUMO (LPCMR), ORBITRAP (LPG), CRESU (IPR), SIMPA (LKB), et SETUP (LISA). Ces équipements représentent un coût de ~12 M€ et le fonctionnement annuel est estimé à ~450 k€.
- (4) Les études sur les analogues et la matière extraterrestre impliquent des dispositifs de simulations d'évolution de la matière en ambiance interstellaire, cométaire ou planétaire comme SICAL et MICMOC (IAS), Nanograins (LPPM), SEMAPHORE Cométaire et OREGOC (LISA) et en partie PIRENEA (CESR) et Orbitrap (LPG). Cette thématique nécessite également l'utilisation de plateformes analytiques : sondes ioniques, spectromètres de masse, spectromètres IR à TF, microscopes IR et Raman, analyses de type GCMS/pyrolyse pour la matière organique. Le coût en matériel estimé est de ~22 M€ pour les dispositifs d'analyse et de 7 M€ pour les expériences de simulations avec un coût de fonctionnement estimé à 640 et 360 k€/an respectivement.
- (5) Les études en laboratoire de temps-fréquence reposent sur les plateformes expérimentales des laboratoires SYRTE, UTINAM et GEO-AZUR : horloges atomiques commerciales, étalons primaires dont horloges à atomes froids, horloges optiques expérimentales en cours de développement, horloges compactes, ainsi que les équipements destinés à la comparaison d'horloges locales ou à grande distance. Le coût en équipement est estimé à ~8 M€ et en fonctionnement à ~850 k€/an.

L'activité repose aussi sur des codes numériques en partie développés dans les laboratoires eux-mêmes : codes de simulations de spectres, calculs de chimie quantique et de dynamique moléculaire, codes de physique dédiés pour les propriétés microscopiques des plasmas et simulations hydrodynamiques numériques lourdes incluant l'effet du champ magnétique et du rayonnement pour la modélisation des écoulements de laboratoire et de leurs homologues astrophysiques. Cette activité implique l'utilisation de centres de calculs (IDRIS, CCRT, CINES). Cf. Chapitre « Calcul, Logiciel, Archivage, OV ».

Il y a également une contribution aux bases de données dans un cadre international ou plus local (ex : bases NIST, JPL, HITRAN, GEISA et CDMS pour la spectroscopie IR et mm du gaz ; action en cours au LPG sur les solides ; BASECOL (Observatoire de Paris) pour les coefficients de collision qui a débouché sur une action internationale dans l'Observatoire Virtuel pour la mise à disposition des données de physique atomique et moléculaire, et le pilotage du réseau européen VAMDC ; base KIDA au LAB pour la cinétique chimique ; OPACITY /IRON project au LERMA et base ODALISC du CEA pour les plasmas).

Quels moyens pour l'avenir?

Dans le domaine de l'astrophysique de laboratoire, la France est très bien positionnée au niveau international. Ceci est dû à un certain nombre de domaines d'excellence en spectroscopie atomique et moléculaire, dans l'étude des chocs et de l'équation d'état, en microphysique avec à la fois une forte implication en simulation et dynamique moléculaire quantique et la mise en place de dispositifs expérimentaux uniques au monde. Sont concernées également les études sur la matière extraterrestre avec une synergie de plus en plus grande avec la géochimie/cosmochimie et un potentiel important pour l'étude de la matière organique.

Enfin, la communauté française est leader depuis plus de 15 ans dans le développement d'horloges à atomes refroidis par laser. Ce positionnement d'excellence se retrouve dans le rôle moteur que joue notre communauté dans les réseaux européens comme *Molecular Universe, Europlanet et Jetset.*

Malgré cette visibilité internationale et le fait qu'il s'agisse d'une activité attractive, l'astrophysique de laboratoire est une activité fragile dont la pérennisation ne peut reposer que sur le dynamisme de quelques chercheurs motivés dans chaque pôle. Une réelle politique doit être mise en place au niveau national et au niveau international (européen) pour soutenir cette activité qui repose sur un champ d'expertise interdisciplinaire et des dispositifs dédiés qu'il va falloir préserver tout en restant au plus proche des problématiques astrophysiques.

L'astrophysique de laboratoire comme thématique de recherche

L'astrophysique de laboratoire est par essence interdisciplinaire et doit le rester. Il faut cependant s'assurer qu'elle constitue un véritable champ disciplinaire et ne résulte pas uniquement d'un choix de champs d'applications au gré de financements ou de collaborations plus ou moins ponctuelles. Par exemple, la spectroscopie reçoit des financements conséquents pour les études sur l'atmosphère terrestre, les études sur les plasmas sont stimulées par les recherches sur les plasmas de fusion pour la partie civile (confinement inertiel : projet HiPER) et s'appuient aussi sur les compétences du CEA. L'« astrophysique de laboratoire » n'est pas de taille à revendiquer la constitution d'une commission interdisciplinaire du comité national. Il est donc nécessaire qu'elle apparaisse clairement comme une thématique de l'astrophysique. Les Sciences de la Terre ont su mettre en avant un thème « modélisation, expérimentation et instrumentation» (cf. section 18 du CNRS) dans lequel une partie de l'astrophysique de laboratoire (thème **-(4)-**) pourrait se reconnaître. La section 4 du CNRS (Physique) fait apparaître l'environnement et l'astrophysique comme champs possibles d'application mais cette section ne peut être motrice dans ce domaine. Une interaction forte avec l'astrophysique est de toute façon nécessaire pour faire vivre cette thématique sur le long terme. ***Il est donc indispensable que l'activité d'astrophysique de laboratoire fasse partie des thématiques affichées par la section 17 du CNRS et que cette section 17 soit le point de rattachement principal de cette activité, tout comme la section 34 du CNU. Une bonne gestion des postes interdisciplinaires reste nécessaire. C'est un exercice difficile pour lequel il va falloir savoir définir une liste de critères adaptés.***

Structuration

Afin d'optimiser le retour scientifique du flot de données astronomiques, il est nécessaire que l'activité d'astrophysique de laboratoire soit à la fois dotée de moyens conséquents et structurée. Aux réponses de la communauté, il est clair que les programmes nationaux (PNP, PCMI, PNPS) et le PIR EPOV jouent un rôle important. Il faut souligner également le rôle d'animation scientifique des GdR (e.g. SpecMo). Il est souhaitable que la structuration scientifique reste proche des questions astrophysiques d'où le rôle majeur que jouent les programmes INSU. L'expertise en physique et chimie doit également être maintenue d'où le rôle de programmes tels que PCMI pour maintenir une dynamique interdisciplinaire, ce qui implique aussi la mise en place d'une politique inter-instituts, INSU/INP/INC. Les PN INSU dans leur forme actuelle ne sont pas dotés de budgets suffisants pour assurer une véritable politique incitative sur les développements instrumentaux. Le jeu des multiples demandes et l'individualisation des critères d'évaluation peut alors conduire à des développements guidés par des effets de mode, au détriment d'une véritable politique de fond. ***Il semble important qu'une réflexion générale sur l'état de l'art soit menée et publiée. Cette réflexion devrait s'étendre au niveau européen en allant au delà du document actuel d'ASTRONET, et être menée par thématique astrophysique. Cette réflexion existe du côté américain depuis plusieurs années avec un travail déjà conséquent et exemplaire et dont on peut imaginer l'utilité immédiate pour des instances comme la NASA ou la NSF pour mettre en place leur politique scientifique*** (http://www.aas.org/labastro/lawg_charter.php). Le retard européen en la matière n'est pas un effet du hasard si on observe que cette activité de laboratoire ne s'inscrit pas dans les missions du CNES et de l'ESA alors que c'est bien le cas pour la NASA.

Financement

Le soutien à l'astrophysique de laboratoire implique un coût significatif de fonctionnement et de jouvence des équipements. Le nombre de dispositifs expérimentaux est amené à se développer ; c'est déjà le cas en particulier sous l'impulsion de l'ANR. Afin de pérenniser cette activité, il est donc nécessaire de trouver un financement récurrent qui de fait est en partie couvert par les PN mais doit aussi pouvoir bénéficier de ressources supplémentaires. Cette réflexion a commencé dans le cadre de l'exercice d'ASTRONET avec un certain nombre de suggestions comme celle de mieux intégrer son coût dans les grands projets de l'astronomie. Cependant, pour cette activité, le résultat du premier appel d'offres d'ASTRONET est décevant voire minimaliste. D'autre part, il est fortement souhaitable que l'affectation du budget soit faite sur la base d'une réflexion en amont comme mentionné précédemment en incluant un état des lieux détaillé. Il n'est pas souhaitable de s'appuyer uniquement sur des choix ciblés faits par les consortia des projets d'astronomie concernés. Le document ASTRONET met également en priorité un effort très conséquent pour la mise en service d'un laboratoire sécurisé (qualité P4) motivé par le retour de matériaux planétaires (Mars). Nous soulevons la question de l'opportunité de développer un tel site compte tenu des très lourds investissements en jeu. En tout cas, les échéances se situent au delà des dix années à venir.

Personnel

La spécificité et la complexité des dispositifs expérimentaux mis en jeu dans l'astrophysique de laboratoire nécessitent une expertise et un suivi technique sur le long terme. La réponse au questionnaire fait apparaître une demande relativement importante en recrutement d'ingénieurs et techniciens (IT) pour les quatre prochaines années : 22 dont 9 sont présentées par des laboratoires AA. Il y a néanmoins un réel phénomène d'autocensure de la part des équipes dans ces demandes ; l'astrophysique de laboratoire n'est pas une activité prioritaire dans les laboratoires, en particulier spatiaux, et est donc forcément pénalisée en période

de restrictions de postes. Il en est de même de la carrière des IT impliqués. Il est vraisemblable que le manque d'IT soit en partie compensé par le recrutement de doctorants et de post-doctorants mais cette situation est peu satisfaisante. ***L'astrophysique de laboratoire doit pouvoir bénéficier d'un support technique conséquent, adapté et pérenne.***

La réponse au questionnaire fait apparaître un besoin en postes de chercheurs *interdisciplinaires* entre l'astrophysique / la planétologie et la physique expérimentale (CNRS 4, CNU 30) ou la physico-chimie plutôt théorique (CNRS 13, CNU 31). Sur la période 2005-2009, il y a eu deux recrutements interdisciplinaires dans la section 17 dont un avec la section 4 sur les horloges atomiques qui peut être rattaché à l'astrophysique de laboratoire. ***Il est indispensable que le nombre de postes interdisciplinaires augmente sensiblement dans les années à venir, en accord avec la prospective affichée par le CNRS. Les critères de recrutement doivent pour cela être reconsidérés avec une meilleure identification des vecteurs de l'interdisciplinarité et une focalisation moindre sur des compétences monodisciplinaires.*** Ceci nécessite d'impliquer des experts de l'interdisciplinarité ou au moins d'élaborer avec ceux-ci une liste de critères spécifiques. Le bilan actuel est que le jeune recruté éprouve des difficultés à se positionner dans sa nouvelle communauté d'autant plus qu'il reste souvent évalué par sa communauté d'origine. ***La mise en place de thèses interdisciplinaires est indispensable pour assurer la formation des futurs chercheurs interdisciplinaires.***

Enfin, la collection, la validation et la mise à disposition des données constituent un lourd investissement qui doit être pris en compte et valorisé. ***Pour encourager cet exercice indispensable à la communauté, les tâches autour des bases de données doivent pouvoir être prises en compte dans un service d'observation, ce qui implique aussi l'affectation de postes CNAP sur ces activités.***

Conclusion

Compte tenu des très importants investissements consentis dans le spatial et dans les grands instruments au sol, il semble naturel de développer en parallèle un investissement soutenu dans la capacité à tirer le meilleur profit scientifique de ces missions et de ces observations par le développement d'une discipline « astrophysique de laboratoire ». Celle-ci doit être conçue de manière rationnelle, développant résolument le champ interdisciplinaire mais conservant la maîtrise astrophysique des programmes en amont. C'est ainsi qu'avaient été conçues les premières expériences et c'est dans cette optique que le développement doit se poursuivre. La construction de bases de données multiples et interconnectées, la mise en place et la pérennisation d'équipements mi-lourds spécifiquement dédiés, l'utilisation de grands équipements de la physique (rayonnement synchrotron, lasers de puissance…), l'interconnexion avec les observations astrophysiques et la mise en place de cursus plus spécifiques dans les formations des étudiants sont des objectifs réalistes et focalisés qui demandent un investissement régulier et soutenu de la part des instances. ***L'INSU a clairement la maîtrise de cette action et se doit de mener une politique inter-Instituts avec l'INP et l'INC et une politique européenne autour des structures existantes (ASTRONET, ESF) ou de structures à définir rapidement***

Calcul, archivage, OV, logiciels

D. Aubert, E. Audit (coordinateur), K. Bocchialini, F. Combes, F. Genova, P. Hennebelle, F. Le Petit, Y. Ponty et R. Teyssier, avec une contribution de F. Masset.

Ce rapport présente à la fois la prospective liée au calcul intensif sous ses divers aspects (matériel, logiciel et humain) ainsi que celle de l'Observatoire Virtuel. Ces deux thématiques n'ont pas de lien particulier, mais elles ont cependant évolué de manière assez semblable au cours des dernières années. En effet, dans les deux cas, un effort déterminant a été réalisé au niveau national et une structuration importante est en train de se mettre en place au niveau européen. Dans ces deux domaines, il est donc essentiel de pérenniser et de valoriser au mieux les investissements réalisés en France mais également d'assurer une présence au meilleur niveau des équipes françaises dans le dispositif européen en émergence. Comme cela est clairement indiqué dans la prospective ASTRONET, les équipements de calcul et d'archivage de données ainsi que l'Observatoire Virtuel font partie intégrante de l'infrastructure de recherche et leur développement doit suivre celui des moyens d'observations.

Calcul

Les grands défis scientifiques

Le calcul intensif est devenu un outil indispensable pour la plupart des thématiques astrophysiques. C'est à la fois un moyen de mener des études théoriques mais aussi un outil pour interpréter et valoriser les observations. Nous présentons ici les grands défis scientifiques qui pourront être abordés par le calcul intensif dans les années à venir. L'accès aux grands calculateurs nationaux puis à la futur machine *Petaflopique* européenne qui sera installée au TGCC (Très Grand Centre de Calcul) permet d'accroître les résolutions spatiales et temporelles, ce qui est crucial pour résoudre les problèmes de couplages d'échelles inhérents à l'astrophysique, mais aussi de faire des modèles incorporant une physique plus complexe et plus réaliste.

Le découpage thématique utilisé dans la suite reprend celui des programmes nationaux.

Formation et évolution du Soleil et des étoiles, interactions Terre-Soleil (PNST, PNPS)

La dynamique, la formation et l'évolution des étoiles, la propagation du vent solaire, son interaction avec la magnétosphère terrestre et la dynamo terrestre, sont clairement liés à la physique des plasmas chaud ou froid, et à leurs approximations fluides (MHD, MHD + effet gyro-cinétique). Ces phénomènes sont fortement non linéaires et turbulents, ils nécessitent généralement une approche numérique lourde.

Il y a plusieurs enjeux du point de vue numérique pour cette science. D'une manière générale, il faut faire évoluer les codes pour les rendre efficaces sur les machines «many-core» (plus de 1 000 processeurs). Il s'agira d'atteindre des régimes turbulents capables de reproduire le cycle solaire dans des simulations 3D, mais surtout d'obtenir une gamme plus large d'échelles spatiales. On pourra accroitre la description des mécanismes de reconnexion magnétique, pour comprendre les phénomènes de jets à la surface et le chauffage de la couronne solaire.

Un autre défi, sera l'assimilation de données réelles dans des simulations. En effet l'intégration des observations spatiales/sols pourra contraindre les observables et valider les prédictions numériques.

De plus, un autre enjeu est la combinaison de différents codes permettant l'interface entre des domaines distincts (zone convective, couronne solaire, vent solaire, magnétosphère terrestre ou planétaire, domaines d'échelle proche du rayon de Larmor ou des modèles fluides non collisionnels). Cette mise en commun de différents codes permettrait par exemple d'explorer l'impact de l'accroissement du flux magnétique ouvert du Soleil sur la magnétosphère terrestre, ou les différentes échelles présentes dans les spectres du vent solaire, allant des grandes structures MHD aux échelles électroniques.

Les descriptions plasmas et cinétiques seront aussi concernées par l'accroissement de la puissance de calcul. Et à terme il sera certainement possible de comparer les simulations cinétiques avec des modèles Landau fluides, permettant d'aborder une explication des trous magnétiques observés dans les données de CLUSTER/WHISPER/FGM/PEACE.

Formation des planètes et systèmes planétaires (PNP)

La problématique de la formation des planètes est un thème très ancien de l'astrophysique, qui a connu un spectaculaire regain d'intérêt avec la découverte des premières exoplanètes. Les scénarios de formation planétaire font apparaître différentes étapes de nature très différente. Aussi, les codes et techniques numériques permettant d'étudier ce problème font appel à une large gamme de compétences. La formation des cœurs solides par accrétion de planétésimaux requiert des codes de type N-corps, basés sur des algorithmes symplectiques (qui conservent l'hamiltonien du système). La formation des planètes géantes requiert la description du disque protoplanétaire gazeux et la prise en compte des processus qui régulent l'accrétion (dynamique tridimensionnelle du gaz, opacité du gaz, possibilité de l'existence d'un champ magnétique). Enfin, une part importante des efforts actuels est dédiée à l'étude des interactions de marée planète-disque, qui ont un impact considérable sur les orbites, et peuvent façonner de manière tout à fait inattendue un système planétaire.

Jusqu'à présent, les efforts entrepris dans ces diverses branches de la formation planétaire ont porté sur des problèmes simplifiés, isolés, considérés indépendamment des autres étapes de la formation. Ces travaux ont permis d'améliorer considérablement notre compréhension de la formation planétaire, et ont permis de révéler nombre de processus physiques cruciaux. A présent, les simulations numériques s'orientent vers des descriptions plus fines, globales et quantitatives des différentes étapes de la formation planétaire. Ainsi, on commence à voir apparaître dans la littérature des études de formation/migration de planètes géantes ou intermédiaires immergées dans des disques envahis par de la turbulence MHD, ou des études de sillons ouverts par des planètes géantes dans des disques où l'on traite les effets de transfert radiatif et d'irradiation par l'étoile centrale. Eu égard aux ressources en calcul colossales que requièrent ces études, elles ne sont que marginalement réalisables à l'heure actuelle. Pour se positionner dans la compétition internationale, très vive dans cette branche très à la mode de l'astrophysique, les équipes françaises ont besoin de très grands calculateurs, leur permettant de faire tourner un très grand nombre de simulations, chacune sur plusieurs centaines de processeurs, pour un total de plusieurs millions d'heures monoprocesseur par an.

Etude des astres condensés, trous noirs, physique relativiste (PCHE)

L'étude des astres compacts et de la matière condensée nécessite de résoudre les équations relativistes, par exemple pour étudier la structure des étoiles à neutrons, leur rotation ou les dernières orbites stables autour d'un trou noir. La fusion entre deux astres condensés est un puissant émetteur d'ondes gravitationnelles, qui pourront dans le futur être détectées par LISA. Afin de prédire le signal auquel on doit s'attendre, il est fondamental de développer ces simulations complexes. Les champs magnétiques sont extrêmement intenses autour de ces astres compacts, et il est essentiel de calculer la déformation de l'astre qui en résulte. L'observation des pulsars binaires permet de contraindre les modèles. Les équipes françaises sont très compétitives dans le domaine, et ont construit un logiciel ouvert, LORENE, à base de méthodes spectrales, qui permet de traiter ces problèmes de façon performante. Les simulations ont permis de construire un modèle d'étoile de quarks étranges en rotation, de calculer la fusion en spirale de deux trous noirs binaires, d'en calculer l'émission d'ondes gravitationnelles.

Les disques d'accrétion autour d'étoiles jeunes ou de trous noirs sont sujets à des instabilités magnétiques, et l'accrétion de matière vers l'objet central s'accompagne d'éjection perpendiculairement au plan dans des jets très collimatés. Les simulations ici sont nécessaires pour étudier les phénomènes énergétiques qui donnent lieu à ces observations de quasars ou microquasars. De nombreux problèmes restent à résoudre, comme la maintenance de la turbulence des disques, l'amplification dynamo, la stabilité de l'éjection, la perte du moment angulaire, la variabilité.

Dynamique et fragmentation du milieu interstellaire, formation des cœurs préstellaires (PCMI et PNPS)

Comprendre la formation des étoiles est d'une grande importance car ces dernières jouent un rôle capital pour la formation et l'évolution des planètes ainsi que pour celle des galaxies à grande échelle. Afin d'interpréter les observations de plus en plus détaillées et de plus en plus complexes de ce processus, il est nécessaire de réaliser des simulations numériques couvrant une grande gamme d'échelles et incluant plusieurs processus, tels que la gravité, le champ magnétique ou encore le transfert de rayonnement ou la chimie hors équilibre. La gamme d'échelles qu'il est nécessaire de couvrir va de plusieurs centaines de parsecs à la fraction d'unité astronomique, et il est nécessaire d'utiliser des codes capables de traiter cette grande gamme d'échelles tels que les codes à maillage adaptatif ou les codes lagrangiens utilisant des particules (SPH). Les équipes françaises ont ainsi contribué à la compréhension du milieu interstellaire diffus et à celle du rôle joué par la turbulence, le champ magnétique et les processus de chauffage et de refroidissement dans la formation des nuages moléculaires. Plusieurs études de l'effondrement gravitationnel des cœurs denses pré-stellaires ont également été menées avec et sans champ magnétique. Les développements en cours visent d'une part à introduire le transfert de rayonnement dans les cœurs en effondrement et d'autre part à traiter le champ magnétique de manière plus réaliste en considérant les effets de MHD non idéale tels que la diffusion ohmique et la diffusion ambipolaire.

Calcul et simulation des processus moléculaires (PCMI, PNP)

La simulation est devenu un outil incontournable dans la description des processus moléculaires dans les milieux interstellaires et circumstellaires et les atmosphères planétaires. Ces processus sont devenus de plus en plus diversifiés et complexes : propriétés de petites molécules, description des processus dynamiques (formation/fragmentation/réactivité), molécules prébiotiques, mais également nanoparticules et grains comme composantes de la poussière interstellaire et leur interaction avec le gaz. La simulation de l'ensemble des propriétés structurales, spectroscopiques (signatures microondes, submillimétriques, infrarouges, visibles, UV) et dynamiques (processus photophysiques/photochimiques, interaction avec le rayonnement) font appel aux méthodes de calcul quantique de la physique moléculaire et de la chimie théorique, ainsi qu'à la modélisation, et impliquent à la fois la communauté INSU et celles de chimie et/ou de physique moléculaire. Un effort important concerne également la cinétique et les réseaux réactionnels dans divers environnements avec pour objectif la constitution de bases de données.

Les enjeux pour la simulation moléculaire concernent la montée en complexité (taille, hétérogénéité et excitation) avec notamment (i) la précision des surfaces de potentiel, le nombre de degré de liberté traités quantiquement et la convergence (sur grilles numériques ou sur bases analytiques) des calculs de dynamique moléculaire quantique pour les taux de réaction par exemple (notons également l'alternative émergente offerte par les méthodes des intégrales de chemin pour la dynamique quantique des noyaux); (ii) le calcul de systèmes contenant quelques centaines à quelques milliers d'atomes, d'un point de vue structural, mais également dynamique et thermodynamique avec des temps de simulation suffisamment longs ou des échantillonnages statistiquement représentatifs ; (iii) la description de l'interaction gaz-grain, et notamment une description complète de la réactivité

et des processus inélastiques encore insuffisamment abordés par le calcul, surtout au niveau dynamique.

Formation et évolution des galaxies, histoire de la formation des étoiles (PNCG)

Les simulations sont essentielles pour mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies, et accompagner les grands relevés des populations de galaxies à toutes longueurs d'onde et à toutes époques, remontant jusqu'au Big Bang. Il s'agit de détailler les processus physiques qui expliquent la formation des disques, des bulbes et sphéroïdes qui forment les trous noirs massifs au centre des galaxies, l'importance des fusions entre galaxies, de l'accrétion de gaz par les filaments cosmiques. Outre le problème à N-corps gravitationnel, et l'hydrodynamique du gaz, il faut prendre en compte la formation d'étoiles, et les phénomènes de feedback qui peuvent l'étouffer, comme l'énergie fournie par les supernovae, ou les noyaux actifs et jets radio associés. Les équipes françaises ont beaucoup contribué à notre compréhension de la dynamique des galaxies, notamment via le projet Horizon, qui a mis en œuvre le couplage avec le contexte cosmologique. Des simulations de plus en plus réalistes, prenant en compte l'âge et le spectre des étoiles formées, permettent de créer des bases de données à comparer aux observations. Dans le futur, les enjeux sont de comprendre les processus d'évolution en fonction du redshift et de l'environnement, et d'expliquer les observations paradoxales de « downsizing », en ce qui concerne à la fois la taille des galaxies, leur activité de formation d'étoiles, ou l'activité de leur noyau central.

Ces simulations demandent une résolution spatiale de l'ordre du parsec, pour un volume de simulation de quelques dizaines de kiloparsecs. Elles requièrent donc l'utilisation de méthodes adaptatives de type SPH ou AMR, avec des calculs aux temps très longs. L'enjeu est donc ici de développer des algorithmes efficaces, qui fonctionnent à la limite des calculateurs parallèles actuels (en régime dit de « strong scaling »). Pour pouvoir réaliser des études statistiques, il est important de pourvoir réaliser un grand nombre de simulations en parallèle (typiquement 100), chacune mettant en jeu de 100 à 1 000 processeurs.

Cosmologie et formation des grandes structures (PNCG)

Ces dernières années ont vu des progrès considérables dans les simulations cosmologiques, la résolution et la dynamique des simulations permettant de traiter tout l'Univers observable, en commençant à distinguer les halos de galaxies. Les efforts ont surtout concerné la matière noire, et le projet Horizon a été très compétitif, en produisant la simulation la plus importante pour un temps. Ces simulations précisent le taux de formation des amas, la fonction de corrélation à grande échelle, l'importance des lentilles gravitationnelles, et contraignent la nature de la matière noire et celle de l'énergie noire, les principaux enjeux de la cosmologie aujourd'hui. Les processus baryoniques étant encore mal compris, il est important de les traiter au moins schématiquement. Le plus fréquemment, les modèles semi-analytiques utilisent les simulations de matière noire pour en dériver des arbres de fusion, et tester les processus de façon phénoménologiques, en explorant les paramètres.

Des simulations complètes avec baryons ont été produites par les équipes françaises, et devraient se développer dans les années futures. Ces simulations sont exigeantes et surtout doivent être reproduites de nombreuses fois en faisant varier la physique (dissipation, formation des étoiles, feedback). Il va aussi falloir augmenter la résolution par de grands facteurs. Il est également nécessaire de faire varier les méthodes et les algorithmes de simulation afin de les comparer entre eux, chacun ayant des avantages complémentaires. Les applications sont nombreuses : formation des grandes structures, des amas et des galaxies, qui est comparée aux grand relevés afin de contraindre les modèles d'Univers ou encore pour déterminer l'époque de la réionisation (en utilisant des codes incluant le transfert radiatif) qui pourra être observée par les radiotélescopes du futur (LOFAR, SKA).

Ces simulations mettent en jeu de très grands volumes de calculs, et leur performance est essentiellement limitée par la mémoire disponible (en régime dit de « weak scaling »). La résolution de la gravité et de l'hydrodynamique tire parti des architectures parallèles actuelles, mais le passage à 100 000 cœurs représente un vrai défi. L'introduction de phénomènes physiques nouveaux et très coûteux en temps de calcul (comme le transfert radiatif) pourra se faire grâce à l'utilisation de co-processeurs dédiés comme les accélérateurs graphiques (GPU).

Pour l'ensemble de ces thématiques, l'accès à une grande puissance de calcul permet le raffinement des modèles physiques et l'augmentation de la résolution numérique, qui est un enjeu particulièrement important pour de nombreux champs de recherche. Tout ceci a un impact immédiat sur la compréhension des phénomènes (astro)physiques. Les ressources de calcul utilisées sont à la fois les moyens de calcul intensif locaux (serveurs, grappes de serveurs), régionaux (méso-centres) et centralisés (centres nationaux et internationaux). Pour certaines thématiques, il est nécessaire de pouvoir avoir accès à un grand nombre de processeurs (plusieurs centaines à quelques milliers) sur des durées pouvant parfois atteindre la semaine voire le mois.

Pour l'ensemble de ces thématiques, une ou plusieurs équipes françaises sont des acteurs de premier plan. Il conviendra de leur fournir le soutien nécessaire, notamment en moyens humains, afin qu'elles puissent utiliser dans les meilleurs conditions les futurs équipements européens et maintenir ainsi leur leadership.

Les Moyens de calcul

Ces dernières années ont vu l'émergence d'une infrastructure claire et solide pour le calcul intensif en France. En effet, l'infrastructure du calcul intensif s'organise selon une pyramide avec les moyens locaux à la base (méso-centres et moyens de calcul des laboratoires), puis les moyens nationaux et enfin au sommet les moyens européens. Cette organisation a été rendue possible grâce à la création du GENCI (Grand Equipement National pour le Calcul Intensif) qui, entre autres, assure un financement pérenne et de bon niveau des moyens nationaux. Vers le haut, ce dispositif est complété à l'échelle européenne par le projet PRACE qui vise à équiper l'Europe en moyens de calcul de premier plan mondial.

Moyens de calcul locaux

L'ensemble des laboratoires ont intégré la nécessité de mettre à disposition de leurs équipes des moyens de type fermes ou serveurs de calcul. Les configurations impliquent typiquement quelques dizaines de cœurs de calculs pour une gamme allant de 5 cœurs pour la plus petite à plus de 200 cœurs pour les plus grosses. Ces cœurs de calculs sont associés typiquement à 1 à 4 Go de mémoire vive chacun, ce qui est conforme aux configurations rencontrées dans les grands centres de calculs. La plupart de ces configurations sont âgées de 4 ans ou moins et peuvent donc être considérées comme '*à jour*' par rapport aux technologies disponibles.

Le niveau de satisfaction apportée par ces matériels est difficile à estimer même si la plupart des laboratoires considèrent que leurs configurations sont satisfaisantes. Par ailleurs, ils anticipent l'augmentation des besoins comme l'avancement des technologies et par conséquent, les évolutions (en nombre de cœurs et de mémoire vive) sont pour beaucoup déjà prévues. De plus, pour certains laboratoires, ces évolutions et le renouvellement posent la question de la maintenance de ce matériel et du personnel sur place en charge de cette maintenance. En particulier, il est nécessaire de veiller à ce que les sources de financement pour l'obtention de calculateurs de taille intermédiaire soient clairement identifiées.

Ces moyens locaux visent à remplir deux objectifs majeurs. Le premier est le développement et/ou l'analyse de résultats en local : les chercheurs mettent au point leurs outils sur des machines à leur entière disposition. Hors mode production de données visant à publication, le développement et l'utilisation de codes parallèles peut se faire sur de petites configurations de fermes, voire des serveurs uniques multi- cœurs. C'est également sur ce type d'installation qu'étudiants et chercheurs se forment au calcul distribué. Pour toutes ces raisons, il paraît important que les laboratoires puissent continuer à disposer de tels moyens. Les équipements locaux sont aussi nécessaires pour la visualisation des données numériques produites dans les centres nationaux (ceux-ci sont trop éloignés pour qu'il soit possible de faire ce travail en leur sein) ainsi que pour le stockage de ces données, nécessaire en particulier pour la visualisation en local. Par ailleurs, certains centres de calcul n'assurent par la conservation des données qui sont détruites après un certain laps de temps.

Le deuxième objectif, mis en avant par quelques laboratoires, est l'indépendance par rapport aux centres de calculs. Cet aspect est en particulier mis en avant par deux laboratoires (IMCCE, GRAAL) qui disposent des plus grosses configurations locales de notre panel[1]. On reviendra sur ce point dans les parties concernant les méso/grands centres mais cette remarque semble assez révélatrice de la façon dont le calcul y est appréhendé : production de calculs et développement des codes sont intimement liés et ces moyens locaux (qui pourraient tout à fait être qualifiés de méso-centres au vu de leur importance pour certains) semblent répondre plus efficacement à cette demande.

Notons que certains laboratoires disposent de matériels spécifiques dédiés : GPUs (Strasbourg, IMCCE, Nançay), GRAPEs (Strasbourg, Marseille), FPGA (Nançay), mais leur utilisation n'est pas répandue.

1 Ce panel est constitué d'une quinzaine de laboratoires qui ont répondu à l'enquête qui a été diffusée lors de la préparation de la prospective.

Les méso-centres

Les méso-centres, contrairement aux ressources locales, sont partagés entre plusieurs laboratoires et font souvent office de centres de calculs «régionaux» ou universitaires, dont le financement est généralement assuré au moins en partie par ce type de partenaires. Une majorité de laboratoires utilise les moyens de méso-centres, dans la plupart des cas pour des calculs parallèles sur architecture à mémoire partagée et/ou distribuée. Le besoin pour ce type d'infrastructures qui visent l'échelle intermédiaire entre les moyens des laboratoires et des grands centres apparaît clairement. Elles permettent des traitements numériques de taille plus importante tout en échappant à la planification que requiert le calcul sur centre national ou international. Ces méso-centres sont également des lieux d'apprentissage et d'accès au calcul parallèle lourd indispensables au bon fonctionnement de l'écosystème du calcul intensif.

Pour toutes ces raisons, de nombreux méso-centres ont vu le jour, financés au coup par coup grâce à des crédits régionaux, des chaires d'excellence, ... Cependant, la pérennisation de ces investissements est extrêmement difficile. Ce type de fonctionnement, même s'il a permis de belles réalisations, n'est absolument pas optimum. En effet, l'achat d'une méso-machine s'accompagne de la mise en place d'une infrastructure (local climatisé, alimentation électrique, moyens de stockage, …) et mobilise des moyens humains ; ces coûts *annexes* sont parfois comparables à celui de la machine. De plus, former les ingénieurs et les chercheurs à la maintenance et à l'utilisation d'une méso-machine nécessite un investissement humain significatif. Il serait donc éminemment souhaitable que la communauté astrophysique dispose de méso-centres stables qui fourniraient une puissance de calcul à un niveau suffisant et seraient également des lieux d'échanges et de compétences autour du calcul intensif.

Vu l'évolution du système de recherche français et en particulier la montée en puissance des Universités et des autres acteurs locaux, il n'est pas envisageable que l'INSU pilote l'installation et la pérennisation des méso-centres. Les besoins exprimés sont néanmoins bien réels, et l'INSU doit être prêt au cas par cas à participer à des partenariats pour leur mise en œuvre et le renouvellement du matériel, par exemple sur la ligne des moyens mi-lourds. Ces partenariats devront autant que possible se faire dans le cadre d'une réflexion plus globale visant à donner accès à l'ensemble de la communauté à un méso-centre. La communauté reste par ailleurs très attachée à l'existence de moyens informatiques dans les laboratoires, pour les raisons expliquées ci-dessus, et il s'agit véritablement de construire un éco-système de moyens complémentaires.

Il serait utile que l'INSU dispose d'une carte complète et maintenue à jour des méso-centres utilisés par la communauté.

Le niveau d'équipement d'un méso-centre devrait être d'environ 10% de celui des centres nationaux, ce qui correspond à un budget d'investissement de l'ordre de 600

k€ tous les quatre ans. A moyen terme, ces méso-centres devront également disposer d'une petite équipe d'ingénieurs spécialisés en calcul intensif et être reliés entre eux et aux centres nationaux par un réseau à haut-débit permettant le transfert de gros volumes de données. Des discussions avec RENATER seront engagées dans ce but.

Les centres nationaux et GENCI

Créé en 2007, GENCI est une société civile ayant pour mission de financer les équipements des centres de calculs nationaux. Le budget de GENCI est de 25 M€/an ; il provient du CNRS (20%), du CEA (20%), des universités (10%), de l'INRIA (1%) et du ministère de la recherche (49%). La création de GENCI a permis un saut qualitatif depuis longtemps indispensable pour les moyens nationaux : grâce à son financement, les trois centres nationaux (l'IDRIS pour le CNRS, le CINES pour les universités et le CCRT pour le CEA) sont maintenant équipés de calculateurs de la classe des 100 Tflops. Ces centres sont très largement utilisés par la communauté astrophysique (35 projets couvrant de nombreuses thématiques et utilisant environ 12% de la capacité des centres nationaux).

La plupart des laboratoires sont donc des utilisateurs des grands centres de calcul. La majorité de ces applications exploitent un parallélisme en mémoire partagée et distribuée. Le nombre d'heures annuelles utilisées par chaque laboratoire s'échelonne de 30 000 heures à 3 000 000 d'heures. L'utilisation des processeurs vectoriels est marginale.

L'utilisation des ressources importantes (plusieurs millier de cœurs) disponibles dans les centres n'est pas sans contraintes. L'accès est conditionné à l'attribution d'heures de calculs par l'exposé d'un projet. Par conséquent il faut pouvoir anticiper parfois plusieurs mois à l'avance les travaux qui y seront exécutés. Il est à noter que dans certains laboratoires, on reproche à ces centres des classes de calculs trop courtes pour une utilisation confortable de leurs applications. A leurs yeux, celles-ci devraient pouvoir typiquement tourner plus de 24 heures. Ce `désagrément´ est toutefois inhérent à ce type d'installation et est généralement compensé par la très grande capacité de calcul qui y est offerte. Il faut également remarquer que les laboratoires disposant d'importantes installations locales sont également grand consommateurs de puissance fournies par les grands centres et ne se détournent donc pas de ce type d'installations qui leur permettent de grands calculs planifiés à l'avance, confirmant à ce niveau également l'image d'un éco-système de moyens de calcul complémentaires. Ce type de centres permet également l'accès à des applications (logiciels de chimie payants) ou à du matériel (GPU, FPGA, Cell) dont le coût ou l'originalité ne peut être assumé par des laboratoires ou même des méso-centres.

Les machines européennes, PRACE[2]

Quelques équipes françaises ont déjà accès à des moyens de centres de calcul internationaux. Les moyens européens concernés sont MareNostrum (BSC[3] Espagne), le LRZ[4] et le HLRS[5] (Allemagne), le centre de calcul du projet LOFAR (Pays-Bas) ainsi qu'un centre de calcul suédois. Certains laboratoires disposent également d'accès aux centres de calculs de San Diego, Québec et NCAR (USA). Ces accès se font principalement par l'intermédiaire de collaborations et non en propre et concernent des allocations de l'ordre 100 000 à 500 000 heures.

Le paysage européen du calcul va changer de manière radicale dans les années à venir grâce au projet PRACE, qui a pour objectif de mettre à disposition de la communauté scientifique des ordinateurs parmi les plus puissants du monde. Les premiers prototypes des ordinateurs PRACE sont déjà accessibles sur demande et la première machine *Petaflopique* sera installée en France en 2010/2011 au TGCC (Très Grand Centre de Calcul) à Bruyères-le-Châtel. Ce très grand équipement Européen (200 M€ d'investissement) permettra la réalisation de simulations de taille exceptionnelle et sera un outil indispensable dans la compétition internationale. Il convient donc de soutenir les équipes françaises souhaitant utiliser le TGCC, notamment en moyens humains et en matériel de post-traitement des données. Ceci pourra se faire dans le cadre des méso-centres.

Les grilles de calculs

Les grilles prennent plusieurs formes depuis la grille locale, régionale (CiGRI, Grif), nationale (Grid 5000) ou internationale (EGEE). Très rapidement, ce concept a intéressé les instances politiques, entre autres parce qu'ils y voyaient une façon de mutualiser les ressources informatiques et de répondre au défi représenté par le traitement des données du LHC. La spécificité des grilles de calcul par rapport aux moyens de calcul classiques est l'accès à la demande à des milliers de processeurs, permettant par là de répondre à des besoins de ressources de calcul importants et réguliers.

L'Union Européenne a financé le programme EGEE, qui est aujourd'hui la plus grande grille de calcul scientifique au monde avec 68 000 CPUs et 20 Petabytes de stockage répartis dans 250 sites. Initialement réservée aux physiciens des hautes énergies, elle est ouverte depuis 2004 aux autres communautés, dont certaines, comme les sciences de la vie, sont aujourd'hui très présentes. L'Europe cherche aujourd'hui à pérenniser un modèle de grille transnational. Cette nouvelle organisation s'articule au niveau européen autour de EGI (European Grid Initiative) et au niveau des états participants autour des NGIs (National Grid Initiatives) qui géreront les grilles nationales. En France, le pilotage de la NGI est assuré par l'Institut des Grilles du CNRS. Cette organisation s'accompagne de la mise en place, dans un cadre européen, de SSCs (Specialised Support Centers) thématiques qui auront pour mission de faire remonter à EGI les besoins des communautés scientifiques. Un SSC en Astrophysique est en cours de préparation.

Contrairement à d'autres communautés, la communauté Astrophysique est très peu impliquée sur les grilles. Cependant, un nombre significatif d'équipes scientifiques françaises se disent intéressées pour essayer cette technologie et voir si elle répond à leurs attentes. Les principales applications concernées sont : 1) des codes dont l'exploitation requiert l'exploration d'espaces de paramètres, 2) le traitement des données issues de grands instruments (Ex : CTA). Enfin, la spécificité des grilles étant de fournir des ressources de calcul à la demande, des scientifiques

2 Partnership for Advanced Computing in Europe
3 Barcelona Supercomputing Center
4 Leibniz Computing Center, Garching
5 Höchst Leistungs Rechenzentrum Stuttgart

souhaitent les utiliser pour fournir des services en ligne pour des modèles numériques ou des services OV.

La Grille ne se prête pas à tous les types d'applications, en particulier pas aux grandes simulations N-Corps, MHD, ... qui nécessitent de la mémoire partagée, ni sans doute aux grands volumes de données stockées dans des centres de données hors de la grille. Elle ne peut donc être pour la communauté astronomique qu'un moyen de calcul annexe.

Deux points bloquants limitent l'utilisation de la grille dans notre communauté, et même notre capacité à évaluer les cas dans lesquels elle est réellement utile.

1. Le manque d'expertise de la communauté A&A pour utiliser efficacement la Grille : les communautés plus anciennes sur la Grille ont développé des outils pour optimiser leurs applications. La communauté astrophysique, à part quelques expériences ponctuelles, ne dispose pas de tels outils.
2. Le design de la Grille : EGEE a été pensée pour répondre aux besoins de la communauté « Hautes Energies ». Il n'est pas certain que les applications astrophysiques, plus complexes, se portent aisément sur un tel modèle de Grille.

Compte tenu du fait que la communauté astrophysique est dans une phase d'exploration des possibilités offertes par la Grille, que certaines équipes en auront besoin dans le cadre de projets européens qui utiliseront la Grille mais que cette technologie ne saurait en aucun cas se substituer au TGCC ou aux méso-centres indispensables à notre communauté, nos recommandations, pour cette période d'exploration, sont les suivantes :

- ***La communauté devrait disposer de quelques points d'entrée à la Grille (on peut noter l'effort fourni sur ce point par l'Observatoire de Paris avec le soutien de l'INSU).***
- ***Il serait souhaitable que la communauté identifie et se familiarise avec les outils développés par les autres communautés pour faciliter l'utilisation de la Grille. Ceci pourrait être fait grâce à 2-3 ans de CDD qui pourraient être demandés à la NGI française.***
- ***La France devrait participer au SSC A&A pour suivre l'évolution de la Grille, former les utilisateurs et faire remonter les besoins spécifiques de notre communauté à EGI.***

Logiciels

La communauté française développe et utilise un certain nombre de logiciels qui constituent l'état de l'art dans leurs domaines respectifs (projet HORIZON, travaux sur la stabilité du système solaire, modélisation des étoiles et du milieu interstellaire, …). Cependant, contrairement à ce qui se passe dans d'autre pays (Etats-Unis, Allemagne, Angleterre, …), il n'existe pas vraiment de code qui soit devenu communautaire à l'échelle française ou internationale (excepté dans une certaine mesure le code RAMSES). Le principal obstacle à cette diffusion est la grande difficulté d'obtenir du soutien en terme de ressources humaines pour réaliser le travail important nécessaire pour permettre la distribution d'un code (documentation, portabilité sur une large gamme de plateformes, site web dédié, …). Il faut noter que la grande diversité des thématiques astrophysiques se traduit par une multiplicité nécessaire des logiciels, ce qui rend la réalisation de codes communautaires plus délicate que dans d'autres champs disciplinaires comme la climatologie ou la physique des particules. Par ailleurs, le développement de logiciels tirant parti des accélérateurs graphiques apparaît comme une voie stratégique, demandant une expertise très technique et donc des moyens humains dédiés (ingénieurs).

Il conviendrait de soutenir un petit nombre de logiciels afin d'une part de permettre leur large diffusion et d'autre part d'assurer leur portage et leur optimisation sur les centres nationaux et européen, notamment le TGCC en construction à Bruyères-le-Châtel. Une part de ce travail pourrait être effectuée par les personnels spécialisés des méso-centres.

Coordination des actions 'calcul'

Réactivation de l'ASSNA : Afin de stimuler et de coordonner les actions dans le domaine de la simulation numérique et de mettre en place les différentes recommandations de la prospective, il semble opportun de réactiver l'ASSNA (Action Spécifique pour la Simulation Numérique en Astrophysique). L'ASSNA devrait avoir les moyens nécessaires pour accomplir les missions suivantes :

- ***sélection des logiciels devant faire l'objet d'un soutien en vue de leur diffusion et/ou de leur portage sur les machines de PRACE ;***
- ***suivi des recommandations de la prospective ;***
- ***action de lobbying et d'information vis-à-vis de l'INSU, des centres nationaux et de GENCI, de PRACE et de la future Maison de la Simulation ;***
- ***suivi de la mise en place et de l'évolution des méso-centres, en concertation avec l'INSU ;***
- ***établissement de critères pour l'évaluation des « Chercheurs Instrumentalistes » dans le domaine du calcul ;***
- ***animation scientifique dont l'organisation annuelle d'un workshop sur le calcul numérique en astrophysique.***

Observatoire Virtuel et Centre de Données

Les données astronomiques et l'Observatoire Virtuel

L'astronomie développe depuis longtemps un ensemble d'archives et de services en ligne qui sont utilisés quotidiennement par la communauté internationale. Les 'données' astronomiques sont variées, et couvrent l'ensemble de la chaîne de la recherche, des données d'observation, qui sont conservées et mises à la disposition des scientifiques dans les archives d'observatoires, jusqu'aux résultats publiés dans les journaux, en passant par des

bases de données de compilation, telles celles que développe le CDS. On voit également apparaître des services qui mettent en ligne des données de simulation, ou qui permettent de « faire tourner » des modèles à la demande. Les archives d'observatoire et les centres de données développent des produits à valeur ajoutée, données traitées ou compilations, et des outils pour accéder aux données, les visualiser, les traiter, les intégrer.

L'astronomie a immédiatement tiré parti du développement du WWW, et elle se situe à l'avant-garde des disciplines scientifiques pour tout ce qui concerne services d'information en ligne et mise en réseau de l'information. Elle se distingue aussi par le fait que ces services sont utilisés de façon massive par la communauté scientifique. La mise en ligne et en réseau des informations bibliographiques, grâce à la collaboration des journaux, des centres de données et d'ADS, a déjà conduit à une révolution dans les méthodes de travail des chercheurs, dans laquelle le CDS et le journal européen *Astronomy & Astrophysics* ont joué un rôle de pionniers.

A partir de l'an 2000, l'étape suivante a été l'émergence du concept d'Observatoire Virtuel (OV) astronomique (les premiers projets ont commencé à être financés en 2001). Il s'agit d'aller plus loin que la mise en réseau des données et des services via des liens entre les pages Web, en donnant un accès transparent pour les utilisateurs à la très riche palette des informations disponibles : permettre aux utilisateurs de retrouver les données qui les intéressent, de télécharger ces données, de les utiliser, de les comparer et de les intégrer avec d'autres données. Pour cela, il faut définir un ensemble de standards d'interopérabilité qui constituent l'architecture de base de l'OV. Pour publier leurs données dans l'OV, les centres de données ajoutent au-dessus de leurs services une surcouche qui assure l'interopérabilité : enregistrement dans le registre des services, réponses aux requêtes soumises selon les protocoles de l'OV, etc. La définition de ces standards est sous la responsabilité de l'*International Virtual Observatory Alliance* (IVOA), une alliance des projets nationaux qui compte actuellement 17 membres, dont la France et le projet européen Euro-VO. Chaque projet a sa propre organisation, ses contraintes et ses objectifs, qui dépendent fortement des contextes nationaux, mais tous concourent à la mesure de leurs moyens (*best effort*) à la définition d'une architecture commune.

Les différents composants de la mise en place de l'Observatoire Virtuel sont les suivants : les centres de données et les développeurs de services, qui fournissent le contenu et les outils de l'OV ; le développement des éléments techniques, qui est du ressort des projets OV et est cordonné par l'IVOA ; et le support aux scientifiques utilisateurs et aux centres de données. Ces trois éléments forment les trois piliers identifiés au niveau européen à la suite du projet de définition et de test des concepts, *Astrophysical Virtual Observatory* (projet RTD, 2001- 2004) :

- l'alliance des centres de données astronomiques (*Data Centre Alliance*- DCA), piloté par le CDS, qui peuplent l'OV avec des données et des services (sur ce thème dans le 6e Programme Cadre : Coordination Action EuroVO-DCA à coordination française, 2006- 2008) ;
- le *Technology Centre* (VOTC), piloté par AstroGrid (UK.), un 'centre' distribué qui met en place le cadre de l'OV (architecture, standards – sur ce thème dans le 6ème Programme Cadre : Design Study VO-TECH à coordination britannique et forte participation française, 2005-2009) ;
- le *Facility Centre* (VOFC), piloté par l'ESA et l'ESO, chargé d'aider d'une part les scientifiques à utiliser l'OV et d'autre part les centres de données à mettre en œuvre la 'couche d'interopérabilité' qui leur permet de publier leurs données et leurs services dans l'OV, et de gérer le registre des ressources.

Rôle de la France et organisation nationale

La France a joué un rôle moteur dans le développement de l'Observatoire Virtuel astronomique dès l'origine : le CDS pilotait le premier groupe de travail international sur les standards de l'OV, dans le cadre du Réseau Thématique européen du 5ème Programme Cadre OPTICON ; le CDS et Terapix figuraient parmi les 6 participants du premier projet financé par la Commission Européenne dans le 5ème Programme Cadre, le projet *Astrophysical Virtual Observatory*, et l'Observatoire de Paris et l'IAS parmi ceux du projet similaire financé à la même époque pour la physique solaire, *European Grid of Solar Observations* (EGSO).

En 2003, le précédent colloque de prospective a identifié le développement de l'Observatoire Virtuel européen comme l'une des priorités de la discipline, et a recommandé à l'INSU de créer une structure de coordination nationale, sous la forme d'une Action Spécifique, en collaboration avec le CNES. Conformément à cette recommandation, l'Action Spécifique Observatoires Virtuels France (ASOV) a été créée en 2004 avec le mandat suivant :

- assurer la représentation du domaine au niveau national et international ;
- maintenir une relation étroite avec les Programmes Nationaux pour se tenir au courant de la problématique scientifique ;
- donner un avis sur les demandes de moyens relevant de son domaine de compétences (l'avis sur la pertinence scientifique étant du ressort des Programmes Nationaux) ; l'évaluation est faite au niveau de l'INSU et du CNES pour les gros projets ;
- regrouper l'information sur les projets et les compétences des laboratoires et des individus, pour aider à l'organisation de discussions techniques, de groupes de revue, …
- recenser les initiatives ;
- organiser des réunions sur les thèmes techniques importants, permettant un partage de l'expertise ;
- lancer la réflexion sur l'inclusion de la modélisation/simulation dans l'Observatoire Virtuel, en liaison avec l'Action Spécifique Simulation Numérique en Astrophysique,
- servir de point de contact avec les STIC, en liaison étroite avec le Directeur Adjoint Scientifique Astronomie.

Les objectifs ont été réalisés, sauf le dernier : la communauté STIC est très diverse, et les relations, qui ont dans certains cas abouti à des programmes soutenus par l'ANR, se sont plutôt développées au niveau des équipes.

L'ASOV est membre de l'International Virtual Observatory Alliance. Elle a créé, grâce en particuliers à des tutoriels (nationaux puis européens) et à la mise en place de groupes de travail, une communauté nationale de développeurs de services pour l'OV,

et plusieurs groupes français sont visibles et actifs dans l'IVOA pour la définition des standards d'interopérabilité. Le CDS a été la pierre angulaire des activités de l'ASOV et de l'impact de la France dans l'IVOA. La plupart des laboratoires français ont des activités reliées à l'OV, et certains Observatoires ou laboratoires ont défini une politique de participation active et de mise à disposition de moyens au-delà d'actions ponctuelles.

De nouveaux thèmes pour l'Observatoire Virtuel

Les projets du 7e Programme Cadre

Au niveau international, l'OV astronomique passe progressivement en phase opérationnelle. Le projet Euro-VO Astronomical Infrastructure for Data Access (EuroVO-AIDA, février 2008-juillet 2010), qui a pour objectif d'assurer cette transition au niveau européen, a été sélectionné dans le premier appel d'offre e-Infrastructures (*Scientific Digital Repositories*) du 7ème Programme Cadre. EuroVO-AIDA intègre, pour la première fois dans un projet européen, tous les aspects de l'Observatoire Virtuel, les aspects centres de données et développements technologiques initiés par EuroVO-DCA et VO-TECH, mais aussi le soutien aux utilisateurs (workshops, « hands-on », tutoriels) et la diffusion des connaissances auprès du public scolaire niveau collège/lycée.

La structuration en France du domaine 'Système Solaire et Univers lointain' a conduit l'AS OV à inclure dès l'origine plusieurs domaines qui sont souvent traités séparément dans d'autres pays, en particulier, en plus de l'astronomie *stricto sensu*, la physique solaire et héliosphèrique, et la planétologie. Les activités de type OV dans ces différentes disciplines sont traitées dans des projets différents au niveau international. Par ailleurs, la force des activités interdisciplinaires dans le domaine de la physico-chimie d'intérêt astrophysique en France a également très vite conduit à la prise en compte du thème physique atomique et moléculaire dans les activités de l'OV astronomique, activités qui se développent maintenant de manière autonome.

Plusieurs projets sélectionnés récemment dans des appels d'offre *Infrastructures* ou *e- Infrastructures* du 7ème Programme Cadre vont permettre des développements dans ces autres disciplines :

- Europlanet II (coordinateur M. Blanc) a un important volet sur le partage des données, dans cette discipline qui a récemment créé un analogue de l'IVOA appelé l'*International Planetary Data Alliance* (IPDA) ;
- dans le domaine de la physique solaire et héliosphèrique, le successeur d'EGSO, HELIO (coordinateur GB), démarre, avec une participation française significative ;
- le projet VAMDC (Virtual Atomic and Molecular Data Centre), coordonné par M.-L. Dubernet, qui a joué un rôle de pionnier au niveau international dans ce domaine, démarre également.

L'OV théorique

L'observatoire virtuel a d'abord été conceptualisé autour des données d'observation, mais l'utilité d'inclure des données de modélisation a été très vite identifiée, d'une part pour fournir des services pour interpréter les observations des nouvelles générations d'instruments, et d'autre part pour rentabiliser le temps calcul des grandes simulations. En effet, les codes de simulation « state-of-the-art » sont aujourd'hui d'une telle richesse qu'il est difficile pour une équipe d'exploiter pleinement une simulation ou un code. Grâce à l'OV, il est possible de donner accès à des codes avec des ressources de calcul en ligne et de diffuser des résultats de simulation pour permettre à des parties tierces de les exploiter. A terme, l'OV théorique devrait ouvrir de nouvelles perspectives pour la modélisation des systèmes astrophysiques, en permettant en particulier de coupler des codes et des télescopes virtuels. Par exemple, le projet STARFORMAT financé par ASTRONET va, via l'OV, utiliser des résultats de simulations MHD dans des codes calculant la structure chimique des nuages interstellaires pour comparaison aux données Herschel / ALMA.

Ce thème est pleinement intégré à l'Observatoire Virtuel astronomique puisqu'il est piloté par l'IVOA. L'AS OV a créé très tôt un groupe de travail sur ce thème, et les projets EuroVODCA et EuroVO-AIDA ont fortement soutenu cette thématique et permis d'avancer de façon significative dans la définition des standards et la réalisation de prototypes. Grâce à cela, la France est aujourd'hui très bien positionnée avec comme services théoriques (fonctionnels ou en développement) : DEUVO, GALMER, HORIZON, PDR, POLLUX, STARFORMAT. Des services comme le modèle de la Galaxie de Besançon et d'autres devraient peu à peu intégrer l'OV.

Le développement de services théoriques nécessite plus de ressources humaines que celui de services astronomiques classiques, d'une part en raison de l'hétérogénéité entre les codes et d'autre part en raison de l'évolution rapide de ceux-ci.

Les Centres de Données français

La France a développé au fil du temps un réseau de centres de données disciplinaires : le CDS, qui joue un rôle pionnier depuis 1972 et a été récemment labellisé Très Grande Infrastructure de Recherche ; BASS 2000 et MEDOC, pour respectivement les aspects sol et spatiaux des données solaires ; le CDPP, Centre de Données de la Physique des Plasmas. Il aussi citer le centre d'expertise Terapix pour le traitement de données grand champ, et le JMMC pour le traitement des données interférométriques.

Le développement du concept d'Observatoire Virtuel, et les actions de sensibilisation et de formation des développeurs menées par l'AS OV, ont attiré l'attention des équipes et des laboratoires, et ont produit une floraison de services qui mettent en ligne de l'information souvent plus focalisée. Plusieurs recensements, menés par l'AS OV (en 2005 et 2006) et l'action européenne EuroVO-DCA en 2008, ont montré la grande diversité des services français développés pour s'interfacer avec l'Observatoire Virtuel, et qui sont à des niveaux inégaux en terme de masse critique et de degré de réalisation. On en trouve dans pratiquement tous les OSU, et certains établissements mutualisent des moyens pour ces développements (OP, IAS, OAMP).

On peut citer (sans cherche à être complet) l'effort de structuration en région parisienne avec la mise en place d'un centre de données OV : VO-Paris Datacentre regroupant les laboratoires de l'OP, l'IAP ainsi que l'UVSQ et le LPMAA de l'IPSL. Ce centre

de données aura pour domaines stratégiques les services VO-Théorie, Physique Atomique et Moléculaire, VOPlaneto – dans ce domaine l'IMCCE en particulier a saisi l'occasion de mettre pleinement en valeur son domaine de compétences - et VO solaire en plus des projets individuels des laboratoires. Le LAM mutualise ses développements de bases de données. De nombreux autres établissements souhaitent mettre en valeur leur domaine d'expertise, par exemple à Besançon une participation aux bases de données des petits corps du système solaire et la mise à disposition du Modèle de la Galaxie de Besançon ; à Bordeaux une base d'images VLBI, une base de paramètres stellaires (PASTEL), et la base de données KIDA (Kinetic Database for Astrochemistry), à laquelle participent également plusieurs autres établissements ; plusieurs bases de spectroscopie, incluant des bases de données de physique atomique et moléculaire d'intérêt astrophysique, et qui impliquent plusieurs laboratoires (ELODIE-SOPHIE, POLLUX, Narval ; LPMAA, OP, LPG, …). Les équipes françaises d'astronomie fondamentale et de géodésie spatiale sont également très actives pour faire émerger le concept d'observatoire virtuel au niveau international dans leur domaine.

Recommandations

Les recommandations d'Astronet reconnaissent la pertinence des actions menées sur le long terme pour le partage des données et le développement de l'OV, et identifient les actions de base nécessaires à sa pérennité avec des attendus spécifiques.

Pour chacun des trois domaines qui composent l'OV (centres de données, développements technologiques, support aux utilisateurs), il faut dans cette phase :

- **assurer la pérennité des centres de données et des services**. De nombreux services sont proposés, et ils n'ont pas tous une masse critique et/ou un support suffisant au niveau local ou national. Pour identifier les centres de données qu'il faut soutenir en priorité au niveau local et/ou national, il faudrait mettre en place un processus d'**évaluation**, nécessité également relevée par le Groupe de Travail qui a traité des Services d'Observation ;
- assurer la maintenance évolutive des standards et de l'architecture, en tenant compte des retours sur l'utilisation, de l'évolution des besoins des scientifiques et de celle de la technologie. Cela nécessite que les équipes françaises compétentes continuent à travailler sur les développements techniques, et qu'**un financement soit trouvé pour assurer la coordination des activités au niveau national, européen et international ;**
- assurer le support aux utilisateurs : il faut continuer la formation et la mise en réseau des centres de données, mais **la formation des utilisateurs devient un enjeu majeur.**

Au niveau national

L'AS OV souhaite continuer à accompagner cette évolution dans son domaine de compétence, *en élargissant son domaine d'action à l'aide aux utilisateurs* :

- coordination nationale ;
- continuation du support au développement de nouveaux services (tutoriels, conseils, etc) – l'action de l'AS OV est essentielle dans ce domaine pour la formation et le transfert d'expertise entre équipes ;
- aide à l'utilisation astronomique (tutoriels, …).

Le CDS (chercheurs et ingénieurs) assure l'essentiel du (lourd) travail de support aux centres de données et aux utilisateurs, et il faut lui assurer les moyens nécessaires pour éviter que cela se fasse au dépend du développement et de la maintenance de ses propres services.

L'AS OV peut certainement aider à préciser la définition des tâches de services pour les SO qui relèvent de son domaine de compétences. Il faut de plus étudier sa participation au processus d'évaluation des services d'observation proposé par le groupe SO. Dans ce contexte, il est nécessaire également que les OSU et les Programmes Nationaux explicitent leur stratégie et leurs priorités concernant ce type de services, les Programmes Nationaux étant seuls capables de juger de la pertinence scientifique des services dans leurs domaines de compétence respectifs.

Il faut aussi prévoir dans la stratégie nationale (en particulier postes CNAP et ITA), et au niveau des PN et des laboratoires, le support nécessaire aux services qui composent l'Observatoire Virtuel. Le financement sur projet (ANR, Europe) peut jouer un rôle important dans certaines phases des projets, en particulier pour la conceptualisation, le prototypage et le démarrage, mais les services et les compétences doivent être pérennisées.

Plus généralement, la recommandation de base d'AstroNet dans ce domaine :

> Systematic archiving of properly calibrated observational data in standardised, internationally recognised formats will preserve this precious information obtained with public funds for future use by other researcher, creating a Virtual Observatory.

doit être mise en œuvre, en particulier pour tous les grands instruments internationaux auxquels la France participe, ce qui nécessite une action résolue de l'INSU.

A noter aussi qu'il faut que les spécificités des métiers de chercheurs, d'informaticien et de documentalistes qui travaillent dans ces domaines soient reconnues. C'est particulièrement critique pour les documentalistes, pour lesquels ce type de fonctions est à peine mentionné dans les fiches de postes, alors qu'ils sont à l'avant-garde d'une des évolutions fondamentales de ces métiers.

Par ailleurs, le groupe de travail chargé de l'astrophysique de laboratoire estime qu'il serait souhaitable que la diffusion OV des données de physique atomique & moléculaire d'intérêt astrophysique soit effectuée par une équipe de permanents conseillée par un comité international d'experts utilisateurs et fournisseurs de données spectroscopiques (physiciens et astrophysiciens). Leur but premier serait de collecter, évaluer, rassembler, documenter, distribuer les nouvelles données de laboratoire (expérimentales et théoriques) disponibles.

Au niveau européen

Un problème critique est d'assurer la pérennisation des financements qui permettent de continuer la coordination des activités au niveau européen (Euro-VO) et au niveau international (IVOA), qui sont essentielles pour la maintenance évolutive des

standards qui forment l'infrastructure technique de l'OV. Un sujet d'inquiétude est qu'il n'est pas possible d'assurer un financement pérenne au niveau européen, alors que le projet EuroVO-AIDA se termine en juillet 2010.

Il faut également trouver un cadre au niveau européen (et plus généralement au niveau international) pour faciliter les convergences entre les différents domaines qui relèvent de la problématique Observatoires Virtuels. La France a joué un rôle précurseur dans ce domaine grâce à la large couverture thématique de l'AS OV, mais il reste à trouver un relais au niveau européen. L'IVOA réfléchit également à la mise en place de liaisons avec les autres disciplines au niveau international.

La formation et les métiers du calcul et de l'OV

Les thématiques du calcul et de l'OV reposent sur des métiers et des compétences spécifiques aussi bien pour les ITA que pour les chercheurs. Pour ces deux domaines relativement nouveaux, des recrutements de personnels avec des profils spécifiques (ingénieur spécialisé en calcul intensif, documentaliste pour l'OV, …) devront avoir lieu, notamment pour le bon fonctionnement des méso-centres et la poursuite des développements au CDS. Pour ce qui concerne l'OV, il est également nécessaire de modifier les profils de documentalistes afin de disposer d'une fiche métier bien adaptée.

Il faut également recruter des chercheurs « *Instrumentalistes* », capables notamment de développer des codes ou des services. Il est important de poursuivre le recrutement sur ces types de profils et le travail spécifique effectué par ces chercheurs doit être reconnu aussi bien pour le recrutement que pour les promotions par l'ensemble des corps (CNRS, CNAP, enseignants-chercheurs, …).

Par ailleurs le développement et l'utilisation des outils du calcul et de l'OV nécessitent un effort important de formation initiale et continue. Pour ce qui concerne le calcul, la formation initiale est assurée par les Masters et les Ecoles doctorales et la formation continue par les centres nationaux. Pour l'OV, il s'agit essentiellement de formation permanente assurée par le CDS qui doit donc disposer des moyens humains nécessaires pour cette mission.

Valorisation

R. Bellanger, E. Bertin, J. Boulesteix, T. Gonthiez, P. Kern (Coordinateur), E. Priéto, J. Michel Réess, E. Sein.

L'impact économique de la discipline est difficile à analyser suivant les critères habituels de la valorisation des activités de recherche scientifique. Malgré un nombre réduit de brevets, licences d'exploitation, et entreprises créées, l'étude menée montre que les investissements alloués au développement de l'astronomie en général, et de l'instrumentation associée en particulier ont des retombées conséquentes dans le secteur industriel, avec un retour d'investissement hors salaire souvent proche de 1 pour l'essentiel de grands programmes. Les partenaires de la discipline considèrent que les réelles retombées dépassent ce qui est immédiatement mesurable par l'ouverture de marchés internationaux et bien au-delà des marchés de l'astronomie.

La valorisation au sens strict du terme est difficilement appréhendée par les laboratoires. Ceux-ci invoquent un manque de moyens appropriés et une méconnaissance des procédures. Les expériences de valorisation réussies correspondent en général aux endroits où un lien est bien établi entre les cellules de valorisation d'une des tutelles et le laboratoire.

Les développements instrumentaux des laboratoires INSU-AA sont, dans une grande majorité de cas, très innovants technologiquement et exigeants en termes de performances, donc potentiellement très porteurs de valorisation. Pourtant, au sens traditionnel de la valorisation, l'INSU-AA n'est pas une discipline qui dépose beaucoup de brevets.

L'objectif premier du développement instrumental est d'obtenir les meilleures données astrophysiques, et non pas une finalité technologique. Cet objectif premier impose de mener les développements instrumentaux jusqu'à un prototype pleinement opérationnel, incluant les équipements de tests et recettes et la partie logicielle d'acquisition de données à partir du sol ou de l'espace. Du fait de la mission première des laboratoires, les moyens disponibles seront mis en priorité pour l'accomplissement des tâches d'observation et d'interprétation, de construction d'instruments d'observation, et de manière beaucoup plus marginale pour la valorisation des développements accomplis en vue de leur application à d'autres domaines.

Dans ce sens, la valorisation des activités de recherche au sens conventionnel du terme au-delà de l'effort habituel de publication n'est pas mise en priorité, et ne constitue pas un moteur usuel du support de l'activité de recherche de la discipline. Les financements des projets qui sont menés dépendent assez peu des résultats de valorisation autre que par une publication scientifique. Tout au plus il est considéré, parfois, de s'appuyer sur des domaines à fort potentiel économique pour bénéficier des efforts technologiques qui en résultent (télécommunications dans les années 90, optique adaptative militaire dans les années 80, imagerie infrarouge dans ces mêmes périodes). Pour l'essentiel, en France comme en Europe, les financements des moyens d'observation en astronomie sont issus des grandes agences nationales et internationales et génèrent un nombre assez réduit d'actions de valorisation de type brevet et transfert de savoir faire formalisés, par comparaison à d'autres disciplines. Peu de laboratoires dépose des brevets, et dans le meilleur des cas en nombre limité.

Par contre les financements alloués à la réalisation des grands instruments d'observation sont en grande partie dépensés dans l'industrie, sous forme de sous-traitance, ou de contrats formels de collaboration. Il en résulte un fort impact économique de l'activité de la discipline auprès de nos partenaires industriels. De surcroît ces projets de réalisation sont très souvent l'occasion pour les partenaires industriels d'un accroissement de savoir faire et de potentiel technologique. Ces remarques préliminaires peuvent expliciter certaines constatations faites par le groupe de travail.

Moyens mis à disposition des laboratoires pour la valorisation

Nous présentons ici les moyens existants pour les laboratoires pour valoriser leurs recherches et les possibilités offertes pour leurs mises en place.

Méthodes de valorisations

Les méthodes de valorisations sont multiples et sont souvent menées parallèlement ou successivement. Nous en donnons ici une liste non exhaustive qui est une synthèse de ce que nous avons recensé :

Collaborations de recherche

- bi partenaires : entre un laboratoire et un partenaire unique [1] ;
- multipartenaires : entre plusieurs partenaires dont un laboratoire, principalement dans le cadre de projets subventionnés sur appels d'offres (ex. : FP7, ANR, FUI, …).

Dans le cadre des collaborations de recherche, la valorisation des recherches est précisée par un contrat de type Contrat de Recherche, Accord de Consortium, … Dans la majorité des cas pour que l'exploitation des résultats se fassent par un partenaire, il y a une nécessité d'établir un nouveau contrat, type contrat de licence ou de cession. Au cours de la réalisation de ces collaborations de recherche, des transferts de savoir-faire et compétences se font fréquemment entre les partenaires. Ceci est indispensable pour la bonne réalisation des projets et apporte de la valeur ajoutée à tous. Cela peut engendrer des situations complexes dans

1 Partenaire pouvant être une entreprise, un laboratoire, une organisation nationale ou internationale, une fondation, un institut, …

lesquelles plusieurs partenaires peuvent revendiquer de bonne foi la propriété des résultats.

Depuis 4 ans, notamment depuis la mise en place des Pôles de Compétitivité et de l'ANR, il est constaté que les Laboratoires INSU/AA sont fortement sollicités par des entreprises ou d'autres laboratoires pour participer à des projets multipartenaires. Ces projets visent à développer des produits issus du savoir-faire venant de la communauté Astronomie, en vu de leur application en dehors du domaine de l'Astronomie. La Commission suggère à l'INSU d'analyser dans l'avenir les retombés économiques des développements initialement faits pour des besoins de la discipline.

Prestations de recherche

Dans ce cadre le laboratoire réalise des recherches pour le compte d'un partenaire. Ce partenaire finançant ces recherches acquiert souvent la propriété des résultats sans autre contrepartie financière que celle prévue pour le financement de cette prestation de recherche.

Création d'entreprise

Depuis la loi sur l'innovation de 1999, ce mode de valorisation des recherches est mis en avant. Il offre de grandes possibilités aux personnels de recherches de s'investir à titre personnel tout en apportant des retombées directes pour son laboratoire :

- le personnel peut s'investir soit sous forme d'actionnaire, de conseiller scientifique ou même de se rendre disponible à l'entreprise pour une durée déterminée (voir tableau récapitulatif) ;
- les laboratoires peuvent bénéficier d'aides publiques pour aider les développements techniques nécessaires en phase ante-création (souvent via les régions), puis une fois la société créée, il est fréquent de voir que les laboratoires et les sociétés ont des collaborations de recherches.

Au travers des interviews menées dans le cadre de la commission, il est constaté que ce mode de valorisation donne satisfaction aux laboratoires concernés. Néanmoins, il est constaté que de tels projets sont risqués, prennent du temps, et nécessitent une vigilance pour qu'ils ne soient pas contre-productif vis-à-vis de la mission principale du laboratoire. Ils doivent être considérés comme un moyen de valorisation dont la rentabilité ne peut être vue à cours terme.

Consultant

Les personnels de la recherche publique ont la possibilité de valoriser leur savoir à titre individuel auprès d'entreprises, soit comme consultant, soit au titre du concours scientifique (souvent dans le cadre de création d'entreprises dans ce cas-là). Bien que cela ne valorise pas directement les travaux menés dans les laboratoires, le souhait d'entreprises de recourir à des consultants issus de la communauté INSU/AA montre une reconnaissance du niveau d'expertise de la communauté. Nous n'avons pas pu établir de statistique sur le nombre de chercheurs consultants, mais avons constaté au travers du travail mené que cette forme de valorisation a des retombés pour les laboratoires, s'associant souvent à un partenariat laboratoires entreprises, ce partenariat ayant déjà eu lieu, ou prenant la suite du travail de consultant fait par le chercheur.

Licence/ cession

L'exploitation des résultats issus des laboratoires par une entreprise doit se traduire à un moment donné par un contrat de licence ou de cession qui prévoit les obligations de chacun et les retours pour les tutelles du laboratoire. Concernant l'INSU/AA, très peu de contrats de licences ou cessions sont recensés, même si les chercheurs de la discipline communique beaucoup de leur savoir-faire et résultats, dans le cadre de collaborations de recherche ou de sous-traitance, à des entreprises qui les exploitent par la suite, sans forcément de contreparties. Des réflexions doivent être menés sur cela, en lien étroit avec les structures de valorisations. Des formations spécifiques sur la confidentialité dans le cadre de développement de projets pourraient être préconisés.

Structures de valorisations pour mettre en place ces méthodes de valorisation

Pour les laboratoires de la discipline qui sont des UMR, la mise en place des modes de valorisations préalablement mentionnés, peut recourir à différentes structures de valorisations :

- les Services Partenariats et Valorisations de leur Délégation Régionale CNRS respectives (SPV) ;
- les Structures de Valorisations de leurs Universités qui peuvent être soit des Services Internes, des SAIC[2] ou des filiales de droit privé.

Toute action passe à un moment donné par ces structures. Nous constatons que le traitement des projets est fait de manières très inégales d'une région à l'autre, et qu'il n'était pas réaliste de conseiller aux laboratoires de l'INSU de privilégier l'une des structures de valorisation. Indépendamment de celle-ci, le traitement des projets, qui fonctionnent bien et pour lesquels les partenaires *in fine* tirent satisfactions, ont quelques points communs :

- relation de proximité entre la structure de valorisation et les laboratoires permettant très tôt une participation de la structure de valorisation dans la vie d'un projet ;
- prise en compte des enjeux du projet, du contexte scientifique – économique - industriel dans lequel il est mené, des partenaires impliqués ;
- connaissance par la structure de valorisation de la technologie, des résultats et de l'équipe les ayant développés ;
- structure de valorisation réactive, pouvant conseiller et/ou avoir un rôle moteur dans les projets ;
- personnel de recherche ayant fait l'effort de connaître les différents modes de valorisations existants et les ayant intégrés dans leurs projets et idées de recherches ;
- démarche entrepreneuriale à la fois du chercheur et de son interlocuteur au sein de la structure de valorisation ;
- les intervenants ont une réelle expérience de valorisation en ayant travaillé dans le privé ou en ayant mené eux-mêmes une démarche de valorisation (brevet, licence, création d'entreprise, …).

2 SAIC: service d'activités industrielles et commerciales : http://www.amue.fr/finances/metier/valorisation/le-service-dactivites-industrielles-et-commerciales-saic/

Les données utilisées par le groupe de travail

Les chiffres communiqués par le CNRS

La DPI (Direction de la Politique Industrielle du CNRS) a édité un récapitulatif exhaustif des actions de valorisation menées par le CNRS sur l'année 2008. La Figure 1 donne le récapitulatif de ces actions de valorisations, dont 295 brevets. Cette représentation montre la faible contribution de l'INSU, 6 brevets inventoriés pour l'ensemble de l'INSU, et 3 pour l'INSU/AA.

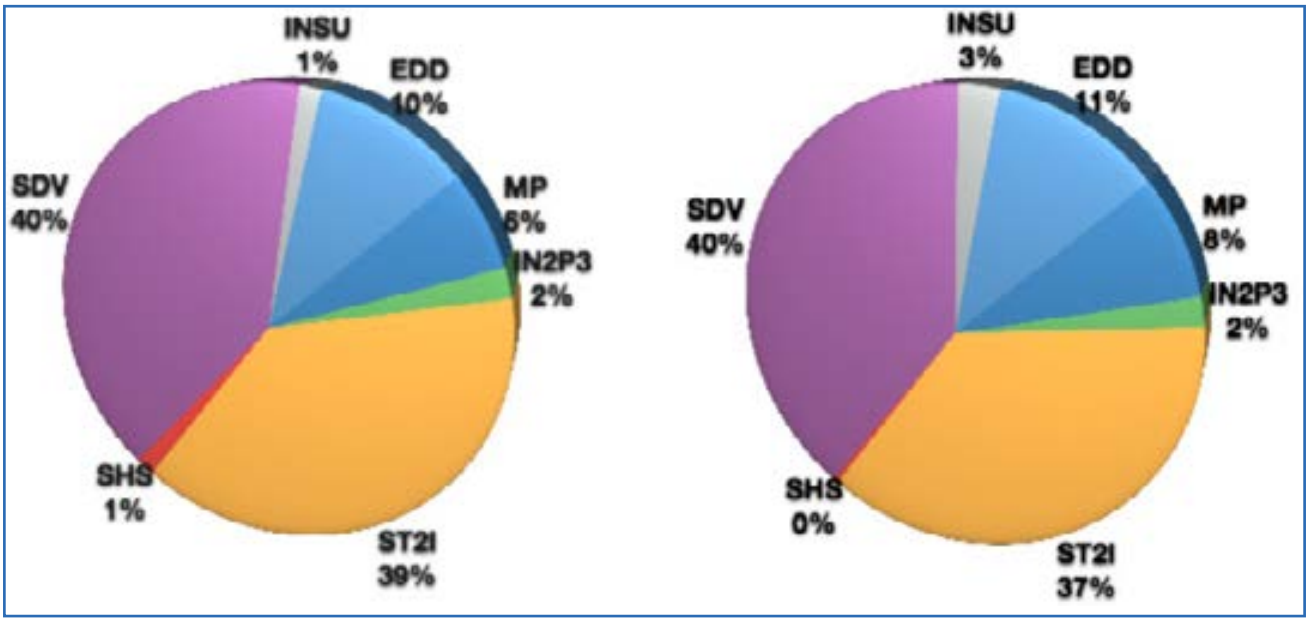


Figure 1 : gauche : Actions de valorisation CNRS par département pour 2008 (de l'ordre de 350). Droite : répartition des 295 brevets par département. Certaines actions sont interdisciplinaires. *(Source : La diffusion des découvertes du CNRS vers le monde industrie pour 2008, Tome 2, DPI)*..

Enquête menée auprès des laboratoires

Les grandes lignes de l'enquête

Une enquête a été menée auprès l'ensemble des laboratoires de la discipline soit une trentaine de directeurs d'unité de recherche contactés ; 22 réponses ont été traitées. L'enquête a recensé les types de valorisations identifiées par les unités de recherche et les partenariats et collaborations associés. Les données fournies ne sont pas homogènes, induisant un biais éventuel : le nombre d'actions répertoriées est probablement en deçà de la réalité, leur identification n'est sans doute pas toujours correctement faite. Ces résultats vont surtout donner une tendance. La figure 2 donne le type de valorisations répertoriées.

La figure 2 récapitule les partenaires mentionnés. La conception de la valorisation varie d'un laboratoire à un autre. Dans une grande partie des cas, elle est formellement attachée à la prise de brevet, cession de licence d'exploitation et création d'entreprise. Plusieurs de nos interlocuteurs académiques et industriels mentionnent une valorisation effective des acquis des laboratoires chez un partenaire industriel, via une collaboration au sein d'un projet de réalisation ou d'un programme de recherche. En tout état de cause il existe un grand nombre d'innovations qui ne sont pas formellement valorisées. Les causes invoquées sont rapportées dans la figure 4. Dans une très grande majorité de cas, le manque de temps est invoqué. Il est surprenant que peu de laboratoires aient conscience de l'impact économique effectif de leur activité via leurs collaborations industrielles.

Nous donnons en annexe A trois exemples récents de valorisation via une prise de brevet issus de l'INSU/AA, qui illustrent le type de valorisation issue des activités des laboratoires de le discipline.

Il est apparu clairement au cours de cette enquête une demande d'aide pour toutes les démarches liées à la valorisation. Elle s'est exprimée par les attentes suivantes :

- accès à une documentation pour les processus de valorisation ;
- évaluation du potentiel de valorisation des études et réalisations faites en laboratoire ;
- sensibilisation des personnels et surtout des directeurs d'unités aux questions de valorisation ;
- accès identifiés et simples à des spécialistes de la valorisation ;
- besoin d'outils pour la diffusion des savoir-faire ;
- besoin d'outils pour la protection des concepts, méthodes et composants souvent rendus publics par les grandes agences ;
- amélioration de la coordination entre les différentes tutelles d'une UMR.

Le cas particulier de la valorisation des activités liées aux logiciels et aux données

A l'heure actuelle, les logiciels et algorithmes en tant que tels ne sont pas brevetables en Europe ; ils ne peuvent l'être que s'ils font partie d'inventions susceptibles d'application industrielle. En dehors de telles applications, la valorisation des développements logiciels effectués dans les laboratoires ne peut se faire que par concession de licences d'exploitation ou d'utilisation, au sens du

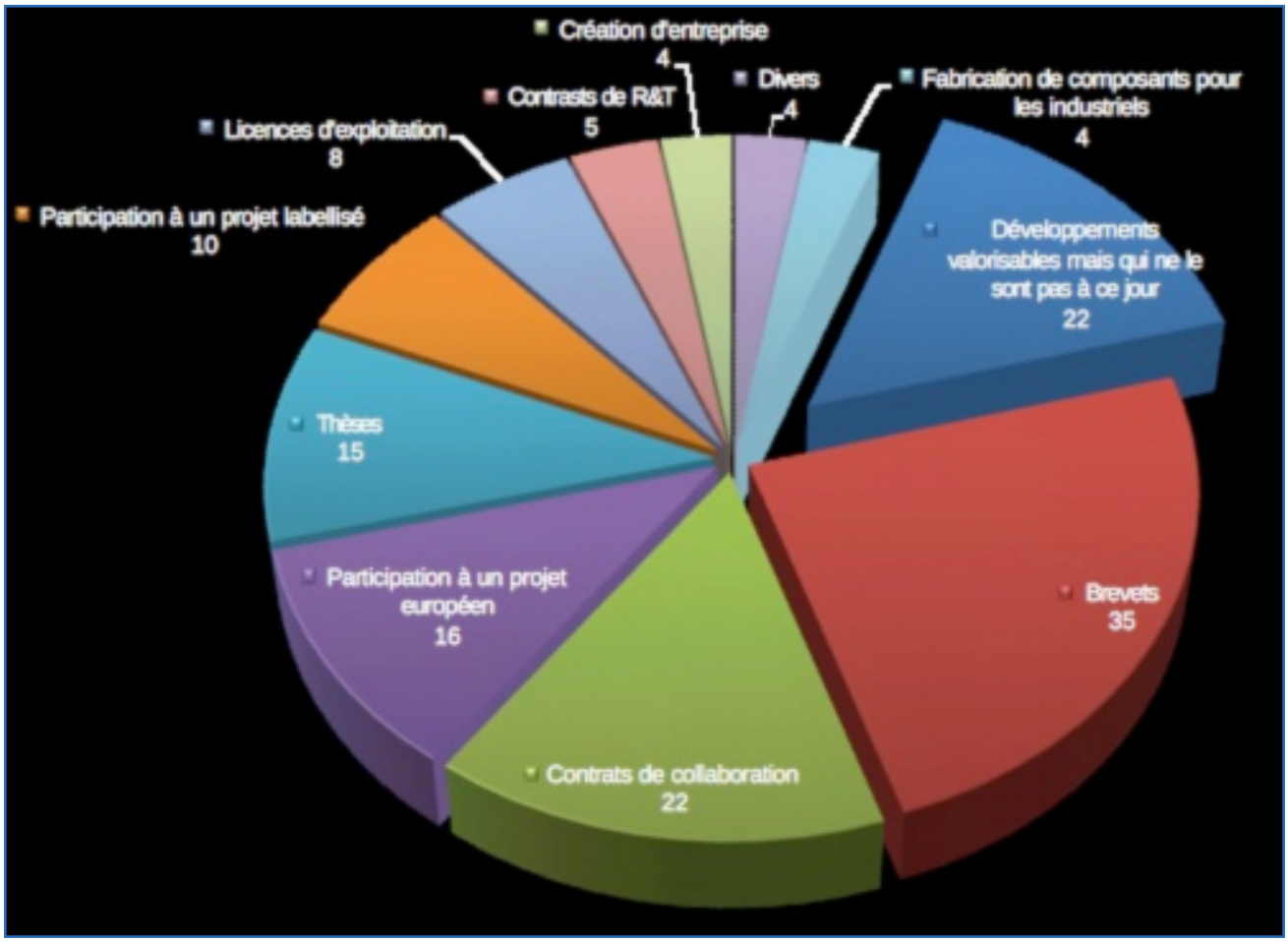


Figure 2 : Opérations réalisées sur la période 2003-2008 et développements qui pourraient faire l'objet de valorisation mais qui ne le sont pas à ce jour.

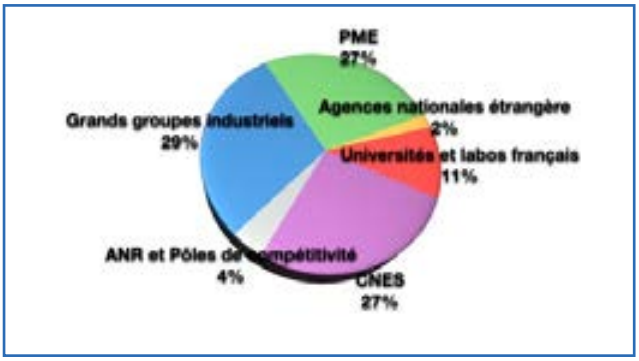


Figure 3 : Partenaires mentionnés par les laboratoires pour les collaborations industrielles de la discipline, que ce soit pour des contrats, des brevets, des licences ou autres actions.

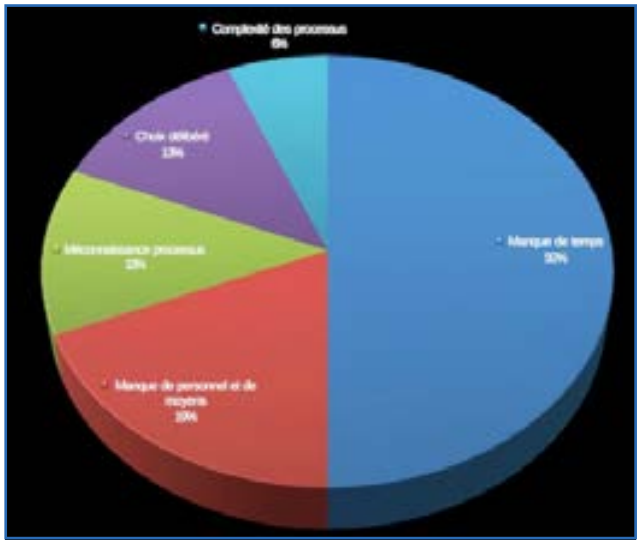


Figure 4 : Répartitions des raisons pour lesquelles les unités n'ont pas valorisé un développement

droit d'auteur.

La concession de licences commerciales de logiciels représente en 2009 un phénomène marginal en astronomie (quelques cas en France au cours des 5 dernières années). La contribution des laboratoires est très largement dominée par les licences non commerciales de type « Open Source » (principalement Gnu Public Licence et CeCILL[3]), et concerne à la fois des paquetages complets et des modules pour des logiciels existants.

3 Les licences CeCILL proposées par le CEA, le CNRS et l'INRIA, sont des adaptations aux droits français et européen des principales licences du monde du logiciel libre : http://www.cecill.info

Leur dissémination dans la communauté, y compris chez les astronomes amateurs, est facilitée par l'existence de standards bien établis pour les formats de données (FITS) et de requêtes (protocoles de l'Observatoire Virtuel).

Les données elles-mêmes peuvent être valorisées sous forme de contrats d'exploitation de "belles images" destinées au grand public, comme l'illustre le partenariat entre le CFHT, des agences photographiques et une société d'édition pour la gestion et la diffusion des images du ciel obtenues avec le télescope Canada-France-Hawaï (posters, calendriers, vidéos).

Une reconnaissance par le secteur privé des compétences en développement logiciel des étudiants en astronomie/astrophysique

Plusieurs étudiants issus de l'INSU/AA intègrent chaque année le secteur privé du logiciel (le plus souvent en SS2I) à l'issue d'une thèse ou d'une expérience postdoctorale. Les domaines concernés incluent le traitement du signal, les systèmes de gestion de bases de données, ou encore le multimédia. Les qualités reconnues chez ces ex étudiants sont, leur expertise en manipulation de données et en statistique, une grande autonomie, et une expérience à l'international (pratique de l'anglais, habitude d'une confrontation au niveau mondial, capacité de communication). On notera que les SS2I en pointe sont très demandeuses de ces jeunes chercheurs, et recrutent même en période de crise.

Consultation de partenaires industriels

Un volet important de la valorisation de l'activité des laboratoires INSU/AA concerne leur impact économique. Ces laboratoires entretiennent des relations technologiques étroites avec les industriels qui interviennent sur les programmes d'étude et de réalisation. Ces relations ne donnent pas souvent lieu à des brevets ou transferts technologiques. Une enquête a été envoyée à ces industriels (via POP-sud). Les réponses provenant de quatre grosses PME sont assez instructives et assez homogènes.

Les premières questions portaient sur l'apport économique direct de l'astronomie. Pour ces quatre entreprises, le marché représente une part conséquente de leur chiffre d'affaires (de 15 à 35%). Le marché de l'astronomie est vu comme indispensable pour ces entreprises. Nous avons ensuite abordé l'impact des défis technologiques de l'astronomie sur la croissance de l'entreprise. Ces défis conduisent ces entreprises à développer des expertises qui leur permettent d'être plus compétitives ensuite sur d'autres marchés. Nous avons abordé ensuite les relations industrie - laboratoire dans le cadre de contrat de fabrication instrumentale. Ces industriels perçoivent nos laboratoires comme des donneurs d'ordre exigeants et coopératifs. Dans le cadre de ces contrats, nos compétences et expertises peuvent les aider pour l'exécution optimale du contrat. Les collaborations sont considérées comme fructueuses par ces industriels. Le retour de ce questionnaire est très partiel ; néanmoins nous pouvons estimer que l'impact économique de nos activités est conséquent sans parler de valorisation plus formelle. Il est noté aussi que les industriels ont une connaissance très limitée du potentiel de nos laboratoires, d'autant plus qu'ils sont éloignés de notre domaine d'activité.

- Les actions de valorisation prennent du temps, et il peut s'écouler plusieurs années entre l'idée et l'application valorisée. L'évaluation des retombées n'est pas toujours simple.
- Des techniques ou des procédés sont développés avec l'aide de laboratoires, plutôt que des produits.
- La valorisation se mesure à la capacité des techniques acquises à ouvrir des portes à d'autres marchés. Les développements pour le VLT par exemple ont ouvert le marché des télescopes américains GEMINI.
- Les répercussions à plus grande échelle pour un grand groupe industriel sont plus difficiles à estimer. Il est de même assez difficile d'identifier les retombées effectives de tels ou tels domaines, plusieurs applications pouvant contribuer à des développements similaires.
- Les collaborations sont privilégiées avec les laboratoires ayant une expertise reconnue dans les domaines clés concernés, cette recherche se faisant aussi avec des laboratoires étrangers par contrat direct ou thèse.

Le retour des investissements de la discipline sur l'activité industrielle française

Il n'est pas facile de faire une analyse précise de ce retour, par contre il est possible d'en estimer les grandes lignes. Les ordres de grandeur des contributions françaises aux agences sont récapitulés ci-dessous.

ESO :	20 M€/an
ESA :	65 M€/an
Programme exploration spatiale astro :	jusqu'à 10 M€/an
Astronomie au CNES :	62 M€/an

Une partie très significative de ces contributions retournent vers l'industrie pour la réalisation des instruments.
Ce retour industriel est très nettement dominé par l'activité spatiale, où les programmes de l'ESA tiennent la plus grande part. Plus précisément dans le cas de l'ESA, pour le programme obligatoire total, sur une période de 9 ans de 2000 à 2009, on note un rapport retour / investissement vers l'industrie française de 563 M€ / 451 M€, les chiffres annuels étant en croissance significative sur cette période. Pour le programme d'exploration robotique de l'ESA le rapport est de 2 720M€ / 2 576M€ sur la même période.

Dans le cas de l'ESO le budget d'investissement total est de l'ordre de 50M€/an (i.e. hors salaires et opérations). On constate un retour sur investissement de la France proche de 1, la contribution française étant de 16%, cela signifie un retour proche de 8 M€/an vers l'industrie française pour la part ESO.

Nous détaillons en annexe ce propos, à partir des chiffres de 2 projets sol (SPHERE et MUSE) et 2 projets spatiaux (PLANCK et VIRTIS) qui confirment cette tendance (voir en annexe B).

L'activité économique générée par la diffusion auprès du public

Livres d'astronomie

D'après un décompte fait depuis 2005, on constate qu'il y a en moyenne chaque mois un ouvrage écrit par un professionnel de la discipline qui est édité et commercialisé en France, à destination du grand public.

Planétarium

Une réelle dynamique marque la création des Planétariums au fil des années : après la grande relance des années 1980-85 (7 créations), le nombre d'implantations croît régulièrement à raison d'une création par an en moyenne. L'ensemble des Planétariums français reçoit près de 1 500 000 visiteurs par an, dont environ 10% (essentiellement des scolaires) fréquentent les planétariums

mobiles. Chaque création de Planétarium engendre la création d'emplois associés avec le souci de former et faire reconnaître ces nouveaux emplois.

Enrichi par les apports de la télévision, du cinéma, des salles IMAX, le Planétarium d'aujourd'hui visualise l'Univers en 3D, à travers les images transmises par les VLT et HST, mais aussi les images de la biologie, de la chimie,..., toutes images issues de la recherche actuelle. Les Planétariums participent à l'éducation des jeunes, valorisent la recherche scientifique, renforcent la cohésion sociale ; ils s'inscrivent parfaitement dans les préoccupations des collectivités territoriales.

On peut citer la création et développement d'entreprises. RSAcosmos constructeur français de planétariums, filiale de la société RSA (automatisme industriel) se développe activement avec un rayonnement international croissant (devenu l'égal de Zeiss dans cette branche). Plusieurs sociétés multimédia créent des spectacles de planétarium en «video pleine voûte» en lien avec les planétariums et l'APLF (Association des Planétariums de Langue Française : http://www.aplf-planetariums.org/.

Analyse

Nous constatons une disparité entre les informations de la DPI/CNRS et celles communiquées par les laboratoires, même s'il faut relativiser l'homogénéité des informations transmises par les laboratoires. Par exemple il existe des brevets déposés hors du CNRS, y compris avec des inventeurs CNRS.

En analysant les résultats de notre enquête on constate une insatisfaction des laboratoires, invoquant dans la plupart des cas le manque de temps et de moyens humains et le manque d'information sur les procédures. Dans plusieurs laboratoires un potentiel objectif de développements pourrait fortement bénéficier d'applications hors astronomie. Les transferts pourraient être d'autant plus efficaces que les prototypes construits dans le standard des grandes agences (ESA, ESO, NASA, CNES) disposent de plan de développements stricts pouvant grandement faciliter les procédures de transfert. Ces équipes sont de plus en plus formées pour produire une documentation détaillée des instruments réalisés. L'effort pour aller jusqu'à un transfert formel sort des priorités des équipes. Faute de connaissance des procédures, cette étape est omise la plupart du temps.

Par ailleurs il convient de mentionner, en particulier pour les programmes spatiaux, qu'un transfert effectif de savoir faire et de technologie s'opère au cours des projets, dans le cadre des contrats de collaboration. Les entreprises concertées dans le cadre de cette étude, souligne l'importance de l'impact de nos projets sur leurs activités. Une analyse plus détaillée de l'impact économique de l'activité de la discipline serait utile et doit pouvoir se faire avec l'appui des pôles de compétitivité concernés.
Les actions de valorisation émergent souvent de développements instrumentaux menés avec un support ou en collaboration avec d'autres établissements que le CNRS. Il en résulte dans beaucoup de cas que les actions de valorisation sont menées avec le support de ces établissements (CNES, Universités, CEA, …) ou directement avec un industriel. Il arrive aussi que l'intervention du CNRS en certains lieux soit plus considérée comme une entrave que comme une aide dans ces procédures de valorisation. De manière factuelle, il advient parfois que la disponibilité des services de valorisation induise des temps d'instructions de dossier tout à fait néfaste au transfert lui-même. Dans ce sens, les actions et prérogatives respectives du CNRS localement et au niveau national ne sont pas toujours compréhensibles de la part des laboratoires.

Dans le suivi des actions de valorisation, au niveau individuel, les agents CNRS concernés notent qu'ils ne sont informés d'aucune manière sur les résultats de ces actions de valorisation.
De toute évidence il manque un lien au plus proche des équipes qui facilite la procédure de transfert lorsqu'il est justifié. Le retour de l'enquête menée auprès des laboratoires montre une forte méconnaissance des mécanismes de valorisation, et des partenaires à solliciter.

On constate que les unités de recherche qui ont su se doter de moyens de valorisation proche des chercheurs, ou se rapprocher de tels moyens existant par ailleurs, sont beaucoup plus efficaces, pour breveter mais surtout pour déposer avec des industriels partenaires des dossiers auprès des pôles de compétitivité qui aboutissent.

Lorsque le correspondant de la structure de valorisation (CNRS, université, ou autres) est au contact du laboratoire et des chercheurs au moment même où les innovations émergent, on constate un processus beaucoup plus efficace, identifiant au meilleur moment les développements méritant une action de valorisation et évitant également au laboratoire de chercher à breveter ce qui ne le justifie pas.

Recommandations du groupe de travail

- Identification pour chaque laboratoire d'un correspondant dans la structure de valorisation, CNRS ou autre tutelle, familière des développements du laboratoire pour permettre une interaction efficace. Une concertation constructive entre les moyens des universités et des délégations du CNRS serait précieuse.
- Une visite régulière, par exemple annuelle, de ce correspondant permettrait de sensibiliser les personnels aux questions de valorisation tout en donnant à ce correspondant une vision complète des développements spécifiques du laboratoire dans leur contexte.
- Sensibilisation et information des directeurs d'unités sur les

enjeux et moyens de la valorisation.

➢ Mise en place à l'INSU d'un site internet dédié donnant les procédures à suivre pour une démarche de valorisation assortit des liens vers les sites appropriés (FIST, DPI, INPI, cellule de valorisation locale, et les sites équivalents des autres instituts du CNRS)

➢ Sur ce site, à destination des industriels, listes des brevets et savoir-faire des laboratoires, ou lien vers la page adaptée de chaque laboratoire.

Annexes

Exemples de transfert de technologies issus de l'INSU/AA

	Miroir Déformable	Image slicer	Oeil
Laboratoire INSU	LAOG (CNRS / UJF)	LAM	LESIA
Entreprise partenaire	ALPAO	Winlight	MKT
Etapes clé	2005 : Business Unit au sein de Floralis 2008 : Création de ALPAO	2006: première idée, prototypage, et brevet 2007: proto VLT-MUSE	1998 : dépôt du brevet fondateur
Org. valorisation	Floralis (filiale UJF)		FIST
Application	Astronomie et applications industrielles	Astronomie	Ophtalmologie
Retombée attendues	systèmes d'optique adaptative, visant réductions de coût essentiellement	position privilégiée pour répondre aux appels d'offre	Par l'application à d'autres domaines, développement plus large : réduction de coût, logiciels dédiés.
Mode de collaboration	collaboration de recherche, licence, hébergement, prestations de Recherche, réponses à AAP en commun	dépôt de brevet développement en commun de prototypes	phase de valorisation initiale via des brevets et licences d'exploitation
Commentaires	Société créée suite à une démarche de valorisation novatrice (Buisness Unit) au sein de Floralis menée avec le LAOG.	Le dépôt de brevet avait un caractère défensif dans le cadre des appels d'offre pour les instrumentations astronomiques	Difficultés pour une réelle valorisation par MKT en contexte concurrentiel. Liens étroits avec structure de valorisation dans la durée serait un plus.

Exemples d'impact économique des projets de la discipline

Nous illustrons ce propos à partir de 2 instruments de seconde génération pour le VLT (SPHERE et MUSE) et 2 projets spatiaux (PLANCK et VIRTIS) importants de la discipline.

Remarques : Pour Planck HIFI / France s'ajoute 41 post-doc, coût évalué à 1,6 M€uros. Les FTE et coûts énoncés ici, sont hors chercheurs (HFI : 31 Pi, Co_Is, dont 12 français, 198 chercheurs, dont 95 français).

	MUSE	SPHERE	VIRTIS-Rosetta	PLANCK-HFI
Partenaires français	CRAL, LATT	LAOG, LAM, LESIA	LESIA	IAS, IAP, LAL, LPCE, CESR, Institut Néel, APC, CEA(IRFU)
Partenaires étrangers	NOVA Leiden, IAG Göttingen AIP Potsdam ETH Zurich ESO Munich,	NOVA Leiden, MPIA Heidelberg, Padova, ETH Zurich ESO Munich		JPL, Cardiff, RAL, Université de Rome, Université de Grenade, Université de Dublin Sciencetech (Canada)
Budget total	21 M€	9,7 M€ (+55FTE)	3,3M€ (5,8M€ consolidé)	70 M€ (155 M€ consolidé)
Part Française	8,7 M€	1 M€	3,3M€	38 M€ (76 M€ consolidés) [a]
Sous-traitance France	3,6 M€	2,5M€ (1M€ Opticon)	1,65M€	36 M€
Acquis industriel	Winlight : Image Slicer Zeiss : Réseaux Cybernetics : Mini Fabry-Perot adhérés	E2V : CCD rapide faible flux	Cilas : Miroir Déformables	Raytheon : détecteurs IR Air Liquide : 100/50 mK sur satellite pour plusieurs PME : méthodes de pointe (matériaux, procédés, vérif.)

Europe

J. Bergeron, P. Feautrier, F. Genova, E. Kohler, D. Mourard (coordinateur), C. Turon, avec la contribution de C. Cesarsky.

Dans ce document, nous présentons tout d'abord un tableau des possibilités de financement européen ouverts à l'astronomie, principalement à travers les différents outils mis à disposition par l'Union Européenne. Nous nous appuyons ensuite sur une enquête menée auprès des laboratoires de la discipline (2/3 de réponse mais quelques manques importants de laboratoires d'Ile de France ainsi que de laboratoires spatiaux) pour présenter les principales caractéristiques des programmes en cours sur financement de la Commission Européenne ou dans le cadre des appels d'offres de l'ESA et de l'ESO, et analyser les difficultés que peuvent rencontrer les équipes face à ce type de financement.

Nous constatons clairement qu'en Astronomie/Astrophysique un très grand chemin a été parcouru et que la discipline est très fortement structurée au niveau européen, avec un effet important des programmes européens sur la stratégie nationale. Il existe naturellement un certain nombre de difficultés pour la mise en place de ce type de programme et il importe que l'INSU renforce sa prise en charge et son accompagnement. Avec le recul de plusieurs années de fonctionnement au niveau européen, il apparaît en effet fondamental que les agences nationales se saisissent de la question de la pérennisation des actions européennes et qu'il est important que cela soit pris en compte le plus en amont possible des projets. Par ailleurs au moment du montage et du dépôt des dossiers, la cellule Europe de l'INSU peut jouer un rôle centralisateur important en complément bien sûr du rôle, assez divers aujourd'hui, des délégations régionales. Ces deux niveaux doivent être mieux intégrés dans le dispositif au profit des laboratoires et à toutes les étapes des projets : montage, gestion et terminaison/pérennisation.

Cet accompagnement par les tutelles devrait permettre de continuer à renforcer la très bonne place des équipes françaises dans le paysage de l'astronomie européenne.

Les possibilités de financements européens pour l'astronomie

Même s'il n'existe pour le moment aucun financement européen spécifiquement dédié à l'astronomie et à l'astrophysique, différentes possibilités se présentent dans le 7e PCRD, voire dans d'autres programmes.
L'essentiel des financements pour AA provient de la thématique « Infrastructures » dans le programme « Capacités » du 7e PCRD. Les projets dits de « Phase préparatoire » sont réservés aux infrastructures qui ont été retenues sur la liste ESFRI. Tel est le cas pour E-ELT, SKA et KM3NET. Doté en moyenne de 5 millions d'euros, ces projets ne financent pas la construction des futures infrastructures, mais des études de faisabilité juridique et financière ainsi que quelques développements technologiques. Lors de la mise à jour de la feuille de route ESFRI fin 2008, ce sont essentiellement des infrastructures liées à l'environnement qui ont été privilégiées. Lors de la prochaine mise à jour, prévue en 2010, il est question de favoriser surtout les infrastructures liées à l'énergie. Il n'est donc pas sûr que des projets de nouvelles infrastructures AA puissent être retenus dans le cadre d'ESFRI dans les deux années à venir. L'influence de la feuille de route ASTRONET devrait plutôt se faire sentir à moyen terme.

Pour les projets qui ne sont pas encore arrivés suffisamment à maturité pour figurer sur la feuille de route ESFRI mais qui ont bénéficié d'un avis favorable (liste de réserve), il existe les « Design Studies». Cette catégorie comprend l'ET (Einstein gravitational wave telescope), EST (Large aperture solar telescope), LAGUNA (Infrastructure for large apparatus studying grand unification and neutrino astrophysics) et EURONU (High intensity neutrino oscillation facility in Europe).

Alors que les « Phases préparatoires » et les « Design Studies » concernent des projets de construction de nouvelles infrastructures ou des développements majeurs d'infrastructures existantes, les «Initiatives d'infrastructures intégrées (I3) », permettent à des infrastructures existantes d'obtenir des financements, de l'ordre de 5 à 10 millions d'euros, pour se coordonner entre elles, mener des activités de R&D conjointes et s'ouvrir à l'accès transnational. OPTICON, RADIONET et EUROPLANET constituent les projets phares dans ce domaine pour notre discipline.

Mais alors que ces projets-là ont été retenus dans le cadre d'appels «blancs» (bottom-up), la CE a prévu de ne plus publier que des appels ciblés pour la période 2010-13, en tenant toutefois largement compte des I3 déjà existants Ainsi, dans le programme de travail 2010, les appels I3 dans le domaine AA concernent spécifiquement :

1) Research Infrastructures for dark matter search, neutrinos, gravitational waves (en lien avec la Roadmap ASPERA et suite du projet ILIAS dans FP6) ;
2) Research Infrastructures for high energy astrophysics.

Pour 2011, la CE prévoit les appels suivants :

1) Research Infrastructures for advanced radio astronomy (suite du projet RADIONET, en lien avec SKA et ALMA) ;
2) Research Infrastructures for optical/IR astronomy (suite du projet OPTICON, en lien avec E-ELT) ;
3) Research Infrastructures for astroparticle physics : high energy cosmic rays, multi-messenger approach (en lien avec KM3Net, CTA, HESS, obs. Pierre Auger et les

roadmaps ASPERA et ASTRONET).

Pour 2012 est prévu un appel pour la suite d'EUROPLANET (research Infrastructures for Planetology).

Il faut noter que pour la CE, la poursuite de ces grands réseaux I3 n'est pas automatique. Ceux-ci doivent évoluer dans leurs objectifs par rapport aux infrastructures de la roadmap ESFRI sous peine de voir leurs financements baisser. De façon générale, on peut craindre une diminution du financement moyen par projet dans la mesure où le call A (2010) prévoit un budget total de 160 M€ pour 35 projets I3, le call B (2011) 100 M€ pour 21 projets et le call C (2012) 90 M€ pour 22 projets.

La suppression des appels "blancs" découle d'une volonté de la CE de procéder plus par "clusters", à savoir de privilégier des I3 en lien avec les infrastructures retenues dans le cadre de la Roadmap ESFRI. Cette politique risque donc de limiter fortement la possibilité de voir apparaître de nouvelles thématiques en matière d'I3 dans le 7e PCRD, mais renforce les I3 existants.
En revanche, dans l'autre partie du programme Infrastructures, celle consacrée aux e-infrastructures, les possibilités restent plus ouvertes, hormis les appels spécifiquement dédiés aux super-calculateurs ou au réseau. En AA, ces appels sont surtout intéressants pour les observatoires virtuels (cf. EuroVO-AIDA, coordination OAS/CDS). Deux autres projets viennent d'être retenus : VAMDC, piloté par le LPMAA, et HELIO, qui implique l'IAS et l'Observatoire de Paris. Ces projets visant l'intégration de larges communautés, il est regrettable que les budgets dépassent difficilement 3 M € par projets.

Quant aux ERA-NETS, ils jouent un rôle intégrateur important. Conçu au départ par la CE pour lancer des appels d'offres conjoints entre plusieurs agences de financement européennes, cet instrument a été réorienté dans le cadre d'ASTRONET (et d'ASPERA) pour élaborer notamment une prospective européenne, comme en témoignent les documents «Science Vision» et la Roadmap Infrastructures. ASTRONET devrait bénéficier d'un nouveau financement ERANET d'ici 2011 afin de poursuivre la coordination stratégique européenne en AA.

Outre les programmes «Coopération» et «Capacités», le 7e PCRD comprend également les programmes «Idées» (ERC) et «Mobilité» (ex Marie-Curie), ouvert à tout projet AA. Grande nouveauté du 7e PCRD, les financements ERC, destinés soit aux jeunes chercheurs (starting grants) soit aux chercheurs confirmés (advanced grants), sont attribués à titre individuel selon des critères d'excellence scientifique. Compte tenu de l'importance de ces financements (de 100 000 à 500 000 euros par an), il sera intéressant d'analyser d'ici la fin du 7e PCRD les effets de ce nouvel instrument, à la fois en terme scientifique et en terme d'attractivité des organismes hébergeurs. Cinq projets en AA ont jusqu'à présent été retenus, deux en 2007, un en 2008 et deux en 2009. A noter qu'en 2009, trois projets seulement rattachés à l'INSU ont été retenus avec donc deux pour l'astronomie.

Contrairement à ce que pourrait laisser entendre son titre, la thématique « Espace » dans le programme « Coopération » du 7e PCRD n'offre guère d'opportunités. En effet, 85% environ du budget sont destinés à la mise en place de GMES (Global Monitoring of Environment and Security), une initiative conjointe de l'ESA et de l'UE visant à coordonner les activités européennes d'observation de la Terre. Il ne reste donc que quelques niches dans le domaine du développement des technologies de l'espace et du traitement des données spatiales pour des budgets moyens ne dépassant pas 1-3 million(s) d'euros par projet. A titre d'exemple, on peut citer le projet SOTERIA (SOlar-Terrestrial Investigations and Archives) auquel participent le LPG, le LESIA et le LPCE.

Dans le programme «Mobilité», l'essentiel du budget est consacré à des bourses pour doctorants et post-doctorants effectuant une mobilité soit à l'intérieur de l'Europe, soit hors d'Europe. Il est regrettable que, dans le 7e PCRD, les RTN (Research training networks), tel GAIA-ELSA, aient été supprimés et que seuls subsistent les ITN (Initial training networks), plutôt tournés vers la formation des doctorants. A titre d'exemple, on peut citer ELIXIR, réalisé dans le cadre de JWST/Nirspec et auquel participent l'IAP et le CRAL. En revanche, deux nouveaux instruments ont été introduits : 1) «Cofund», qui propose un co-financement CE à des programmes régionaux, nationaux ou internationaux de mobilité des chercheurs ; 2) IRSES (International Research Staff Exchange Scheme), qui finance des programmes d'échanges de 2 à 4 ans avec des chercheurs de pays tiers. Ces deux instruments dont encore à l'état de « rodage ».

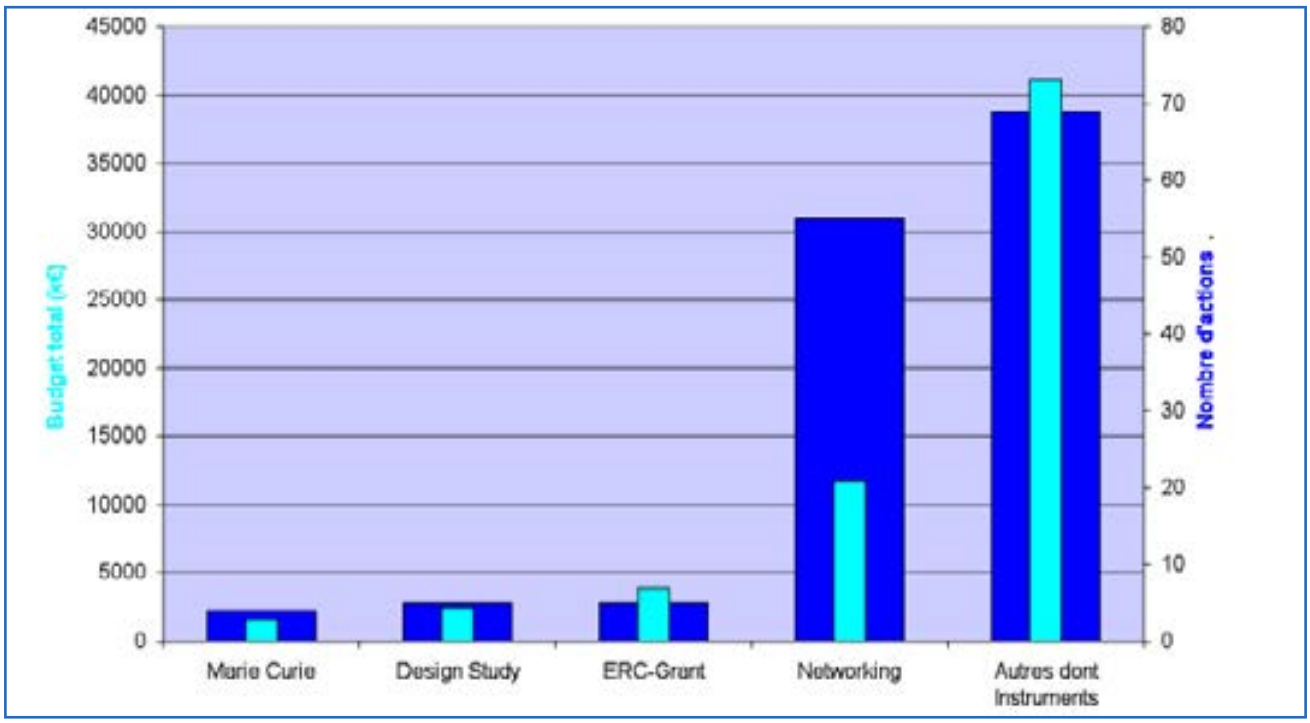
Enfin, il existe quelques opportunités de financements européens hors 7e PCRD pour des actions de coordination. Ainsi, le programme COST finance, à hauteur d'environ 100 000 euros par an, des projets «blancs» d'une durée moyenne de 4 ans axés sur le networking et l'organisation de workshops. Le montage de ce type de projet est plus léger que le montage d'un projet du 7ème PCRD. A titre d'exemple, on peut citer le projet COST 724 « Developing the scientific basis for monitoring, modelling and predicting Space Weather » auquel participe le LPG. L'ESF (European Science Foundation) propose également des "Research networking programmes" (RTN), mais avec une différence notoire : c'est aux organismes dont dépendent les chercheurs à assurer le financement. C'est pourquoi l'INSU, sauf exception, ne soutient plus les projets ESF. De toute manière, le domaine AA est très marginal pour COST et l'ESF.

Pour terminer, il convient d'indiquer deux nouvelles structures mises en place par la DG Recherche qui vont influencer les financements européens à long terme. Les "Joint technology initiatives" (JTI), qui ne concernent pas directement AA, dans la mesure où il s'agit de la mise en place d'appels d'offres pilotés par l'industrie dans les domaines du médicament, de la pile à combustion, de l'aéronautique, des nanotechnologies et des systèmes embarqués, et l'European Institute for Technology (EIT). Conçu comme un institut virtuel (dont le bureau a été créé à Budapest en 2008), l'EIT est censé structurer des "communautés de la connaissance", telles que Climat et Energie pour l'instant, autour de trois piliers : formation, recherche et innovation. Largement contrôlée par des industriels, tout comme les JTI, cette initiative montre que la CE se tourne de plus en plus vers des partenariats public-privé.

Présentation générale des actions européennes des laboratoires.

Sur la base des réponses au questionnaire envoyé à l'ensemble des laboratoires de la discipline, nous avons pu dresser un tableau relativement représentatif de l'état des actions européennes en astronomie. Ce bilan s'établit sur 22 réponses, soit un peu plus de la moitié des laboratoires. Cela représente près de 135 programmes européens. A ce stade, il est important de noter l'absence de réponses d'un certain nombre de gros laboratoires spatiaux, ce qui peut fausser malgré tout les analyses, notamment pour ce qui concerne les thématiques fortes des programmes européens. Néanmoins, une des premières constatations est certainement l'importance des programmes européens dans les laboratoires français d'astronomie : pas moins d'une moyenne de 6 programmes européens par laboratoire, c'est donc dire l'importance des moyens que cela amène dans les équipes.

Sur ces 135 réponses, 52% concernent les programmes de l'Union Européenne, 30% l'ESA (incluant les financement CNES) et 18% l'ESO. Compte tenu du format de l'enquête, les chiffres pour les programmes multilatéraux et internationaux ne sont pas représentatifs de la réalité et ces programmes n'ont pas été considérés dans notre rapport.

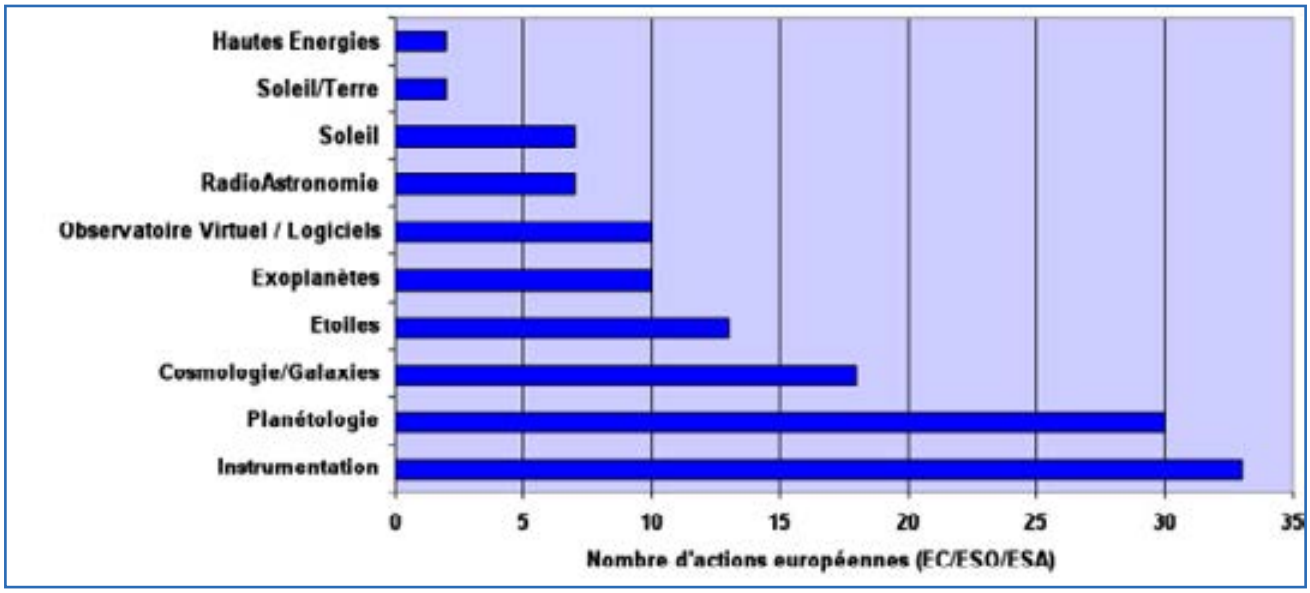


La figure ci-dessus présente la répartition des actions selon le type d'activité que proposent les programmes européens de l'UE, de l'ESA (+ financements CNES) et de l'ESO. En bleu foncé on trouve le nombre de programmes dans chaque grande classe alors qu'en bleu turquoise il s'agit du budget de ces actions. Au-delà des actions liées directement au développement des instruments, on note l'importance des programmes type « Networking», incluant les réseaux de type RTN ou ITN. Ces programmes concernent de plus, généralement, un grand nombre de laboratoires contrairement aux actions de type ERC, Marie-Curie. Le rôle structurant de ces actions est très fort, que ce soit au niveau des collaborations européennes ou au niveau de celui de la coordination entre les différents laboratoires français. Il est particulièrement important de noter le fort succès des Starting Grant et Advanced Grant de l'ERC en astronomie. Cinq projets en AA ont jusqu'à présent été retenus, deux en 2007, un en 2008 et deux en 2009. A noter qu'en 2009, trois projets seulement rattachés aux disciplines de l'INSU ont été retenus avec donc 2 pour l'astronomie. Cela constitue un excellent résultat quand on sait que le taux de réussite moyen global sur l'ERC se situe aux environs de 5%. Ce chiffre est cependant à moduler selon les disciplines et pour les Sciences de l'Univers il s'est élevé à environ 40% pour l'exercice 2008. Comme le montre ce graphique ces projets ERC rapportent un budget réellement conséquent.

La deuxième analyse que nous présentons à la page suivante concerne la répartition de ces actions européennes vis-à-vis des thématiques scientifiques ou techniques. A travers la place occupée par la planétologie et les aspects cosmologie, on reconnaît le rôle des programmes de l'ESA dans ce domaine et l'impact des grandes missions de l'agence sur l'européanisation des laboratoires de la discipline. Les thématiques liées à l'instrumentation occupent une place très forte, et on reconnaît là l'influence des développements instrumentaux pour l'ESO, mais aussi en préparation des futurs grands programmes européens : ELT, SKA notamment. Les thématiques OV et exoplanètes encore jeunes sont néanmoins bien présentes dans ce panorama.

Pour conclure cette analyse, on notera que ces 135 actions représentent un budget d'environ 60M€ et ont impliqué plus de 170 FTE sur la période 2003-2009. Ces chiffres montrent clairement l'impact à la fois structurant et concret pour les laboratoires de

ces actions européennes. De plus, compte tenu des réponses manquantes on peut estimer que la réalité pour l'INSU-Astronomie se situe à un niveau au moins deux fois plus élevé.



Analyse d'impact et effet structurant des projets européens

L'impact des projets européens ainsi que leur effet structurant dépendent beaucoup de leur type et du laboratoire concerné. Pour la communauté AA, on peut grossièrement classer ces projets en trois grandes familles :

- les projets qui répondent à des appels d'offres de grandes agences européennes (ESA, ESO…) ;
- les actions de type mise en réseau ou «networking» ;
- les projets qui répondent à des appels d'offres (les «calls») de la Commission européenne: on pense plus particulièrement au FP6 et maintenant au FP7.

Par ailleurs, on note des différences importantes vis à vis des financements CE selon que le laboratoire concerné est un laboratoire sol ou un laboratoire spatial.

Pour analyser l'impact et les effets structurants des projets européens, nous nous appuyons comme dans le paragraphe précédent sur les 22 réponses au questionnaire envoyé aux laboratoires, et il faut se souvenir qu'ils représentent un peu plus de la moitié des laboratoires sollicités mais avec quelques manques notables sur les gros laboratoires spatiaux de la discipline.

On constate tout d'abord que la France et l'INSU tirent très bien leur épingle du jeu dans la réponse aux appels d'offres des grandes agences européennes que sont l'ESO et l'ESA. Ces appels d'offres peuvent porter sur la définition d'instruments (phases A), la construction d'instruments ou l'analyse de données. Ils sont bien intégrés dans les laboratoires avec une synergie importante entre les motivations scientifiques du laboratoire et les développements de projets techniques. Ils permettent d'obtenir des financements importants et de bâtir des consortiums auxquels participent des laboratoires et industriels européens. Les financements qu'ils apportent peuvent être (très) importants, mais ils sont liés aux projets et sont donc ciblés et limités dans le temps. Les relations tissées lors de ces projets ne sont pas non plus forcément pérennes, elles peuvent disparaitre une fois le projet terminé. Néanmoins, ces projets ont un impact fort sur la structuration des communautés concernées et sur chacun des laboratoires impliqués, en rapport avec le poids de ces projets pour les laboratoires. On note aussi un très fort couplage entre développements instrumentaux (qui se font bien évidemment en forte coopération avec les autres laboratoires européens) et activité scientifique pour l'exploitation de ces instruments (centres de traitement des données, temps garanti, connaissance approfondie des instruments optimisant le retour scientifique, …).

Les projets de la Commission européenne (CE) se montent en réponse à des appels d'offres venant de la CE. Là encore, les laboratoires français sont bien présents mais on note qu'ils sont moins leaders de ce type de projets que dans le cas précédent à quelques exceptions près, comme le CDS à Strasbourg sur les Observatoires Virtuels. On en recherchera les causes plus loin. Comme pour les projets ESO/ESA, les laboratoires notent que ces projets ont amené des financements importants, en particulier au début des années 2000, mais sont inquiets car la CE annonce que ces financements ne sont pas pérennes. On peut déjà prévoir des départs de personnels embauchés en CDD sur ces projets, qui ne pourront pas être maintenus sur ces activités dont le financement sera arrêté. On cite également un grand nombre d'étudiants en thèse liés à ces projets européens. L'un des écueils, comme pour tous les financements sur projet, est la gestion de personnels sous statut différent (CDI, CDD) qui peut générer des tensions dans les laboratoires.

On note tout particulièrement le rôle structurant du programme OPTICON «Access» au niveau de l'astronomie européenne. Ce programme a permis de mettre en commun du temps de télescope de classe 2-4 m à destination notamment des pays qui n'y avaient

pas un accès aisé. Même si la proportion de temps de télescope mis effectivement à disposition et remboursée par OPTICON est minoritaire, son effet est jugé comme très important en termes de rayonnement et d'ouverture sur la communauté. Malheureusement, le soutien de la CE à ce programme faiblit dans le FP7.

Les programmes du FP7 concernent de plus en plus les projets et de moins en moins les réseaux d'excellence qui permettent aux communautés de se rencontrer. C'est là que va maintenant le gros des financements et on peut regretter la disparition progressive de ces lieux de structuration scientifique de la communauté au profit d'une philosophie 'projet d'excellence' plus individualisée.

Pour les laboratoires spatiaux en revanche, les projets européens (CE) ont eu un impact relativement faible jusqu'à la mise en place des ERC juniors et seniors. Pour un laboratoire spatial, les missions de l'ESA sont les plus cruciales, et les laboratoires ont un financement important du CNES. Les ANR étaient perçues comme plus « rentables » que la chasse aux crédits européens pour le soutien à des projets scientifiques. Les projets ERC sont particulièrement attractifs : ils ont une très forte visibilité, amènent plusieurs post-docs et étudiants à un chercheur et poussent sa thématique dans son laboratoire.

Parmi les intérêts à participer à un projet européen (ESA/ESO ou CE), on trouve généralement, en plus des aspects structurants, les arguments suivants :

- une extension de la visibilité internationale du laboratoire ;
- la reconnaissance – et le développement - des domaines d'excellence du laboratoire ;
- une ouverture sur de nouvelles collaborations internationales et de nouveaux projets, entrainant une diversification des activités scientifiques ;
- un recrutement plus important d'étudiants, de post-docs, mais aussi de chercheurs et d'IT (pas seulement sur postes temporaires) ;
- une amélioration de la reconnaissance au niveau national permettant d'attirer de nouveaux financements, en particulier pour financer de la R&D pour de futurs projets.

Il est clair aujourd'hui que les grands laboratoires sol et spatiaux ont complètement intégré la dimension européenne sous ses diverses formes et sont très présents sur les trois types de projets cités ci-dessus. Plusieurs laboratoires A-A pourraient être cités en exemple de ce schéma de figure. Ces laboratoires mentionnent aussi qu'une part importante de leur production scientifique (publications de rang A) est liée à ces projets européens.

Les difficultés liées aux projets européens

Un certain nombre de difficultés sont inhérentes aux projets en coopération internationale :

- difficulté de faire travailler ensemble, et souvent selon un planning très serré, des personnels de culture et de niveau d'investissement (très) différents ;
- difficulté liée au maintien des compétences et de la continuité malgré les inévitables mouvements du personnel sur de si longues périodes, et pour valoriser, par un recrutement sur poste permanent, l'investissement et l'expertise d'au moins une partie des CDD travaillant sur ces projets ;
- difficulté accrue de la gestion financière due aux différents taux de TVA ;
- le peu de souplesse de la gestion des appels d'offres rentrant dans le cadre des marchés ;
- le peu de prise en compte des responsabilités internationales dans les carrières des chercheurs. A l'image de ce qui se fait dans plusieurs pays européens, on pourrait par exemple favoriser l'attribution de thèses sous direction de chercheurs qui prennent des directions européennes, sur les sujets de leurs projets européens :
- difficulté à mobiliser les scientifiques suffisamment tôt dans le projet pour préparer efficacement le retour scientifique.

Pour les programmes de la CE, on retrouve plus fréquemment les difficultés suivantes :

- une grande lourdeur des réponses aux appels d'offres de la CE ;
- une grande lourdeur de la gestion administrative et financière de ces contrats, même quand il s'agit de financements modestes comme pour les RTN (un contre-exemple, les financements ERC : très forte visibilité et peu lourds à gérer) ;
- peu de soutien du CNRS ou des Universités pour la mise en place et la gestion de ces contrats.

Pour les projets des grandes agences européennes :

- la sous-estimation du poids du management d'un consortium européen ;
- les difficultés inhérentes au travail en commun avec des industriels (cultures différentes) ;
- la difficulté des équipes techniques à rentrer dans l'approche qualité ;
- le manque d'outils pour financer l'exploitation scientifique des missions spatiales : l'ESA s'en est (presque) complètement désengagée et l'ERC ou l'ANR refusent a priori les financements dans les laboratoires fortement soutenus par le CNES ;
- le manque quasi-total de post-docs financés par l'ESA ou l'ESO en liaison avec l'investissement des laboratoires sur leurs grands projets, bien peu secondés par les appels d'offres de la CE. Ce point mérite néanmoins débat. Les équilibres financiers entre les agences européennes et nationales sont fragiles et on ne peut imaginer que ces financements de post-docs se fassent au détriment des programmes instrumentaux européens ou à travers une part trop importante des programmes nationaux. C'est donc certainement à travers les programmes de l'Union Européenne qu'il faut chercher ce type de financement.

Une présence à renforcer auprès de la Communauté Européenne

Nous avons vu que la communauté A-A française parvient souvent à être leader de projets des grandes agences européennes mais c'est moins le cas pour les projets de la CE, notamment pour ce qui concerne les RTN ou la responsabilité à haut niveau des Design Studies par exemple. On diagnostique ici un certain manque de liens directs entre la communauté française et Bruxelles. Les chercheurs dans les laboratoires sont encore relativement peu au courant des appels d'offres et des instruments de la CE. On se doit d'étudier une présence plus directe des chercheurs auprès de la CE de manière, par exemple, à influencer le contenu des appels d'offres et ensuite être naturellement leaders sur les projets. Pour améliorer notre action de lobbying, on peut penser à plusieurs pistes. Tout d'abord, il serait intéressant de motiver le plus de personnel possible à devenir évaluateur du FP7, car c'est la première entrée possible pour un contact direct avec la CE. Les inscriptions pour devenir expert européens du FP7 se font via le site web CORDIS de la commission. Ensuite, il faut se faire reconnaître par la commission comme un interlocuteur crédible, par exemple représenter une institution (comme le CNRS), un pôle de compétitivité, ou un regroupement d'universités. Enfin, il faut assurer un système de veille efficace calqué sur celui de l'industrie qui a largement fait ses preuves. Pour les projets de R&D instrumentaux, un couplage renforcé avec les pôles de compétitivité, naturellement en lien avec les industriels, pourraient permettre d'assurer une veille plus efficace que ce que l'on fait en interne dans la communauté A-A.

Conclusions

La communauté A-A, bien structurée depuis longtemps, est largement passée à l'ère européenne. Pour les laboratoires concernés, les projets européens (ESA, ESO, CE) sont une formidable ouverture internationale et les retombées en termes de visibilité et de collaboration sont nombreuses.

Depuis le début des années 2000, les financements directs via la CE sont en forte augmentation. La France est leader de plusieurs réseaux d'excellence, elle est bien représentée dans les grands projets de la CE. Cependant, la CE annonce que ces projets ne sont pas pérennes sauf s'ils sont liés au développement d'une grande infrastructure inscrite sur la feuille de route ESFRI. C'est par exemple le cas de l'E-ELT auquel le réseau I3 Opticon doit sa survie, au prix d'une baisse d'un facteur 2 dans le financement entre le FP6 et le FP7. La non-pérennité de ces projets va poser des problèmes dans un avenir proche : des compétences recrutées en CDD sur ces projets vont disparaitre ainsi que les financements associés. Au cas par cas, les laboratoires et les tutelles devront analyser les actions à prolonger pour conserver et développer certaines compétences ou certains programmes clés.

On note que les projets de la CE sont particulièrement importants pour les laboratoires sol. Les labos spatiaux sont plus intéressés par l'ERC et surtout par les missions spatiales de l'ESA.

Il serait souhaitable d'avoir des entrées plus directes avec la CE et y assurer un lobbying plus efficace afin d'anticiper les appels d'offres, voire les influencer, en particulier pour que la science fondamentale y ait toute sa place. Il serait aussi souhaitable de mettre en place une aide efficace à la réponse aux appels d'offres de la CE et à leur gestion administrative et financière.

La communauté A-A a une longue tradition de réponse aux appels d'offres des grandes agences européennes. Elle le fait avec beaucoup d'efficacité et est souvent leader de ce type de projets. Les participations aux missions de l'ESA et à la construction des instruments VLT/VLTI et E-ELT de l'ESO ont un rôle absolument crucial pour de nombreux laboratoires spatiaux et sol respectivement. La compétence et la visibilité acquise par ces laboratoires leur a permis de répondre en particulier, et avec beaucoup de succès, à l'appel d'offres Cosmic Vision 2015-2025 de l'ESA et aux appels d'offres de l'ESO pour les instruments seconde génération du VLT/VLTI et pour ceux de l'E-ELT. On ne saurait trop souligner l'importance du soutien du CNES dans le premier cas et de l'INSU dans le second pour assurer, très en amont, les travaux de R&D et sur les phases de définition d'instrument.

L'une des choses qui manque actuellement le plus est un moyen de soutenir l'exploitation des données des missions spatiales dans lesquelles la communauté investit tant de moyens : les bourses doctorales et post-doctorales mises en place par la NASA – même pour des missions européennes – sont de loin supérieures en nombre à celles qui le sont en Europe (même en prenant en compte l'ensemble des bourses CE et dans chaque pays), et cela nous met clairement en position de faiblesse vis-à-vis de nos collègues des USA. Un pas très timide a été fait dans le FP7 avec la création de la thématique Espace, mais d'une part elle n'est pas orientée astronomie, et d'autre part les sommes qui y sont actuellement consacrées sont très faibles. Ici aussi, un lobbying efficace auprès de la CE serait nécessaire.

Liens utiles

- Pour s'inscrire en tant qu'évaluateur européen de la CE pour le FP7 https://cordis.europa.eu/emmfp7/?fuseaction=wel.welcome:
- Pour avoir des informations sur ces différents appels, le plus simple est d'être en relation avec les points de contact nationaux : http://cordis.europa.eu/contacts/fr/national.htm
- Le site du FP7 permet de connaître tous les instruments à notre disposition pour les financements de la CE: http://cordis.europa.eu/fp7/

Les interfaces interdisciplinaires de l'astronomie

E. Chassefière, P. Coyle, S. Derenne, G. Dubus, T. Dudok de Wit, M. Gerin (coordinatrice), C. Joblin, B. Marty, M.C. Maurel, S. Roques, P. Tuckey, J.P. Uzan

L'astronomie et l'astrophysique ont toujours travaillé en relation étroite avec les autres sciences forndamentales. Pour la physique et la chimie, l'Univers permet l'étude de processus et de systèmes difficilement accessibles au laboratoire, températures et densités extrêmes, champs magnétiques intenses ou au contraire vide poussé et très basses températures. Ce document présente les principales thématiques d'interface dans une première partie, et aborde en deuxième partie la question des modalités permettant de tirer le meilleur parti de ces activités aux interfaces.

Le domaine des astroparticules et de la cosmologie apparaît comme une interface majeure, où les astrophysiciens travaillent conjointement avec les physiciens des particules et les théoriciens. La montée en gamme des projets au cours des dix dernières années et les étroites collaborations nouées ont permis l'émergence d'une communauté interdisciplinaire. Les progrès majeurs accomplis dans la détection des photons de haute énergie en particulier laisse entrevoir l'avènement d'un nouveau champ pour l'astronomie. Le principal enjeu devient la mise en œuvre d'une astronomie multi-messagers. Si la communauté de cosmologie est structurée au sein du programme PNCG, le besoin d'une structuration analogue pour l'astrophysique des hautes énergies est patent. La transformation du GDR PCHE en programme INSU permettrait d'atteindre cet objectif, en conservant la tutelle des instituts concernés (INSU, INP, IN2P3) et un conseil scientifique interdisciplinaire.

Le domaine de la physique fondamentale, de la métrologie de l'espace et du temps, et des systèmes de référence est en forte mutation, avec une convergence des communautés d'astronomie, physique et sciences de l'ingénieur pour de nouveaux projets dans l'espace et au laboratoire. Pour accompagner ce développement et faciliter la structuration de cette communauté en émergence, la création d'une structure INSU, ouverte à la participation des autres instituts concernés est recommandée.

L'étude des processus physiques et chimiques est un autre domaine où des collaborations interdisciplinaires existent de longue date, qui exploitent la très grande diversité des phénomènes naturels. L'astrophysique de laboratoire est une discipline en émergence, qui vise à contribuer à la connaissance des milieux et objets astrophysiques par des études en laboratoire, expérimentales et théoriques. C'est par essence un domaine d'interface avec la physique et la chimie, qui fait appel à des installations dédiées et aux grands instruments (par exemple synchrotron SOLEIL, lasers de puissance).

L'exploration toujours plus avancée du système solaire, combinée à la diversité des systèmes planétaires extrasolaires, offre un champ d'étude renouvelé à la planétologie, où les compétences des spécialistes de géophysique, géochimie, climatologie et astrophysique se complètent. Les thématiques de la météorologie de l'espace, et de la climatologie de l'espace sont deux exemples prometteurs, où astrophysiciens et spécialistes des atmosphères devraient travailler conjointement. L'étude des atmosphères des exoplanètes, notamment dans l'objectif d'identifier des critères d'habitabilité est de même un domaine naturellement interdisciplinaire à l'interface entre astrophysique, sciences de la Terre, biologie et écologie. La question des origines, qui sous-tend ces thématiques est féconde pour la réflexion épistémologique.

La réalisation des nouveaux instruments, depuis les étapes de recherche et développement amont, à celles de la conception puis de la construction et du traitement des signaux, permet de nouer des collaborations fructueuses dans les domaines des sciences de l'ingénieur et du traitement du signal. Quatre grandes orientations se dégagent pour les travaux en traitement du signal, situées dans la problématique générale des problèmes inverses : la déconvolution d'images, l'analyse temps – fréquence ou analyse spectrale, la reconnaissance des formes, et le traitement des données hyper-spectrales. Les activités d'instrumentation font émerger le besoin de faciliter l'accès aux plates-formes technologiques pour les laboratoires de la discipline, et de participer à la coordination du développement de ces plates-formes..

La deuxième partie s'appuie sur une enquête réalisée auprès des laboratoires. L'interdisciplinarité est perçue comme une richesse et un facteur de dynamisme scientifique. Cependant beaucoup de réponses soulignent les difficultés de l'évaluation des activités interdisciplinaires, au niveau des travaux de recherche, des personnels et des équipes. Il est recommandé de veiller à ce que les activités interdisciplinaires soient reconnues et valorisées comme des activités de recherche à part entière et non pas considérées comme des « activités de service ». Outre l'évaluation de la qualité du travail par les disciplines, il est également important d'évaluer le bénéfice apporté à la problématique scientifique étudiée par l'approche interdisciplinaire. Par conséquent, il est recommandé que des experts de l'ensemble des disciplines soient présents dans les comités d'évaluation, au niveau des laboratoires, des équipes ou des chercheurs. Le travail en collaborations interdisciplinaires nécessite des échanges et l'établissement d'un langage commun. Les activités d'animation scientifique doivent donc être encouragées et pleinement reconnues.

Même si le débat sur la formation initiale n'est pas tranché, il est souhaitable, quand les conditions locales le permettent, d'encourager les écoles doctorales de site à financer des thèses sur des sujets interdisciplinaires, par exemple en co-direction.

Introduction

Par la vaste gamme des objets et milieux célestes étudiés, l'astrophysique offre un champ d'investigation inégalé pour la connaissance des phénomènes fondamentaux, et la mise en perspective des théories élaborées à partir du cadre plus restreint offert à l'expérimentation sur Terre. L'astrophysique est en étroite relation avec la théorie physique : les systèmes accessibles ouvrent l'accès à des conditions difficilement reproductibles en laboratoire (grandes distances, hautes pressions et densités ou au contraire vides extrêmes et basses températures, champ magnétique fort, faible accélération, ...) et donc la possibilité d'étendre les tests des lois physiques connues dans de nouveaux régimes. Mais les interfaces de l'astrophysique ne se limitent pas à la physique fondamentale. Les questionnements et découvertes astrophysiques suscitent des développements novateurs, théoriques ou expérimentaux dans de nombreuses branches de la physique, de la chimie comme de l'ingénierie. En retour, la démarche d'exploration de l'Univers se nourrit des avancées d'autres domaines scientifiques. La multiplicité des collaborations nouées autour de la question des origines, (origine de l'Univers, origines des planètes et du système solaire, origine de la vie), une des interrogations majeures de l'humanité, illustre parfaitement la fécondité des collaborations interdisciplinaires pour l'astronomie/astrophysique. Ce document présente les thèmes scientifiques où les activités interdisciplinaires doivent être particulièrement encouragées. Une deuxième partie analyse le fonctionnement des activités interdisciplinaires et l'impact sur les personnels.

Thèmes scientifiques interdisciplinaires

Astroparticule et cosmologie

La dénomination « astroparticule » englobe une communauté, interdisciplinaire par essence, d'astrophysiciens, de physiciens des particules et des noyaux, et de physiciens théoriciens dont l'intérêt se porte sur les phénomènes cosmiques de haute énergie (c'est-à-dire associés à des particules ou des rayonnements dépassant les centaines de keV).

Ces études font appel à deux domaines d'expertise complémentaires :

- D'une part, il s'agit de l'utilisation de techniques issues de la physique des particules ou de la physique nucléaire pour répondre à des questions astrophysiques. L'astronomie des gammas de hautes énergies, l'observation des neutrinos émis par la supernova 1987A, la recherche de l'origine astrophysique du rayonnement cosmique, ou les mesures en laboratoire de processus de physique nucléaire motivées par la nucléosynthèse sont autant d'exemples issus de cette tradition.
- D'autre part, il s'agit de l'observation du ciel comme terrain d'expérimentation pour des questions issues de la physique. Le rayonnement cosmique a joué un rôle central en physique des particules avant l'avènement des grands accélérateurs avec la découverte de l'antimatière, du muon, des pions etc. La cosmologie observationnelle joue maintenant ce rôle central avec, par exemple, la limite sur le nombre de familles de neutrinos de basse énergie établie à partir de la nucléosynthèse primordiale, la mise en évidence de l'inflation, de la matière noire et de l'énergie noire comme constituants majeurs de l'Univers. Tout cet ensemble motive désormais la recherche au-delà du modèle standard.

L'astroparticule hérite de ces deux traditions devenues de moins en moins distinctes avec le temps. Les collaborations instrumentales actuelles regroupent les chercheurs sans considérer leur communauté d'origine et constituent un moyen puissant pour favoriser l'interdisciplinarité. Ces consortia rassemblent typiquement plus d'une cinquantaine de chercheurs vues la complexité et l'étendue des compétences requises. L'interdisciplinarité est d'autant plus aisée que les outils et la technique sont maîtrisés. Par exemple, pour Antares (neutrinos) ou Virgo (ondes gravitationnelles), il s'agit encore de maîtriser la technique de détection et de démontrer l'existence des sources prédites par les modèles théoriques. À mi-chemin, un instrument comme Auger (rayonnement cosmique ultra haute énergie) a dépassé le cap de la maîtrise instrumentale et aborde l'étude détaillée du signal astrophysique. Enfin, HESS ou Fermi sont des projets fortement interdisciplinaires combinant des techniques issues de la physique des particules, avec la détection d'un grand nombre de sources astrophysiques. Ces projets fonctionnent comme des télescopes, avec des besoins de programmes d'observations, de relais multi longueurs d'onde et d'interprétation des observations. La mesure ne constitue plus le facteur limitant et la clef devient la maîtrise d'une exploitation de type observatoire. On retrouve cette évolution dans la plupart des projets instrumentaux en préparation (Auger vers JEM-EUSO, Antares vers KM3NET, HESS vers l'observatoire CTA, Virgo vers Advanced Virgo).

L'astroparticule, dont une première mention est faite dans le rapport de prospective de 1992, a bénéficié d'un fort encouragement au CNRS, avec la création en 2000 d'un programme et d'une commission interdisciplinaires dédiés et pilotés par des représentants des trois communautés (IN2P3, Physique théorique et Astrophysique), sans oublier la création du laboratoire APC. L'impact du CNRS est reconnu au niveau européen (pilotage des réseaux ERANET ASTRONET et ASPERA) et se concrétise par le grand nombre de candidats étrangers sur les postes ouverts aux concours CNRS dans la thématique. La sélection des deux projets initiés par la communauté IN2P3 CTA (gamma) et KM3NET (neutrinos) dans la feuille de route de l'astronomie européenne est indéniablement un succès de cette politique. Il faut aussi noter l'implication croissante de l'IN2P3 tant en chercheurs qu'en moyens sur des projets faisant appel à des techniques purement astronomiques (recherche de microlentilles gravitationnelles, de supernovae de type Ia, télescope LSST et mission spatiale JDEM).

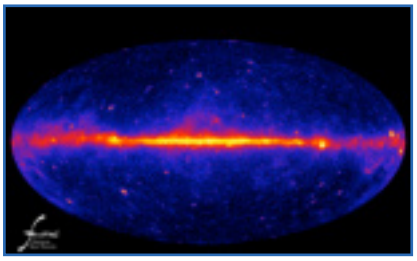
Parmi les événements majeurs de ces dernières années traduisant cet essor scientifique, citons la mesure de l'anisotropie

du rayonnement cosmique ultra énergétique par la collaboration Auger et la découverte d'un nombre insoupçonné de sources de rayonnement gamma très haute énergie par HESS. L'étude de ces sources a dépassé largement la communauté initiale des promoteurs de ces instruments. Le début de la phase d'acquisition des données par Antares ou Virgo ainsi que les limites supérieures sur la matière noire dérivées d'EDELWEISS constituent également de véritables tours de force.

Le principal enjeu émergeant est le développement d'une astronomie multi messagers. Après la conquête du spectre électromagnétique jusqu'à ses confins (Fermi, HESS), il s'agit maintenant d'obtenir des informations via la détection d'ondes gravitationnelles, de sources de neutrinos ou de rayons cosmiques. La détection de sources astrophysiques de neutrinos serait une avancée considérable pour comprendre comment le rayonnement cosmique est accéléré. Advanced Virgo et LISA devraient être en mesure de détecter des sources d'ondes gravitationnelles et d'apporter des contraintes inédites sur la relativité ou l'échelle des distances. Les travaux théoriques (nombre et propriétés des sources attendues) ou observationnels (recherche de contreparties électromagnétiques ou de coïncidences temporelles entre plusieurs instruments) venant en accompagnement doivent être encouragés afin de préparer au mieux l'exploitation et le retour scientifique de ces instruments.
Par ailleurs, l'utilisation d'objets astrophysique (binaires compactes, GRB, supernovae, etc.) en tant que révélateurs de processus physiques fondamentaux (tests de la relativité générale, physique des neutrinos, champs magnétiques et densités extrêmes, accélération de particules, matière noire) trouve des applications de plus en plus larges.

La cosmologie étudie l'évolution globale de l'Univers et l'histoire de sa structuration. Elle fait intervenir des échelles de temps,

Le réseau de télescopes HESS, dédié à la détection de photons gammas de très haute énergie, entre 100GeV et 100 TeV, via l'émission Cherenkov produite dans l'atmosphère par l'arrivée d'un tel photon. © HESS.



Carte du ciel vu par le satellite Fermi. (photons gamma dans le domaine d'énergie 10keV – 300 GeV), montrant l'émission du plan galactique (au centre), et des pulsars et trous noirs super-massifs apparaissant comme des sources ponctuelles. © NASA/DOE/International LAT Team.

d'espace et d'énergie qui lui permette de tester de nombreuses extrapolations du modèle standard de la physique des particules et de la relativité générale. La cosmologie possède aujourd'hui un modèle de référence en accord avec la plupart des observations existantes.
Les diverses mesures cosmologiques nécessitent cependant de supposer qu'un quart de la densité d'énergie de l'Univers est sous forme de « matière noire », discernable par son interaction gravitationnelle avec la matière baryonique mais ne produisant aucun rayonnement électromagnétique directement détectable. Les candidats théoriques pour cette matière sont nombreux, et la matière noire est traquée par des expériences de détection directe (e.g. EDELWEISS) sur Terre. L'astrophysique permet aujourd'hui de mieux cerner les propriétés de cette matière par exemple en obtenant des contraintes sur la section efficace matière noire - matière noire à partir d'observations d'amas en interaction (e.g. l'amas « Bullet Cluster ») ou sur la durée de vie de la matière noire, qui doit être supérieure à 10^{28} s, à partir de la non-observation des gamma que devraient produire sa désintégration. Une meilleure connaissance de la distribution de la matière noire a aussi été obtenue grâce aux effets de lentilles gravitationnelles dans les amas de galaxies. Le signal d'annihilation de la matière est peut-être à la portée des expériences telles que PAMELA ou Fermi qui ont révélé un excès local de positrons autour de GeV qui pourrait être une manifestation de la matière noire mais d'autres explications faisant intervenir des sources astrophysiques sont possibles. De nombreux progrès sont attendus dans les années à venir, d'une part grâce aux progrès des contraintes en accélérateur (LHC), d'autre part grâce aux avancées astrophysiques observationnelles (développement des grands relevés, de l'astronomie gamma) et théoriques (on commence à prendre en compte l'effet de la matière noire sur la structure et l'évolution stellaire).

Plus surprenant est le problème de l'énergie noire, une composante de matière exotique qui représenterait 70 % de la densité d'énergie de l'Univers, introduite afin de rendre compte de l'accélération récente de l'expansion cosmique. Cette accélération, initialement mise en évidence à partir du diagramme de Hubble des supernovae de type Ia, est maintenant confirmée par de nombreuses sondes astrophysiques. Les principales contraintes sur l'équation d'état de cette énergie noire ont été obtenues à partir de projets interdisciplinaires tels que les grands relevés du CFHT (CFHTLS pour le cisaillement gravitationnel et SNLS pour les supernovae), ou les futurs relevés d'amas du satellite Planck. La réflexion actuelle pousse à considérer l'utilisation de plusieurs sondes chacune souffrant de biais différents. (voir les documents du PNCG et la prospective thématique)
Les conclusions sur l'existence de l'énergie noire et la matière noire reposent sur l'hypothèse que la relativité générale reste une bonne description de la gravitation dans les régimes considérés (grandes distances, faible accélération). La nécessité de construire des tests de la relativité dans ces régimes s'est progressivement imposée dans les dernières années et est aujourd'hui au cœur du projet de mission Euclid. Cette problématique est un point de contact avec les travaux sur la physique fondamentale dans l'espace, exposés au paragraphe suivant, et qui font appel à des méthodologies et des technologies très différentes. En particulier, les tests du principe d'équivalence peuvent être menés aux échelles astrophysiques en utilisant les constantes fondamentales de la physique qui gouvernent les propriétés de nombreuses observables : spectres d'absorption de quasars, nucléosynthèse primordiale et stellaire, rayonnement de l'hydrogène à 21cm, fond diffus cosmologique, chronologie des météorites, horloges atomiques. Cette activité pluridisciplinaire (physique théorique, astrophysique, physique nucléaire, métrologie) est bien représentée en France et a une communauté en émergence.
La dynamique gravitationnelle est aussi au cœur des propriétés des grandes structures de l'Univers. Ces dernières trouvent leur origine dans l'effondrement gravitationnel de fluctuations de densité générées pendant les phases les plus primordiales de l'Univers (inflation). Les anisotropies du fond de rayonnement cosmologique permettent de contraindre cette phase primordiale de l'Univers mais aussi la dynamique gravitationnelle qui en découle. Ces derniers mois ont vu le lancement du satellite ESA Planck (qui implique INSU, IN2P3, INP, CEA) qui couronne de nombreuses années de travail. La détection de la polarisation de ces anisotropies représente probablement la meilleure opportunité de détecter le fond d'ondes gravitationnelles primordiales, ce qui offrirait une information inestimable sur la phase primordiale. Les observations de Planck permettront de mieux caractériser la statistique de la distribution des anisotropies de température. La détection d'une déviation à la gaussianité permettrait de tester la dynamique gravitationnelle et ouvrirait une fenêtre sur la phase d'inflation.

Les liens interdisciplinaires ont principalement été structurés par le Programme National de Cosmologie (PNC) et son évolution récente en Programme National Cosmologie et Galaxies (PNCG), le Programme InterDisciplinaire (PIR) « Particules et Univers » et la Commission InterDisciplinaire associée (CID47), ainsi que le groupement de recherche (GdR) «Phénomènes Cosmiques de Hautes Energies» (PCHE). Toutes ces actions regroupent les chercheurs des différents instituts (INP, INSU, IN2P3) ainsi que le CEA et le CNES (pour PCHE). Le programme interdisciplinaire P&U soutient essentiellement des actions de R&D instrumentation pour l'astroparticule et la cosmologie. Le GdR PCHE dispose d'un budget issu du PIR P&U et du CNES. Sa mission est d'animer la communauté astroparticule, notamment par le financement de collaborations au niveau national. Il donne aussi des avis scientifiques sur sollicitation des instances. Les aspects cosmologie ne sont pas traités par le GdR PCHE mais par le PNCG. Le PIR P&U doit arriver à échéance en 2012 et la question de la pérennité de ces actions se pose. Le GdR PCHE envisage une transformation en programme national, à l'image du PNCG. Quelle que soit la solution envisagée, il conviendrait de garder une structure réunissant les instituts concernés avec un conseil scientifique interdisciplinaire à l'image de ce qui existe actuellement

Au niveau local des régions ou des universités, la création d'équipes ou de laboratoires interdisciplinaires doit être envisagée. La création du laboratoire APC (AstroParticule et Cosmologie), du groupement d'intérêt scientifique (GIS) P2I (Physique des 2 Infinis) ont eu un effet fédérateur important en Ile de France et au-delà. Il faut encourager les efforts de dialogues entre laboratoires sur le modèle de ce GIS. En effet l'ensemble de ces activités à l'interface entre astrophysique, physique théorique et physique des particules nécessite un brassage d'idées. Il est nécessaire de développer les échanges en amont des collaborations instrumentales. Des différences « sociologiques » entre les 3 communautés principales (astrophysique, physique théorique et physique des particules) existent encore, sur la manière d'appréhender les collaborations, la stratégie de distribution des données, etc. La commission interdisciplinaire 47 était un espace de dialogue permettant d'aplanir ces différences. Les programmes et GdR sont probablement les meilleurs acteurs pour prendre le relais.

Deux approches sensiblement différentes existent dans la gestion des données récoltées par les collaborations instrumentales en astroparticule et cosmologie. Dans certains cas les données restent privées et à disposition uniquement des membres de la collaboration, suivant des règles précises pour leur utilisation et leur publication. Dans d'autres cas, les données sont mises à disposition de l'ensemble de la communauté après un temps d'accès privilégié, typiquement d'un an. Un grand nombre de sources (ou plus généralement de «mesures possibles») encourage une diffusion large des données (analyse complète et exhaustive hors des moyens disponibles, faible valeur ajoutée immédiate des sources). La mise à disposition des données s'accompagne forcément d'outils fiables et stables pour leur analyse et d'un archivage pérenne. Le partage des données est de règle en astronomie, dans le spatial ainsi que pour les observatoires au sol, où il est indispensable pour éviter le redoublement d'observations et permet la comparaison de mesures obtenues avec des instruments ou des télescopes différents, sur une vaste période temporelle. L'archivage préserve et étend l'utilité des données bien au-delà de la durée de vie de l'instrument. La conception des archives et outils d'analyse publics constitue un investissement très important qui doit être préparé bien avant la mise en service des archives et bénéficier de moyens adéquats.

Gravitation, physique fondamentale, métrologie espace-temps/ fréquence, systèmes de référence, mécanique céleste et spatiale

Le mot clé « systèmes de référence spatio-temporels » de la section 17 recouvre de nombreux points forts de l'astronomie française :

- astrométrie (VLBI, …) ;
- géodésie spatiale (télémétrie laser, DORIS, GPS ...) ;
- géopotentiel ;
- orientation de la Terre ;
- systèmes de référence terrestres et célestes ;
- échelles de temps et mesures de fréquences (horloges atomiques) ;
- mécanique céleste (trajectoires de corps naturels) et éphémérides ;
- mécanique spatiale (trajectoires de corps artificiels).

Outre leurs objectifs et applications directs et bien connus, ces domaines d'étude partagent un même centre d'intérêt, la structure géométrique de l'espace-temps. Par conséquent l'étude des systèmes de références apporte des possibilités nouvelles pour tester la physique fondamentale et plus particulièrement la relativité générale, que ce soit le principe d'équivalence, l'invariance de Lorentz, ou l'existence de forces supplémentaires, etc.

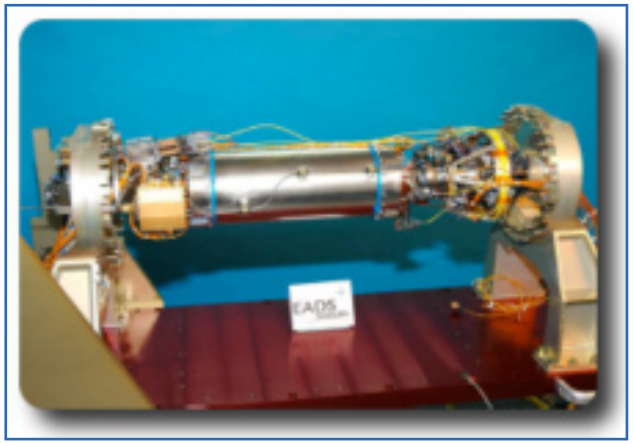
Le domaine de la gravitation et des systèmes de référence est donc fortement interdisciplinaire, tant par les méthodes mises en œuvre que par le champ d'application des résultats. Pour résumer rapidement les nombreuses interfaces, citons :

- les sciences de la Terre par l'étude du champ de gravité de la Terre et de sa rotation ;
- les enveloppes fluides de la Terre : altimétrie de la mer, irrégularités dans la rotation de la Terre ;
- les sciences de l'ingénieur, par les applications de la métrologie temps/fréquence (navigation, communications, senseurs inertiels...), et le développement et le transfert de technologies innovantes ;
- la physique fondamentale, pour les atomes froids, les techniques de métrologie, et aussi pour la théorie des interactions fondamentales ;
- la physique des hautes énergies, notamment au travers les projets de détection d'ondes gravitationnelles comme VIRGO et LISA.

Il ne faut pas non plus oublier les interfaces avec d'autres sous-domaines de l'astronomie/astrophysique, et leurs structures :

- la planétologie (PNP), notamment concernant le mouvement et la structure interne des objets du système solaire ;
- les objets accrétant (quasars, …) (PNCG et PCHE), notamment pour les relations entre stabilité de position et structure interne de quasars, ou les aspects gravitationnels de phénomènes astrophysiques violents ;
- la cosmologie (PNCG), en particulier concernant les questions de l'énergie et de la matière noires ;
- l'AS GAIA, concernant le système de référence céleste et les tests de la gravitation.

Il faut remarquer que le tracé de ces « frontières » s'établit plutôt à partir des projets instrumentaux et des savoir-faire des différentes communautés, que des problématiques théoriques de base, dont certaines peuvent être largement partagées par différentes communautés.



Tube césium de l'horloge PHARAO, développée pour le programme spatial ACES/PHARAO (CNES – SYRTE – LKB)

Une caractéristique forte de ce domaine depuis une dizaine d'années est la montée en puissance de son volet spatial, qui est encadré scientifiquement au CNES par le groupe thématique « physique fondamentale ». En effet la première expérience spatiale française dédiée du domaine, T2L2 (transfert temps/fréquence par lien laser) a été emportée sur la mission d'altimétrie Jason-2 en 2008. L'horloge spatiale à atomes froids PHARAO du CNES et la mission ACES de l'ESA (métrologie temps/fréquence, redshift gravitationnel, ...) qui l'emportera sont récemment rentrées dans la phase de réalisation des modèles de vol, avec un lancement prévu en 2013. La mission MICROSCOPE, destinée à tester l'universalité du principe d'équivalence, est aussi en cours de réalisation du modèle de vol, pour un lancement en 2014. Les équipes françaises sont également impliquées dans LISA Pathfinder. De nombreux autres projets sont en préparation, notamment dans la perspective des plans Cosmic Vision et de son successeur CV2 : LISA ; GAP (Gravity Advanced Package) un candidat pour emport sur EJSM ; Odyssey (phase 0 CNES) ; GEOstar (phase 0 CNES) ; Einstein Gravity Explorer ; SAGAS, ... D'autres grandes missions spatiales ont également certains objectifs qui relèvent de ce domaine, par exemple GAIA et BepiColombo. Notons enfin que le développement du système européen de navigation globale par satellites, Galileo, a aussi contribué à renforcer les liens entre les agences spatiales et la communauté scientifique travaillant sur la physique fondamentale de l'espace-temps et les systèmes de référence. Cette évolution scientifique rapide a fait émerger le besoin d'une structure INSU pouvant servir d'interlocuteur du CNES pour ce domaine, notamment lors du colloque de prospective du CNES. Plus généralement, le besoin d'une structuration nationale de cette communauté est clairement identifié pour accompagner son développement et coordonner les activités des laboratoires qui relèvent de multiples tutelles.

Ce domaine a été partiellement couvert dans le passé par les GdR AGRET, GREX et G2, mais n'est couvert par aucune structure INSU/CNRS actuelle. Les actualités scientifiques sont présentées aux

journées de la SF2A dans la session GRAAPH, qui est organisée par une collaboration informelle entre les laboratoires concernés. Certaines structures spécifiques françaises incluent des parties du domaine, notamment le GRGS (Groupement de Recherche en Géodésie Spatiale – une structure *ad hoc*) et l'IFRAF (Institut Francilien pour la Recherche sur les Atomes Froids – un GIS), dont le CNRS est signataire. Très récemment, en réponse au besoin de coordination scientifique des propositions et des développements des laboratoires français pour des projets spatiaux, notamment en vue de l'appel Cosmic Vision 2 de l'ESA, l'Observatoire de Paris a créé le groupement GPhyS (Gravitation et Physique Fondamentale dans l'Espace), dans le cadre de son contrat quadriennal 2010-2013. L'adhésion à GPhyS de chercheurs de 11 laboratoires CNRS, relevant des sections 02, 04, 08 et 17, ainsi que du DMPH (Département des Mesures Physiques) de l'ONERA, a confirmé la pertinence de cette initiative. Au vu de ce paysage morcelé, il paraît important que ce domaine soit pris pleinement en compte dans les dispositifs de politique scientifique nationale du CNRS. Cela pourrait se faire par une action spécifique de l'INSU, qui devrait être ouverte à la participation des autres Instituts. Par la suite il faudra certainement aborder le problème de structuration à l'échelle européenne, car ce domaine n'est pas dans le périmètre des structures existantes telles que les ERANET ASTRONET et ASPERA.

Processus physiques et chimiques, astrophysique de laboratoire

L'étude des milieux astrophysiques requiert une expertise interdisciplinaire à propos des processus physiques, chimiques et dynamiques impliquant les atomes et molécules, les grains de poussière, les particules énergétiques, les plasmas, le rayonnement et le champ magnétique. Les processus mis en jeu, couplés avec la dynamique, jouent un rôle fondamental dans la structuration des milieux et ceci à petite comme à grande échelle : formation et évolution des étoiles et des systèmes planétaires, évolution des phases du milieu interstellaire (MIS), formation des galaxies. Les thématiques qui sont présentées ci-dessous sont celles qui mettent en jeu une activité importante d'astrophysique de laboratoire à l'interface avec les communautés de physique et de chimie et en interaction forte avec les sciences de la Terre pour le cas particulier de l'analyse de la matière extraterrestre.

Les propriétés microscopiques des milieux ionisés interviennent dans l'équation d'état des intérieurs stellaires et planétaires, l'opacité des intérieurs stellaires, et se rapportent au domaine de la physique atomique d'ions et d'atomes d'intérêt astrophysique, incluant les élargissements de raie. Les questions d'actualité sont l'équation d'état de l'hydrogène pour les intérieurs de planètes géantes ainsi que celle du fer pour les planètes et exoplanètes telluriques, le besoin de raffinement des calculs de l'opacité du plasma solaire, suite à la nouvelle détermination des abondances solaires, et l'influence de telles opacités pour la détermination des paramètres fondamentaux des étoiles comme pour l'interprétation des spectres X des régions de chocs. Les études conduites font appel aux grands lasers et plus généralement à une activité d'astrophysique de laboratoire menée par des astrophysiciens et des physiciens (cf. chapitre «astrophysique de laboratoire»). Elle implique pour les plasmas denses, des compétences venant de chercheurs du CEA/DAM.

La compréhension des mécanismes d'accrétion / éjection des étoiles et l'évaluation des taux de perte de masse associés, ainsi que l'injection de turbulence dans le MIS sont des questions clefs de l'astrophysique. Le lancement d'un jet a pu être reproduit au laboratoire et étudié dans ses phases linéaires et non-linéaires permettant de vérifier les propositions théoriques, en mettant en évidence dans l'expérience à la fois la pulsation et la collimation. Cette activité met en jeu l'étude sur des installations de lasers de puissance de propriétés hydrodynamiques ou magnétohydrodynamiques de phénomènes astrophysiques violents, actuellement jets stellaires et chocs d'accrétion, dans des conditions pertinentes, et idéalement mises à l'échelle. La simulation numérique joue un rôle très important et sollicite très fortement les centres nationaux du CNRS et du CEA. Il faut souligner que les activités d'astrophysique de laboratoire permettent de valider des codes numériques, qui peuvent ensuite être utilisés tant pour des calculs d'astrophysique que pour l'étude des plasmas de laboratoires. L'étape de validation est essentielle pour acquérir la plus grande confiance dans les résultats des simulations. On observe un rapprochement fructueux entre la communauté travaillant sur les plasmas astrophysiques et celle des plasmas de laboratoire (y compris les plasmas magnétiquement confinés), qui devrait être bénéfique pour les deux communautés.

Les dernières décennies ont révélé la présence d'un nombre toujours croissant de molécules interstellaires et circumstellaires, présentes dans des conditions physiques extrêmement variées : des nuages denses qui constituent la composante ultra-froide du MIS avec des températures typiques de 10 K aux environnements circumstellaires et aux chocs où cette température peut atteindre de l'ordre de 1 000 K. L'étude des signatures moléculaires est indispensable pour la compréhension de l'évolution chimique de ces milieux ainsi que de la structure, de la dynamique et du champ magnétique, des régions associées. L'étude des processus inélastiques d'excitation et de relaxation collisionnelles est fondamentale pour quantifier le refroidissement des nuages interstellaires qui intervient dans l'effondrement gravitationnel conduisant à la formation de nouvelles étoiles. La synthèse en laboratoire de nouvelles espèces moléculaires complexes constitue également un enjeu majeur de la chimie interstellaire. A titre d'exemple, la détection des premiers anions interstellaires C_nH^- a été rendue possible grâce à leur production en laboratoire et l'étude de leur spectroscopie micro-onde, et pose de sérieuses contraintes pour les prédictions et l'amélioration des modèles décrivant les milieux astrophysiques où ils sont observés.

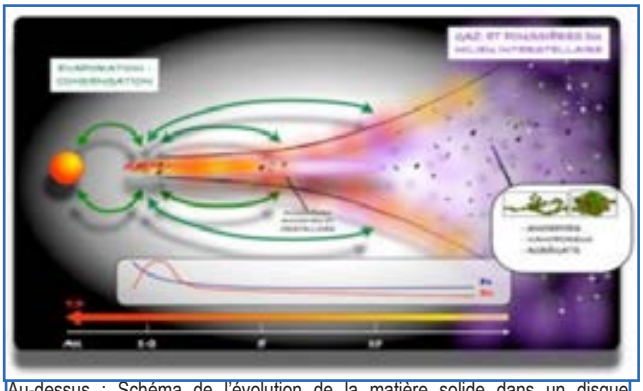
La chimie dans les milieux astrophysiques fait intervenir les collisions réactives en phase gazeuse mais aussi des réactions en phase solide ou hétérogènes impliquant les grains : le cas le plus évident est celui de la molécule H_2, mais la formation de molécules plus complexes comme CH_3OH semble également se produire en phase solide. De surcroît, il est reconnu que les grains jouent un rôle important dans l'enrichissement isotopique de molécules, en particulier pour le formaldéhyde et le méthanol, enrichissement qui ne peut s'expliquer par la seule chimie en phase gazeuse. L'observation de molécules doublement ou triplement deutérées dans certains cœurs préstellaires illustre la subtilité des couplages entre la chimie dans le gaz et celle impliquant les grains. Cette

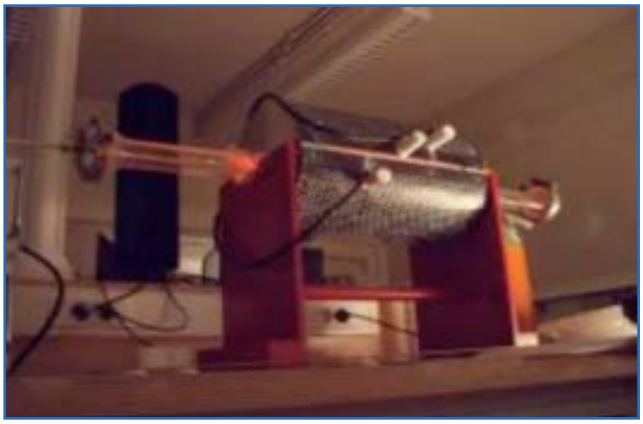
chimie sur et dans les grains est encore très mal connue. S'interroger sur le rôle (catalytique) des grains dans la réactivité pose également les questions du piégeage et de la désorption du gaz ainsi que des échanges thermiques entre les molécules formées et le grain lui-même. En ce qui concerne les surfaces planétaires, des travaux sur les interactions surface - atmosphère (planètes telluriques, Titan), eau - minéraux (Mars) et glace d'eau - hydrocarbures (Titan) sont à encourager. Même si des mesures de cinétique chimique en phase neutre et ionisée sont indispensables pour mieux comprendre l'origine des espèces photochimiques observées dans les atmosphères, la chimie hétérogène joue probablement un rôle important sur Titan et sans doute sur Mars, et est encore très mal connue (aérosols dans l'atmosphère, interactions gaz-minéraux et gaz-glace à la surface).

L'analyse du spectre infrarouge de la poussière interstellaire a permis de révéler qu'elle est composée de grains carbonés et d'oxydes : principalement des silicates et d'autres oxydes métalliques. La caractérisation de la structure et de la composition des grains interstellaires est un enjeu fondamental car il s'agit de pouvoir relier les variations du spectre IR à l'évolution des conditions physiques des milieux et également d'obtenir une description précise de ces grains pour pouvoir évaluer leur contribution à la chimie. Cette évolution intervient tout au long du cycle de cette poussière, de sa formation dans les environnements circumstellaires à son incorporation dans les systèmes planétaires. Des analogues des grains interstellaires (hydrocarbures aromatiques polycycliques PAH, nanograins carbonés, glaces, silicates, carbones amorphes, …) sont donc synthétisés en laboratoire afin d'étudier leur mode de formation et de croissance, leur structure et organisation, leur comportement sous irradiation ou encore leur spectroscopie. Les enveloppes d'étoiles évoluées (haute densité et haute température) offrent des conditions favorables à la nucléation et à la croissance des grains. Une fois injectés dans le MIS, les grains peuvent être modifiés (par ex. amorphisation des silicates) ou détruits par le rayonnement ou dans les régions de choc. Dans la phase froide cependant ils peuvent se reconstruire (processus de coagulation ? réactivité chimique ?) et l'interaction avec le gaz conduit à la formation de manteaux de glaces moléculaires (H_2O, CH_3OH, CO, CO_2, CH_4, NH_3). Ceux-ci peuvent être le siège d'une chimie organique complexe pouvant conduire à la formation de molécules prébiotiques.

Les études sur les analogues de la matière solide sont en partie réalisées en lien étroit avec des analyses d'échantillons de matière extraterrestre, études impliquant la communauté des sciences de la Terre. Dans le contexte de la planétologie, les expériences de laboratoire jouent un rôle reconnu comme préparation et support d'interprétation aux données des missions spatiales (voir le rapport du groupe de travail « astrophysique de laboratoire »). Comme axes prioritaires dans les années qui viennent, on peut citer la formation des roches et minéraux des météorites différenciées, les conditions de formation et les évolutions des diverses phases hydratées observées dans les météorites primitives, et la préparation des observations de Rosetta notamment pour l'interprétation des caractérisations minéralogiques.

Les processus physiques et chimiques impliquant la matière en astrophysique se rapportent donc à des conditions variées, depuis les intérieurs stellaires et planétaires, aux environnements circumstellaires, aux atmosphères planétaires et à plus grande échelle aux milieux interstellaires et intergalactiques. Leur étude fait intervenir une palette de dispositifs expérimentaux, d'outils de théorie et de modélisation. De part la diversité des conditions physiques mises en jeu et des objets étudiés, elle constitue un champ d'applications attractif pour la physique expérimentale, la physico-chimie et la chimie théorique. L'expertise apportée par ces communautés est un réel atout pour les activités de l'astrophysique française. Les actions des programmes nationaux INSU PNP, PCMI et PNPS ont permis de développer au cours du temps un cadre interdisciplinaire pour ces activités. La synergie développée doit pouvoir se poursuivre dans les années à venir car ceci constitue clairement une spécificité et une force de la communauté française. Il est en particulier indispensable de trouver un langage commun, et de cibler les moyens sur les études menées au plus près des problématiques astrophysiques. Si une partie de ces projets peuvent clairement être considérés comme novateurs dans les domaines de la physique et de la chimie, le risque qu'une autre partie soit seulement considérée comme une tâche de service vis à vis de la communauté astrophysique est réel. Il faut donc s'assurer que le travail fourni soit correctement valorisé. Il est également fondamental que la spécificité des jeunes docteurs formés à l'interface de ces disciplines soit correctement prise en compte en particulier au niveau du recrutement. L'astrophysique de laboratoire doit donc avoir pleinement sa place parmi les thématiques de recherche en astrophysique.





Au-dessus : Schéma de l'évolution de la matière solide dans un disque protoplanétaire; en-dessous installation en laboratoire permettant d'étudier les processus d'évolution des grains silicatés en laboratoire, et ainsi de mieux comprendre les spectres des sources astrophysiques.

La Terre dans le système solaire, les exoplanètes

L'exploration toujours plus avancée du système solaire et la diversité étonnante des systèmes d'exoplanètes offrent un champ d'investigation toujours plus vaste à la planétologie où les compétences des spécialistes de géophysique, géochimie, climatologie, océanographie, astrophysique peuvent s'épauler, en lien étroit avec les études en laboratoire de physique et de chimie. L'exploration des caractéristiques des exoplanètes ne fait que commencer, mais d'ores et déjà elles présentent une très grande variété de propriétés, qui posent des défis interdisciplinaires pour leur modélisation.

La Terre dans le système solaire (planétologie comparée, connaissance du Soleil et impact de son évolution sur les climats, ….)

Deux thématiques récentes à fort caractère interdisciplinaire et avec des incidences sociétales sont nées au cours de cette décennie. Les deux peinent cependant à être reconnues en raison de leur caractère jugé trop applicatif ou trop interdisciplinaire.

- la météorologie de l'espace, qui vise à comprendre et à prédire l'impact de l'activité solaire sur notre environnement terrestre. Cette discipline a brusquement révélé l'importance de l'impact sociétal de phénomènes jusque-là considérés comme faisant partie de la science fondamentale. Même si il est encore prématuré d'envisager des applications commerciales, il est certain que le développement d'outils opérationnels favorise la création de liens forts et totalement nouveaux avec des disciplines telles que le traitement d'image, la cybernétique et l'intelligence artificielle.
- La climatologie de l'espace se concentre sur les effets à long terme de l'activité solaire et le lien avec le climat terrestre. Nous avons pris conscience récemment de l'impact déterminant de l'activité solaire et de son évolution temporelle, sur l'évolution des atmosphères et des climats des planètes, notamment via l'échappement atmosphérique. Les attentes du public sur la question du climat sont très fortes. En raison des nombreux couplages entre mécanismes, seule une approche multidisciplinaire (astrophysique, physico-chimie de l'atmosphère, géophysique, océanographie, …) permet de progresser. Or l'interaction entre les communautés du spatial et des plus basses couches de l'atmosphère reste encore trop timide et devrait être développée dans les prochaines années.

Deux thématiques nouvelles, mériteraient enfin d'être abordées, et éventuellement développées dans les années futures, afin de mieux comprendre l'évolution climatique des planètes telluriques, les conditions d'habitabilité sur la Terre primitive, et à plus long terme de mieux interpréter les observations de la composition atmosphérique des exoplanètes de type terrestre et d'établir des diagnostics éventuels de présence de vie :

- L'évolution du Soleil ancien durant le premier milliard d'années du système solaire est encore mal connue. L'impact de cette évolution sur l'évolution climatique des planètes telluriques (Vénus, la Terre, Mars) est déterminant. L'évolution du flux UV et extrême UV, relativement bien connue via l'observation d'étoiles proches analogues du Soleil, conditionne l'histoire de l'échappement atmosphérique. L'évolution de la constante solaire, qui augmente avec le temps (paradoxe du « faint young Sun »), pose des problèmes pour expliquer la stabilité climatique à long terme de la Terre, les climatologues faisant appel à des mécanismes de régulation par les gaz à effet de serre. Enfin, l'évolution du vent solaire, encore mal connue, a un impact déterminant sur l'histoire de l'échappement.
  Un programme cohérent dans ce domaine consisterait à faire interagir climatologues et physiciens solaires/stellaires, avec l'objectif de définir un programme d'étude, par la modélisation et l'observation, de l'évolution du Soleil primitif durant le premier milliard d'années, avec les objectifs suivants :
  — affiner la séquence d'évolution du flux UV-EUV,
  — confirmer / affiner le modèle standard de l'évolution de la luminosité solaire, en tenant compte notamment de pertes de masse potentiellement importantes en début d'évolution,
  — caractériser les vents stellaires d'étoiles proches analogues au Soleil, par la mesure notamment du continu d'émission free-free dans les domaines millimétriques et centimétriques avec par exemple ALMA, complétée par la modélisation.
  Un tel programme est susceptible de constituer une composante majeure de la climatologie comparée des planètes telluriques. Des contraintes sur l'évolution à long terme du vent solaire peuvent être apportées par la cosmochimie (analyse de météorites et d'échantillons rapportés : Lune, astéroïdes, Mars, …).
- ii) L'interprétation des mesures de composition atmosphérique des exoplanètes de type terrestre (mission de type DARWIN) nécessitera la mise au point de diagnostics permettant de conclure (ou non) à l'existence de processus biologiques sur ces planètes. La possibilité de formation abiotique d'atmosphères massives d'oxygène est démontrée. En vue d'identifier de possibles faux-positifs, il faudra se baser sur l'analyse d'un échantillon statistique suffisant d'exoplanètes, et connaître aussi précisément que possible les caractéristiques de l'étoile centrale (flux UV-EUV, flux visible, vent stellaire), en vue de reconstituer l'évolution susceptible d'avoir conduit à l'état présent, et tenter de mettre en évidence des cas inexplicables en l'absence de processus biologiques. En s'appuyant sur le cas terrestre, éclairé par la comparaison avec Mars et Vénus, des bases de données d'évolutions possibles devront être construites, nécessitant, pour être crédibles, une représentation fiable de l'évolution stellaire. Il serait également très utile de déterminer si la planète possède ou non un champ magnétique global

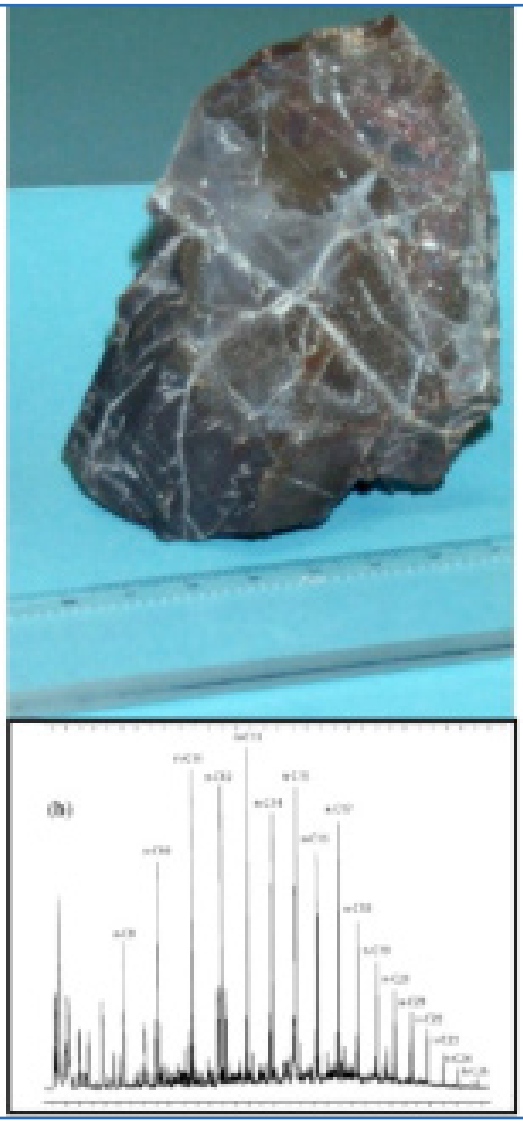
Les apports de la communauté ST à l'étude du système solaire et des planètes, interactions avec AA

Comprendre l'origine du système solaire, et des systèmes planétaires en général, est le but ultime de la planétologie. La recherche sur la formation et l'évolution précoce du système

solaire devient de plus en plus interdisciplinaire. D'une part, les avancées des techniques d'analyse isotopiques des échantillons permettent désormais de lire directement le livre des origines et d'établir sa chronologie (formation des premiers solides, accrétion et différentiation des premiers planétésimaux, assemblage des planètes telluriques). D'autre part les observations astronomiques visant à caractériser les petits corps les plus primitifs (comètes, astéroïdes carbonés) et les réservoirs les plus lointains (objets de Kuiper, planétoïdes) fournissent de plus en plus de contraintes pour les modèles d'évolution physique et dynamique des objets du système solaire. Les progrès des capacités de calcul, et des techniques de simulation permettent désormais d'élaborer des modèles sophistiqués et réalistes de l'histoire des collisions et accrétions donnant naissance aux corps de notre système planétaire, dont les résultats peuvent être comparés directement aux contraintes observationnelles (tant astronomiques que cosmochimiques).

La cosmochimie base ses diagnostics sur les mesures précises de la composition en éléments chimiques des matériaux extraterrestres, qui apportent des contraintes irremplaçables sur leur origine et leur histoire. L'originalité de la communauté cosmochimique, rattachée en France à ST, est de travailler en laboratoire sur des échantillons extraterrestres (ET), météorites, micrométéorites, particules interplanétaires (IDPs), avec toute la finesse des techniques développées par cette communauté depuis 3 décennies : minéralogie-pétrologie par rayonnement synchrotron, analyses élémentaires et isotopiques *in situ* par sondes électronique et ionique et ablation laser-spectrométrie de masse, pouvant atteindre une précision de 5 chiffres après la virgule avec les dispositifs ICP-MS (spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif). Les grands axes développés par ST sont :

1. contexte astrophysique de la formation du système solaire ;
2. physico-chimie du gaz et des solides ;
3. la clé de voûte de la Cosmochimie : *les* radio-chronologies ;
4. évolution planétaire précoce : des « *planétésimaux* » à la Terre primitive, Mars (via l'étude des météorites martiennes ;
5. hydrosphère et atmosphère Archéennes et Hadéennes (les environnements de la Terre durant le premier milliard d'années).



Découverte d'un marqueur signature chimique de la présence de matière organique dans un chert daté de 3,5 milliards d'années. La prédominance des composés ayant un nombre impair d'atomes de carbone est une signature indiscutable d'activité biologique démontrant la présence de matière vivante à l'époque où la roche s'est formée.

L'excellence française en analyse, en grande partie acquise via la géochimie, a permis aux laboratoires nationaux d'être sélectionnés pour l'analyse d'échantillons ET ramenés par les missions Apollo (3 laboratoires français sont PI), Stardust (échantillons d'une comète, consortium de 5 laboratoires nationaux) et Genesis (analyse du vent solaire).

C'est dans ce contexte pluridisciplinaire que la « Cosmochimie-Terre Primitive » s'est développée en France, soutenue par le PNP, qui constitue le forum de référence pour les échanges et collaborations avec la communauté AA. Les collaborations et interactions s'établissent aussi par des écoles thématiques, telles que celles d'exobiologie (à Propriano) et celles sur la formation du système solaire (Les Houches). L'évolution récente du PNP en programme transverse de l'INSU devrait faciliter encore les échanges et collaborations entre communautés AA et ST sur des thématiques d'interface. Un enjeu majeur de la prochaine décennie est le développement de l'analyse de très faibles quantités de matière extraterrestre en préparation des missions de retour d'échantillons. Le déploiement de réseaux de capteurs à la surface de planètes et satellites pour mieux appréhender les conditions de leur surfaces, atmosphères et intérieurs constitue un deuxième point de contact des communautés AA et ST.

Exobiologie

L'exobiologie (ou astrobiologie) est la science qui étudie la vie dans l'Univers. Elle inclut l'étude des origines de la vie terrestre, la recherche des traces de vies extraterrestres et l'étude des conditions et des processus qui ont permis (et qui permettent) la formation et l'évolution de la vie partout où les conditions environnementales le permettent. Ceci nécessite la compréhension de l'évolution de la matière organique vers des structures complexes, capables de se reproduire et d'évoluer, ainsi que la recherche de la distribution de la vie ailleurs sous toutes les formes qu'elle pourrait revêtir.

L'impact de la présence de vie sur l'environnement et l'influence de l'environnement sur les formes de vie, constituent des points clé car ils permettront probablement, une fois bien maîtrisés, de définir des diagnostics de présence de vie sur des corps inaccessibles à l'exploration (satellites ou planètes distantes, exoplanètes, etc.). L'étude de la Terre primitive est un aspect essentiel de cette problématique car il importe de bien cerner la chronologie de l'apparition de la vie et comprendre quels environnements ont été les plus favorables. Ces études s'appuient en particulier sur la comparaison des restes fossiles des premiers environnements favorables à la vie avec des conditions modernes dans une démarche associant géologues, géophysiciens, chimistes et biologistes. La vie sur Terre a été découverte dans des environnements extrêmes longtemps considérés comme hostiles à toute forme de vie. Ce nouveau champ d'exploration étend considérablement les critères dits « d'habitabilité » et devrait permettre d'envisager la vie « autrement ». Un vaste chantier de caractérisations, de définitions, d'investigations audacieuses doit s'ouvrir dans l'interdisciplinarité, en combinant les expertises des astrophysiciens, géophysiciens, chimistes, physiciens et biologistes, ... Il s'agit là d'un défi scientifique majeur qui mobilise plusieurs champs conceptuels et de nombreuses connaissances dans des domaines variés.

Le CNRS, dans le cadre de sa politique de prospective et de programmation, a piloté, de 2006 à 2009, le programme interdisciplinaire « Origines des Planètes et de la Vie. », coordonné par l'INSU. Ce programme vient d'être renouvelé sous un intitulé différent « Environnement Planétaires et Origines de la Vie » qui illustre le déplacement de la question grâce aux avancées obtenues. Les questions clés concernent la caractérisation des systèmes planétaires, l'origine des atmosphères, la compréhension de la diversité des systèmes planétaires, des caractéristiques physico-chimiques des exoplanètes et de la fraction d'exoplanètes telluriques, ainsi que la complexification de la matière (matière solide réfractaire ou soluble, composition et structure de la matière carbonée, formation de molécules organiques).

Sont également interrogés aujourd'hui les processus et les conditions aux origines de la vie. Quelles furent les conditions de la Terre primitive ? Quelles sont les transitions connues de l'inanimé vers le vivant primitif ? Les premières traces de vie sur Terre, les biomarqueurs du vivant etc. Enfin, existe-t-il des signatures de vie extraterrestre? Quelles formes de vie ? Pouvons nous extrapoler la vie terrestre sur d'autres systèmes ?

Cette réflexion souligne l'importance de la caractérisation des différents systèmes planétaires, le modèle de la Terre devant être replacé dans un contexte plus général. Comme souligné plus haut, il est connu qu'une atmosphère riche en oxygène peut être obtenue dans un contexte abiotique, en modifiant légèrement les conditions d'irradiation de la planète.

Enfin, les questions d'ordre historiques, épistémologiques et philosophiques doivent être analysées afin de mettre en évidence et de mieux cerner les liaisons causales qui relient ces thèmes. Cette thématique est donc naturellement en interface avec le domaine des sciences humaines, en particulier l'épistémologie et l'histoire des sciences.

Le GdR exobiologie a coordonné jusqu'en 2008 une grande partie de ces thèmes de recherche. Après son arrêt, la création de la société française d'exobiologie (SFE) sur le modèle d'autres sociétés savantes a permis de prendre le relais du GdR pour l'animation et la diffusion d'information dans la communauté scientifique et vers le grand public, tandis que les PIR OPV, puis EPOV conduisent une politique incitative de recherches interdisciplinaires. A court terme, le volet astrophysique de l'exobiologie se concentre sur l'exploration de la planète Mars, la recherche et caractérisation d'exoplanètes telluriques, ainsi que l'étude toujours plus fine de la matière primitive carbonée. Un couplage étroit est maintenu avec la géophysique/géologie pour l'étude de la Terre primitive. Sur le long terme, une mission de retour d'échantillons martiens recueille une forte adhésion. Une telle mission nécessite l'accroissement des capacités analytiques en raison des très faibles quantités de matière, et aussi pour minimiser les risques de contamination. Il ne faut pas oublier le couplage étroit avec les programmes de planétologie dans le système solaire comme au-delà.

Traitement de l'information

Les activités en traitement de l'information de plusieurs laboratoires d'astronomie français (essentiellement Nice, Toulouse, Strasbourg, Paris) illustrent aujourd'hui, dans le concret, les relations présentes et à venir au sein du CNRS, tout particulièrement entre l'INSU, l'INSI2 et l'ISTI (??). Si les recherches en relation avec les mathématiques et l'ingénierie, ainsi qu'avec l'IN2P3, doivent continuer leur croissance durant les prochaines années, ce sont celles relevant du traitement de l'information proprement dit (signal, image) qui seront amenées à augmenter fortement. En effet, le développement de méthodes de traitement d'images robustes, s'affranchissant autant que possible du caractère mal posé des problèmes inverses sous-jacents, est devenu un impératif majeur dans les conditions observationnelles extrêmes des très grands télescopes (grands relevés du ciel, optique adaptative, astrophysique des très hautes énergies, interférométrie, etc.). Réciproquement, les recherches menées par les laboratoires d'astrophysique dans ce domaine pourront apporter des problématiques et des contributions originales aux laboratoires menant des recherches dans le domaine des sciences et technologies de l'information et la communication (STIC).

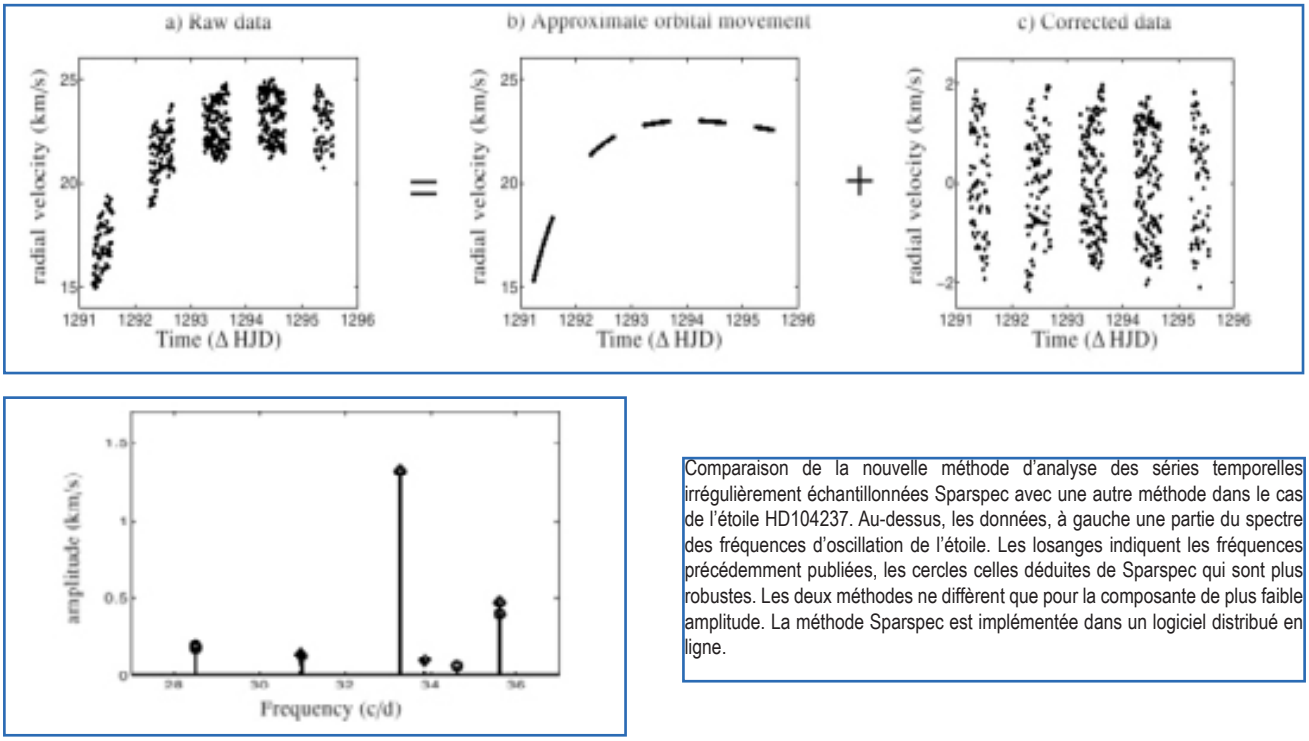
Les thématiques autour de la déconvolution d'images et de la séparation de sources sont en accroissement constant avec les projets d'instrumentation à haute résolution angulaire dans tous les domaines de longueur d'onde. En particulier, les grands relevés profonds sont dominés par le bruit du ciel, raison pour laquelle il est indispensable de mettre en œuvre des méthodes de réduction du bruit et de déconvolution, conjuguées à une estimation convenable de paramètres physiques des objets étudiés. Les méthodes mises en œuvre peuvent être instrumentales (par exemple *optique adaptative*) ou bien numériques (observations *couplée*s avec des algorithmes de reconstruction d'image). Dans les deux cas, il est nécessaire d'effectuer une analyse préalable du front d'onde pour le corriger.

Le thème de reconstruction d'images est aujourd'hui encore élargi pour les problèmes inverses très complexes liés par exemple à l'astrophysique spatiale des très hautes énergies avec observation par masque codé. D'autres problèmes font appel à l'analyse temps-fréquence (étude du CMB par exemple). Les données obtenues par Planck seront encore polluées par des impacts de rayons cosmiques ou par des objets dans le champ qu'il s'agira d'une part d'identifier, et d'autre part de supprimer sans introduire d'artefact, afin de ne pas augmenter l'erreur sur le spectre des anisotropies. Les possibilités ouvertes par l'analyse temps-

fréquence (qui a été peu appliquée jusqu'à présent sur ce type de données – probablement pour des raisons de cloisonnement entre disciplines) sont immenses, parce qu'elle permettra à l'astrophysicien de construire des « dictionnaires » de fonctions parfaitement adaptées à la nature physique des éléments qu'il s'agit de caractériser.

Les axes de recherche en traitement de l'information dans le domaine des applications en astrophysique n'excluent pas d'autres types de développements élargis. Citons par exemple l'émergence de nouveaux thèmes liés à l'imagerie spatiale à haute résolution pour l'observation de la Terre, en relation ave le CNES. En effet, l'algorithmique de restauration des images a atteint aujourd'hui une maturité suffisante pour être introduite en phase opérationnelle et les coûts de traitement au sol sont largement d'un ordre de grandeur inférieur au prix des instruments, soit une économie que l'on peut évaluer à plusieurs millions d'euros. Ces thèmes se situant dans un contexte de forte concurrence, ils peuvent présager de futures lignes de force au sein des laboratoires INSU. De plus, ils s'insèrent naturellement dans le cadre plus large des missions spatiales astronomiques et géophysiques et pourront le moment venu renforcer l'assise des activités spatiales autour de pôles techniques régionaux.

En complément, l'expérience acquise par les groupes techniques, notamment grâce aux développements sur le contrôle instrumental et la gestion de grands projets, a permis d'assurer leur participation à des programmes ambitieux à l'échelle internationale. Les compétences acquises pourront se compléter avec le développement de logiciels proches des utilisateurs dont l'importance est grandissante. Cela permettra de renforcer la synergie entre les équipes scientifiques et techniques dans les différentes phases des projets, depuis la conception jusqu'à la réalisation. Les codes mis au point par les scientifiques ne resteront pas à l'état de prototypes, mais pourront être insérés dans des bibliothèques afin de produire des outils « clés en main »



Comparaison de la nouvelle méthode d'analyse des séries temporelles irrégulièrement échantillonnées Sparspec avec une autre méthode dans le cas de l'étoile HD104237. Au-dessus, les données, à gauche une partie du spectre des fréquences d'oscillation de l'étoile. Les losanges indiquent les fréquences précédemment publiées, les cercles celles déduites de Sparspec qui sont plus robustes. Les deux méthodes ne diffèrent que pour la composante de plus faible amplitude. La méthode Sparspec est implémentée dans un logiciel distribué en ligne.

pour tirer pleinement profit des investissements nationaux sur les TGE.

Les compétences acquises dans le domaine de la gestion des bases de données interrogeables à distance sont importantes, à la fois dans la mise en place des bases au sens littéral du terme, mais aussi dans le développement d'outils destinés à gérer une grande quantité de données pour la préparation ou l'exploitation de missions spatiales, comme pour tirer profit de résultats de simulations numériques intensives. Ces moyens préfigurent aussi l'outil scientifique et l'enjeu technologique que sera l'Observatoire Virtuel AVO. Une telle approche permettra de rassembler des observations simultanées complémentaires qu'il aurait été laborieux de réunir autrement : ce seront des observations coordonnées a posteriori.
La radioastronomie dans le domaine des longueurs d'onde centimétriques et décamétriques souffre des interférences produites notamment par les télécommunications. Une activité spécifique de traitement du signal est menée pour développer des algorithmes permettant soit le traitement en temps réel des interférences avec des processeurs spécifiques, soit leur traitement « off line ». Ces traitements sont indispensables pour obtenir des données scientifiquement validées, les interférences pouvant totalement occulter les signaux astrophysiques. Une collaboration fructueuse existe sur ces activités entre l'USN et l'institut PRISME de l'université d'Orléans. La R&D est financée notamment dans le cadre de projets européens pour la préparation de la nouvelle génération d'instruments dans ce domaine de longueurs d'onde.

Dans le concret, ces activités se traduisent par une activité de recherche TdSI originale : publications dans des journaux de type IEEE ; congrès de type Gretsi, EUSIPCO, ICASSP ; participation au GdR-PRC ISIS ; création de 2 PPF (Toulouse et Nice), accueil d'étudiants d'Écoles Doctorales relevant de STIC ; examen

de laboratoires de la section 17 par la section 07; présence d'enseignants-chercheurs de la 61ème section du CNU dans des laboratoires d'astrophysique (Toulouse, Paris et Nice par exemple). Cette activité de recherche est complétée naturellement par une activité d'enseignement dans les filières EEA et dans les formations doctorales TdSI. Un vivier de docteurs « STIC » est à ce jour constitué, riche de cette culture pluridisciplinaire.

En conclusion, en prenant en compte les informations sur le système physique ou le dispositif d'acquisition, en renforçant la synergie entre astrophysiciens et « traiteurs de signal » dans les différentes phases des projets – depuis leur conception jusqu'à leur réalisation – on pourra pleinement tirer profit scientifiquement des investissements nationaux et internationaux sur ces grands équipements. L'ouverture des différentes phases de ces projets à la communauté des sciences du signal impliquera, à terme, de dépasser le seul accès à des données brutes, pour aller vers une grande valeur scientifique ajoutée. Elle renforcera d'autre part la participation française à des programmes ambitieux à l'échelle internationale. Ainsi, les axes de recherche autour des problèmes inverses sont amenés à se développer dans le cadre de thématiques comme la physique stellaire, la cosmologie ou encore l'astrophysique des très hautes énergies. Ils permettront de poursuivre ou d'entreprendre des programmes sur le long terme, en développant des méthodes originales profitant d'une bonne connaissance des mécanismes de formation des images et des objectifs astrophysiques fixés. On peut alors dégager quatre grandes orientations autour desquelles doivent se concentrer, dans les prochaines années, les efforts autour des problèmes inverses au sens le plus général du terme : la déconvolution d'images, l'analyse temps – fréquence ou analyse spectrale , la reconnaissance des formes et le traitement des données hyper-spectrales.

Instrumentation et détecteurs

L'astronomie s'est développée sur l'ensemble du spectre électromagnétique, et même au-delà en utilisant les nouveaux messagers que sont les particules comme les neutrinos, et bientôt les ondes gravitationnelles. Pour atteindre les meilleures performances (sensibilité, résolution spatiale, spectrale, temporelle, champ de vue, etc.) la communauté AA est très investie dans de nombreuses activités d'instrumentation. La photonique est le domaine d'excellence de l'astronomie. L'utilisation de l'optique guidée couplée à la miniaturisation des systèmes permet d'améliorer sensiblement les performances des instruments. Les recherches menées sur les détecteurs dans l'infrarouge moyen et lointain font intervenir des développements récents en physique des semi- et supraconducteurs, et des nanotechnologies. Le besoin de détecteurs cryogéniques dans ces gammes de longueurs d'onde, fait appel aux avancées les plus récentes en physique des basses températures, pour la cryogénie comme pour le choix et l'usinage des matériaux. L'électronique, la microélectronique, les activités systèmes sont aussi des exemples possibles, où des collaborations existent de longue date entre laboratoires d'astrophysique et d'ingénierie.

S'il existe des structures transverses permettant le dialogue entre l'astronomie, la physique et l'ingénierie (par exemple le GdR Détecteurs et émetteurs de radiations térahertz à semiconducteurs, ou les actions dans le domaine photonique), et des échanges fructueux entre chercheurs et équipes dans certains domaines, la visibilité des activités amont de l'instrumentation astronomique (au sol comme dans l'espace) devrait être améliorée. Ces activités devraient être mieux mises en avant par les laboratoires, les projets astrophysiques, étant très exigeants au niveau des spécifications instrumentales (sensibilité, conditions extrêmes de fonctionnement, autonomie), permettent l'émergence de nouveaux concepts qui peuvent ensuite être repris dans d'autres contextes. Il faut noter que les pôles de compétitivité sont des acteurs important pour la mise en réseau des laboratoires et industriels ainsi que pour le financement (par exemple OPTITEC en Provence).

Une difficulté potentielle pour l'approfondissement des collaborations est la différence d'objectifs entre laboratoires d'ingénierie et d'astrophysique : alors qu'il s'agit fréquemment de démontrer un concept dans les laboratoires d'ingénierie, les laboratoires d'astrophysique construisent des instruments qui demandent une plus grande maturité technologique (fiabilité, durabilité des composants et du système, intégration, etc.)

Ces activités sont décrites de manière plus approfondie dans les parties R&D et valorisation.

Organisation des activités interdisciplinaires

Le groupe de travail a diffusé une enquête auprès de 88 laboratoires, rattachés à l'astronomie/astrophysique ou menant des activités scientifiques sur des thématiques d'intérêt astrophysique. Une fraction significative (> 50%) de ces laboratoires a répondu à l'enquête, certains fournissant plusieurs réponses selon les équipes qui les composent. Une analyse des réponses aux questionnaires et des commentaires accompagnant ces réponses est donnée ci-dessous.

L'interdisciplinarité est largement perçue comme un enrichissement pour la dynamique scientifique des équipes et des laboratoires, et permet une augmentation de la visibilité des activités des laboratoires ou équipes. L'apport de financements incitatifs, comme les programmes INSU, les programmes interdisciplinaires du CNRS ou les GdR, est très apprécié, même si les contacts individuels entre chercheurs semblent être le plus souvent à l'origine de projets de recherche interdisciplinaires. Les programmes ont un rôle structurant des communautés concernées, et permettent d'accompagner des collaborations dans la durée. Cette action dépasse l'impact purement budgétaire (mais significatif) des financements accordés par les programmes. L'organisation d'ateliers de travail, ou d'écoles thématiques est bien perçue car elle favorise ce genre de contacts au-delà de la discipline d'origine des chercheurs. Il faut veiller à faciliter de telles initiatives et accompagner le travail d'organisation qui repose souvent sur quelques personnes. Si la participation aux écoles

thématiques est financée par la formation permanente pour les chercheurs CNRS, il faudrait trouver des financements analogues pour les chercheurs d'autres corps. Le travail en commun autour d'un projet d'envergure (par exemple un instrument spatial) est aussi un facteur de rassemblement au-delà d'une discipline.

Les réseaux de collaboration sont multiples, tant en France qu'à l'étranger. Les laboratoires d'astrophysique travaillent avec des laboratoires de physique fondamentale et d'astroparticule, de physique moléculaire et de chimie, de géophysique, d'instrumentation principalement mais l'éventail est bien plus large. Les plateformes technologiques sont également sollicitées pour certains projets de collaboration. Les réseaux européens contribuent au fonctionnement de ces activités dans certains cas sans que ce soit une règle générale.

Les modalités d'organisation des activités interdisciplinaires sont multiples et il ne semble pas y avoir de modèle unique : outre les collaborations entre équipes autour d'un projet limité dans le temps, la formation d'équipes interdisciplinaires au sein d'un laboratoire, éventuellement pour une durée finie, voire la création de laboratoires interdisciplinaires comme le laboratoire APC sont évoquées. Le contexte de l'objectif scientifique poursuivi est donc le déterminant le plus important, et les modalités d'organisation doivent être adaptées au cas par cas.

L'astrophysique de laboratoire est un des domaines d'interfaces majeur de l'astronomie avec les communautés de physique et chimie. Les commentaires fournis en réponse au questionnaire soulignent le besoin pour des financements interdisciplinaires spécifiques et souples, au moins dans ce domaine, qui permettraient de financer les activités dédiées aux applications astrophysiques dans les laboratoires qui ne dépendent pas de l'INSU. De tels financements sont intéressants, non seulement pour contribuer au financement des projets, mais aussi pour permettre le regroupement d'«équipes» autour d'un projet commun plutôt que de fonctionner sur le mode « service d'une communauté scientifique par une autre » qui n'apporte pas de bénéfices sur le long terme. Les programmes de l'INSU et les programmes interdisciplinaires du CNRS répondent partiellement à cette demande. Toutefois, et même si les financements INSU sont souvent considérés comme indispensables et structurants, les montants financiers accordés ne sont pas toujours suffisants, en particulier pour les projets instrumentaux ou d'expérimentation de laboratoire. Ces structures de financement ne permettent donc pas nécessairement de faire fonctionner les projets interdisciplinaires à la hauteur des besoins réels, mais apportent un "label" appréciable. Il est demandé d'alléger les dossiers et de faciliter la mise en œuvre d'opérations pluriannuelles comme le sont fréquemment les projets expérimentaux. Le faible soutien en moyens humains, la modestie des financements récurrents pour le fonctionnement des expériences, l'absence de pérennité des structures CNRS hors laboratoires, sont perçues négativement. Le besoin de réunir plusieurs sources de financement autour de moyens expérimentaux couteux est perçu comme pénalisant. Les financements obtenus pas l'Agence Nationale de la Recherche sont conséquents mais ne favorisent pas nécessairement l'établissement d'une stratégie nationale. En outre, les moyens de fonctionnement de ces équipements ne suivent pas forcément.
En conclusion, l'action importante en faveur de l'interdisciplinarité des programmes de l'INSU comme PCMI, PNP, PNPS, et des autres structures comme le PIR EPOV est reconnue. La synergie entre programmes sur les aspects physico-chimie pourrait être améliorée, puisque ces programmes cofinancent fréquemment les mêmes équipes.

Les questions de la formation des jeunes chercheurs, des recrutements et des évaluations ont fait l'objet de nombreux commentaires, tant dans les réponses aux questionnaires, que dans les discussions du groupe de travail.

Pour la formation initiale, deux modèles sont évoqués. Si le besoin d'ouverture vers d'autres disciplines est toujours souligné, les modalités sont différentes. Dans un premier cas, la nécessité d'une solide formation disciplinaire est affirmée, cette formation disciplinaire doit être complétée (par exemple pendant la thèse) par des cours ou écoles d'ouverture. Dans le second modèle, la formation doit être interdisciplinaire dès le départ; le biais d'une co-direction où les encadrants viennent de disciplines différentes est un modèle possible, à condition que l'étudiant s'insère dans une collaboration préexistante. Il serait souhaitable d'ouvrir la possibilité de sujets de thèses interdisciplinaires fléchés, l'aspect incitatif pouvant servir de déclencheur au démarrage d'un projet, ou arriver en appui à un dispositif déjà financé. Il y a un manque en bourses de thèse interdisciplinaires.

L'évaluation des activités interdisciplinaires, au niveau des chercheurs comme des équipes est un point dur. Une majorité des réponses qualifie la poursuite d'activités interdisciplinaires comme un handicap plutôt que comme un atout pour l'évaluation. Les structures de recrutement et d'évaluation des chercheurs sont largement constituées sur des bases disciplinaires. Il est important de veiller à ce que les chercheurs, laboratoires ou équipes puissent être évalués par des experts couvrant l'ensemble des thématiques abordées, même si ceci génère un surcroît de travail pour l'évaluation. Il devrait être possible de demander l'examen par deux sections du comité national ou du CNU, au niveau d'un chercheur individuel comme au niveau d'un laboratoire. Par ailleurs, il est souhaitable que les personnes recrutées sur des profils ou dans des équipes pluridisciplinaires aient une véritable sensibilité interdisciplinaire. Les commissions interdisciplinaires du CNRS ont été créées pour combler le besoin de jurys interdisciplinaires sur des thématiques fléchées. Ces commissions sont créées pour un mandat de 4 ans du comité national et ne sont pas nécessairement pérennes au delà de ce mandat. Jusqu'à présent, les postes de chercheurs ouverts au concours sur ces commissions sont "mis à disposition" par les instituts associés à la commission, soit par des fléchages, soit par des coloriages. La commission interdisciplinaire 47 a fonctionné sur les thématiques à l'interface physique théorique, physique nucléaire et astrophysique de 2002 à 2008. Elle a permis des recrutements correspondants aux profils de ces 3 communautés mais avec des sensibilités et une ouverture plus interdisciplinaire que ne l'auraient fait des commissions « classiques ». Le bilan de la CID47 est largement positif. La CID 47 a joué également un rôle structurant, le travail en commun permettant de mener une réflexion prospective commune aux communautés associées, qui aurait émergé plus difficilement sans commission interdisciplinaire. Il est probable que l'impact d'une CID est plus important si le nombre de disciplines associées reste modéré pour permettre l'émergence

d'une réflexion commune. Il faut s'interroger sur la pertinence d'associer l'astronomie aux CID existantes, ou de participer à la création d'une nouvelle CID au moment du renouvellement du comité national. Comme le nombre des CID est trop limité pour assurer l'évaluation et le recrutement de chercheurs à toutes les interfaces de l'astronomie, il n'est pas nécessairement souhaitable de multiplier les commissions interdisciplinaires. Un élément d'appréciation complémentaire est la nécessité de maintenir un bon degré de sélection pour l'ensemble des jurys de concours « disciplinaires » comme « interdisciplinaires », et donc la nécessité de disposer d'un vivier de candidats suffisamment vaste. Si la constitution de jurys interdisciplinaires devient possible au CNRS, la méthode des coloriages des profils de poste est préférable à la création de commissions interdisciplinaires au sein du comité national qui polarisent l'interdisciplinarité sur un nombre réduit d'actions pendant le mandat de 4 ans.

Quelques laboratoires proches du périmètre AA reposent sur des bases interdisciplinaires (par exemple: APC, LAOG, LERMA, LPC2E, LPP, UTINAM, etc.). Dans d'autres cas, les équipes participant aux activités interdisciplinaires des laboratoires sont relativement isolées dans des laboratoires qui ont une activité principale « disciplinaire ». Il apparaît au fil des commentaires et des discussions du groupe que les équipes interdisciplinaires sont difficiles à stabiliser dans un tel contexte, une des raisons étant le risque d' « isolement » de chercheurs par rapport à une discipline non représentée dans le laboratoire. La situation sur un campus peut faciliter les contacts et limiter ce risque d'isolement. L'absence d'expert lors des évaluations peut renforcer ce sentiment d'isolement et contribuer à distendre les liens entre les chercheurs/équipes et leur communauté d'origine.

Enfin un fort besoin de coordination entre les différents instituts, agences et organismes (INSU, CNRS, ANR, CEA, etc.) est exprimé. Les programmes nationaux permettent cette coordination dans leur périmètre, mais toutes les thématiques ne sont pas couvertes par des programmes INSU. La moindre pérennité des programmes interdisciplinaires du CNRS (4 ans) les rend moins aptes à assurer ce besoin de coordination, en regard de la longue durée de maturation des projets instrumentaux de la discipline (> 10 ans), qui est voisine de la durée de création de communautés partageant un langage, des méthodes et des objectifs communs.

Recommandations

Structuration

La contribution du GdR PCHE à la structuration de la communauté astroparticules est reconnue et appréciée. Sa transformation en programme national, à l'image du PNCG, permettrait de pérenniser cette structuration. Il est essentiel de garder une structure réunissant les instituts concernés (INSU, INP, IN2P3) avec un conseil scientifique interdisciplinaire à l'image de ce qui existe actuellement.

Le domaine de la physique fondamentale, de la métrologie de l'espace et du temps, et des systèmes de référence est en forte mutation, avec une convergence des communautés d'astronomie, physique et sciences de l'ingénieur pour de nouveaux développements dans l'espace et au laboratoire. Il paraît important que ce domaine soit pris pleinement en compte dans les dispositifs de politique scientifique nationale du CNRS. Cela pourrait se faire par une structure de type AS ou PN de l'INSU, qui devrait être ouverte à la participation des autres instituts (INSU, INP, INST2I).

Les activités d'instrumentation font émerger le besoin de faciliter l'accès aux platesformes technologiques aux laboratoires de la discipline, et participer à la coordination de leur développement.

Evaluation

L'évaluation devrait veiller à valoriser le travail réalisé dans les collaborations interdisciplinaires, au niveau de l'évaluation des laboratoires, des équipes ou des chercheurs.
Pour que les activités interdisciplinaires soient évaluées à leur juste valeur, il est important que les experts de l'ensemble des disciplines soient présents dans les comités d'évaluation. Il est également important, pour les laboratoires ou équipes ayant des rattachements secondaires avec plus d'une section du comité national, que des membres de l'ensemble des sections participent à l'examen, et puisse ainsi analyser la pertinence des activités interdisciplinaires en liaison avec la stratégie nationale de chaque discipline.
Outre l'évaluation de la qualité du travail par les disciplines, il est également important d'évaluer le bénéfice apporté à la problématique scientifique étudiée par l'approche interdisciplinaire. Des critères possibles pour cette évaluation ont été proposés, comme l'existence de publications communes, ou plus généralement de réalisations communes, les contributions à des conférences ou des enseignements dans une autre discipline, etc.
Le recrutement de jeunes chercheurs ayant une formation interdisciplinaire peut s'avérer difficile par des commissions strictement disciplinaires. Des commissions mixtes peuvent s'avérer bénéfiques sur certaines thématiques, qui doivent être décidées au cas par cas.
Il faut veiller à ce que les activités interdisciplinaires soient reconnues comme des activités de recherche à part entière et non pas considérées comme des « activités de service ». Le périmètre des commissions doit donc être défini de manière suffisamment souple pour ne pas discriminer les activités « aux frontières ». Les activités interdisciplinaires se développeront avec le recrutement chercheurs pouvant servir d'interlocuteur aux deux (ou plus) disciplines grâce à une double compétence.

Formation initiale et continue

Même si le débat sur la formation initiale n'est pas tranché, il est souhaitable, quand les conditions locales le permettent, d'encourager les écoles doctorales de site à financer des thèses sur des sujets interdisciplinaires. Le CNRS peut faciliter cette politique en participant au financement des bourses de thèses sur des sujets fléchés.

Le travail en collaborations interdisciplinaires nécessite des échanges et l'établissement d'un langage commun. Les activités d'animation scientifique doivent donc être encouragées et reconnues à part entière.

Enseignement - Diffusion des connaissances

M. Dennefeld, R. Ferlet, G. Henri, E. Josselin, M. Marcelin, F. Roques, D. Rouan (coordinateur), G. Soucail, I. Vauglin. Une contribution d'A. Riazuelo sur la vulgarisation a été résumée et intégrée.

Former des étudiants à l'astronomie, faire partager la passion de la découverte astronomique, la valeur des méthodes scientifiques et le plaisir qu'il y a à mieux comprendre l'Univers et la place que nous y occupons, sont des préoccupations que notre communauté a toujours considérées comme motivantes et dignes d'efforts particuliers. Elles sont d'ailleurs inscrites en toutes lettres dans les missions des chercheurs, notamment celles du corps des astronomes. L'astronomie est en effet un canal assez unique pour sensibiliser le public aux questions scientifiques, en particulier les jeunes de tous milieux, en offrant une ouverture à la démarche scientifique, qui part de questions que chacun se pose. Cette curiosité, qui souvent correspond à de vraies interrogations philosophiques, est aussi un portail sans guère d'équivalent pour attirer les jeunes vers des études scientifiques qui subissent une inquiétante érosion. C'est aussi une façon efficace de combattre la montée des fausses sciences et de la pensée irrationnelle. Le groupe de travail a passé en revue trois volets de cette question de l'enseignement et de la diffusion des connaissance : l'enseignement universitaire de l'astronomie, l'enseignement dans le primaire et le secondaire, la diffusion des connaissances et la communication des résultats. Le travail s'est fait sous forme d'enquêtes préliminaires puis de discussions sur leur analyse, les conclusions et les recommandations principales sont les suivantes :

• Etudes doctorales : le passage au LMD et au système des grandes Ecole Doctorales généralistes s'est accompagné d'une perte globale, hors Île-de-France, du nombre d'allocations ministérielles pour les doctorants en A-A. Par ailleurs l'astrophysique bien qu'elle reste une discipline vivante et attractive pour le grand public, souffre de la désaffection générale des étudiants pour les sciences. Enfin on note que la filière ne produit pratiquement pas de chômeurs, et donc que les flux ne sont pas trop élevés. Il est recommandé : a) d'encourager des passerelles plus nombreuses entre les Masters nationaux et les ED, b) de développer l'internationalisation sous tous ses aspects (réseaux, programmes Erasmus Mundus, accords de co-tutelle, accords bilatéraux nationaux, des efforts sur la langue publicité internationale) c) mettre sur pied une concertation plus grande entre les organismes offrant des demi-financements, d) d'envisager la création d'un institut national de la formation doctorale en A-A qui coordonnerait et diffuserait l'offre de thèse, serait un interlocuteur des Masters, des organismes, maintiendrait des statistiques à jour du devenir des docteurs et un annuaire qui faciliterait l'insertion.

• Licence, Master : l'offre est abondante et très diversifiée, mais l'astrophysique se retrouve au carrefour de différentes disciplines, avec parfois une difficulté à négocier une « bi appartenance » entre la physique et les Sciences de l'Univers, souvent séparés dans les structures universitaires et ministérielles. Afin de confronter les expériences et les actions, définir un socle de connaissance, il est recommandé qu'une réunion annuelle des responsables de filières soit systématiquement organisée. Il faudra aussi trouver un cadre adapté pour continuer à faire vivre l'activité de formation à l'astronomie observationnelle en Licence et Master sur le site de l'OHP : elle est irremplaçable.

- La formation ouverte à distance est désormais une composante forte de la formation en astronomie et elle doit se développer dans les nombreuses niches qui s'offrent à elle.

- Les programmes scolaires du primaire et secondaire affichent des objectifs louables en astronomie, mais les moyens et les instructions sont insuffisants : Il serait souhaitable d'œuvrer à obtenir la participation systématique d'un astrophysicien mandaté dans les comités d'élaboration des programmes.

- Les actions nationales et locales vers les scolaires sont bien développées et se structurent de plus en plus avec des actions comme LAMAP ou HOU, mais la formation des professeurs demeure rare et peu visible ou disparate. Il est recommandé que se mette en place une structure de coordination nationale de cette formation qui pourrait être pilotée par des personnels CNAP.

- Visites organisées, expositions, parcours, conférences, journées des planètes, soirées d'observations, Nuit des étoiles, Nuit des chercheurs, journées Portes Ouvertes : le public est friand de ces occasions qui lui sont offertes d'être au contact de l'astronomie professionnelle et vient notamment y chercher la fiabilité du discours faits par des scientifiques. L'offre semble assez large et assez bien perçue, mais un certain déficit de personnels volontaires pour ces actions est constaté : les établissements pourraient d'avantage inciter « tous » leurs personnels à participer à ces actions, en échange de décharges ou de jours de rattrapage. Par ailleurs, quelques unes des actions de AMA09 ont été de belles réussites et des moyens devront être trouvés pour qu'elles puissent être prolongées sur plusieurs années. Enfin, afin de promouvoir le classement sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO d'éléments du patrimoine astronomique français, la création d'un comité national est recommandée.

- La communication des établissements d'A-A a bien évolué, avec le fort développement et la professionnalisation des pages web, la généralisation de «chargés de communication», la multiplication des communiqués de presse. Il est suggéré une coordination plus forte des chargés de communication et la création d'un « réseau ».

Enseignement universitaire

Depuis le dernier exercice de prospective, l'évolution la plus importante correspond à la mise en place du système LMD qui très rapidement s'est imposé comme standard dans toutes les universités françaises. Le passage à la LRU est également un

facteur majeur de l'évolution du paysage universitaire mais dont on ne peut pas encore apprécier aujourd'hui tout l'impact sur notre discipline.
Trois niveaux différents ont été examinés : le niveau doctoral et le devenir des doctorants, le niveau Licence-Master et enfin l'enseignement plus professionnel.
Les sources ont été diverses : utilisation des informations du site de la SF2A, questionnaires aux ED, consultation des sites des universités.

Doctorat

Effectifs

Une enquête nationale menée auprès des ED qui mentionnent le terme astronomie dans leur champ disciplinaire (site du Ministère) a donné peu de retours, aussi les estimations qui suivent sont-elles basées sur un croisement des données statistiques des laboratoires (Labintel) et de l'hypothèse raisonnable que l'ED Astronomie-Astrophysique d'Île-de-France représente en France une bonne moitié des doctorants de la discipline.

Sur les 18 ED mentionnant l'astronomie ou l'astrophysique dans leurs mots-clefs, seulement 12 semblent en relever effectivement. On notera la singularité de l'ED d'Île-de-France qui est la seule monothématique et qui représente, bon an mal an, une bonne moitié des doctorants (45 soutenances en moyenne / an) en A-A. Toulouse est probablement le deuxième site en importance (12 soutenances / an).

Le pavage national est assez bon, même si on continue de noter l'absence d'ED capable d'accueillir des doctorants A-A dans tout le Nord-Ouest du pays. En revanche ce pavage assez large masque une autre réalité liée au passage au LMD et au système des grandes ED très généralistes : une perte globale, hors Île-de-France, du nombre d'allocations ministérielles pour les doctorants en A-A. L'effet de dilution du poids des astronomes et l'arbitrage qui se porte plus facilement vers des thématiques plus appliquées semblent constituer deux raisons à cette tendance. La région Ile-de-France avec son ED monothématique est, pour le moment, peu sujette à cette évolution, mais comme ce modèle d'ED n'est pas appelé à se développer, il faut trouver localement des solutions car dans certaines régions la situation est devenue assez critique. Par exemple à Strasbourg, le nombre d'allocations du ministère est passé de 2,25 à 1,5 en moyenne par an entre les périodes 2001-2004 et 2005-2009.
Une première recommandation est de négocier par ED des quotas pluri-annuels d'allocations pour A-A sur une base claire, en proportion par exemple du nombre de HDR en A-A dans l'ED. Une autre recommandation est d'encourager des passerelles plus nombreuses entre les Masters nationaux et les ED en assurant une meilleure publicité et en favorisant des thèses en co-direction.

Le nombre de thèses en A-A se situe probablement entre 80 et 90 par an (base Labintel et croisement avec les thèses soutenues en Île-de-France et à Toulouse). Si on compare ce nombre à celui de deux autres pays européens actifs en astronomie, les Pays-Bas (20 thèses/an) et le Royaume-Uni (140), on constate que, ramené à la population du pays, il est identique dans le premier cas et nettement inférieur dans le second. Dans la mesure où il ne correspond pas non plus à la création de futurs chômeurs (voir plus loin), c'est donc très loin d'être un nombre pléthorique, comme parfois on peut l'entendre dire par des partisans de la « fermeture du robinet » qui proposent d'adapter le nombre de thèses au flux des postes en recherche publique.

En ce qui concerne la chute des effectifs en physique, constatée dans tout le monde occidental, on note que l'astronomie s'en sort un peu mieux par l'attrait qu'elle continue de représenter mais il n'est désormais pas rare de voir des sujets financés ne pas trouver preneur ou être l'objet de candidatures de faible niveau. Cette question du niveau des étudiants universitaires est d'ailleurs préoccupante. Un exemple frappant a été donné dans une grande université du Sud de la France : la fraction des étudiants qui s'inscrivent en Licence et qui ont eu le bac après un oral de rattrapage est passé de 21% en 2005 à 73% en 2008 ! C'est l'augmentation de la population des classes préparatoires aux grandes écoles qui explique en grande partie cette évolution : il y a un drainage des meilleurs étudiants vers cette filière. Il faut du coup que les Masters recherche et les écoles doctorales attirent plus d'étudiants venant des grandes écoles en développant leur publicité en direction de ces établissements, par exemple par des interventions ou des conférences. On sait par ailleurs qu'il y a un potentiel d'étudiants brillants à l'étranger dans lequel beaucoup d'Universités européennes ont fait le choix de puiser en offrant des facilités pour faire des thèses. La France devrait ne pas négliger cette source, même si des difficultés sérieuses liées à la langue font que notre pays n'est pas ciblé prioritairement par ces étudiants.

Une recommandation est donc de développer l'internationalisation sous tous ses aspects par la participation à des réseaux ou au nouveau programmes Doctorate Erasmus Mundus de l'UE, la multiplication des accords de co-tutelle, des accords bilatéraux nationaux comme par exemple CNRS-CONICYT (Chili), des efforts sur la langue (cours en anglais, formation en langue), une ouverture large des bourses et une publicité internationale.

Financement des thèses

Les contrats doctoraux (ex allocations du Ministère) représentent typiquement la moitié des financements des thèses, les autres sources étant les bourses CNRS (ex BDI), qui de plus en plus correspondent à des co-financements, les bourses du CNES (même remarque), les CFR du CEA et depuis peu on voit une montée des financements par l'ANR et par les régions. Les bourses à caractère industriel sont moins courantes et on voit une évolution : les CIFRE semblent de plus en plus rares, tandis que les supports venant des industries sont de plus en plus proposés en exigeant un co-financement, or l'obtention de ce co-financement est souvent aléatoire en partie en raison de calendriers non synchrones. Ceci est également vrai pour les organismes publics. On voit ainsi souvent des projets de thèse ne pas aboutir faute d'avoir trouvé le ½ financement correspondant.
Deux recommandations pourraient être émises à ce sujet : a) mettre sur pied une concertation plus grande entre les organismes qui devraient mieux s'accorder sur les calendriers, et créer une « bourse » des ½ financements qui permettrait de mieux utiliser ce potentiel ; b) multiplier les sollicitations de financeurs potentiels, en coordonnant les informations au

niveau national.

Devenir des doctorants

On note en premier lieu que le taux d'échec, i.e. de thèses n'ayant pas abouti, est très faible (il est par exemple de 3% à l'ED A-A d'Île-de-France), ce qui tient sans doute au niveau assez élevé du recrutement et du volontarisme des étudiants s'engageant dans cette voie.

Sur la base des statistiques provenant des deux plus importants sites de formation de doctorants en A-A (IdF et Toulouse) il semble bien établi que l'astronomie ne forme pas de chômeurs, contrairement à une idée reçue (les connaissances acquises et le savoir-faire seraient jugés comme non applicables dans un milieu professionnel). En effet, sur 277 docteurs ayant soutenu une thèse depuis 2004 sur l'ensemble de ces deux sites, seul deux (voire un) étaient en recherche d'emploi. C'est un chiffre rassurant, même s'il ne doit pas masquer qu'une fraction importante des docteurs ayant un emploi se trouve sur des postes non pérennes (post-doc ou CDD) ; mais ceci est aussi une caractéristique de notre discipline : si on a fait une thèse en A-A c'est dans l'immense majorité des cas en souhaitant essayer de poursuivre une carrière dans la recherche, aussi un parcours passant par plusieurs années de post-doc est-il un choix aussi courant que cohérent. Une étude détaillée des raisons de ce faible nombre de docteurs en recherche d'emploi serait intéressante, mais en son absence on est réduit aux hypothèses : sous la pression de l'internationalisation des études et des économies, peut-être le tournant se fait-il enfin en France de la reconnaissance de la valeur professionnelle du diplôme quelle que soit *l'exotisme* de la discipline ; le savoir-faire en méthodes pointues de traitement de l'information et également la largeur du champ pluridisciplinaire maîtrisé par nos docteurs constituent d'autres éléments ; enfin le niveau assez élevé des doctorants, pour une bonne part titulaires d'un diplôme de grande école, est aussi à considérer. Enfin, on doit noter un taux de reconversion important vers les métiers de l'enseignement (via le CAPES ou l'agrégation, et même via le concours de professeur des écoles en IUFM).

Statut du doctorant

Le contrat doctoral qui se met en place à la rentrée 2009 constitue un changement notable. Il y a clairement des avancées liées à ce contrat doctoral, comme la garantie d'un montant plancher, le cadre juridique donné à des bourses qui en étaient dépourvus (e.g. fondations) et surtout le décompte des années de thèse dans la reconstitution de carrière. L'extension de la notion de monitorat à d'autres activités complémentaires (diffusion des connaissances, expertise, innovation), ainsi que sa généralisation à une grande majorité des doctorants est également un point très positif à la fois pour le doctorant par la professionnalisation et le complément de salaire qu'elle apporte, et pour la communauté par les possibilités qu'elle apporte par exemple en terme de moyens supplémentaires pour la communication.

Cependant un certain nombre de questions se posent : par exemple le surcroît de salaire lié à la mission complémentaire va-t-il correspondre à une augmentation parallèle du budget ? La gestion par les établissements de toute la formation (mission qui était dévolue aux CIES) peut-elle être considérée comme une avancée quand elle comporte des risques de cloisonnement, de repli sur soi et que l'on considère les écarts entre les universités en termes de moyens et de taille critique pour avoir une formation de qualité ?

Un institut ou un observatoire de la formation doctorale en astronomie ?

Au global, l'évolution vers l'autonomie accrue des universités et la généralisation des ED pluri-thématiques ne vont pas dans le sens d'un renforcement de l'astronomie au niveau doctoral. Les ED vont avoir tendance à se replier sur la communauté locale alors que notre communauté est de plus en plus engagée dans des projets collaboratifs et s'est organisée au travers des programmes nationaux et des services d'observation qui pavent la discipline.

Il semble que la plupart des recommandations énoncées précédemment trouveraient assez naturellement un support à leur mise en œuvre si une structure nationale légère pouvait en prendre la coordination. Elle pourrait assurer le recueil de l'information auprès des ED et des laboratoires, pour des besoins statistiques mais surtout de diffusion nationale et internationale des possibilités de financement et des sujets thèses, être un interlocuteur des organismes proposant des supports de thèse et coordonner par exemple la question des demi-financements, maintenir une base nationale de données sur le devenir des docteurs en A-A.

Une recommandation est donc d'envisager la création d'un institut de la formation doctorale en A-A (essentiellement un secrétariat, un directeur et quelques membres d'un petit bureau).

Licence, Masters (Licence, M1, M2, M2P)

Une enquête nationale basée sur l'exploration des sites universitaires a permis de construire une photographie, sûrement incomplète mais cependant parlante de la place de A-A dans l'enseignement universitaire en cycles de Licence et de Master.

Le tableau ci-dessous montre cette distribution par villes universitaires, sous la forme condensée du nombre de modules (unité d'enseignement) proposés.

A l'échelon national, l'enseignement est donc présent à tous les niveaux des filières universitaires, et sous différentes formes : formation initiale conventionnelle (toutes universités comprenant des EC en section 34), mais aussi filières destinée au grand public, à la formation continue ou à la culture générale (e.g. Grenoble), Masters recherche et professionnels (Toulouse,

	Bordeaux	Grenoble	Le Havre	Lille	Lyon	Marseille	Montpellier	Nice	Paris	Rennes	Strasbourg	Toulouse
Licence	3	12	3	3	12	2	3		16	4	7	2
Master	13	11		2	36	10	5	22	47		14	19

Paris), enseignement en ligne pour la formation à distance (Paris-Meudon, Lyon, Grenoble). Il existe également assez couramment des enseignements transversaux en histoire des sciences qui font une place importante à l'histoire de l'astronomie, une composante importante de l'histoire des idées scientifiques souvent traitée comme « modèle », en partant des théories des anciens jusqu'aux théories cosmologiques actuelles. Les enseignants sont bien sûr majoritairement des enseignants – chercheurs de la section 34 et des astronomes du CNAP, mais des CNRS chercheurs ou ingénieurs y interviennent aussi. Cela peut être vu comme un signe positif de la vitalité de la discipline. Cependant, l'installation progressive du LMD, comme dans d'autres filières, a conduit à une multiplication des offres, et à une grande hétérogénéité des situations locales. Dans certaines universités, l'enseignement n'a lieu qu'en Licence, dans d'autres, qu'en Master, et dans les plus grandes, à tous les niveaux. Dans les Masters, l'astrophysique peut apparaître comme un parcours d'une spécialité, comme une spécialité, ou même comme une mention (région parisienne) (à noter que la mention Astronomie et Astrophysique est dans la liste officielle recommandée par le ministère, mais n'est affichée comme telle qu'en région parisienne où elle est construite à cheval sur plusieurs universités).

On note aussi une certaine hétérogénéité des programmes traités, qui dépendent assez fortement de la situation de la recherche locale. Les bases comme la mécanique céleste, la physique du rayonnement, la structure stellaire, la planétologie, la cosmologie, sont traitées à peu près partout, mais à des niveaux variables, allant de la Licence au Master 2. Il arrive que dans une même université, un enseignement soit offert en commun à plusieurs niveaux, ou que des éléments de programme soient repris d'une année sur l'autre (avec probablement un niveau plus élevé). Bien qu'il paraisse difficile de normaliser les enseignements d'une université à l'autre, il pourrait être utile de réfléchir à un canevas de programme cohérent, progressif, donnant des recommandations à ce qui devrait être traité à chaque niveau, de la Licence au Master, en définissant aussi les pré-requis que les étudiants devraient avoir acquis à chaque niveau.

Pour amorcer cette réflexion, mais aussi confronter les expériences et les actions, il est recommandé qu'une réunion annuelle des responsables de filières soit organisée. Qui entre CNU, CNAP ou même SF2A pourrait prendre l'initiative de cette action reste à définir.

Cette offre est en général complétée par des enseignements plus spécifiques choisis par les enseignants, en général dans des thèmes proches de leur recherche, souvent au niveau Master. Du fait que les masters irriguent en général en futurs étudiants en thèse, cela semble à la fois normal et utile, et permet d'orienter spécifiquement les colorations de chaque filière de Master, qui offre un choix qualitatif ne se résumant pas à un classement quantitatif des attractivités des différents sites.

Le développement de la branche astroparticules à l'IN2P3 a souvent conduit à offrir des mentions communes, avec une coloration en parcours astrophysique ou physique des particules, et mutualisation d'enseignement communs (cosmologie, astrophysique des hautes énergies). Il pourrait être intéressant de faire un bilan des formations des futurs chercheurs recrutés dans ces disciplines frontières, la coexistence de ces formations pouvant parfois conduire à une concurrence locale dans le recrutement des meilleurs étudiants. Il existe aussi manifestement un développement de l'enseignement en commun avec les géosciences, par le biais de la planétologie, voire de la climatologie comparées. L'astrophysique se retrouve ainsi au carrefour de différentes disciplines, avec parfois une difficulté à négocier une « bi appartenance » entre le secteur physique (voire mathématiques) et le secteur sciences de l'Univers, souvent séparés dans les structures universitaires et ministérielles.

Si toutes les grandes universités proposent des enseignements d'astronomie au niveau Licence, ces enseignements sont souvent abstraits et ouverts uniquement aux étudiants de physique. Or, comme cela est noté, l'astronomie est au carrefour de nombreux domaines. Il pourrait être utile de réfléchir à ouvrir ces enseignements vers les domaines techniques (optique, électronique, informatique), littéraires, ou autres.

Il existe plusieurs universités scientifiques qui ne proposent pas d'astronomie dans leur cursus. Des modules pourraient être proposés, soit en présentiel soit à l'aide de formations à distance (cf ci-dessous).

Une réflexion sur la place de l'enseignement de l'astronomie en premier et second cycle pourrait être initiée. Cette réflexion et la confrontation des expériences et les actions pourraient être faites lors de la réunion annuelle des responsables de filières proposée plus haut.

Effectifs

Les effectifs de 2eme cycle ont connu une baisse assez continue, accompagnant la baisse des effectifs dans les sciences physiques, et les sciences « dures » en général, constatée dans tous les pays occidentaux. Les effectifs dans les modules d'astronomie de Licence ne sont généralement pas en baisse, celle-ci affectant essentiellement les seconds cycles de province. S'il manque une statistique précise, on constate bien cependant que ces formations tournent avec des effectifs d'une dizaine d'étudiants, parfois plus, parfois moins, ce qui peut mettre en danger leur existence.

La région parisienne, avec la fusion des anciens DEA dans une offre unique et diversifiée, reste encore prédominante dans l'offre nationale et semble encore suffisamment attractive pour garder des effectifs convenables (mais en situation de difficulté de recrutement, cela peut exacerber la pénurie d'étudiants d'autres sites par « effet ciseau »). Ailleurs, l'astrophysique se retrouve confrontée au paradoxe d'être souvent un puissant facteur d'attraction des étudiants vers la physique, mais d'être étiquetée comme offrant finalement peu de débouchés en recherche ou une reconversion vers le privé supposée acrobatique, ce qui détourne finalement beaucoup d'étudiants de qualité de ses filières spécialisées. Même si le constat est fait depuis longtemps, il semble nécessaire d'insister sur le fait que des formations de recherche fondamentale sont aussi des formations à un travail de haut niveau, qui devrait être reconnu dans d'autres secteurs de la société comme cela est le cas dans la plupart des pays étrangers.

Concernant la question de la mise en valeur des diplômes de Master ou de doctorat avec la mention Astronomie, de leur reconnaissance sur le marché de l'emploi, on note qu'il manque un moyen de diffusion, par exemple une sorte d'annuaire des anciens étudiants et doctorants (ou une association) qui aiderait à faire cette valorisation, permettant soit à un employeur potentiel, soit à un étudiant cherchant une filière de formation de se faire une idée de ce que permettent les formations dispensées par la discipline.

Le rôle de l'OHP dans la formation des futurs astronomes

L'OHP accueille des formations de tous niveaux qui concernent beaucoup l'astronomie.

C'est la formation d'étudiants de Master Recherche et Master Pro qui concerne notre discipline au premier chef. Elle concerne plusieurs universités françaises (Marseille, OP-P6-P7-P11, Strasbourg, Grenoble), mais aussi des universités européennes (Irlande, Angleterre, Belgique). La facilité d'accès et la très bonne adéquation des équipements offerts (télescopes de 152, 120, 80) à une initiation de la pratique professionnelle de l'observation astronomique sont les deux grands atouts qui ont assuré ce succès. Cette formation est considérée comme essentielle et efficace par tous les responsables de Masters qui l'ont inscrite dans le cursus de leur diplôme. Elle est également très largement plébiscitée par les étudiants eux-mêmes.

Cette mission de l'OHP rencontre aujourd'hui des difficultés croissantes liées à la réduction de personnel technique pour cette activité, à la dégradation des moyens d'observation et aux hausses du coût de l'hébergement. Ces difficultés sont à considérer dans une situation administrative complexe dans un contexte en évolution. L'union administrative entre les 3 universités de Marseille, prévue en 2010, devrait s'accompagner de l'évolution de l'OAMP dans un OSU plus large et pluri-thématique. Il se dessine une mutation assez radicale de la mission de l'OHP dans l'avenir avec en particulier une vocation à devenir une station très pluridisciplinaire. ***Il nous paraît indispensable d'intégrer l'initiation à l'astronomie observationnelle des futurs astronomes dans cette évolution de l'OHP. Il faut trouver un cadre adapté pour faire vivre et même renforcer sur ce site cette activité de formation à l'astronomie d'intérêt national voire européen.*** Former aussi des ingénieurs, techniciens et administratifs de nos laboratoires ainsi que des enseignants à l'observation du ciel serait sûrement à encourager.

On notera qu'il existe également un projet de monter une structure d'accueil pour étudiants au Pic du Midi. Le projet, soutenu par l'Université Paul Sabatier, consisterait à augmenter les capacités d'accueil au sommet, dédiées aux stagiaires, ce qui n'est pas possible actuellement et d'équiper une petite coupole d'instrumentation adéquate. Cette opération ne peut être qu'encouragée.

Les Formations Ouvertes et À Distance (FOAD)

L'enseignement à distance est une solution pour proposer un enseignement adapté aux demandes d'étudiants nombreux mais dispersés et aux attentes variées en termes de niveau, de calendrier, de sujets.
Les formations par Internet permettent de profiter des fonctionnalités du multimédia pour la création des contenus (animations, vidéos, exercices interactifs) comme pour l'organisation des cours (e-mails, chats, forum). Ce mode de formation nécessite une structure technique efficace pour faire évoluer les contenus et les sites en interaction étroite avec les enseignants.
On peut noter qu'il existe aussi deux formations à distance « classiques » proposées par le CNED et l'Université d'Orléans dont l'essentiel des cours est sur papier.
L'offre actuelle en terme de FOAD (Formation Ouverte et À Distance, c'est-à-dire basée sur Internet) est faible en France : une formation proposée par l'observatoire de Grenoble (*Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement*) de niveau L3 qui contient quelques modules d'astronomie (6 modules sur 20) partiellement en ligne, et l'Observatoire de Paris qui propose 2 formations : *Astronomie et Mécanique Céleste* au niveau L1 et *Fenêtres sur l'Univers* avec 5 parcours de niveaux L2 à M1.

Les FOAD existantes ne sont qu'une faible partie de ce qui pourrait être proposé, aussi recommandons-nous de ***favoriser le développement de modules couvrant d'autres sujets où s'adressant à un public plus étendu, la mission d'enseignement des astronomes offrant un cadre bien adapté à ce projet.***
Des modules pourraient être développés pour les niveaux de Licence ou de Master 1. La structure du LMD permet à des étudiants de cursus scientifiques (ou non scientifiques), si l'offre leur en était faite, d'intégrer des modules d'astrophysique dans leur formation. De nombreuses écoles d'ingénieurs s'ouvriraient certainement avec profit à des modules d'astrophysique. Des besoins existent aussi en terme de formation professionnelle des encadrants, animateurs de clubs, et journalistes. Si des cours existent déjà, comme ceux présentés ci-dessus, tous les sujets ne sont pas couverts, par exemple la formation à l'astronomie des professeurs d'écoles, qui n'ont pas, pour la plupart, de formation scientifique.
Des domaines de formation pointus et proches de la recherche donnent lieu actuellement à des Ecoles : des FOAD permettraient de prolonger ou compléter ces Ecoles et de toucher des étudiants dispersés ou disponibles à des périodes différentes. La structure des cours en ligne permet de garder à jour des connaissances qui évoluent vite parce que proches des domaines de la recherche.

Enseignement des compétences techniques des laboratoires

Les laboratoires, le plus souvent au travers de leurs ingénieurs, participent activement à la diffusion de leur savoir-faire spécifique en instrumentation ou en développement logiciel, voire en méthodes de conduite des projets, en donnant des cours destinés à des élèves des grandes écoles ou dans certaines universités. C'est une activité qu'il convient de soutenir car elle permet de faire connaître auprès d'éventuels futurs personnels de la recherche les attraits du travail de recherche, sa réalité concrète. C'est aussi souvent un moyen d'attirer des stagiaires. Enfin, c'est une façon de maintenir à niveau le savoir-faire des laboratoires dans la mesure où l'exigence de se mettre à jour sur les dernières techniques que demande la préparation d'un cours, ainsi que le contact avec des enseignants partageant des intérêts communs ou ayant des problèmes semblable à résoudre est toujours bénéfique. Il serait sûrement intéressant d'avoir une statistique sur cette pratique dans nos laboratoires.

L'astronomie dans l'enseignement secondaire et primaire

Les programmes

L'astronomie apparaît dans les programmes officiels, de l'école maternelle (!) au lycée. À l'école primaire : l'ambition affichée de privilégier une démarche expérimentale est en apparente contradiction avec les instructions officielles (de 2002 à 2008 : disparition de l'étude du « mouvement apparent du Soleil » des instructions officielles). L'invitation au rêve a fait aussi long feu (plus de « Système solaire et Univers ») …

Au collège : les objectifs généraux sont très ambitieux (« l'idée qu'un modèle peut fournir une certaine représentation de la réalité ») … Mais les moyens d'y parvenir sont loin d'être à la hauteur de ces ambitions :

- Présentation succincte du Système solaire, sans connaître le nom et la place des planètes !
- On aborde les ombres, mais on fait abstraction de la pénombre, en contradiction avec l'observation, et donc la démarche expérimentale.
- La présentation de la gravitation est pour le moins ambiguë.

À noter le manque de continuité dans les programmes avec l'absence de toute notion astronomique en classe de 4e.

Au lycée : le programme de seconde est particulièrement ambitieux. Est-il réaliste ? Sur les documents pédagogiques fournis sur le site du MEN, on évoque les magnitudes (pour la construction d'un diagramme HR), alors que les logarithmes sont au programme de mathématiques en terminale ! Par ailleurs, les programmes impliquent une formation spécifique des enseignants (spectroscopie astronomique, lois de Kepler, parallaxes, nucléosynthèse stellaire).

En bref : des objectifs louables, mais des moyens et des instructions insuffisants (pour ne pas dire dérisoires).

Il serait souhaitable d'œuvrer à obtenir la participation systématique d'un astrophysicien mandaté dans les comités d'élaboration des programmes, afin de : (i) garantir la pérennité de l'enseignement de l'astronomie dans les collèges et lycées ; (ii) veiller à la continuité de cet enseignement sur l'ensemble du cycle ; (iii) veiller à l'adéquation avec les programmes des autres matières (mathématiques, SVT). Le CLEA pourrait aider à définir le socle de connaissances en astronomie pour le primaire, le collège et le lycée.

Les actions locales vers les scolaires

On rencontre une grande disparité de ces actions spécifiquement tournées vers l'initiation à l'astronomie, suivant les sites :

- des contacts ponctuels ou des partenariats suivis ; suivant le contexte local, soit les classes viennent dans les observatoires, soit les chercheurs se déplacent ;
- en province, peu ou pas de publicité, mais les demandes sont nombreuses ;
- quelques protocoles de partenariat ont été mis en place avec les écoles, financés par les Délégations Régionales du CNRS (« Passeport pour la Science », « Passion recherche ») ;
- de même des protocoles de partenariat avec les écoles sont parfois financés par l'Inspection Académique (classes à PAC, ateliers de pratique scientifique) ;
- des stages de collège (« découverte de l'entreprise ») et de lycée (TPE/TIPE) encadrés un peu partout ;
- L'Observatoire de Paris par sa taille a clairement des actions de plus grande ampleur que les laboratoires de province et a ainsi mis en place l'opération de parrainage de classes par des chercheurs, qui rencontrent un grand succès.

Un point récurrent : « ce sont toujours les mêmes qui s'y collent … ». Du coup, la réponse aux demandes est à flux tendu, et les intervenants se lassent. La demande a été particulièrement abondante cette année, AMA09 oblige, ce qui risque d'accélérer le découragement.

Il serait dommage de ne pas profiter de la dynamique engendrée par l'AMA09. Mais cela nécessite des moyens financiers pour maintenir (et généraliser au niveau national) des actions locales et des moyens humains qui doivent se sentir valorisés ! Il est indispensable d'obtenir plus de reconnaissance de ces activités.
Les personnels CNAP peuvent contribuer pour partie, mais ce n'est pas dans leurs attributions formelles qui relèvent principalement de l'enseignement supérieur. On note que le référentiel récemment mis à jour par la section CNAP-AA recommande que ce type d'activité en lien avec les scolaires ne dépasse pas 22h d'ETD ce qui correspondrait à 88h réelles d'activité. C'est très loin d'être négligeable mais malgré tout insuffisant.
Il est recommandé que les établissements incitent leurs personnels à participer à cette palette d'activité, en recourant en particulier à l'attribution de décharges significatives pour les personnels non chercheurs.

Les actions nationales ou internationales vers les scolaires

Il est nécessaire de contribuer à renforcer, voire provoquer l'intérêt des élèves pour les filières scientifiques ; leur redonner le goût des sciences est un enjeu majeur actuel. Parallèlement à l'enseignement magistral classique (le programme), cela passe par des approches éducatives innovantes et transversales, exploitant la pédagogie de projet basé sur le questionnement ainsi que le travail en partenariat. L'opération « La main à la pâte » pour le primaire, le dispositif ministériel « Sciences à l'école » pour le secondaire – avec en particulier son opération « Astro à l'école »–, le réseau international « Hands-on Universe »[1], tous participent de la même démarche fondée sur l'expérimentation. Le travail à faire est immense : ces actions doivent non seulement coopérer mais surtout être soutenues.

La formation des maîtres qui va de pair avec les actions vers les scolaires proprement dites correspond à plusieurs initiatives :

- EU-HOU organise des ateliers de formation d'enseignants au niveau européen (financés par l'Europe ; plusieurs en 2009) ;

1 avec en particulier sa composante européenne coordonnée par la France qui a reçu en 2009 la médaille d'argent attribuée par la Commission Européenne dans la catégorie « Créativité et innovation dans les technologies de l'information et de la communication » (dans le domaine de l'éducation et la formation)

— «Astro à l'école» (Science à l'Ecole) diffuse un appel à projets tous les ans (deux cette année AMA09) vers les enseignants et organise pour les lauréats un atelier de formation ;
— au niveau de certains rectorats (e.g. Aix-Marseille) sont proposées des formations aux enseignants (dans le cadre de la formation continue et donc payée) ayant un bon succès (candidats refusés faute de place) ;
— Science à l'Ecole joue aussi un rôle de diffusion de l'information et de coordination des formations, mais manque de moyens ;
— le Comité de Liaison Enseignants Astronomes (CLEA) dont l'objectif est d'aider à la formation des enseignants (de la maternelle au lycée) en astronomie. Ses moyens sont variés : une « Encyclopédie » en accès libre (l'Univers à portée de main), un forum par mail (questions-réponses, débats), l'édition d'une revue trimestrielle (articles de fond, bilan d'expériences individuelles, etc.), enfin et surtout une École d'été (3e semaine d'août, à Gap) qui accueille une quinzaine de stagiaires par an.

Deux remarques sur ces écoles d'été doivent cependant être faites :
— les stagiaires et les animateurs ne sont plus subventionnés par le Ministère de l'Éducation Nationale, comme ce fut le cas dans les années 1980, d'où une baisse sensible du nombre de participants et un manque de renouvellement (surtout des enseignants déjà intéressés par l'astronomie : amateurs, membres de clubs) ;
— - la participation d'astronomes universitaires à la formation n'est pas reconnue dans leur service, en revanche elle peut l'être pour les personnels CNAP dans le cadre de la formation des maîtres.

S'il serait très souhaitable de pouvoir revenir à un financement par le MEN de la participation aux écoles d'été organisées par les associations, cela reste probablement un vœu pieu. En revanche, la question de la très grande disparité d'une région à l'autre des possibilités de formation en astronomie accessibles aux professeurs, de leur rareté ainsi que le manque de visibilité de ces formations est un handicap qui, lui, est tout à fait à la mesure d'une action de notre communauté. Aussi ***recommandons-nous que se mette en place une structure de coordination nationale qui pourrait être pilotée par des personnels CNAP. Son rôle serait de recenser les actions locales ou nationales de formation des maîtres, de susciter par des contacts avec les OSU et les inspections d'académie des initiatives régionales, de coordonner des actions entre des opérations pluri-disciplinaires (LAMAP, Science à l'Ecole) et des associations ciblant l'astronomie (EU-HOU, CLEA), de faire une publicité nationale de ces formations pour permettre à plus de professeurs d'y avoir accès.***

Diffusion de la science dans le public

Les actions de diffusion

Les observatoires

Tous les établissements de notre communauté pratiquent à des degrés divers la diffusion des connaissances de façon institutionnelle, soit par le contact direct avec le public, soit via leur site internet.
Le contact direct se décline de plusieurs façons. C'est d'abord sous la forme de visites organisées des sites, de présentations pérennes comme des salles d'exposition d'instruments, des panneaux, des vitrines et expériences, parfois des parcours dans les jardins. C'est également en organisant des manifestations locales spécifiques : expositions temporaires, cycles de conférences, journées des planètes, soirées d'observations, événements astronomiques, comme le transit de Vénus par exemple. Enfin, c'est en s'insérant dans le cadre d'initiatives d'ordre nationale : Science en fête, Nuit des étoiles, Nuit des chercheurs, journées Portes Ouvertes, Journées du Patrimoine.
On n'oubliera pas non plus les interventions pour les CCSTI et interventions dans les médias.
Le public est très friand de ces occasions qui lui sont offertes et vient notamment chercher dans ces contacts avec le milieu de l'astronomie professionnelle une particularité unique par rapport aux amateurs : la fiabilité du discours faits par des scientifiques.
Tout cela représente un investissement très important, basé parfois dans les grands établissements sur un service spécifique, mais aussi et surtout sur le volontariat. Il faut bien reconnaître que malheureusement cet effort est souvent le fait d'un trop petit nombre de personnes.

Une tentation serait d'inciter les personnels CNAP à s'investir dans ces tâches au titre des tâches d'enseignement, mais ce serait une fausse route car les actions de diffusion de la culture, «vers le grand public et les scolaires», ne sont pas de l'enseignement supérieur et ne font pas formellement partie de la mission d'enseignement d'un astronome. Ces actions sont tout simplement des missions de «tous» les chercheurs et même de «tous» les personnels des labos.

Une recommandation est donc que les établissements incitent d'avantage « tous » leurs personnels à participer à ces actions, en échange de décharges ou de jours de rattrapage.

Enfin, on citera la possibilité nouvelle qui se fait jour avec les nouvelles *missions complémentaires* des doctorants, un dispositif associé au nouveau contrat doctoral et qui est destiné à élargir les anciens monitorats à des actions de diffusion de la culture. C'est un important potentiel d'heures, par des personnes qualifiées et très motivées, qui ne doit pas être négligé.

On note enfin qu'à l'étranger, beaucoup des grands observatoires professionnels sont plus ouverts et touchent une plus grande palette de publics (touristes, amateurs, scolaires, …), par l'intermédiaire de "visitor centers" parfois très grands avec expositions et boutiques, de visites, de programmes de toutes sortes plus ou moins ciblés. Malgré les initiatives mentionnées plus haut, la France est encore en retard de ce point de vue. Si maintenant tous les laboratoires ont un site internet, leurs composantes enseignement/diffusion – quand elles existent – ne sont pas suffisamment diversifiées vers les différents publics ciblés (scolaires, amateurs etc.) et manquent

en général de contenus dédiés. Mais bien sûr cela requiert des moyens humains et financiers.

A propos de l'Année Mondiale de l'Astronomie (AMA09), on doit considérer que c'est un immense succès, comme en témoigne le site français qui recense les actions menées et le bilan qui a été fait en janvier 2010 lors de la journée de conclusion. 200 actions ont été menées avec succès dans l'hexagone et les DOM-TOM. Elles ont été extrêmement variées : nuits d'observation avec les 100 heures en avril, qui ont concerné près de 70 000 personnes, expositions téléchargeables ou itinérantes dans des villages, des collèges, des écoles ou présentées dans les lieux consacrés (Cité des Sciences et de l'Industrie, Palais de la Découverte, Cité de l'Espace, …), l'astronomie allant jusqu'à s'afficher dans le métro parisien ; rencontres et conférences ; actions art et astronomie avec des créations musicales, picturales ou théâtrales ; publication de livres, DVD, films sur l'astronomie. Ces actions ont touché près d'un million et demi de personnes, sans compter les centaines de milliers de visiteurs des grandes expositions dédiées dans les musées scientifiques ni les passagers du métro, un public très diversifié, de tous âges et de toutes cultures.

On a nettement plus parlé d'astronomie dans les média cette année. Beaucoup de collègues se sont investis (notamment pour donner des conférences), mais il y a eu également un fort soutien des associations d'astronomes amateurs (indispensables pour relayer nos actions vers le grand public, notamment lorsqu'on organise des soirées d'observation). On note la bonne coordination des actions, en PACA par exemple où un CDD d'un an a été financé par la Région, permettant notamment une coordination des actions entre Marseille et Nice.

Quelques-unes des actions de AMA09 ont été de réelles réussites et nous recommandons que des moyens soient trouvés sur une ligne spécifique pour qu'elles puissent être prolongées sur plusieurs années. La SF2A pourrait jouer le rôle de comité de sélection de ces actions à pérenniser.

Le patrimoine

La France possède un patrimoine astronomique qui mériterait d'être reconnu, non seulement au niveau national (l'inscription aux Monuments historiques de quelques observatoires est en cours ou déjà acquise), mais aussi au niveau international par un classement au patrimoine mondial de l'UNESCO. Grâce à l'Année Mondiale de l'Astronomie (AMA09), d'une part l'UAI et l'UNESCO travaillent étroitement ensemble sur ce sujet, et d'autre part l'UAI et l'ICOMOS (International Council on Monuments and sites – organisation non-gouvernementale indépendante de l'UNESCO et chargée entre autres de conseiller l'UNESCO sur les demandes de nomination sur la liste du patrimoine mondial avec un point de vue scientifiquement objectif et politiquement neutre) ont également décidé de s'associer pour produire une Etude Thématique développant les critères à partir desquels des sites astronomiques pourront ensuite être jugés quant à leur importance exceptionnelle et universelle pour l'Humanité. Un document final devrait être présenté à l'issue de l'AMA09, document qui devra ensuite être approuvé par le Comité adéquate de l'UNESCO.
Cependant, l'UNESCO ne peut décider l'inscription d'un site sur sa liste du patrimoine mondial qu'à la requête officielle des gouvernements nationaux. C'est pourquoi la France se doit parallèlement de préparer un dossier pour ses propres sites astronomiques, dossier suffisamment convaincant pour que le Comité français de l'UNESCO l'intègre dans ses priorités. D'autres pays ont déjà fait cette démarche. ***Pour cela, un petit comité issu de la communauté des astronomes et doté de quelques moyens devrait être créé officiellement, par exemple auprès de l'INSU, afin de porter ce projet, en collaboration avec le Ministère de la Culture (qui a déjà été sensibilisé à cette question) et les Universités ou établissements propriétaires du patrimoine.***

Les amateurs

Que ce soit vis-à-vis des amateurs occasionnels, avertis ou chevronnés, la communauté des astronomes se doit d'essayer de répondre à leur demande et de jouer les rôles suivants :

- sensibiliser les plus chevronnés à l'orientation de leurs observations vers des programmes directement utiles à la science, en liaison avec des astronomes professionnels. Cela devrait se faire en collaboration avec des associations d'envergure nationale dont c'est l'un des buts, par exemple les commissions de la Société Astronomique de France ou l'Association Aude ;
- organiser des stages théoriques ET pratiques observationnels/techniques adaptés aux débutants, amateurs plus ou moins chevronnés, ''ingénieurs en retraite'', IUT et autres universitaires….

Le CNRS a d'ailleurs commencé à comprendre que les moyens et techniques accessibles aux amateurs les plus motivés représentent un potentiel attractif en organisant en 2003 la première Ecole d'astrophysique d'Oléron pour une coopération professionnels / amateurs, et en récidivant en 2006 et en 2009. Par les moyens qu'il peut offrir, l'OHP pourrait jouer un rôle leader dans ce domaine et devenir un pôle de la collaboration amateurs/professionnels, y compris au niveau européen (en se souvenant que ce public amateur satisfait sa passion sur son temps de loisir et n'est pas forcément riche !).

Les planétariums

C'est une composante de diffusion de la culture astronomique qui se répand de plus en plus, si on considère les 1 500 000 visiteurs par an en France. Les statistiques récentes sont les suivantes :

- 23 planétariums fixes (dont un outre-mer) ont été créés entre 1979 et 2005 (un créé en 2005, plus un 2e à la Cité de l'Espace) ; 2 sont liés à des OSU (Strasbourg, Nançay), 3 à des « grosses » structures muséographiques (La Villette, Musée de l'Air et de l'Espace, Cité de l'Espace). À noter un IUFM (Angers) ;
- 9 planétariums fixes et itinérants, créés entre 1990 (exception du Palais de la Découverte en 1952 !) et 2002, dont 3 associés à un OSU ou un grand établissement (Palais de la Découverte, Marseille, Saint Michel l'Observatoire) ;
- 16 planétariums itinérants, créés entre 1987 et 2007 (3 au cours des 4 dernières années).

On note cependant que ces médias en grande partie échappent à une validation de leurs contenus par notre communauté, ce qui conduit parfois à des présentations contenant des erreurs. On ne peut qu'encourager les contacts au niveau régional entre les établissements de la discipline et les planétariums.

Communication des labos et établissements

En matière de communication des résultats, les principales évolutions constatées depuis le dernier exercice de prospective peuvent être ainsi résumées :

— multiplication des pages web à destination du grand public sur les sites des laboratoires, avec presque toujours un contenu de qualité et parfois une présentation très soignée en terme d'interactivité. Les pages actualités apparaissant sur le portail sont en général régulièrement mises à jour. C'est sans doute nettement moins vrai pour les contenus de base, qui trop souvent encore contiennent des informations dépassées (le satellite XX qui sera lancé en 2002 …). Le manque de professionnels dédiés à cette maintenance des sites internet explique ce défaut courant ;

— généralisation des «chargés de communication», voire de services de communication (Observatoire de Paris, OAMP) du moins pour les grands laboratoires (ou OSU) avec une professionnalisation croissante et une efficacité accrue de l'impact local. Cependant, il faudrait sans doute une coopération plus étroite entre tous ces chargés de communication (pour éviter les redondances ou de ré-inventer la roue), en collaboration et avec le soutien officiel des organismes nationaux, voire européens. ***Il est suggéré une coordination plus forte des chargés de communication et la création d'un « réseau » avec des correspondants dans les établissements qui n'en ont pas ;***

— augmentation de l'effort de communication des manips et résultats intéressants vers les médias, via des communiqués de presse, relayés par l'INSU et le CNRS. On note également l'internationalisation croissante de ces communiqués de presse, beaucoup de résultats étant le fait de collaborations pluri-nationales ou mettant en jeu des équipements d'organisations ou agences internationales (ESO, ESA, IRAM, CFHT, NASA, etc.). L'impact des ces communiqués issus de l'ESO et dans une moindre mesure de l'ESA est beaucoup plus grand, s'y on se réfère aux nombres de sites sur la Toile qui reprennent ces communiqués ;

— augmentation des ouvrages de vulgarisation d'astronomie écrits par des chercheurs (pas de chiffrage précis cependant car la liste exhaustive est difficile à établir, …). Actuellement il paraît environ un ouvrage de vulgarisation par mois écrit par un astrophysicien ;

— organisation d'une session de rencontre avec la presse lors des journées de la SF2A. Cette manifestation rencontre une réussite pas toujours à la hauteur de la qualité de résultats mis en avant : les journalistes scientifiques ne se déplacent guère pour cette occasion qui souvent reprend des nouvelles déjà un peu défraîchies il faut bien le dire.

La vulgarisation ses pièges et ses limites

Vulgarisation et évaluation des chercheurs

La pratique d'une activité de vulgarisation est-elle un handicap pour un chercheur ou au contraire un indicateur d'excellence ? Une étude récente menée par des chercheurs du CNRS semble promouvoir, de façon peut-être surprenante pour certains, ce second point de vue[2], en indiquant au passage que l'astrophysique est la discipline des sciences dures qui fait le plus de diffusion des connaissances.

Il est cependant difficile de savoir comment les renseignements donnés sous la rubrique vulgarisation de la fiche des chercheurs du CNRS vont ensuite être utilisés par les comités d'évaluation, ni s'ils sont effectivement utilisables tant ils sont peu précis. Qu'est-ce que les comités d'évaluation attendent de la part des chercheurs s'adonnant à la diffusion des connaissances sur internet, par exemple via Wikipédia ? Ce nouveau moyen de diffusion des connaissances n'a pas très bonne presse auprès de quelques cercles intellectuels français mais les chercheurs, toutes disciplines confondues, y sont majoritairement favorables.

Les revues de vulgarisation grand public

L'intervention de chercheurs dans des revues de vulgarisation grand public pose parfois des questions particulières :

— l'occurrence de biais de nature plus éditoriale observée dans certaines revues : présentation biaisée d'un domaine, point de vue atypique d'un chercheur qui est systématiquement mis en avant ;

— le problème du contrôle du contenu avec le risque de cautionner involontairement des divagations qui n'ont pas grand chose de scientifique.

Télévision

La télévision est, en France, le parent pauvre de la vulgarisation scientifique. Dans les faits il n'existe aujourd'hui qu'une émission scientifique pérenne sur les six grandes chaînes, c'est-à-dire *C'est pas sorcier*, un programme ciblé pour des jeunes téléspectateurs. Un des exemples les plus emblématiques est la disparition de la *Nuit des Etoiles*, qui pendant plusieurs années était diffusée en prime time la première quinzaine d'août.

Pour des raisons structurelles (formation insuffisante des professionnels de l'information, et manque d'intérêt pour cela), les sujets scientifiques sont mal traités par la télévision, une des contraintes étant celle des délais : la présence d'un sujet dans un journal télévisé est décidée le jour même, ce qui suppose une réactivité extrême des gens contactés (quand ils le sont effectivement), et un recul très limité pour produire un contenu de qualité, la personne interviewée n'ayant que peu l'occasion de contrôler ce qui est gardé de son intervention au montage, contrairement à ce qui se fait dans la presse écrite.

Par ailleurs, la presse télévisuelle a produit plusieurs ratages médiatiques, aussi spectaculaires que peu glorieux. Le réflexe de vérifier la plausibilité de "découvertes" spectaculaires auprès de personnes compétentes ne fait pas partie des habitudes des journalistes de télévision.

2 P. Jensen et al., Scientists who engage with society perform better academically, Science and Public Policy, 35, 527-541 (2008), disponible en ligne à l'adresse http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00334363. Etude réalisée à partir de l'étude de plus de 11 000 rapports d'activités de chercheurs du CNRS sur trois ans ; voir aussi le communiqué de presse du CNRS à ce sujet, http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article200

Internet

Quel est le meilleur moyen de communiquer sur la Toile ? Il serait intéressant d'étudier en termes d'impact et de crédit les différentes possibilités qu'elle offre. Il serait intéressant de faire savoir aux chercheurs les résultats de ces études, afin de les éclairer dans les choix qui s'offrent à eux. La Toile est un véritable enjeu : c'est là que les gens vont chercher l'information aujourd'hui, surtout quand le sujet est un peu « technique » comme c'est le cas en science. Réfléchir au moyen de le faire au mieux est peut-être la question la plus importante.

ANNEXE I - ECOLES DOCTORALES INSCRIVANT DES DOCTORANTS POUR DES THÈSES EN ASTRONOMIE

- Ecole Doctorale Astronomie & Astrophysique d'Ile de France ; Observatoire de Paris, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud 11, Université Denis Diderot
- Ecole Doctorale SDU2E «Sciences de l'Univers, de l'Environnement, et de l'Espace» Université Paul Sabatier
- Ecole Doctorale Physique et Sciences de la Matière ; Université de Provence Aix-Marseille
- Ecole Doctorale de Physique et Ecole Doc
torale «Terre, Univers, Environnement» Université Joseph Fourier Grenoble
- Ecole Doctorale Information Structures et systèmes Montpellier II
- Ecole Doctorale «Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement» Université de Strasbourg
- Ecole Doctorale «Sciences Fondamentales et appliquées» Université de Nice
- Ecole Doctorale «Ondes et matière» Université Paris-Sud 11
- Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur Université Bordeaux I
- Ecole Doctorale Louis Pasteur Université de Franche-Comté
- Ecole Doctorale Physique et Astrophysique de Lyon - Université Claude Bernard Lyon I
- Ecole Doctorale Particules, Noyaux, Cosmologie - Paris Denis Diderot, Paris Paris-Sud 11, Paris Pierre et Marie Curie

ANNEXE II : Les FOAD existantes

L'université de Joseph Fourier à Grenoble propose une Licence comprenant une partie de formations à distance. Cette **Licence « Diffusion Des Savoirs »** est destinée à répondre à une demande de « culture scientifique tout au long de la vie » :
http://www.obs.ujf-grenoble.fr/enseignement/DiffusionSavoirs
Elle s'adresse aussi, comme module d'ouverture de niveau L3, aux étudiants de l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Sa thématique concerne les « Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement ». Elle comprend 20 modules dont 6 concernent l'astronomie. Chaque module est proposé alternativement en cours du soir ou en enseignement à distance. Les 20 modules constituant l'année de L3 sont proposés sur 3 ans. Les contenus des formations à distance sont sur un site accessible uniquement aux étudiants inscrits et pour une période de temps limitée. La validation se fait à distance par un QCM et un dossier bibliographique.

L'Observatoire de Paris propose des modules d'astronomie en FOAD *: Astronomie et Mécanique Céleste* (AMC) au niveau L1 et *Fenêtres sur l'Univers* (FsU) avec 5 parcours de niveaux L2 à M1. Ces modules ne constituent pas un diplôme. La validation des modules varie suivant les étudiants : si l'étudiant a suivi tout le cours et fait les exercices, le tuteur responsable de l'étudiant lui fourni une attestation de suivi. Si l'étudiant souhaite obtenir un DU (Diplômes d'Université) de l'Observatoire, la validation des connaissances se fait alors sous forme de QCM ou d'examen sur table. Les étudiants inscrits dans un établissement universitaire et souhaitant acquérir une formation à l'astrophysique, qu'ils ne peuvent pas suivre en présentiel, peuvent faire valider cette formation comme module de Licence ou de Master. Les différents parcours représentent de 3 à 9 ECTS. La formation complète peut représenter 9 ECTS au niveau L3 ou 12 ECTS au niveau M1. La validation se fait alors avec un examen sur table.

ANNEXE III : Le rôle des amateurs

On peut estimer à plus de 4 millions le nombre de personnes qui auront "consommé" de l'astronomie au moins une fois dans l'année 2009, soit plus du double qu'il y a une quinzaine d'années ! Cette augmentation s'explique pour beaucoup par la croissance de l'offre de loisir astronomique. Mais on est certainement encore loin de la saturation, bien que les offres autres qu'astronomiques se multiplient elles aussi, augmentant d'autant la concurrence. Quelques signes indiquent d'ailleurs que cette concurrence commence à se faire sentir chez les scolaires ; la communauté des astronomes ne doit pas se reposer sur ses lauriers.
Pendant la même période, le nombre d'adhérents dans des clubs d'astronomie (quelques centaines sont répertoriées en France) n'a pas du tout progressé dans les mêmes proportions. Est-ce à dire que le passage de la consommation ponctuelle à la pratique astronomique est difficile ? Peut-être pas ! En effet, d'une part le nombre de clubs est insuffisant pour bien couvrir le territoire, d'autre part les progrès technologiques sont tels que le débutant peut souvent se débrouiller tout seul et consulter sur l'Internet les forums où il trouvera des conseils.

Le nombre d'astronomes amateurs avertis a, quant à lui, peu évolué ; on l'estime entre 5 et 10 000 en France. Par contre, on constate une tendance au recul du besoin d'utiliser les télescopes plus ou moins gros mis à disposition dans plusieurs dizaines d'observatoires amateurs. Là encore, une explication peut être trouvée dans l'évolution du matériel, qui permet aux amateurs de faire de belles images avec leur propre matériel.
Parmi ces amateurs avertis, il en est un petit sous-ensemble de particulièrement chevronnés. Ils sont extrêmement motivés par l'observation et en particulier par ses aspects techniques.
Que ce soit vis-à-vis des amateurs occasionnels, avertis ou chevronnés, la communauté des astronomes se doit d'essayer de répondre à leur demande et de jouer les rôles suivants :
▪ inciter au passage vers la pratique astronomique, la pérenniser et maintenir des liens avec ces amateurs ;
▪ sensibiliser les plus chevronnés à l'orientation de leurs observations vers des programmes directement utiles à la science, en liaison avec des astronomes professionnels. Cela devrait se faire en collaboration avec des associations d'envergure nationale dont c'est l'un des buts, par exemple les commissions de la Société Astronomique de France ou l'Association Aude ;
▪ organiser des stages théoriques ET pratiques observationnels/techniques adaptés aux débutants, amateurs plus ou moins chevronnés, "ingénieurs en retraite", IUT et autres universitaires….
Le CNRS a d'ailleurs commencé à comprendre que les moyens et techniques accessibles aux amateurs les plus motivés représentent un potentiel attractif en organisant en 2003 la première Ecole d'astrophysique d'Oléron pour une coopération professionnels / amateurs, et en récidivant en 2006 et en 2009. De par les moyens qu'il peut offrir, l'OHP pourrait jouer un rôle leader dans ce domaine et devenir un pôle de la collaboration amateurs/professionnels, y compris au niveau européen (en se souvenant que ce public amateur satisfait sa passion sur son temps de loisir et n'est pas forcément riche !).
Enfin, un nouveau public amateur émerge et est probablement appelé à prendre de l'ampleur : les possesseurs et très souvent constructeurs de télescopes pilotables à distance grâce à l'Internet. De par leur disponibilité et leur répartition dans le monde entier, ces instruments seront probablement de plus en plus utilisés pour la surveillance du ciel. On peut citer par exemple les vastes programmes d'observation des microlentilles gravitationnelles, et bien sûr toutes sortes d'objets variables.

Nombre d'initiatives de l'AMA09 n'auraient tout simplement pas eu lieu sans l'enthousiasme des amateurs, qui contribuent ainsi à la diffusion de l'astronomie et à son soutien par le public. La communauté des astronomes se doit donc d'entretenir les meilleurs liens possibles avec eux, ne serait-ce que pour assurer la qualité scientifique du discours.

Sur la carte des lieux d'astronomie amateur en France, il est clair que ceux-ci ne sont pas systématiquement regroupés là où les conditions d'observation sont les meilleures. En effet, ils se concentrent souvent dans les zones les plus dynamiques qui misent en partie sur l'animation astronomique pour se développer. On ne peut que recommander aux laboratoires d'être partie prenante dans ces politiques locales. Mais la réussite est liée à l'existence d'une équipe très motivée qui comprend que la vocation d'un tel centre d'animation scientifique n'est pas d'abord d'être rentable financièrement, mais de contribuer à la formation de citoyens dans une société de plus en plus dominée par la science et la technologie et désireuse d'emprunter la voie du développement durable.

Prospective spatiale : synergies et comparaison sol/espace

P. Binétruy, J.-L. Bougeret, F. Boulanger, F. Daigne, A. Decourchelle, F.-X.Désert, T. Encrenaz, G. Lagache (coordinatrice), Y. Mellier, F. Mignard, C. Moutou, F. Robert. Avec la participation de D. Fontaine, C. Turon, N. Vilmer.

Ces dernières décennies, l'astronomie a connu une révolution avec la mise en œuvre et le développement de très grands équipements sol – télescopes, radiotélescopes et interféromètres – et la naissance de l'astronomie multi-messagers – photons, neutrinos, rayons cosmiques et ondes gravitationnelles. L'accès à l'espace reste indispensable pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, il permet l'observation de l'ensemble du spectre électromagnétique, depuis les rayons gamma jusqu'aux ondes radio ; il permet de s'affranchir de la turbulence atmosphérique. Les observatoires en orbite terrestre peuvent aussi observer en continu les astres et permettent le fonctionnement des détecteurs à basse température, avec un moindre niveau de bruit et dans de meilleures conditions de stabilité. Pour la planétologie, les sondes spatiales permettent également d'obtenir des informations sur place et de ramener des échantillons.

Quelque soit le domaine scientifique, la complémentarité sol-espace est donc une nécessité et les prospectives «spatial» et «sol» ne peuvent être découplées. En particulier, la définition d'un projet spatial doit intégrer les projets sols qui pourraient préparer la mission, et les instruments sol d'accompagnement et/ou complémentaires. Tout projet spatial nécessite également un fort soutien au sol notamment pour les aspects «segments sol », de plus en plus complexes, ainsi que l'exploitation des données. En particulier, le traitement des données des expériences spatiales à la charnière sol/espace demande une bonne coordination entre le CNES et l'INSU.

Notre groupe n'avait pas pour mandat de donner des priorités en terme de moyens sol nécessaires aux expériences spatiales mais de recenser les synergies sol/espace et identifier les actions à mener afin d'améliorer ces synergies, d'un point de vue scientifique mais aussi en ce qui concerne la structuration des communautés. Le document détaille dans un premier temps les synergies scientifiques par thématique et étudie dans un deuxième temps les pôles thématiques et centres de données, et les actions de structuration. Les actions urgentes et importantes peuvent être reprises ici. La communauté GAIA a besoin de se doter d'un spectrographe multi-objets à haute résolution sur un télescope avec un champ de 0,5-1 deg^2 pour obtenir des abondances précises sur les étoiles observées par le RVS à bord. Pour la course à l'énergie noire, déployer un grand relevé « MegaCam-u » construit sur les nuits noires françaises du CFHT, et intéressant très fortement les expériences sol (comme Pan-STARRS4, Big-Boss), serait d'un atout considérable. Sur le même thème et dans le contexte de la pré-sélection d'Euclid, nous soutenons très fortement l'initiative du CNES avec la phase 0 DADA. Pour la physique fondamentale, le contexte change avec le démarrage réussi de T2L2, la confirmation du programme ACES sur Pharao, et les lancements programmés de LISA-Pathfinder et de Microscope. Dans ces conditions, une réflexion sur les besoins en traitement des données doit être conduite rapidement. Lié à ce nouveau contexte et à l'actuel manque de pavage disciplinaire, le projet de création d'action spécifique comprenant la gravité et physique fondamentale, la métrologie temps/fréquence, la mécanique céleste, l'astrométrie, les systèmes de référence et la géodésie spatiale est fortement recommandé. Pour les sursauts gamma, le satellite SVOM doit être complété au sol par deux télescopes robotisés (GFTs). Le GFT français, seul instrument allant vers l'IR, jouera un rôle crucial dans le projet, car il permettra à la communauté française d'aborder toute la science des rémanences et d'identifier les sursauts à grand z. Il convient de trouver une solution pour son financement. Le manque de structure particulière pour la communauté exoplanète, à cheval sur plusieurs instances et sous thème de plusieurs disciplines s'est fait sentir. La stratégie de la communauté française suite aux recommandations des groupes «Blue Dot» et «EPRAT», ainsi qu'à la pré-sélection de Plato, seront à intégrer dans un futur proche. Nous recommandons la création d'un groupe de travail ou action spécifique pour définir, en particulier, la prospective instrumentale. Nous encourageons la participation des laboratoires de l'INSU au projet CTA qui doit se développer vite pour bénéficier d'une synergie Fermi/CTA (synergie à développer autour de HESS2 dans un premier temps). Il nous apparaît opportun de soutenir la participation française à la mission d'opportunité japonaise JEM-EUSO, même dans le contexte concurrentiel d'Auger Nord. Nous engageons la communauté à mener une réflexion sur les futurs observatoires (sol versus espace) et l'avenir de l'astronomie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie. Enfin, le périmètre des laboratoires spatiaux a considérablement changé durant les 10 dernières années. Dans le nouveau contexte de l'autonomie des universités et de la redéfinition des contours du CNRS, il est apparu urgent de recenser les moyens spatiaux et réfléchir à l'organisation de la recherche spatiale en France (création d'un groupe de travail CNES, INSU, et CEA).

Préambule

Notre groupe de travail a abordé cinq points :

1. La prospective spatiale CNES : compte rendu et suivi des recommandations.

2. L'accompagnement sol :
   — Instruments sol d'accompagnement des missions spatiales et/ou complémentaires aux missions spatiales : les existants à maintenir, les « nice to have », les obligatoires.
   — Structuration des segments sols (incluant les centres d'opérations, les centres de données, la dissémination de données scientifiquement validées). Il faut noter que les segments sols sont de plus en plus complexes et

gourmands.

3. Les projets sol qui préparent le spatial : projets spatiaux en attente de résultats de projets sol (ou ballons), démonstration de technologie, mesures de sensibilité, faisabilité scientifique (nous ne couvrirons pas ici les expériences de laboratoire – cf groupe «Astrophysique de laboratoire»).

4. Les mérites respectifs des projets spatiaux et sol. C'est un point important pour certains domaines scientifiques, en particulier les domaines en émergence. Mais cela représente un travail pointu, sérieux, volumineux et nécessite le travail d'experts. Nous nous limiterons donc ici à quelques cas évidents.

5. La structuration de la communauté / moyens humains :
- Construction de la communauté autour des projets spatiaux émergents, adoption du projet par une communauté large.
- Soutien en personnel (ex : postdocs).
- Structuration du segment sol : en particulier réduction des données dans les laboratoires.
- Organisation de la science : groupes de travail, actions spécifiques ?
- Retour scientifique à la communauté française.

Remarques : Les liens sol/espace sont riches et complexes et comportent de fait plusieurs aspects qui sont propres à chaque thématique astrophysique. Nous avons donc passé en revue chacune des thématiques et identifié celles pour lesquelles des recommandations étaient nécessaires. Nous insistons sur le fait que les synergies sol/espace existent dans tous les domaines mais que seules ici les thématiques où la synergie sol/espace demande à être renforcée/maintenue/structurée sont détaillées. La prospective scientifique est faite par ailleurs (cf. groupe «Etat et évolutions des thématiques»). De même le mandat de notre groupe n'était pas de mettre des priorités en terme de moyens, contrairement au groupe «Evolution des moyens et nouveaux moyens à 5-10 ans».

Quelques faits scientifiques marquants de synergie sol/espace

Plusieurs résultats majeurs ont valorisé les synergies sol/espace. Les exemples récents mentionnés ici donnent un aperçu de leur diversité, mais ils ne peuvent à eux seuls rendre compte de toute la richesse des synergies.

- Les exoplanètes : une planète tellurique, CoRoT-7b, a été découverte par le satellite CoRoT (Léger et al. 2009 ; Queloz et al. 2009). Son rayon et sa masse sont de 1,8 et 5 fois la Terre, c'est donc la plus petite exoplanète caractérisée à ce jour. Avec une période orbitale de 20 heures seulement, sa température de surface est telle (plus de 1 000 degrés) qu'elle serait recouverte de lave ou de vapeur d'eau. Pour 50 candidats observés par CoRoT, plus de 40 sont des étoiles binaires à éclipse, et seul un suivi systématique avec des télescopes au sol permet d'identifier les planètes et de les caractériser pleinement. Dans le cas de CoRoT-7b, l'imagerie sol à haute résolution spatiale a pu éliminer les scénari de binaires à éclipse de fond (Fig. 1), les mesures de vitesse radiale ont permis de mesurer la masse de la planète, et la nécessaire détermination des paramètres stellaires à partir de spectres visibles a été obtenue au VLT et sur HARPS.

- Les blazars : des observations du blazar PKS 2155-304 dans un état calme ont été menées simultanément du sol (ATOM, HESS) et de l'espace (Swift, RXTE, FERMI) couvrant une gamme d'énergie s'étendant du visible aux rayons X et gamma de très haute énergie. La distribution spectrale d'énergie moyenne est correctement reproduite par un modèle standard auto-synchrotron-Compton (Fig. 2). Cependant, des variabilités temporelles et spectrales ont été mises en évidence : l'émission gamma de très haute énergie est bien corrélée avec l'émission visible, mais pas avec les rayons X ou gamma de haute énergie. Ces observations mettent en difficulté les modèles standards de ces sources et requièrent de passer à une modélisation multi-zones de l'état calme des blazars. Elles confirment que la compréhension de ces sources nécessitent d'étudier leur variabilité simultanément à plusieurs longueurs d'onde, combinant instruments du sol et spatiaux.

- Les galaxies lointaines : MIPS/Spitzer a détecté un grand nombre de galaxies lointaines (z~2), très massives et très brillantes qui ont été ensuite observées par le spectrographe IR-moyen IRS/Spitzer. Des observations conjointes avec à la fois le Plateau de Bure et le 30 m de l'IRAM permettent de comprendre la physique à l'œuvre dans ces objets, de calculer leur masse dynamique, la fraction du gaz moléculaire froid et l'efficacité avec laquelle le gaz froid est converti en étoile. Aussi, SINFONI au VLT apportent avec la spectro-imagerie des vues complémentaires à la dynamique du gaz. Ceci est rendu possible grâce à l'amélioration des sensibilités des télescopes sols et spatiaux. Une vraie synergie scientifique est en train de naître.

- Le champ magnétique solaire : les observations simultanées de TRACE et du télescope THEMIS permettent d'étudier l'origine des boucles coronales. TRACE observe des petites régions localisées brillantes correspondant à des éjections localisées de matière (appelées bombes d'Ellerman), supposées reliées au processus de reconnexion magnétique. THEMIS permet d'obtenir un magnétographe de la même région. A l'endroit même de la bombe d'Ellerman, le champ magnétique vertical s'inverse (on observe alors un creux dans la ligne de champ), montrant par là même que les lignes de champ commencent par sortir ondulées de la surface du Soleil avant de prendre la forme d'une boucle coronale.

- Les sursauts gamma : le sursaut gamma GRB 090423 à z~8.3, découvert en avril 2009, est actuellement l'objet astronomique connu le plus lointain ayant une distance mesurée précisément. Ce sursaut a été émis lorsque l'Univers n'était âgé que de ~625 millions d'années, ce qui signifie qu'il y avait déjà des étoiles massives en train de mourir dans cet Univers très jeune. Cette découverte illustre le potentiel que représentent les sursauts gamma pour l'étude de l'Univers lointain, et la chaîne instrumentale sol-espace complexe qu'il faut mettre en œuvre pour cet objectif. GRB 090423 a été détecté et localisé dans l'espace par Swift. Plusieurs télescopes robotiques (UKIRT, GROND) ont réagi automatiquement à l'alerte, ont découvert la rémanence, et ont montré qu'elle n'était détectée qu'en bandes J, H et K. Le redshift photométrique estimé à partir de ces observations indique z>8.

Les premières observations spectroscopiques ont été effectuées au VLT avec ISAAC environ 17,5 heures après l'alerte. Le projet franco-chinois SVOM reposera sur cette même approche instrumentale, avec un détecteur gamma mieux adapté aux sursauts les plus distants.

La prospective spatiale

En 2008-2009 s'est déroulée la préparation du colloque de prospective du CNES. Le colloque a eu lieu en mars 2009. Après appel à idées, les 5 groupes thématiques[1] du CNES ont donné leurs priorités. Ces priorités ont abouti à des propositions du CERES et à l'élaboration des messages à discuter dans les groupes de travail mis en place lors du colloque (4 groupes de travail en parallèle, même liste de questions, convergence des messages à la sortie). Une synthèse a été présentée par Thérèse Encrenaz, présidente du CERES. La présentation de synthèse du CERES est disponible sur http ://paa09.cesr.fr/ rubrique « prospective spatiale ». Il faut savoir que le colloque s'est déroulé dans un contexte budgétaire catastrophique. L'ouverture budgétaire quasi nulle sur 2009-10

1 Astrophysique, Système Solaire, Soleil Héliosphère Magnétosphère, Physique Fondamentale, Exobiologie

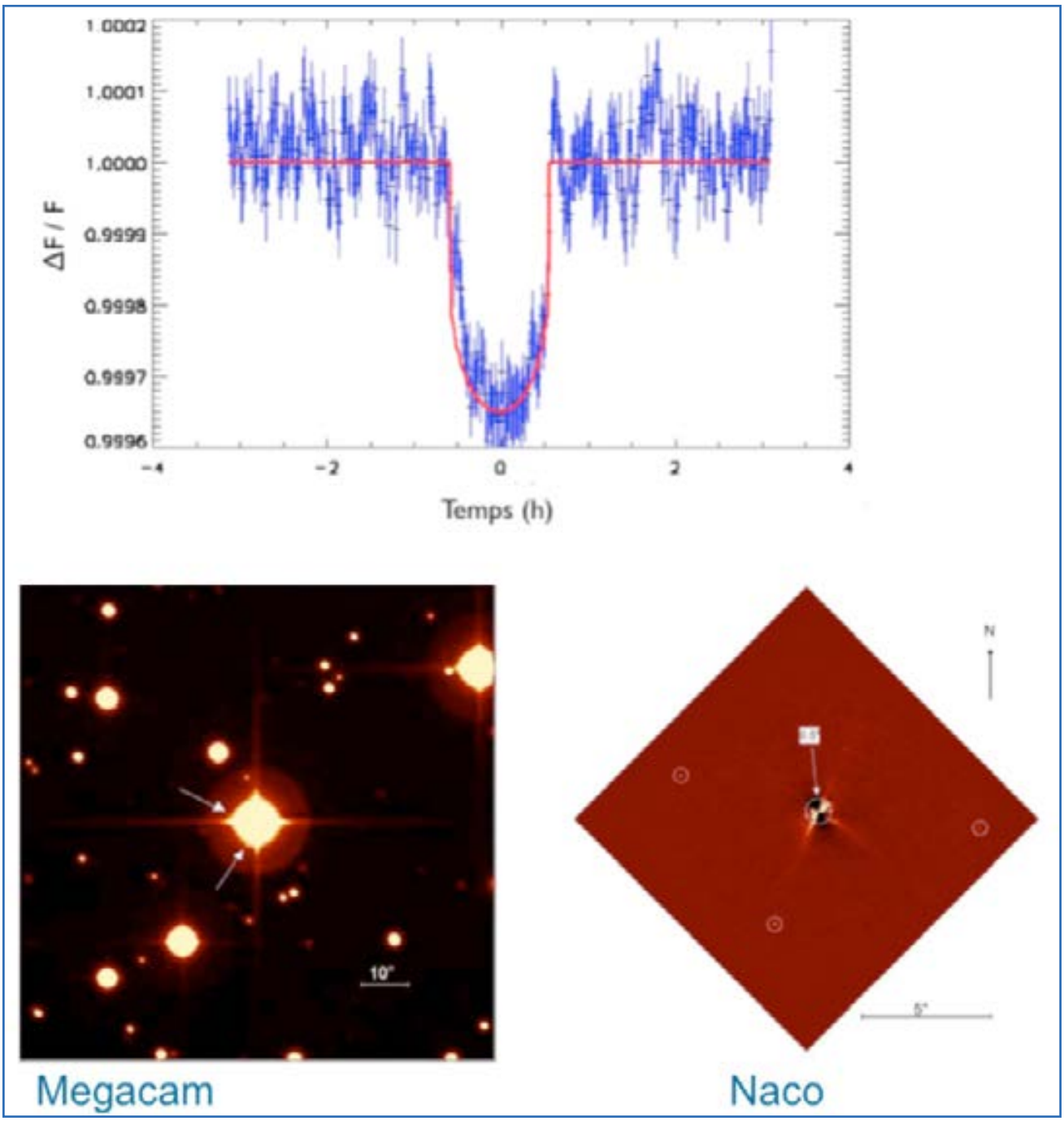


Fig. 1 : en haut, la courbe de lumière de l'exoplanète tellurique CoRoT-7b repliée en phase ; en bas, les images profondes obtenues avec MegaCam (à gauche) et NACO (à droite) ont permis d'éliminer le scénario de systèmes binaires à éclipse de fond (Léger et al. 2009).

Spatial, synergie et comparaison sol/espace

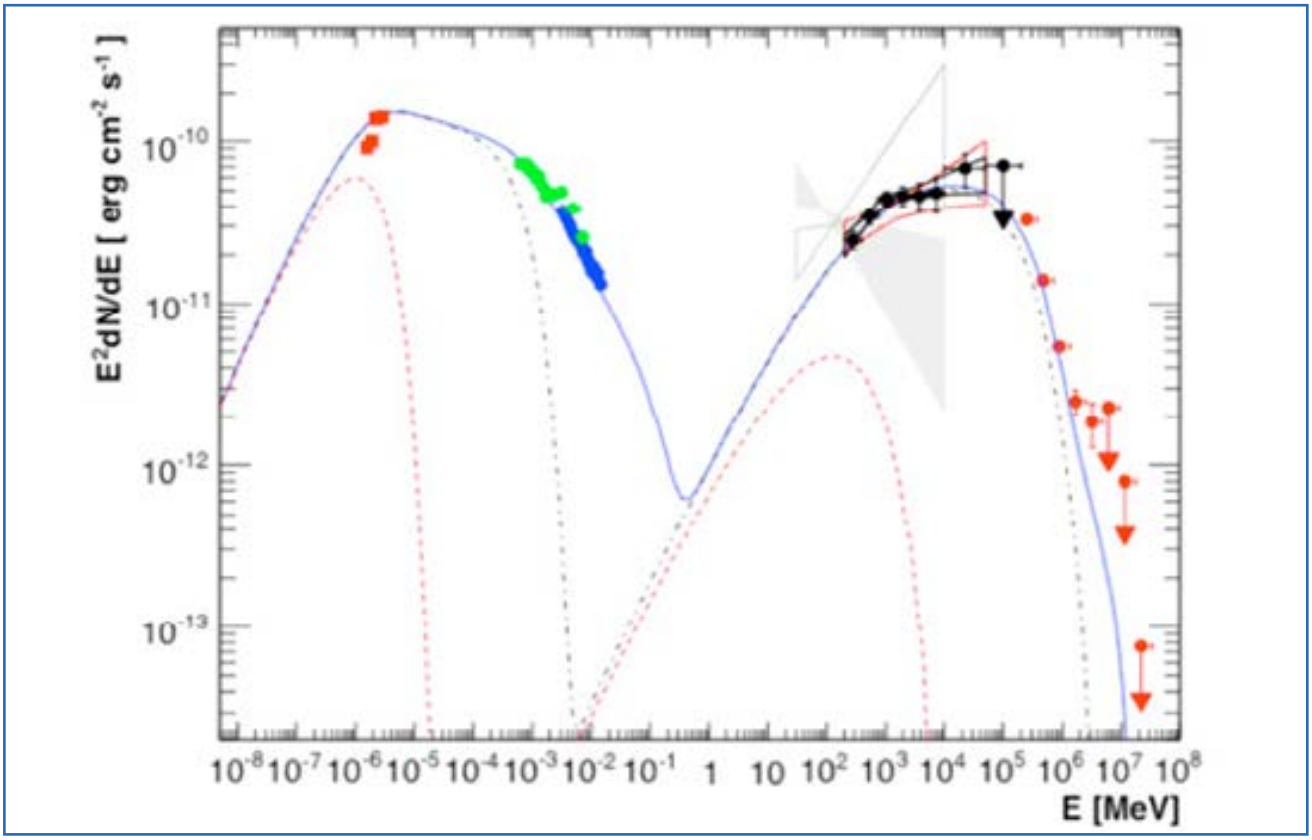


Fig. 2 : Distribution spectrale d'énergie du blazar PKS 2155-304 dans son état calme ajusté par un modèle mono-zone standard auto-synchrotron-Compton (trait continu), tiré d'Aharonian et al. (2009). Données sol (ATOM et HESS), et espace (Swift, RXTE, Fermi).

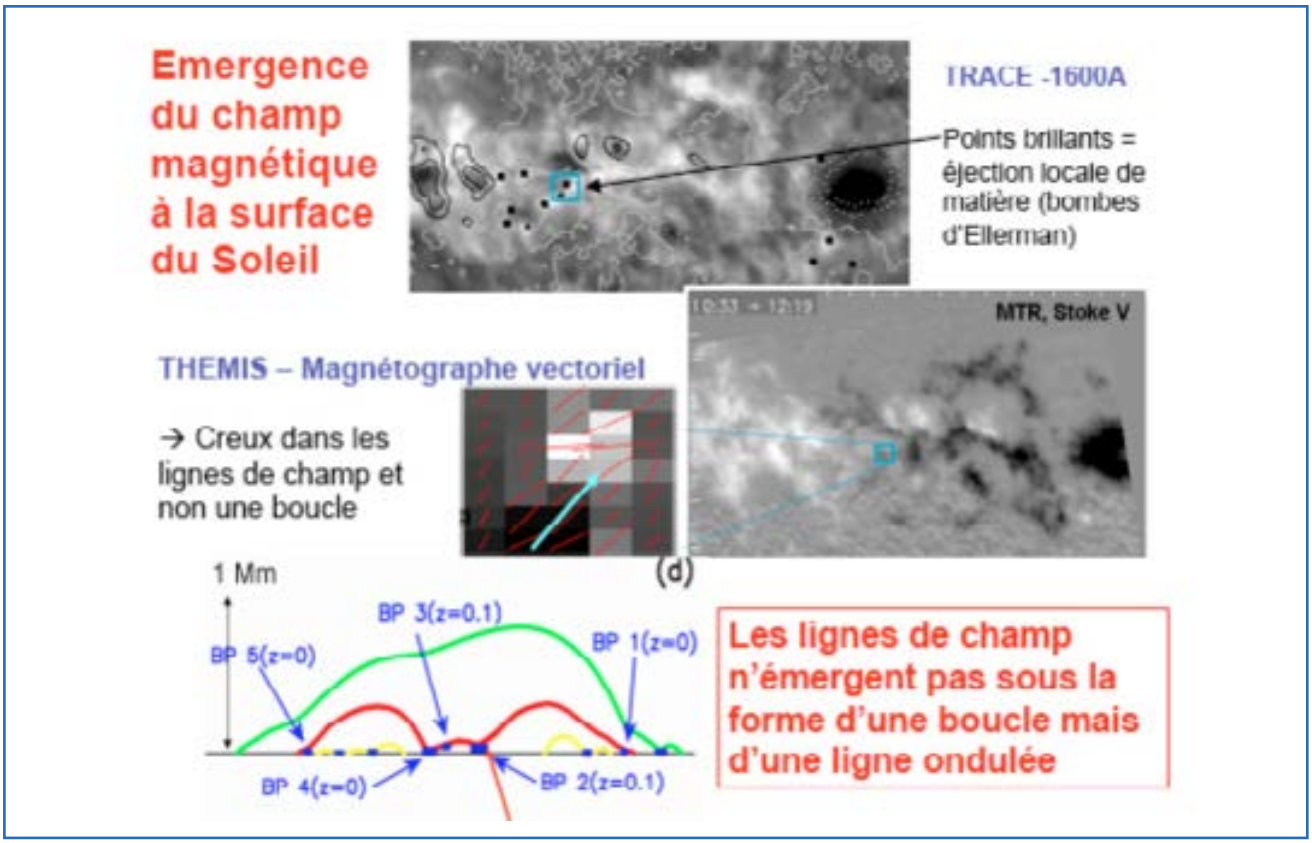


Fig. 3 : émergence du champ magnétique à la surface du Soleil.

a conduit à l'abandon de Simbol-X, malgré un investissement important de la communauté depuis trois ans.

Les messages et recommandations sont les suivants :

1. Fort soutien au « socle » de la programmation ESA : Programme scientifique obligatoire et Programme Exploration (Aurora, ISS) :

– Priorité 0 à l'achèvement de BepiColombo et ExoMars (en phase de re-budgétisation).

– Priorité 0 à l'instrumentation des missions Cosmic Vision :

  — missions M : Euclid - SPICA - Plato - Solar Orbiter - Marco Polo - Cross-scale ;
  — missions L : EJSM(+GAP) - LISA - IXO ;
  — rappelons ici qu'à ce jour le planning Cosmic Vision est le suivant : sélection de 3 ou 4 missions M début 2010 pour 2 ans d'étude (Euclid, Solar Orbiter, Plato, + SPICA ont été pré-sélectionnées) – Sélection finale de 2 ou 3 missions M et/ou d'opportunité fin 2011 pour lancement en 2017 et 2018 (et possibilité d'une mission d'opportunité) – Pré-sélection de 2 missions L fin 2010 – Sélection finale fin 2012 pour lancement en 2020

– Appel CV2 mi-2010 pour une mission M avec lancement 2021.

2. Passage en phase C/D du microsat TARANIS (interaction haute atmosphère / magnétosphère) à l'issue de la phase B.
3. Forte priorité à l'instrumentation à bord des missions d'opportunité avec notamment le soutien à une participation instrumentale à un réseau sismique lunaire (en préparation au réseau sismique martien).
4. Démarrage de Phase 0 : en priorité DADA (DArk DAta), ODYSSEY, ballons planétaires.
5. Rôle essentiel de la R&T; soutien aux axes identifiés dans les groupes thématiques ; Accent mis sur la préparation des missions «Cosmic Vision».
6. L'importance croissante des phases d'exploitation de données nécessite une meilleure concertation avec les autres organismes.
7. Le problème du processus de plus en plus tardif de sélection des missions crée des incertitudes dans les plans de charge des laboratoires « spatiaux » difficiles à gérer. Besoin d'une concertation plus étroite avec la direction du CNES.
8. Besoin d'une collaboration étroite et plus formalisée entre le CNES et l'INSU pour notamment :
   — Evaluation des moyens humains et matériels nécessaires à la réalisation des missions, réflexions archivage, mise en commun des moyens spatiaux.
   — Structuration des communautés, synergies sol-espace.

Notons que la communauté a été affectée par les sorties du colloque de prospective. En ce qui concerne Simbol-X la communauté regrette le manque de visibilité concernant la situation budgétaire du CNES, et s'inquiète de la dégradation de la situation depuis le colloque de Biarritz. Elle réaffirme sa priorité aux missions sélectionnées du programme Cosmic Vision, et souhaite une forte implication des laboratoires français, en particulier pour les contributions de type PI. Les surcoûts liés au caractère stratégique du projet SVOM (coopération franco-chinoise) ne doivent pas remettre en cause cette priorité. Un groupe de travail coordonné par L. Vigroux a conclu que la mission SVOM était compétitive scientifiquement, mais que la présence d'un télescope X était indispensable. Le financement de ce télescope qui n'est pas sécurisé actuellement offre un nouveau motif d'incertitude. A ce jour, la mission SVOM est toujours en attente de passage en phase B et le passage en phase C/D de Taranis est retardé.

Les synergies scientifiques par thématique

Les exoplanètes

La détection et la caractérisation des exoplanètes fait appel à une grande variété de méthodes complémentaires : transit, astrométrie, vitesses radiales, micro-lensing, imagerie directe, interférométrie. Cette diversité a donné lieu à une prospective spatiale riche, dont le but commun est l'étude de planètes extrasolaires de plus en plus semblables à la Terre, et une caractérisation de leur atmosphère. Les potentiels de détection et de caractérisation des différentes méthodes se complétant avantageusement, il n'est pas opportun d'éliminer par avance une ou plusieurs méthodes. Les recherches actuelles ne permettent pas d'identifier un concept plutôt qu'un autre pour la recherche à long terme de planètes habitables. La figure 4 présente les missions actuelles et futures dans ce contexte, qui auront une contribution importante dans l'étude des exoplanètes à court, moyen et long terme.

Plusieurs initiatives internationales de prospective sur l'étude des exoplanètes ont été lancées, dont quelques unes des conclusions préliminaires sont rapportées ici :

  — Initiative « Blue Dots » de fédération de la communauté exoplanète et d'établissement d'une feuille de route pour la recherche de biomarqueurs. Un colloque : « Pathways Towards Habitable Planets » a eu lieu en septembre 2009, dont l'objectif était de converger vers un consensus et de choisir les meilleures stratégies d'étude et de caractérisation des exoplanètes, et finalement de détection des signes d'activité biologique. La première recommandation de cette étude est d'intégrer le support sol aux missions spatiales. D'autres recommandations suivront d'ici mi-2010.
  — ESA/EPRAT : une réflexion est en cours depuis 2008, pour donner suite au bilan de Cosmic Vision. Une feuille de route est en cours d'élaboration, et là encore des recommandations issues de la communauté internationale exoplanètes seront annoncées, probablement mi 2010.

Il paraît cohérent de se baser sur ces recommandations pour définir les contributions de la communauté française aux axes de recherche identifiés par ces deux prospectives, mais il est encore un peu prématuré d'en sortir les grandes lignes. On peut malgré tout donner (i) un résumé du consensus qui se dégage sur la stratégie à adopter, et (ii) plusieurs exemples en ce qui concerne les complémentarités sol/espace dans ces études d'exoplanètes pour les années à venir :

(i) Un possible consensus de stratégie consisterait à combiner des mesures de vitesses radiales depuis le sol (de SOPHIE vers E-ELT/CODEX), des mesures de transits dans l'espace

(avec le nécessaire suivi sol associé) et de l'imagerie directe de l'atmosphère des planètes depuis l'espace (JWST puis des concepts spatiaux plus ambitieux) ET le sol (SPHERE puis E-ELT/EPICS) pour le complément des capacités spectrales. Cette feuille de route est à préciser d'ici un an.

(ii) Synergies sol/espace, quelques exemples de complémentarité :

- Projets de R&D en haute résolution angulaire, pour la préparation de missions spatiales : par exemple la maquette Persée, les développements de coronographie, de conjugaison, d'optique intégrée.
- La complémentarité des mesures photométriques et spectroscopiques : utilisation des télescopes de classe 2-4m équipés de spectrographes haute précision tels que SOPHIE, HARPS, ESPRESSO pour le suivi des transits détectés depuis l'espace par CoRoT, Kepler et Plato ; il s'agit d'identifier les planètes et de les caractériser (masse, rayon, orbite). Dans les opérations de suivi entrent aussi en jeu des télescopes de classe 1-4m équipés de CCD pour de la photométrie à plus haute résolution spatiale que les instruments embarqués. Les besoins pour le suivi Plato (si la mission est sélectionnée) seront importants et comprendront l'utilisation de CODEX sur l'ELT pour les planètes les moins massives.
- La complémentarité des mesures astrométriques et spectroscopiques. GAIA (lancement en 2012) permettra l'observation de systèmes planétaires détectés par leur signature astrométrique. On s'attend à détecter jusqu'à 9000 planètes de masse supérieure à Saturne sur des orbites lointaines (typiquement 2-10 AU), et des planètes moins massives s'il en existe autour des étoiles les plus proches. Des mesures complémentaires seront faites sur les systèmes détectés : 1) spectroscopie pour la caractérisation des étoiles hôtes ; 2) vitesses radiales de haute précision pour rechercher des planètes peu massives et de courte période dans les systèmes comprenant une planète géante éloignée ; 3) dans certains cas, la photométrie précise sera nécessaire pour identifier les systèmes en transit ; 4) dans certains cas, une détection en imagerie directe depuis le sol sera tentée avec VLT/SPHERE. On obtiendra à l'aide de ces mesures complémentaires une statistique complète des exoplanètes dans le voisinage solaire, et la caractérisation détaillée des exoplanètes observées ; ces mesures complémentaires au sol s'effectueront à partir de ≈ 2015.

En résumé :

- ***On voit l'importance des suivis sols des systèmes planétaires détectés par GAIA et peut-être Plato, en particulier en vitesse radiale. Il conviendrait de consolider le rôle et l'accès de la communauté française dans l'étude et l'exploitation des instruments impliqués. La place des télescopes de classe 1-4m y est prépondérante, à condition de maintenir une instrumentation de pointe.***
- ***Les recommandations des groupes «Blue Dot» et «EPRAT» seront à intégrer dans un futur proche pour la feuille de route exoplanète.***
- ***En lien avec l'exobiologie, il faut veiller à préparer les observations spectroscopiques des exoplanètes (modélisation, instrumentation).***

Exobiologie, retour et analyse d'échantillons

La composante spatiale de l'exobiologie est centrée sur la (I) cosmochimie organique et (II) l'exploration planétaire.

I - La **cosmochimie organique** vise à identifier les molécules et les structures organiques, à comprendre leurs relations avec l'encaissant minéralogique et à déterminer la nature chimique des constituants volatils qui leur sont associés. Ces travaux font appel à des techniques analytiques très variées (GCiRMS, RMN, MET, IR-Synchrotron, XANES, EPR, SIMS, ICPMS, OrbiTRAP, Pyrolyse GC), mises en oeuvre par des équipes spécialisées, attachées à des laboratoires dédiés. L'interprétation de leurs données analytiques, permettra peu à peu à ces équipes de formuler des problèmes spécifiques à l'organosynthèse dans les milieux extraterrestres. Ces laboratoires constitueront le cœur de la cosmochimie organique dans les décennies à venir et ils doivent bénéficier d'un soutien logistique ciblé.
Plusieurs laboratoires en France sont spécialisés dans des technologies qui seraient d'un grand secours en cosmochimie organique. Il s'agit de (i) la désorption laser couplée à la spectrométrie de masse organique et (ii) l'analyse GC/MS des petites molécules solubles (M<500) et HPLC/Mass pour les plus grosses. Il faudrait encourager les laboratoires du Département de Chimie au CNRS, à participer à l'analyse de la matière organique extraterrestre et à réaliser, en collaboration avec les équipes AA/ST impliquées dans des problèmes d'Exobiologie, des expériences d'organosynthèse dans des milieux simulants des conditions naturelles.

II - Avec ces dispositifs analytiques, il s'agit avant tout de préparer les missions d'**exploration planétaire** et en particulier l'analyse des échantillons qui seront prélevés à la surface de comètes, d'astéroïdes, de la planète Mars et rapportés sur la Terre (MSL 2011 ChemCam et SAM – ExoMars 2016 - Phobos-Gunt, etc.). La première priorité des missions martiennes est la compréhension de l'environnement primitif de la planète et la recherche de traces de vie passée. L'exploration planétaire concerne également les travaux sur les exoplanètes dont les observations spectroscopiques sont appelées à se développer. C'est une thématique concurrentielle où la communauté nationale doit absolument continuer d'occuper l'une des premières places. Modélisation des atmosphères, recherche de biomarqueurs, expérimentations en laboratoire sont les directions qui permettront bientôt de proposer des systèmes planétaires cibles pour une nouvelle génération d'instruments au sol et dans l'espace.

En résumé :

- ***Il faut encourager les laboratoires du Département de Chimie au CNRS, à participer à l'analyse de la matière organique extraterrestre et à la réalisation d'expériences d'organosynthèse dans des milieux simulant des conditions naturelles.***
- ***Nous recommandons le soutien de la collecte des Micrométéorites antarctiques car ces collections renferment déjà des grains encore non identifiés, en provenance de comètes ou d'astéroïdes.***
- ***Il faut veiller à assurer le succès d'Exomars et préparer notre participation à la microanalyse d'éventuels nouveaux***

vitesses radiales	transits	astrométrie	détection directe	microlentilles
SOPHIE HARPS géantes	CoRoT Kepler HST / Spitzer géantes	PRIMA géantes longues P	SPHERE JWST géantes jeunes / étoiles	PLANET géantes
ESPRESSO SPIROU telluriques proches et autour des M	PLATO TESS SPICA telluriques	GAIA géantes courtes P + quelques telluriques	SPICA géantes évoluées	OLMES telluriques
CODEX telluriques dans la ZH		SIM quleques telluriques dans la ZH	EPICS géantes évoluées quelques telluriques	EUCLID telluriques
			télescope spatial + coronographe interféromètre spatial caractérisation des telluriques dans la ZH	
identification cibles pour caractérisation exobiologique			statistiques	

Fig.4 : Projets Exoplanètes (vert = espace ; rouge = sol). Evolution temporelle de haut en bas.

échantillons.
- Il est important de faire vivre l'héritage technologique et intellectuel de missions spatiales retour d'échantillons telles que StarDust ou Genesis.
- L'Europe doit se doter d'un laboratoire P4 pour accueillir les futurs échantillons martiens. L'Andra a proposé le réaménagement d'un site déjà existant en sous-sol.

Le système solaire

Au cours des dernières décennies, la planétologie a connu un essor considérable, largement associé à l'exploration spatiale des objets du système solaire. En particulier, 4 missions spatiales à forte participation française sont actuellement en opération : Cassini autour du système de Saturne, Mars Express, Venus Express, Rosetta en route vers la comète Churyumov-Gerasimenko. De plus le satellite Herschel, en orbite terrestre, donne des observations complémentaires dans le domaine submillimétrique pour les planètes, les comètes et les TNOs (2 programmes-clés sélectionnés). L'observation depuis le sol des objets du système solaire reste cependant très complémentaire de l'exploration spatiale, car elle permet l'utilisation d'instruments plus complexes (spectro-imageurs à haute résolution spectrale) ou l'utilisation de techniques différentes (occultations stellaires).

En plus des objectifs scientifiques propres des missions spatiales planétaires, les données de navigation des sondes fournissent des données de tout premier plan pour les orbites planétaires. Ces données deviennent essentielles pour l'amélioration des éphémérides et les test des modèles gravitationnels à l'échelle du Système solaire. L'obtention et la reconnaissance des données de navigation comme données scientifiques à part entière des missions spatiales planétaires devient alors un enjeu fondamental.

Atmosphères planétaires

Les études suivantes doivent accompagner les missions en cours (MEx, VEx et Cassini) ou à venir (EJSM). Elles utilisent actuellement les télescopes de la classe 4-8m et les radiotélescopes millimétriques et submillimétriques. Dans le futur elles tireront bénéfice de l'E-ELT et d'ALMA.

- Détection et suivi des espèces mineures par spectroscopie haute résolution (R= 10^5 - 10^6), dans l'infrarouge et le millimétrique.
- Observation des effets diurnes (en fonction de l'heure locale) et de phénomènes transients par mesure globale du disque planétaire depuis la Terre.
- Etude des atmosphères planétaires depuis le sol par occultation stellaire.

Objets transneptuniens

Les TNOs sont peu lumineux et leur étude repose très largement sur les observations sol dans le domaine optique (télescopes de 4-8m). Celles-ci portent sur la détection, l'imagerie, la courbe de lumière, la spectro-photométrie, la recherche de systèmes multiples. La composante thermique a largement bénéficié des observations de Spitzer et l'on attend beaucoup du programme-clé d'ALMA sur les TNOs.
Instrumentation spécifique : en complément du programme sol mené sur les grands télescopes en imagerie et en spectroscopie, la communauté française propose comme instrument pour le VLT, pour la détection des TNOs par phénomènes d'occultation, un photomètre visible à réponse rapide (UltraPhot). Ce projet est pour une grande part financé par une ANR obtenue en 2008. Il devra être approuvé par le STC de l'ESO.

Monitoring des comètes

Du fait de leur caractère très transitoire, la surveillance temporelle des comètes depuis le sol est un élément incontournable de leur exploration. Celle-ci porte sur les observations suivantes :
- Suivi en fonction de la distance héliocentrique : observations radio avec le RTN (raies de OH) qui donnent une mesure directe du taux de production de l'eau.
- Recherche de molécules-mères : radiotélescopes (IRAM, JCMT, CSO et demain ALMA) pour les molécules dipolaires ; télescopes optiques en IR proche (2-5 µm) pour les autres (CH_4 et les hydrocarbures en particulier).
- Etude du rapport D/H, diagnostic du milieu où les comètes se sont formées. HDO peut être observée du sol dans le domaine submillimétrique (JCMT, CSO, ALMA).

Spatial, synergie et comparaison sol/espace

Magnétosphères planétaires

Le thème «magnétosphères planétaires» est fortement ancré dans la planétologie (PNP) et la physique héliosphérique (PNST). Des discussions historiques ont eu lieu sur ce sujet et des progrès faits pour qu'existe une interface non nulle entre ces deux programmes et thématiques. Il serait bon de préserver et confirmer ces progrès. Dans le domaine de la magnétosphère de Jupiter pour le moins, une très forte synergie sol-espace existe qui implique LOFAR. Ce projet a un programme développé d'étude/imagerie à distance de la magnétosphère Jovienne, avec un groupe de travail dédié. Ce même groupe de travail abordera avec LOFAR la question de l'observation radio des éclairs d'orages planétaires, qui relève des atmosphères et porte là aussi un potentiel de synergie sol-espace.

Les petits corps (astéroïdes, comètes, satellites) du système solaire vus par Gaia

Les besoins en accompagnement sol au niveau national qui permettront d'amplifier les retombées scientifiques de Gaia sur la science du système solaire sont de trois ordres :
- télescope de la classe 1-2m afin de pouvoir effectuer la photométrie et l'astrométrie de certains astéroïdes sélectionnés sur des périodes en dehors de la mission Gaia, ou bien de type «follow-up», ou encore permettant une meilleure résolution temporelle ;
- télescopes robotiques pour des observations en alerte de phénomènes ou d'objets nouvellement découverts (sub-Atens ou comètes)
- télescope de la classe 8-10m pour les astéroïdes relativement faibles, pour la détermination des taille, forme et densité. Spectroscopie dans le proche infrarouge en complément du domaine visible couvert par Gaia pour identifier des bandes d'absorption particulières.

Notons enfin que si le projet SELENE2 de déploiement d'un paquet géophysique incluant un sismomètre sur la Lune est sélectionné par le CNES, il sera opportun d'envisager la mise en place d'un soutien sol visant à contraindre le temps et la position des flashs liés aux impacts lunaires qui seront utilisés comme source sismique. Cette action nécessite l'instruction d'un dossier préalable.

En résumé :
- ***L'utilisation des grands instruments pour la planétologie (e.g. VLT, IRAM) va se poursuivre avec la mise en service d'ALMA et le projet E-ELT.***
- Nous recommandons le soutien :
   I. au programme de photométrie visible pour la détection des TNOs, dans le cadre d'une instrumentation VLT ;
   II. au projet NOEMA pour l'étude et le suivi des objets du système solaire dans le domaine millimétrique ;
   III. à l'étude de la magnétosphère de Jupiter avec LOFAR.
- La mission Rosetta de l'ESA, lancée en 2004, arrivera en 2014 sur la comète Churyumov-Gerasimenko. Des études préparatoires sont nécessaires comme des observations depuis le sol et le développement de modèles de transfert dans la coma. Se pose ici la question de mobilisation sur un projet réparti sur une si grande échelle de temps.
- Il convient d'assurer le suivi sol des petits corps du système solaire observés par Gaia (suivi par des télescopes de la tailles 1-2m, utilisations de télescopes robotiques, observations spécifiques au VLT).

Physique de l'héliosphère

Héliosphère, magnétosphère terrestre, les plasmas du système Soleil-Terre constituent un laboratoire de physique des plasmas à portée de main. Cette thématique évolue vers la physique fondamentale, avec le couplage fort entre milieux et processus physiques. Comme pour les autres thématiques, seules les synergies sol/espace fortes sont détaillées ici.

Synergie sondeurs ionosphériques/ satellites magnétosphériques

Les zones aurorales et polaires sont des régions très actives de l'ionosphère en couplage étroit avec la magnétosphère par l'intermédiaire du champ magnétique. Entre ces 2 régions, se produisent des échanges de particules, la circulation de courants, et la transmission du champ électrique qui contribue au transport du plasma ionosphérique et du plasma magnétosphérique. Les observations des satellites magnétosphériques et des radars (SuperDarn, EISCAT-ESR et le projet EISCAT-3D) dans l'ionosphère au pied des lignes de champ magnétique que traversent ces satellites permettent d'étudier les mêmes phénomènes en 2 points distincts des lignes de champ ; ce sont des mesures complémentaires. Les observations ionosphériques apportent une vision du contexte physique global aux mesures ponctuelles des satellites magnétosphériques. L'intérêt d'observations couplées sol/espace a été depuis longtemps mis en avant et exploité dans 2 types de configurations :
1) Synergies des radars ionosphériques et des satellites à basse altitude (OERSTED, CHAMP et DEMETER, puis IMEDIA). Ils donnent une description très précise des champs et courants juste au-dessus de l'ionosphère.
2) Synergies des radars ionosphériques et des satellites lointains (CLUSTER/ESA, THEMIS/NASA puis MMS) qui traversent les frontières de la magnétosphère. Les mesures ionosphériques donnent une vue globale des conditions électrodynamiques qui règnent au voisinage des pieds des lignes de force que croisent les satellites.

Synergies Radiohéliographe de Nançay (RH)/ missions spatiales

Le RH est le seul instrument qui fournit des images de la couronne solaire dans une gamme d'altitudes allant d'environ 0,1 à 1 rayon solaire au dessus de la photosphère. Il apporte notamment des diagnostics originaux sur les mécanismes d'émission (radio), l'accélération et la propagation de populations non thermiques d'électrons dans la couronne. L'atelier international de prospective de radioastronomie solaire organisée en juin 2009[2] a permis de conforter le rôle complémentaire du RH dans l'analyse des données spatiales dans deux domaines :
1) la spectrographie du plasma coronal pour laquelle le RH fournit des diagnostics des plasmas de la couronne calme ou éruptifs : complémentarité avec STEREO (en particulier des expériences

2 http ://www.lesia.obspm.fr/Atelier-Futur-de-la.html

SECCHI et SWAVES pour lesquelles le RH est un instrument à statut Co-I), CORONAS Photon, et des missions en préparation (SDO/NASA et Proba2/SWAP/ESA).
2) l'étude des particules de haute énergie dans la couronne et leur connexion de la surface du Soleil vers l'héliosphère avec les diagnostics radio des électrons non-thermiques : complémentarité avec les missions dédiées RHESSI, CORONAS Photon et non dédiée FERMI.

Notons également que l'un des programmes clef de Solar Orbiter est l'étude de la connexion entre la surface, la couronne et l'héliosphère. Un imageur de la couronne en ondes dm-m, tel le RH, a un rôle clef à jouer dans ce programme.

Synergies Télescope THEMIS/missions spatiales

Le télescope THEMIS, et son futur successeur EST, ont, entre autres, pour vocation de produire des cartes du vecteur champ magnétique simultanément à plusieurs altitudes de la photosphère solaire, et à terme de la chromosphère. Ils sont complémentaires aux magnétographes embarqués SDO et Solar Orbiter (meilleure résolution spectrale, capacité multi-λ, visibilité). Les champs magnétiques mesurés par THEMIS puis EST seront également d'une importance fondamentale pour l'interprétation des données en imagerie et en spectro-imagerie UV et X sur les missions SDO, SOLAR-C et Solar Orbiter. Les données UV et X montrent en effet la dynamique du plasma dans la région de transition et dans la couronne solaire, au-dessus de la photosphère et de la chromosphère. Du fait de la forte stratification dans ces dernières, ces couches constituent une zone de transition et de forçage magnétique de la couronne, dont le chauffage et la dynamique des événements éruptifs sont directement contrôlés par la façon dont les champs magnétiques se structurent et évoluent à basse altitude, là où THEMIS et EST peuvent le mesurer. La capacité de THEMIS (puis de EST) à intervenir dans ces études, a déjà maintes fois été prouvée par de nombreuses publications utilisant THEMIS pour interpréter des données de SOHO/EITSUMER-CDS-LASCO, TRACE et HINODE/XRT.

Picard / Picard sol

Le micro-satellite du CNES Picard devrait être lancé fin mars 2010. Les objectifs scientifiques de Picard sont la mesure de l'hélioïde, l'héliosismologie et la réponse de l'atmosphère et du climat à l'irradiance solaire. La mission spatiale est accompagnée d'un volant sol comprenant deux instruments, MISOLFA et SODISM2. Les objectifs sont la comparaison des mesures sol-espace (avec/sans turbulence), et la caractérisation de la turbulence atmosphérique, visant au recalage et donc à la ré-exploitation possible des mesures historiques controversées de diamètre solaire (astrolabe, à Calern). Aujourd'hui, la question se pose de l'exploitation scientifique de Picard sol/espace. Il semblerait que les personnels impliqués dans Picard-sol soient insuffisants, rendant le contexte scientifique de l'opération délicat. Il faut également noter le besoin de maintenir sur le projet les compétences en physique atmosphérique pour assurer l'exploitation scientifique du volet sol.

En résumé :
- ***Les synergies sol-espace sont anciennes, exploitées depuis longtemps et les spécialistes du sol sont reconnus comme Co-I des missions spatiales. Nous encourageons fortement la poursuite des fortes synergies existantes avec les nouveaux instruments au sol et dans l'espace.***
- ***A court terme (prochain cycle) le RH reste un instrument unique. Il y a un intérêt scientifique fort à maintenir la capacité d'imagerie de la couronne en ondes dm-m pour les prochaines missions, en complément des observations de LOFAR et en attendant la mise en service de FASR et du radiohéliographe chinois (CSRH).***
- ***Il conviendra de continuer avec THEMIS, et de permettre avec EST, d'organiser des campagnes d'observations coordonnées sol-espace.***
- ***Picard sol/espace : il faudrait pousser d'avantage la réflexion sur l'exploitation scientifique, la valorisation des données, la mise en place des plans d'archivage et de mise à disposition (liens entre MEDOC, BASS2000 et le Centre de Mission Scientifique Picard à Bruxelles). Il faut également noter le besoin de maintenir sur le projet les compétences en physique atmosphérique pour assurer l'exploitation scientifique du volet sol.***

L'énergie noire

La découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers et les mesures des anisotropies du fond diffus cosmologique ont conduit à supposer qu'il existait une sorte d'énergie baptisée noire. Cette énergie est, en terme de densité d'énergie, la composante majeure de l'Univers, représentant ~70% de la densité d'énergie totale de l'Univers. Aujourd'hui, la nature exacte de l'énergie noire est encore inconnue. Les objectifs de la communauté «énergie noire» sont donc de sonder les propriétés de cette énergie et des théories alternatives de la gravitation, en caractérisant simultanément le taux d'expansion et le taux de croissance des structures dans l'Univers. Pour cela, trois sondes primaires peuvent être utilisées : les supernovae (SNIa), les oscillations acoustiques des baryons (BAO) et les effets de distorsions gravitationnelles (WL). Les sondes secondaires (amas de galaxies, effet ISW, z-distorsion) sont des compléments intéressants mais ne rentrent pas en compte dans la définition du plan stratégique de chasse à l'énergie noire. Il faut noter que les trois sondes primaires sont non équivalentes (dégénérescence ; interprétation cosmologique parfois indirecte et/ou complexe ; difficulté / précision / stabilité de la mesure ; systématiques astrophysiques ; besoins en observations de suivi) et ne sont donc en aucun cas exclusives.

Pour faire face à cette grande énigme, de nombreux projets sol ont vu le jour (e.g. Wiggle-z, VIPERS, (Big-)BOSS, KIDS/VIKING, DES, Pan-STARRS, LSST, SKA. . .). La France est en général peu présente et sans leadership sur de futurs projets majeurs alors qu'elle est leader mondial dans certains domaines (e.g. WL). Parallèlement, des projets spatiaux ont été soumis aux agences et deux projets sont actuellement dans la compétition : Euclid à l'ESA et JDEM à la NASA. L'accès à l'espace est indispensable pour notamment la qualité d'image (mesure de PSF pour le WL), la spectroscopie des objets à $1,2<z<2,5$ et la détermination des redshifts photométriques avec des bandes visibles et NIR à la profondeur du NIR nécessaire. A noter que l'espace est indispensable pour les amas de galaxies (données X) et que les données Planck seront indispensables à l'interprétation cosmologique des données des trois sondes primaires.

Spatial, synergie et comparaison sol/espace

Dans ce domaine en pleine effervescence et où la compétition est féroce, la multitude des projets et les positions changeantes des agences spatiales américaines et européennes ont entraîné une certaine confusion, avec un risque de lassitude et de démobilisation des forces vives pour s'impliquer dans les grands projets spatiaux de la décennie. Il est apparu le besoin de dégager un plan stratégique visant à soutenir le leadership et les priorités scientifiques françaises dans le domaine de l'énergie noire, l'imagerie grand champ et les sondages spectroscopiques vis/IR de galaxies. Une feuille de route INSU/IN2P3, diffusée aux représentants d'agences a donc été établie. Dans une première étape, elle consiste à s'appuyer sur des moyens existants, en particulier :

— MegaCam et sa qualité unique en bande u ;
— VLT/VIMOS pour un sondage VIMOS ultra-wide.

Elle consiste ensuite à minimiser l'impact des incertitudes programmatiques en sécurisant la présence française, de manière optimale, sur plusieurs « filières » scientifiques à moyen terme :

— WL, avec Megacam-u+Pan-STARRS4+VIMOS ultra-wide ;
— BAO, avec BigBOSS ;
— SNIa, avec le LSST et peut-être IMAKA ;

pour construire une participation à long terme sur une grande expérience spatiale « énergie noire ». Une telle stratégie offre une garantie de préserver un leadership scientifique quel que soit le scénario programmatique. Elle prend en compte les risques et les incertitudes de chaque filière scientifique en limitant leur interdépendance.

En résumé :

- Il est indispensable de maintenir une place de tout premier plan en vue de la sélection potentielle du projet spatial Euclid. Pour cela, la France doit s'impliquer dans des projets sol «énergie noire».

- Nous recommandons la diffusion de la feuille de route à l'ensemble de la communauté PNCG. Il apparaît en effet que les moyens nécessaires à la caractérisation de l'énergie noire sont très importants et peuvent hypothéquer d'éventuelles contributions françaises dans d'autres domaines de recherche du PNCG.

- Les données u sont essentielles pour la mesure des redshifts photométriques des galaxies. Déployer un grand relevé « MegaCam-u » construit sur les nuits noires françaises du CFHT, et intéressant très fortement les expériences sol (comme Pan-STARRS4, Big-Boss), serait d'un atout considérable. Il demande à être accepté par la communauté française et doit être discuté rapidement.

- Pour les autres projets sol, nous renvoyons le lecteur aux discussions du groupe «Evolution des moyens et nouveaux moyens à 5-10 ans».

Les sursauts γ

Un sursaut gamma est une émission de photons γ (keV-MeV), très brève (1 ms –1000 s) mais très intense ($10^{51\text{-}54}$erg), suivie d'une rémanence à plus basse énergie (X=>radio), qui décroît rapidement (heures–jours). Les sursauts sont produits à distance cosmologique (zmax = 8,3 en 2009). Les sursauts longs (≥1 s) sont associés à des explosions d'étoiles massives, l'origine des sursauts courts reste moins bien comprise. Sur le plan théorique, un sursaut est très certainement dû à un jet relativiste émis par une source compacte stellaire, et la rémanence au freinage par l'environnement.

La physique des sursauts gamma, leur utilisation pour la cosmologie

Il s'agit (1) de comprendre la physique de ces phénomènes extrêmes (progéniteurs, éjection relativiste, mécanismes d'émission, ...) ; (2) d'identifier si les sursauts sont – comme on peut s'y attendre – des sources de rayonnement non-photonique (photons de haute énergie, rayons cosmiques, ondes gravitationnelles) ; (3) d'utiliser la luminosité exceptionnelle des sursauts pour explorer l'Univers lointain, et en particulier étudier le milieu interstellaire et la formation d'étoiles à grand *z* (galaxies hôtes) et le milieu intergalactique (spectroscopie du milieu sur la ligne de visée).

Complémentarité sol-espace

Ces objectifs scientifiques nécessitent une stratégie instrumentale complexe. Le sursaut doit être détecté dans l'espace et localisé en temps réel. L'alerte doit être transmise au sol très rapidement (≤100 s pour la contrepartie optique simultanée). La détection dans le domaine optique par un télescope robotisé donne une précision de la position suffisante pour ensuite pointer un grand télescope (délai ≤1 h pour avoir un flux intense). La spectroscopie est importante pour les objectifs liés à l'étude de la ligne de visée (milieu intergalactique ou environnement immédiat du sursaut). D'autres objectifs se contentent d'un bon échantillonnage photométrique (physique du jet). L'accès aux sursauts à grand *z* nécessite d'observer dans l'IR.

La place de la communauté française

La communauté française est fortement investie depuis plusieurs années dans des projets instrumentaux qui s'inscrivent dans cette approche complémentaire sol-espace : les missions spatiales HETE2, INTEGRAL/ESA et Fermi/NASA (détection et localisation dans l'espace), les deux télescopes robotiques français TAROT (réaction automatique aux alertes), le spectromètre XSHOOTER au VLT (spectroscopie rapide des rémanences) et bien entendu le projet franco-chinois de satellite dédié aux sursauts gamma et à leur utilisation pour la cosmologie : SVOM (lancement 2014).

Nécessité du GFT

SVOM observera les sursauts entre 4 keV et 5 MeV et leurs rémanences en optique (et en X, en discussion). Il doit être complété au sol par deux télescopes robotisés (GFTs), ainsi que par des caméras grand champ. Le GFT français, seul instrument allant vers l'IR (bande H), jouera un rôle crucial dans le projet, car il permettra à la communauté française de SVOM d'aborder toute la science des rémanences (y compris à grand *z*), en particulier en fournissant des alertes aux grands télescopes type VLT/XSHOOTER pour le suivi spectroscopique. Il faut noter que SVOM n'a pas de projet concurrent (non sélection de JANUS en SMEX).

En résumé :

- Le GFT français est indispensable à la mission SVOM : il donne accès à toute la science des rémanences, et à l'identification des sursauts à grand z. Il garantit un retour scientifique élevé à la collaboration, pour un coût représentant une fraction modeste du budget total. L'étude des sursauts exige une forte synergie sol-espace : il est donc logique que le GFT fasse partie du segment sol de SVOM au même titre

que le réseau d'alerte rapide.

Lois fondamentales

Les priorités scientifiques se situent principalement à l'interface entre théorie de la gravitation et théorie quantique ; on peut citer en particulier les ondes gravitationnelles (qui ont bien sûr aussi un grand intérêt en astrophysique), les tests du principe d'équivalence, l'étude des constantes fondamentales (et de leur possible non constance) et des interactions fondamentales (étude de la gravité aux grandes échelles, système solaire, galaxie ou échelles cosmologiques ; recherche de nouvelles interactions à longue distance).

Une réflexion est engagée au niveau européen sur les priorités scientifiques et technologiques de la physique fondamentale dans l'espace sous l'égide du groupe FPR-AT (Fundamental Physics Roadmap Advisory Team) convoqué par l'ESA. Le FPR-AT se penche plus particulièrement sur les questions suivantes :
- les priorités scientifiques du domaine ;
- les mérites comparés de l'espace et du sol ;
- les activités technologiques à développer prioritairement dans la perspective de l'appel CV2 ;
- l'organisation de la communauté.

Suite à un appel à white papers lancé en mars 2009, les conclusions préliminaires du groupe ont été discutées lors d'un workshop à l'ESA en janvier 2010. Les conclusions définitives sont attendues pour mars 2010.

La physique fondamentale a maintenant atteint un stade où des projets spatiaux sont approuvés :
- Au niveau du CNES :
  - MICROSCOPE est un micro-satellite qui devrait permettre d'observer des violations du Principe d'Equivalence à un niveau de 10^{-15} (lancement envisagé en 2013-2014).
  - PHARAO est une Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite sur la station spatiale (2013) ; la coordination sol (en particulier pour le traitement des données) est à renforcer.
- Au niveau de l'ESA :
  - La mission phare est la mission de détection des ondes gravitationnelles LISA dans laquelle l'Europe a pour l'instant le leadership technique en particulier grâce à la mission technologique LISA-Pathfinder (lancement 2011). La France est organisée autour du consortium LISA-France.
  - Le projet Gravity Acceleration Probe d'un accéléromètre sur la mission EJSM est en cours d'étude de faisabilité.

Les synergies sol/espace sont :
- la fenêtre de longueur d'onde de LISA n'est accessible par aucun moyen terrestre ;
- étant donné le temps de mise en oeuvre d'une mission spatiale, une comparaison des performances des horloges à atomes froids au sol et dans l'espace à l'échelle de 10 ans est nécessaire ;
- les tests de la loi de gravitation se font au sol à l'échelle microscopique, au sol ou dans l'espace à l'échelle terrestre, dans l'espace à l'échelle du système solaire, et par des observations astrophysiques à l'échelle galactique ou cosmologique ;
- l'espace a des besoins de tests spécifiques à la physique fondamentale (par exemple dans le cadre de l'utilisation des horloges atomiques).

En résumé :
- ***L'accès à l'espace est récent, assurer le retour scientifique des missions dans lesquelles la communauté est fortement engagée (PHARAO/ACES, MICROSCOPE et LISAPathfinder/LISA) est indispensable et doit s'appuyer sur une cohésion nationale assurée par la mise en place d'une nouvelle structure (AS ou PN, cf Sect. 5).***
- ***Il faut étudier le développement des capacités spatiales spécifiques à la communauté physique fondamentale – cf. Sect. « les synergies structurelles » (tests, gestion de projet, qualité...).***
- ***Le calendrier de la réflexion du groupe FPR-AT n'est pas en phase avec celui de la prospective. Il conviendra d'étudier les conclusions du groupe lors du prochain bilan à mi-parcours.***
- ***Nous encourageons la communauté AA à réfléchir à son implication dans le projet LISA.***

Les modes B du Fond Diffus Cosmologique

Le prochain défi de la cosmologie observationnelle est la mesure et la caractérisation précise des modes B, signatures des ondes gravitationnelles primordiales dans les anisotropies polarisées du Fond Diffus Cosmologique. La détection des ondes gravitationnelles provenant de l'inflation (une phase d'expansion exponentielle aux tous premiers instants après le Big Bang) serait une découverte majeure pour la cosmologie et pour la physique fondamentale. L'amplitude du mode B étant fixée par l'énergie caractéristique de l'inflation, cette mesure nous donnerait immédiatement l'échelle d'énergie associée à cette physique, peut-être liée à la grande unification des interactions. Le signal des modes B primordiaux est cependant au moins trois ordres de grandeur inférieur aux anisotropies en température. Il est aussi fortement contaminé par les avant-plans polarisés (synchrotron, poussières). L'instrument Planck/HFI est déjà à la limite du bruit de photons. Le saut en sensibilité nécessaire sera possible uniquement par le gain multiplexe de grandes matrices (de bolomètres) ultra-sensibles (~ 10^4 pixels). En France, un certain nombre de R&D «bolomètres» (CNES, INSU/CSAA, Programme Astroparticules, CEA) permettent de concevoir, tester et développer des matrices de bolomètres. Des tests de matrice sont effectués à l'IRAM (projet européen prototype).
Aujourd'hui, des expériences sol Atacama (ACT, Apex, Clover), Antartique (Bicep, Quad, SPT) et suborbitales (EBEX, SPIDER), essentiellement nord-américaines, tentent de contraindre l'amplitude des modes B (noter que PILOT-CNES permet de comprendre la polarisation de l'avant-plan poussière uniquement). Conscients que la mesure précise ne pourra se faire que depuis l'espace, des projets spatiaux ambitieux ont été proposés et ont été/sont à l'étude : projet de phase 0 CNES (Sampan en 2006) et Projet Cosmic Vision BPOL (2008) - Decadal survey aux USA : Astro2010 inclut le concept CMBPOL (similaire à BPOL). Probablement, la meilleure limite/détection viendra de Planck en 2012/2013. Une détection permettrait de lancer un nouveau projet, sans doute à l'échelle mondiale. Au niveau national, la cohésion passe par le besoin d'une coordination IN2P3/INSU.

Spatial, synergie et comparaison sol/espace

En résumé :
- ***Nous réaffirmons la nécessité du soutien à Planck, en ce qui concerne les opérations, le traitement de données, et l'exploitation (soutien aujourd'hui réel !).***
- Le suivi sol de Planck pour acquérir la pratique des grandes matrices, couplé à l'expérience gagnée avec Planck, nous mettrait en position de force pour les projets post-Planck.
- Il est nécessaire d'organiser un groupe de travail pour établir une feuille route de détection et mesure des modes B, INSU et IN2P3.

L'Univers froid

Le domaine IR-mm donne accès à l'Univers froid, la matière première de la formation des planètes, des étoiles et des galaxies. Les observations IR thermique – permettent de tracer cette matière jusqu'aux très grands redshifts. L'émission de la poussière dévoile les phases précoces de l'évolution des jeunes étoiles et des planètes ainsi que des phases intenses de l'évolution des galaxies où noyaux actifs et jeunes étoiles sont enfouies dans de grandes concentrations de matière interstellaire. La spectroscopie est essentielle pour avoir accès à la cinématique du gaz et à la dynamique de la formation de l'Univers lumineux. Elle est également essentielle pour le refroidissement du gaz et sa composition (e.g. mesures de métallicité, chimie).

Les missions spatiales (Spitzer, Herschel, Planck et le JWST et SPICA) sont essentielles car elles donnent accès à l'ensemble du spectre IR thermique. L'observation de l'espace réduit aussi grandement le bruit de photon. Un petit télescope spatial donne une meilleure sensibilité qu'un grand télescope sol dans les fenêtres atmosphériques. Spitzer (80 cm) est ainsi plus sensible que le VLT et même l'ELT à 10 et 20 µm en imagerie et spectroscopie basse résolution. Un télescope de 3,5m refroidi à 4K (le projet japonais SPICA avec la participation européenne SAFARI en compétition «Cosmic Vision») est potentiellement plus sensible qu'ALMA à 350 µm.

Les télescopes sols (IRAM, ALMA, VLT, E-ELT) offrent une bien meilleure résolution angulaire que celle des observatoires spatiaux. Ils sont aussi en amont du spatial dans l'utilisation des mosaïques de détecteurs grand format. Un avantage des instruments sols essentiel pour l'étude de la formation des planètes et des étoiles est l'accès à la très haute résolution spectrale ($R = n/\Delta n > 10^5$). Pour ces sujets et aussi l'étude de la matière interstellaire, la résolution spectrale et angulaire sont souvent les principaux facteurs limitants plus que la sensibilité. Pour les galaxies, la sensibilité et le champ de vue des observations sont les principaux facteurs limitants.

Les thèmes astrophysiques du domaine IR-mm sont par essence multi-longueurs d'ondes. A l'échelle des disques, des environnements circumstellaires et des galaxies, la matière froide côtoie du gaz chaud observé du visible aux rayons X. Le domaine IR lointain-mm, spatial et sol, est aujourd'hui le maillon le moins développé de ces champs de recherches. Les observations spectroscopiques sont encore limités à un petit ombre d'objets et sont le travail d'une communauté réduite d'experts. On attend des développements instrumentaux de fortes améliorations des moyens d'observation à la fois de la sensibilité, la résolution angulaire et de la taille des relevés. La prochaine décennie avec Herschel, Planck puis JWST dans l'espace, l'IRAM, le VLT et ALMA au sol sera un bond en avant.

La synergie sol-espace est déjà une réalité. Par exemple, CRIRES au VLT est utilisé par plusieurs groupes européens pour étudier le gaz dans les disques proto-planétaires dits de transition (disques sans poussières en leur partie intérieure) découverts dans les relevés photométriques et spectroscopiques de Spitzer. ALMA et les instruments de seconde génération du VLT sont complémentaires à JWST. Pour les galaxies très lointaines, le JWST apportera une vision incomplète de l'Univers à grand z (recherche de galaxies à cassure de Lyman et raie d'émission Lyman-alpha). Reste à trouver les galaxies très poussiéreuses à grand z, z > 4 (ces galaxies dominent la formation d'étoiles dans l'Univers à 0.5 < z < 3, et après ?) pour caractérisation par ALMA. Un télescope submillimétrique sol comme CCAT pourrait fournir le catalogue de galaxies lointaines poussiéreuses à ALMA.

Enfin cette thématique s'appuie fortement sur des expériences en laboratoire (p. ex. caractérisation des propriétés optiques des grains de poussière) qui offrent un soutien sol indispensable aux missions spatiales (p. ex. ISO, Spitzer, Herschel, Planck). Elles sont détaillées dans le groupe «Astrophysique de Laboratoire».

En résumé :
- ***A court et moyen terme la priorité de la communauté IR-mm est l'exploitation scientifique de Herschel et Planck. L'IRAM est un atout fort de la communauté française dans le suivi sol des résultats de ces deux missions. Deux projets de l'IRAM doivent être fortement soutenus car ils conditionnent une partie importante du retour scientifique que la communauté française pourra tirer de Herschel et Planck :***
  - ***i. La construction d'une caméra grand champ (10') à 1-3mm sur une échelle de temps de 3 ans est essentielle pour le suivi des nombreuses sources galactiques et extragalactiques qui vont être découvertes par Herschel et Planck.***
  - ***ii. Le projet NOEMA est essentiel pour le suivi spectroscopique des sources. Il donnera au Plateau de Bure l'efficacité d'observation nécessaire pour observer le gaz dans un nombre significatif de sources galactiques et extragalactiques de Herschel et Planck.***

- La construction d'un grand télescope sub-mm (comme le projet CCAT) ouvrirait un nouvel accès aux galaxies à grand redshift, complémentaire au VLT, ALMA et le JWST. Nous recommandons l'étude d'une éventuelle participation française à ce projet s'il est sélectionné par le «decadal survey».
- Il faut poursuivre l'organisation de la communauté française autour du JWST et identifier les points forts de la communauté concernant les synergies JWST/E-ELT afin de les développer.
- Les équipes françaises doivent continuer leurs efforts développés autour du projet SPICA (que ce soit la contribution à l'instrument européen SAFARI ou l'instrument américain BLISS). SPICA représente l'unique opportunité d'expérience spatiale à moyen terme. A plus long terme d'autres possibilités pourraient se présenter (millimetron, SPECS, SPIRIT, FIRI).

Accélération de particules galactiques et extragalactiques

Depuis la découverte des Rayons Cosmiques par Victor Hess, des avancées gigantesques ont été faites sur leur nature, spectre et composition. Cependant, de nombreuses questions fondamentales restent ouvertes quand à leurs lieux de production, les mécanismes d'accélération en jeu et leurs propriétés, le nombre de types d'accélérateur différents, et la fraction du rayonnement cosmique d'origine extragalactique. Pour répondre à ces questions sur l'origine et les mécanismes d'accélération des Rayons Cosmiques, il est nécessaire de pratiquer une astronomie multi-longueurs d'onde, mais aussi multi-messagers qui à terme utilise l'ensemble des sources d'information que sont les photons, les rayons cosmiques et les neutrinos.

Photons produits par les particules accélérées

L'étude des photons émis par les particules accélérées est primordiale pour contraindre les mécanismes d'accélération en jeu. Elle permet de caractériser la nature et le spectre des particules accélérées, de tracer et d'étudier les sites d'accélération dans les sources galactiques (restes de supernova, nébuleuses de vent de pulsar, régions de formation d'étoiles,...) et extragalactiques (GRB, AGN). Les différents processus d'émission non-thermiques associés à ces particules relativistes s'étendent sur toute la gamme spectrale du domaine radio aux rayons gamma de très haute énergie. C'est en utilisant conjointement les informations radio, infrarouge-optique, X et gamma qu'il est possible de déterminer le spectre en énergie des particules accélérées et de contraindre les mécanismes d'accélération, notamment en déterminant la nature (leptonique, hadronique) de l'émission gamma de haute et très haute énergie.

Cela nécessite une forte synergie sol/espace. Les observations dans le domaine radio, infrarouge-optique et en rayons gamma de très haute énergie proviennent essentiellement du sol. L'accès à l'espace est requis pour observer en rayons X (XMM-Newton, Chandra, Suzaku, projet international IXO) et X-durs/gamma (INTEGRAL, RXTE, Swift), ainsi que pour pouvoir balayer l'ensemble du ciel en rayons gamma de haute énergie (Fermi). Dans ce domaine, les observations du sol (HESS, HESS 2 et CTA en projet) et de l'espace (Fermi) sont complémentaires : les télescopes Cherenkov au sol bénéficient d'une surface effective très supérieure à celle des télescopes spatiaux et couvrent des énergies plus élevées. L'espace permet une couverture complète du ciel, nécessaire à l'étude de population de sources et au suivi des nombreuses sources variables gamma, pour lesquelles des observations simultanées sol/espace sont nécessaires. Le programme de temps ouvert prévu pour SVOM devrait permettre ce type d'observation pour les AGN. Enfin on note l'importance des éphémérides radio du sol, effectuées avec le radio télescope de Nançay, pour l'étude des pulsars gamma de très haute énergie observés avec Fermi.

Rayons cosmiques d'ultrahaute énergie

Les rayons cosmiques d'ultra-haute énergie subissent une moindre déflexion magnétique, qui permet de conserver un accès à la direction de la source. L'observatoire Pierre Auger permet la détection depuis le sol des particules secondaires produites dans l'atmosphère par les rayons cosmiques. De premières indications de corrélation de ces événements avec des sources dans l'Univers local ont été obtenues. Si elles sont confirmées, elles ouvriront une nouvelle ère pour l'étude des sources individuelles à ultra-haute énergie. Du sol également, des efforts sont fournis dans le domaine radio (CODALEMA, LOFAR) en faveur de la détection de l'émission radio cohérente émise par les particules secondaires générées par les RCs d'ultra-haute énergie. Enfin, il est sérieusement envisagé par le Japon de réaliser des observations de gerbes atmosphériques depuis l'espace avec la mission JEM-EUSO sur la Station Spatiale Internationale. L'intérêt de cette approche par rapport au sol est d'augmenter considérablement le volume de détection. Ces technologies, mise en oeuvre pour la première fois dans l'espace, n'ont pas le niveau de fiabilité du projet Auger Nord dont la technologie est déjà éprouvée, mais ouvre la voie à de futurs observatoires de gerbes atmosphériques depuis l'espace.

Neutrinos produits par les particules accélérées : une nouvelle fenêtre à venir

Les collisions de noyaux accélérés avec ceux du milieu environnant la source d'accélération produisent des pions chargés, qui, en se désintégrant, fournissent des neutrinos. L'observation de neutrinos est donc un élément essentiel pour mesurer la contribution hadronique. Le ciel de l'hémisphère sud-est actuellement observé pas ANTARES. Mais c'est avec son successeur, un détecteur de classe km^3 KM3Net, que sont attendues les premières détections de sources astrophysiques et le développement de l'astronomie des neutrinos.

En résumé :

- ***Il est très important, de soutenir et d'encourager la participation des laboratoires de l'INSU au projet CTA qui doit se développer vite pour bénéficier d'une synergie Fermi/CTA (synergie à développer autour de HESS2 dans un premier temps).***
- ***Il nous apparaît opportun de soutenir la participation française à la mission d'opportunité japonaise JEM-EUSO, même dans le contexte concurrentiel d'Auger Nord. Nous engageons la communauté à mener une réflexion sur les futurs observatoires (sol versus espace) et l'avenir de l'astronomie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie.***
- ***L'extension des missions spatiales XMM-Newton et INTEGRAL est fortement recommandée tant qu'elles restent compétitives, de même que le soutien au projet IXO. De plus, suite à l'arrêt de la mission Simbol-X par le CNES, nous encourageons la recherche d'opportunité de participation française à des missions X ayant des capacités d'imagerie en X durs, en tenant compte du calendrier d'IXO et de ses performances dans ce domaine (IXO se donnant pour objectif d'atteindre des performances comparables à celles de Simbol-X en X-durs).***

Accompagnement relevé GAIA en physique stellaire et galactique

Gaia est l'une des Pierres Angulaires de l'ESA, sélectionnée en octobre 2000, avec un lancement prévu début 2012. En combinant la puissance de découverte d'une observation systématique répétée du ciel à l'extrême précision et l'homogénéité de ses

observations de positions, distances, mouvements et propriétés physiques de plus d'un milliard d'objets, Gaia permettra de déterminer la structure spatiale et la cinématique ainsi que l'histoire de notre Galaxie. Gaia recensera et mesurera également un très grand nombre d'exoplanètes, de petits corps du système solaire (astéroïdes, comètes, satellites), de quasars et de galaxies compactes, et apportera une contribution majeure en physique fondamentale. Les mesures astrométriques et photométriques couvriront l'ensemble du ciel jusqu'à la magnitude 20. Les données de spectroscopie seront limitées à la magnitude 16 - 16,5. Tout comme pour la mission Hipparcos, la communauté française s'est fortement mobilisée dans la définition de la mission, et a contribué au succès de la proposition.

Accompagnement direct de la mission

Une coordination des besoins d'observations au sol nécessaires pour réaliser la mission existe au sein du DPAC (cf Sect. 5.2), sous la forme d'un groupe de travail (GBOG : Ground Based Observations for Gaia). Il s'agit d'acquérir des données de référence pour la photométrie, la spectrophotométrie, la spectroscopie, pour la taxonomie des petits corps, la densification des sources extragalactiques pour le système de référence et enfin des observations optiques de Gaia lui-même durant les cinq années de la mission. Il faut également préparer le suivi au sol de différents types d'alertes qui seront fournies par Gaia et nécessitant une réaction dans les 24 heures. A noter que des observations sol doivent continuer durant la mission pour s'assurer de la stabilité des sources. Ceci conduit aux besoins et programmes suivants en France :

– Deux programmes clés financés par le PNG et le PNPS sont en cours sur les spectromètres SOPHIE à l'OHP et NARVAL au Pic du Midi pour observer à haute résolution spectrale une partie des 2 000 étoiles de référence qui serviront à la calibration des vitesses radiales et des paramètres physiques des étoiles déterminées par Gaia. Ces mesures nécessitent un suivi temporel de qualification comme standards. Elles doivent donc continuer après le début de la mission et avec les mêmes instruments pour éviter tout problème de calibration des standards.

– Observations à l'OHP et au Pic du Midi de WMAP et d'astéroïdes faibles pour qualifier les méthodes d'acquisition et de traitement des observations optiques de Gaia autour de L2, et durant la mission participation à un engagement du DPAC sur la fourniture quotidienne des mesures astrométriques optiques.

Accompagnement scientifique pour l'exploitation

De nombreuses observations ciblées sont à prévoir pour exploiter au mieux les données de Gaia et apporter des données complémentaires. Il faut en particulier prévoir des observations spectroscopiques dédiées pour l'analyse chimique détaillée d'étoiles individuelles, l'évolution chimique de la Galaxie et des galaxies proches dans le groupe local, l'étude cinématique des zones denses du plan galactique, des courants du halo ou des amas globulaires. Tout ceci nécessite d'aller au delà des performances du RVS tant en sensibilité qu'en densité stellaire.

Différents groupes de travail se sont penchés sur cette question, et on trouve les apports et conclusions dans un rapport du groupe de travail ESA-ESO sur les populations stellaires (Turon et al. 2008), un atelier spécialisé à Nice en février 2009 (www.oca.eu/rousset/GaiaSpectro/), et une réflexion plus large encore à l'ESO en mars 2009 (www.eso.org/sci/meetings/ssw2009/).

Compte tenu des autres programmes sol déjà en place comme RAVE et SEGUE et avec les performances attendues de Gaia, il apparaît que pour aller plus loin dans la compréhension de la Galaxie et du groupe local, il faut prévoir des observations spectroscopiques additionnelles pour (i) les vitesses radiales, (ii) les abondances chimiques :

– vitesses radiales dans les régions difficilement ou non accessibles au RVS de Gaia : zones denses du plan galactique, courants stellaires dans le halo et le disque épais, amas globulaires. Combinées à l'astrométrie (5-D) et aux métallicités moyennes obtenues par la spectrophotométrie de Gaia, c'est une donnée essentielle à la compréhension de la formation hiérarchique de notre Galaxie. Pour les étoiles faibles sans vitesses radiales avec Gaia, la combinaison avec la vitesse tangentielle (mouvement propre et parallaxe) donnera la cinématique complète des objets.

– l'analyse chimique détaillée d'étoiles individuelles : c'est une information essentielle à l'archéologie galactique qui, combinée aux observations 6-D de Gaia, sera un atout majeur dans la compréhension de l'évolution chimique et dynamique de la Galaxie et des galaxies proches.

Ces objectifs conduisent alors à deux types de priorité sur l'instrumentation :

– Accès à un spectrographe dédié multifibres (N > 1 000) de résolution modérée (R ~ 5 000 - 10 000) avec un champ > 1 deg^2 permettant d'atteindre une précision de quelques km/s sur les vitesses radiales des objets faibles (V > 16) et 0,2 dex sur la métallicité moyenne de très gros échantillons d'étoiles. Un télescope de 4m à grand champ, par exemple à l'ESO, conviendrait.

– Pour les étoiles brillantes et l'analyse chimique, accès à un spectrographe multifibres (N _ 200) de haute résolution (R ~ 10-40 000), sur un champ autour de 0,5 à 1 deg^2, à large bande spectrale dans le visible. Le CFHT serait une solution parfaitement adaptée pour accueillir un instrument de ce type.

Les collaborations possibles sur ces sujets avec l'Australie, les Etats-Unis, la Chine sont aussi envisagées, mais sans se substituer à une instrumentation dédiée pour la communauté française ou européenne.

Les autres domaines pour lesquels des suivis ou des compléments d'exploitation scientifique seront nécessaires concernent les QSOs, d'une part, et les supernovæ qui seront détectées par le système d'alerte de la mission.

– Le système de référence optique va être basé sur quelques dizaines de milliers de sources extragalactiques, dont une proportion non négligeable (50% ?) sera constituée de nouveaux objets reconnus comme non-stellaires par l'analyse spectrophotométrique. En plus de ces sources primaires, Gaia va aussi détecter >200 000 nouvelles sources extragalactiques. Ce relevé va demeurer unique pendant un bon moment et sera à peu près exhaustif jusqu'à G = 20. Cependant, pour être utilisable pour d'autres études, il faut au moins obtenir un spectre pour chaque source, avec une priorité sur celle de l'ICRF-optique, pour déterminer leur distance et leur type. On aura ainsi une statistique précise sur les types de quasars en fonction de la distance, qui ira bien au-delà de ce qui est aujourd'hui disponible avec le SDSS. Il n'y a pas de contrainte temporelle forte et si l'on se limite à la magnitude 18, il y a quelques milliers de quasars à observer, typiquement une heure de pose avec un télescope de 2m, à basse

dispersion (R=1000).
– Pour les Supernovae (SN), on estime que les alertes devraient fournir environ 6 000 détections, dont 1/3 avant le maximum d'éclat et avec G < 19. Un système de réaction rapide doit être capable d'effectuer un suivi au sol, au moins d'une partie avec un temps de réaction inférieur à 24h. Ce réseau n'est pas encore organisé, mais une participation française avec un télescope de la classe 2m est souhaitable, pour autant que l'instrumentation (spectro basse résolution) puisse être activée rapidement et pour des temps courts, sans pénaliser les autres programmes.

Egalement de nombreux objets variables nécessiteront un suivi temporel en complément des observations Gaia. Il est indispensable pour le succès de la mission de maintenir l'instrument 193 cm de l'OHP et le TBL en état de fonctionnement optimal jusqu'au moins 2017. Nous attirons l'attention sur le fait que l'ESA ne s'occupe pas du traitement sol, et que tout financement des équipes, de leur matériel et des temps d'observations complémentaires sol sont à la charge des instituts et pays engagés dans le programme DPAC de Gaia. L'action spécifique Gaia supporte déjà les missions ESO sur des programmes de standards vitesses radiales et constitue une part importante du budget.

En résumé :
- ***Deux types d'instruments spectroscopiques sont particulièrement souhaitables pour le retour scientifique de GAIA (avec une priorité pour le premier) :***
(i) Spectrographe haute résolution sur un télescope avec un champ de 0.5-1 deg^2 pour obtenir des abondances précises sur les étoiles observées par le RVS de Gaia.
(ii) Spectrographe à résolution moyenne sur un télescope grand champ pour étendre le relevé RVS de Gaia en sensibilité avec pour objectif d'obtenir des vitesses radiales et des métallicités.
- Il faudrait maintenir les télescopes français de la classe 2m en état de fonctionnement pour une activité de recherche jusqu'à la fin de la mission pour des suivis au sol d'objets variables, de l'astrométrie CCS pour les observations de Gaia et les petits corps du système solaire, de la spectroscopie de moyenne résolution sur des objets jusqu'à V ~ 18, en particulier les quasars du nouveau système de référence primaire.

Les synergies «structurelles»

Nous avons mis de côté dans les discussions précédentes les synergies relevant plus de la structuration des communautés, des moyens humains, des centres de données et des pôles thématiques. Nous les abordons ici.

Actions de structuration

*** Organisation de la communauté Physique Fondamentale :** le manque de pavage disciplinaire se fait durement sentir depuis la disparition du GREX. La proposition d'une action spécifique au contour bien défini (avec le soutien d'INP, IN2P3 et ST2I), qui préfigurerait un programme national, est fortement soutenue. Cette structuration devrait s'insérer dans une structuration européenne qui reste à définir (dans le contexte de la feuille de route discutée par le FPR-AT à l'ESA) : au niveau spatial, il est important que les projets envisagés dépassent les frontières géographiques.

*** Place/structuration de la communauté française « exoplanètes » :** le manque de représentativité de la communauté exoplanète, à cheval sur plusieurs instances et sous thème de plusieurs disciplines, s'est fait sentir. La redéfinition des contours des programmes nationaux PNPS et PNP, devrait améliorer la situation. Se pose cependant la question de réactiver le groupe de travail INSU 2006 afin de discuter de la prospective instrumentale française dans ce domaine (sous forme d'une action spécifique ou d'un groupe de travail).

*** Les sursauts gamma : interaction PNCG et GDR PCHE :** le suivi au sol des rémanences des sursauts gamma reste encore insuffisamment développé dans la communauté française, en particulier dans la perspective de SVOM. Il faut donc encourager les efforts dans cette direction. Un exemple encourageant est le démarrage en 2009 d'un GDRE (GDR européen) France/Allemagne/Italie sur ce thème. L'utilisation des sursauts gamma comme traceurs de l'Univers lointain (galaxies hôte, IGM) est un thème plus récent, qui déborde du domaine relevant du GDR PCHE pour se rapprocher de celui du PNGC. Un effort est nécessaire pour rapprocher les communautés concernées, dans la perspective de SVOM bien sûr, mais aussi de l'exploitation scientifique d'XSHOOTER sur le VLT.
* La communauté française est fortement investie dans l'étude de **l'accélération de particules** et participe activement à de nombreuses missions du sol et de l'espace. La compréhension de l'accélération requiert non seulement des études photoniques multi-longueur d'onde, mais ouvre également la voie à une astronomie multi-messager utilisant les Rayons Cosmiques et les neutrinos. Ces thèmes, communs à l'INSU et l'IN2P3, relèvent du GDR PCHE. Il est d'une part important de renforcer la synergie entre les observations gamma de haute et très haute énergie et celles du domaine radio, infrarouge-optique et X. Cela demande un rapprochement des communautés concernées, notamment motivé par la préparation de la pleine exploitation des données de l'observatoire CTA. L'accélération et le transport des particules chargées sont intimement liés au milieu interstellaire qui lui même subit l'impact des rayons cosmiques. Un renforcement des liens avec le programme national PCMI est à favoriser. D'autre part, il faut encourager la dynamique d'astronomie multi-messagers qui est en développement. Une évolution du GDR PCHE en programme national serait souhaitable pour permettre une meilleure structuration et visibilité de la communauté nationale.

Les pôles thématiques et centres de données

*** physique fondamentale :** Le contexte change avec le démarrage réussi de T2L2, la confirmation du programme ACES sur Pharao, et les lancements programmés de LISA-Pathfinder (2011) et de Microscope (2013-2014). Dans ces conditions, une réflexion sur les besoins dans le domaine du traitement des données doit être conduite rapidement.

Spatial, synergie et comparaison sol/espace

*** L'énergie noire :** L'initiative DADA (DArk DAta) a démarré en 2009. C'est une phase 0 CNES qui a pour but de dimensionner le projet de centre et de traitement des données énergie noire espace et sol : besoin en processing des données sol+espace, en archivage, besoins en calculs pour analyse scientifique conjointes des sondes, besoins en infrastructure et opération. Ce projet fut proposé à l'initiative des équipes nationales impliquées dans les expériences spatiales JDEM et Euclid. Mais il a vocation à cristalliser, fédérer et coordonner les actions autour du traitement et de l'analyse des très grands projets énergie noire de la décennie. Il est important que le projet DADA s'élabore progressivement et sans précipitation et qu'il puisse accueillir et s'ouvrir vers toutes les propositions de contributions nationales.

*** Héliosphère : Importance des pôles thématiques :** Le CDPP a connu une évolution très importante : au départ centré sur l'archive des données plasma, il s'est aujourd'hui doté de nombreux service à valeurs ajoutées. Les données au CDPP sont plutôt des mesures *in situ*. Il sert également de base miroir pour les missions Themis et MMS, et participent à Europlanet pour les outils liés à l'observatoire virtuel. Le centre MEDOC est quant à lui centré sur l'imagerie spatiale : au départ SOHO, maintenant STEREO et autres missions. BASS2000 est en charge de l'archivage des données solaires sol françaises. Ce service d'observation a récemment évolué en mettant à disposition des outils et données de hautes valeurs scientifiques. Les 3 centres travaillent ensemble et évoluent vers l'observatoire virtuel. Nous encourageons les 3 centres à continuer à développer leurs synergies dans le respect de leurs particularités respectives.

*** Le Pôle sur la Dynamique Environnementale Terrestre (PODET) :** Un pôle d'activités et de ressources liées à l'environnement terrestre a été mis en place. Ce projet, porté par l'IMCCE, regroupe une unité de recherche et un centre de donnée dont les objectifs sont multiples : veille sur l'environnement spatial terrestre, modèles dynamiques, calculs d'orbite, restitution éphémérides. Le CNES a apporté son soutien au démarrage du projet. La pérennisation est à négocier entre le CNES, l'INSU, et l'Observatoire de Paris et à discuter dans le contexte du programme SSA/ESA (SSA = Space Situation Awareness) et de l'appel FP7 « Security of space assets from space weather events ».

*** Le « Data Processing and Analysis Consortium » Gaia :** La mission Gaia de l'ESA ne devra son plein succès qu'au traitement des données pris en charge par le consortium européen DPAC, dans lequel la communauté française a des responsabilités majeures. Elle est le premier contributeur au DPAC, avec environ 25% de l'effectif total. Le traitement complexe des données à la charge de la communauté scientifique requiert d'importants besoins humains. Le soutien du CNES (CDD) est crucial. Le support du CNES est aussi très massif en terme d'architecture, assurance qualité, ingénierie des sous-systèmes logiciels développés dans ces unités. Le DPAC semble être un bon exemple de ce qu'il faut faire ! L'AS Gaia joue son rôle et doit, bien sûr, être maintenue.

*** Un centre de données « Grandes longeurs d'onde » :** Dans l'IR moyen et lointain, le submillimétrique, la maîtrise du traitement des données est la clé de l'exploitation scientifique des données spatiales. La communauté française a une très grande expertise dans ce domaine (cf ISOCAM, Herschel, Planck/HFI) mais doit s'organiser pour coordonner ces compétences et moyens dans ce domaine pour les projets à venir. La coordination nationale requiert la présence de INSU/Universités (plan campus)/CEA/IN2P3.

Les questionnements de la communauté scientifique spatiale : quelques propositions

*** Recensement et mutualisation des moyens spatiaux**: Le périmètre des laboratoires spatiaux a considérablement changé dans les 10 dernières années. Dans ce contexte, il est urgent de recenser les moyens spatiaux en France et d'étudier d'éventuelles mutualisations.

*** Capacités spatiales spécifiques à la physique fondamentale :** Le besoin de capacités spatiales adaptées aux besoins spécifiques de la physique fondamentale se fait sentir et ne peut être satisfait par les laboratoires spatiaux existants. La réflexion doit être engagée rapidement si la France veut garder son avance dans le domaine de la physique fondamentale dans l'espace.

*** L'exploitation scientifique des missions spatiales :** Le CNES a toujours très fortement soutenue (post-docs, frais de missions) l'exploitation scientifique des missions spatiales avec participation française. Mais face aux nombreuses missions et besoins toujours croissants, d'autres sources de financement doivent être considérées. Nous avons encouragé les équipes à se mobiliser et se coordonner pour répondre à l'appel d'offre du FP7 qui comprenait l'exploitation des données spatiales (12 millions d'euros, appel SPACE-2010-1, date limite le 8 décembre). Une autre piste serait de discuter la création d'appels spécifiques ANR (ANR «Appels à projets») liés aux phases de traitement, d'exploitation et d'archivage des données spatiales.

*** Partenariat CNES/INSU :** Le besoin d'une coordination plus étroite CNES/INSU se fait sentir, notamment sur les besoins en personnel. Des réunions inter-organismes, incluant si besoin au cas par cas le CEA et l'ONERA, sont à réactiver. Les relations entre les 5 groupes de travail au CNES et les PN/AS demandent à être mieux définies. Le CNES a organisé en janvier 2009 une réunion très bénéfique avec les directeurs de laboratoires spatiaux (au sens très large). Nous encourageons le CNES à renouveler ce genre de réunion. Enfin, nous notons que suite à la prospective du CNES, un groupe de travail CNES, INSU, et CEA réfléchit à l'organisation de la recherche spatiale en France, en particulier dans le nouveau contexte de l'autonomie des universités et de la redéfinition des contours du CNRS. Un premier rapport est en train d'être rédigé. Il sera soumis et discuté au comité de la recherche spatiale à l'Académie avec l'ensemble des organismes.

Personnels et métiers

D. Alloin, V. Audon, R. Bellenger, A. Chardin, C. Guillaume, E. Le Coarer, J.-G. Cuby (coordinateur), M. Faurobert, P.-O. Lagage, J.-P. Michel, D. Rouan, P. Puget, M. Talvard, avec la participation de P.-A. Duc

Les laboratoires de la division A&A de l'INSU regroupent plus de 2 500 personnes, dont environ 800 chercheurs et 1 000 ingénieurs et techniciens sur emplois permanents, auxquels se rajoutent environ 350 personnels temporaires et autant d'étudiants. La proportion de femmes est d'environ 20% parmi les chercheurs, et 35% parmi les ingénieurs et techniciens, tous corps confondus, ce qui est très loin des moyennes nationales au CNRS (32% et 50% respectivement). Les agents CNRS représentent 40% des personnels chercheurs et enseignants-chercheurs, et 58% des personnels ingénieurs et techniciens permanents. Les procédures d'évaluation dépendent des appartenances statutaires, ainsi que les perspectives de carrière qui sont particulièrement difficiles pour certaines catégories de personnels.

L'évolution du contexte programmatique de notre discipline, avec moins de projets, mais de très grande envergure, renforce les besoins spécifiques envers certains métiers, ainsi que la spécialisation et la professionnalisation de certains d'entre eux. Il y a un besoin récurrent en chercheurs instrumentalistes qu'il faut traiter. Notre capacité à assurer la gestion technique des grands projets sera rapidement un enjeu de notre compétitivité dans le contexte international et fortement concurrentiel des grandes agences. Les métiers de l'administration requièrent de plus en plus de compétences élargies, dans un contexte de carrières particulièrement difficiles. Ces évolutions des métiers font apparaître des besoins nouveaux en formation spécialisée, et en mutualisation de compétences à envisager à différentes échelles.

Introduction

Les analyses de populations présentées dans ce rapport correspondent à une extraction de la base de données LABINTEL effectuée au printemps 2009. Le périmètre de l'analyse est indiqué en annexe. Il n'y a pas de périmètre idéal qui puisse refléter de manière précise les populations travaillant exclusivement pour la division Astronomie Astrophysique de l'INSU à partir d'un découpage en unités. Il existe des UMR fortement pluridisciplinaires qui relèvent de plusieurs instituts ou sections de l'INSU (par exemple LATMOS, UTINAM), et il en est de même de nombreuses UMS. Il y a également des chercheurs dont la section CNRS de rattachement est la section 17 et qui ne sont pas affectés dans des laboratoires du périmètre adopté (par exemple à l'APC, au LPP, ...). Il est également difficile de mener des analyses d'évolution des populations du fait de la transformation de certains laboratoires de la discipline et des changements de rattachement aux diverses divisions de l'INSU. Des données complémentaires à celles de LABINTEL (par exemple données de la section 17, du CNU et du CNAP) ont parfois été utilisées, et du fait que les données LABINTEL ne sont pas toujours toutes correctement renseignées, il ne faut pas chercher à croiser toutes les valeurs données dans la suite, ni à rechercher un niveau de précision meilleur que quelques pourcents.

Liste des abréviations

A&A	Astronomie et Astrophysique
AI	Assistant ingénieur
BAP	Branches d'activité professionnelle
CDD	Contrat à Durée Déterminée
CNAP	Conseil National des Astronomes et Physiciens
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CR	Chargé de Recherche. CR1 : première classe, CR2 : deuxième classe
CNU	Conseil National des Universités
DR	Directeur de Recherche. DR1 : première classe, DR2 : deuxième classe
E-ELT	European Extremely Large Telescope
HRA	Haute Résolution Angulaire
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
IE	Ingénieur d'études
IR	Ingénieur de Recherche
IT	Ingénieurs, Techniciens
OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers
UMR	Unité Mixte de Recherche
UMS	Unité Mixte de Service
VLT	Very Large Telescope

Les personnels des laboratoires A&A, leurs métiers, leurs carrières

Analyse générale

Nous recensions mi-2009 environ 2 100 personnels actifs hors doctorants dans nos laboratoires, dont environ 800 chercheurs et un peu moins de 1 000 IT permanents. Le nombre de personnels non titulaires, incluant les post-doctorants, se chiffre à 350 environ, auxquels se rajoutent environ autant d'étudiants et une soixantaine de personnes en cessation d'activité, essentiellement des chercheurs dans le cadre de l'éméritat (Figure 1). Depuis 2003, le nombre de chercheurs permanents semble être stable. S'il est difficile de se prononcer sur l'évolution du nombre d'IT pour les raisons indiquées en introduction, nous constatons toutefois une diminution alarmante du nombre d'IT du CNRS sur la période 2004-2008 au cours de laquelle notre discipline a perdu environ 30 agents.

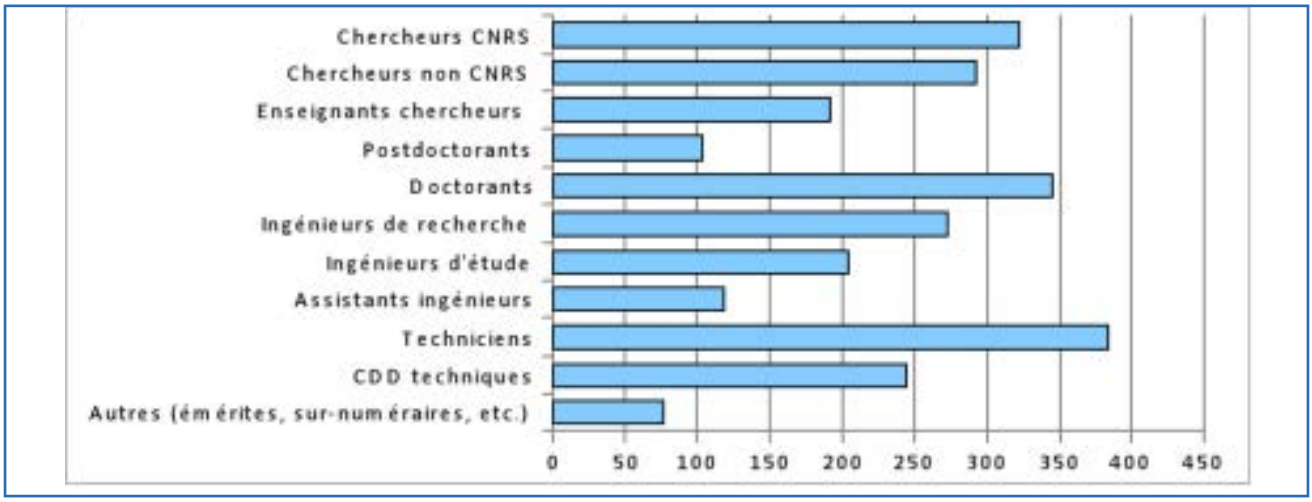


Figure 1 Répartition des personnels A&A par statut et/ou par corps, tous statuts confondus

Le rapport IT/chercheurs

Le rapport IT sur chercheurs est de ~ 1,2 en ne considérant que les personnels permanents. Il est sensiblement supérieur (1,35) si l'on inclut les personnels temporaires hors doctorants. La valeur de ce rapport est semblable à celle de l'ensemble du CNRS où le poids de la partie administrative (siège, délégations régionales) est important ; si on se limite aux seuls personnels CNRS, ce ratio est encore plus élevé. Le nombre d'IT dans notre discipline est donc important, ce qui s'explique bien entendu par la très forte technicité de notre discipline et le poids important des développements sur projets.

Emplois permanents et temporaires

Un changement important depuis la dernière prospective aura été l'apparition de l'ANR dont un des effets les plus visibles est l'accroissement du nombre de post-doctorants dans les laboratoires. Le potentiel de recherche s'en trouve accru, plus encore que le potentiel de développement des projets qui saturent déjà le personnel technique et administratif. L'accroissement de personnels temporaires est rarement accompagné par un accroissement des capacités d'accueil et de gestion des laboratoires, ce qui peut soulever localement des difficultés non négligeables. Quant aux étudiants, nous en accueillons environ une centaine par an. Au total, les étudiants et les post-doctorants constituent environ un tiers des effectifs totaux des personnels chercheurs.

La fraction de personnels temporaires chez les IT est également importante, de l'ordre de 20%. L'emploi temporaire est une variable d'ajustement utile dans la gestion des plans de charge des laboratoires soumis aux aléas des développements instrumentaux, y compris pendant les phases de R&D ; toutefois, au-delà d'un certain seuil, l'accroissement des emplois temporaires au détriment des emplois permanents devient dangereux pour la maîtrise des projets et la pérennité de l'expertise des laboratoires. Il est de ce point de vue absolument essentiel que notre discipline puisse renouveler ses IT. Il en va à moyen terme de notre capacité à développer des instruments pour les grandes agences, et de notre compétitivité sur le plan international.

Répartition géographique

La Figure 2 montre la distribution géographique des personnels A&A en France. Les effectifs sont distribués par moitié entre la région Ile-de-France et la province.

Personnel handicapé

Le CNRS ne remplit pas l'obligation statutaire d'emploi de 6% de personnes handicapées et doit s'acquitter chaque année de lourdes pénalités financières. C'est pourquoi, un plan triennal de développement de l'emploi et d'insertion des personnes handicapées a été signé en 2007. Ce plan triennal prévoit, dans le cadre d'une campagne annuelle, le recrutement de scientifiques (depuis 2008) et de personnels techniques (depuis 2004) handicapés. Les recrutements se font sur la base d'un CDD d'une année donnant lieu à titularisation à l'issue de cette période. Depuis 2008, quelques postes sont également réservés pour l'accueil de doctorants et de post-doctorants handicapés. Entre 2004 et 2008, 16 IT ont ainsi été recrutés dans 13 laboratoires relevant de l'INSU (dont 63 % dans des unités A&A). Les unités doivent être sensibilisées à la nécessité de recrutement des handicapés et aux possibilités offertes par cette filière de recrutement, en tenir compte lors de leurs demandes de moyens, et informer l'INSU lorsqu'elles ont connaissance d'un candidat handicapé dont le profil correspond à une de leurs demandes.

Diversité des statuts

Les divers statuts dans les laboratoires sont une source d'enrichissement et de diversité, et ils répondent à une réalité des besoins, par exemple pour ce qui concerne les tâches de services qui font partie des obligations statutaires des chercheurs du CNAP. Toutefois, cette diversité peut aussi être source de difficultés. Elle s'accompagne de disparité dans les salaires (par exemple entre personnels CNRS et CEA), dans les promotions (un passage Astronome au CNAP est plus facile qu'un passage DR au CNRS), et dans les possibilités d'accession aux primes (prime informatique réservée aux informaticiens de laboratoires labellisés). Ces disparités sont des sources potentielles de revendication et représentent un aspect non négligeable de la gestion des ressources humaines au sein des unités.

Les personnels chercheurs

La pyramide des âges et les recrutements

La pyramide des âges des personnels chercheurs est représentée

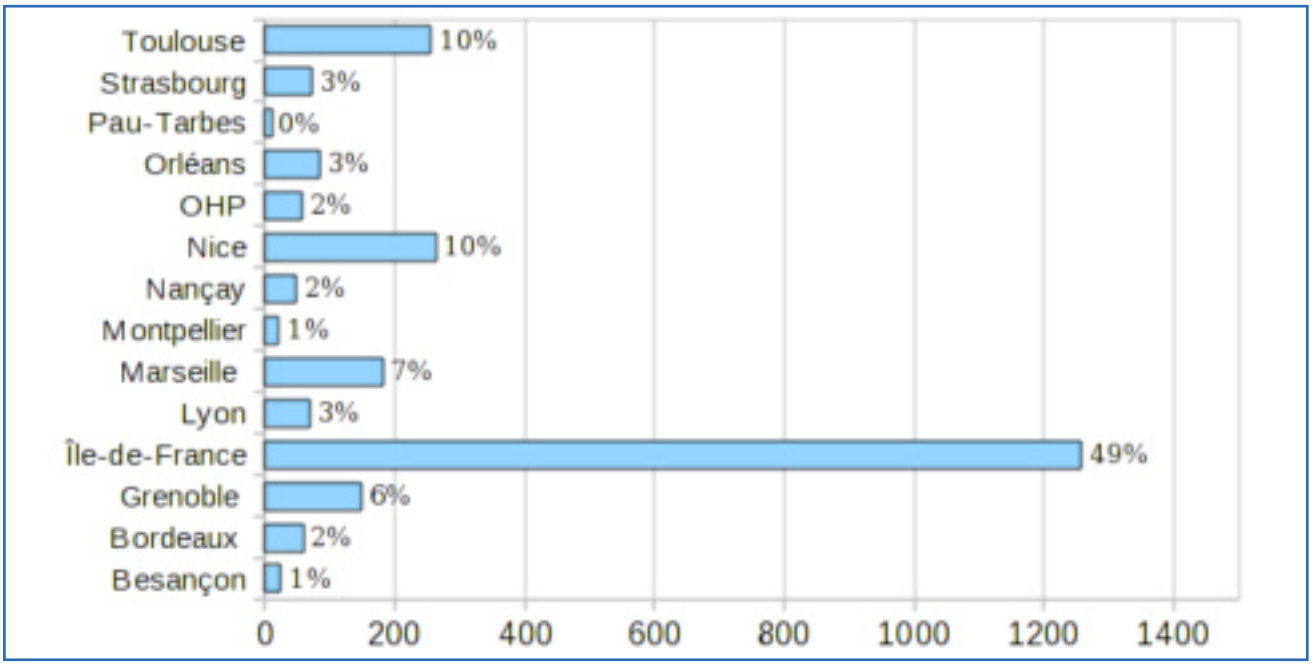


Figure 2 – Répartition géographique des personnels A&A en France, tous personnels confondus, permanents et temporaires. Comme indiqué en annexe certains sites peuvent être sur ou sous représentés du fait du périmètre des laboratoires adopté pour l'analyse.

Figure 3. Elle est légèrement bimodale, avec un fort pic 'jeune' autour de la tranche d'âges 41 à 45 ans, ce qui est une bonne chose pour notre discipline. L'autre pic vers la tranche d'âge 61 à 65 ans indique que nous devons continuer à faire face à un nombre important de départs à la retraite, tous corps confondus, dans les cinq années à venir (de l'ordre d'une vingtaine par an). Ce fort taux de départ à la retraite risque d'être difficilement compensé par les recrutements, même si en 2009 le nombre de recrutements de chercheurs dans la discipline a été exceptionnellement élevé, grâce à un fort taux de recrutement dans les universités (7 postes au CNAP, 9 postes au CNRS après le redéploiement des postes initialement réservés au programme des chaires d'excellence, et enfin 11 postes de maîtres de conférences dans les Universités). La diminution continue du nombre de chercheurs CNRS relevant de la section 17 du Comité National est un souci important pour notre discipline qui a besoin d'une stratégie nationale forte, s'appuyant sur le Comité National et le CNAP, pour le développement et la gestion des grandes infrastructures de recherche. Il est donc important de maintenir un taux de recrutement des chercheurs CNRS qui compense les départs à la retraite.

Les corps, les grades, les carrières chez les chercheurs

La Figure 4 montre la distribution des personnels chercheurs par corps, grade et genre. Il s'agit d'une vision intégrée, qui ne reflète pas la situation à un instant donné des possibilités de promotions offertes dans chacun des corps et pour lesquelles il existe des différences notables selon les statuts. On pourra consulter avec profit les bilans des sections passées du CNRS et du CNAP qui

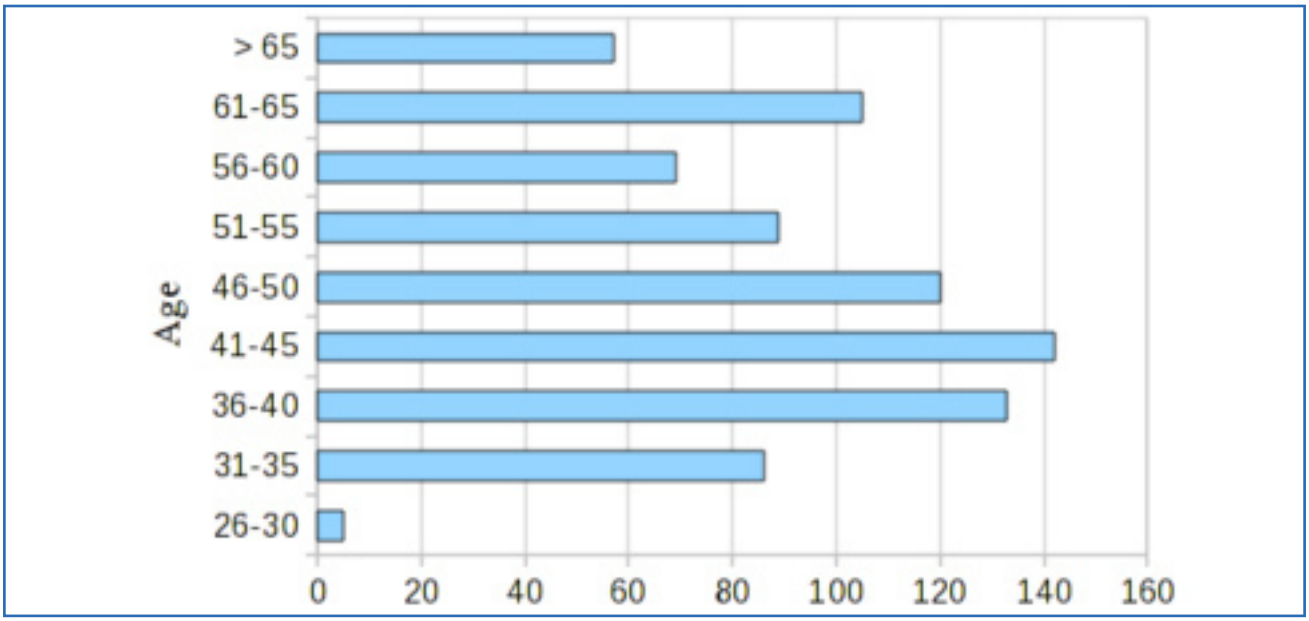


Figure 3 – Répartition des personnels chercheurs par tranches d'âge

donnent des éléments quantitatifs sur les carrières dans leurs corps respectifs[1]. Les difficultés sont particulièrement sensibles au CNRS (CR1 vers DR2 ou DR2 vers DR1). A titre d'exemple, à raison de 8 recrutements DR2 par an, il faudrait 18 ans pour promouvoir la population actuelle (en nombre) de CR1. De la même façon, le nombre de promotions DR2 vers DR1 est très insuffisant (moins de 3 en moyenne depuis le début des années 1990) et se traduit par une accumulation au niveau DR2. La situation au CNU est également très difficile. Le taux de pression sur les recrutements au niveau professeur est de l'ordre de 5 postes pour 100 maîtres de conférences, comparable au taux de pression sur les postes DR au CNRS. L'accroissement du nombre de promotions au CNRS en 2010 est encourageant, bien qu'encore insuffisant, et demanderait surtout à être poursuivi dans les années à venir.

1 https://section17.oca.eu/twiki/bin/view/Main/BilansS17 ; http://cnap.obspm.fr/BilanSectionAACNAP.pdf

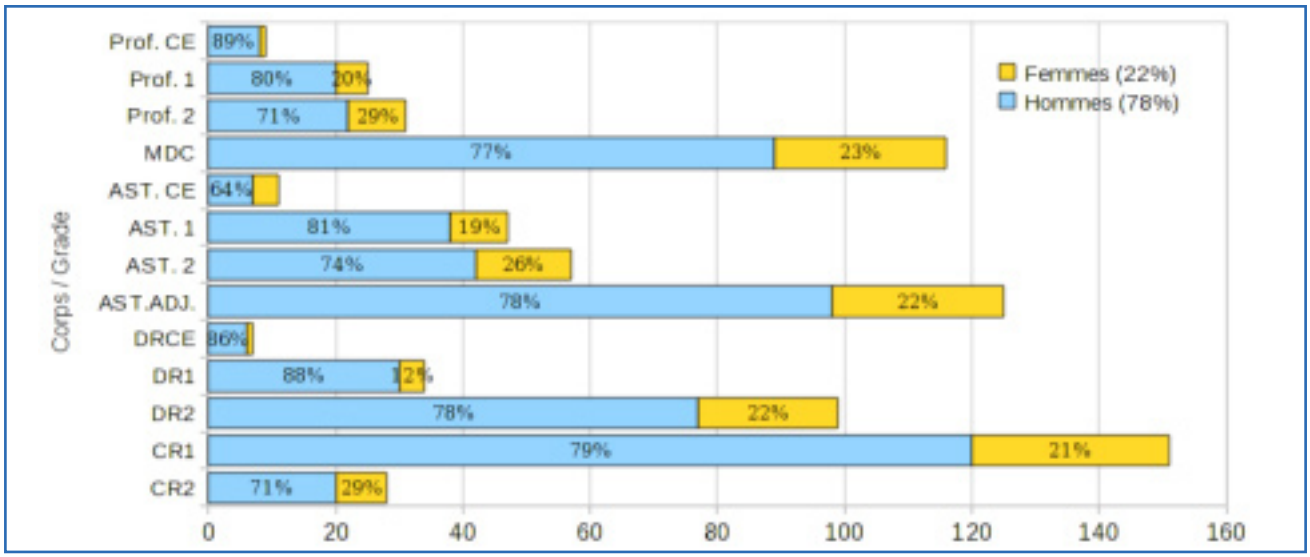


Figure 4 – Répartition des personnels chercheurs par corps, grade et genre. Les éléments sont issus des recensements des personnels gérés par la section 17 du CNRS, par la section A&A du CNAP et par la section 34 du CNU. Les totaux peuvent différer légèrement de ceux issus de Labintel, et les personnels CEA et statuts divers ne sont pas inclus dans l'analyse.

Chercheuses, chercheurs

Au total, la proportion de femmes chez les chercheurs est de ~ 20%, un chiffre qui semble rester stable au cours du temps depuis les années 80. Ce pourcentage varie selon les statuts des personnels, de ~ 12% au CEA où il est le plus faible à ~ 23% au CNAP où il est le plus élevé, légèrement supérieur aux ~ 20% rencontrés dans notre discipline au CNRS et au CNU. Ce pourcentage de 20% est très sensiblement inférieur au pourcentage national de chercheuses au CNRS (31%), inférieur à celui des sciences de l'Univers (26%), mais légèrement supérieur à celui de la physique (18%)[2].

On invoque souvent une moindre attractivité des études de physique pour les jeunes filles, ce qui expliquerait une partie du problème et le situerait en amont de la seule filière Astronomie et Astrophysique. Néanmoins, le pourcentage de femmes préparant un doctorat ou en séjour postdoctoral en A&A est de l'ordre de 28%, soit sensiblement plus que le taux de recrutement aux concours. Ceci semble avoir été globalement le cas au niveau du CNRS entre les années 2003-2006[3]. La section 17 précédente a également constaté une diminution du pourcentage de femmes parmi les candidats aux concours (pourcentage passé de 21% à 18% au cours du mandat 2004-2008), tout en réussissant à maintenir un taux de recrutement de 24%. Que le phénomène soit général ou pas, il y a clairement dans notre discipline une évaporation de candidatures féminines au cours des années suivant l'obtention de la thèse. Ce ne sont donc plus seulement les études supérieures en physique qui seraient responsables de cet état de fait, mais également une moindre attractivité de la profession pour les jeunes femmes docteur.

Diverses hypothèses ont été avancées pour expliquer cette situation : difficultés à concilier une succession de séjours post doctorants avec vie familiale et maternités, dégradation de l'atmosphère de travail dans les laboratoires de la discipline, compétition accrue, surcharge de travail et d'activités managériales, individualisation excessive et dommageable au travail en équipe et aux échanges, etc. La réaction et l'adaptation à ces facteurs sont probablement différentes selon le genre. Si elle se poursuit, la stagnation du nombre de femmes dans notre discipline ira à l'encontre de l'attente de la société et des recommandations de nos gouvernements qui préconisent une plus grande implication des femmes dans la recherche européenne, et à l'encontre de la spécificité française en astronomie où la mixité était plutôt plus favorable que dans de nombreux autres pays. Elle a aussi des implications sur le futur de notre discipline, car la diversité des approches en recherche, en partie produite par la dualité de genre, est un facteur important de créativité.

Notre discipline doit donc s'interroger sur la situation de la parité en son sein, sur les raisons de la faible proportion de chercheuses dans notre discipline, et sur les raisons d'une éventuelle dégradation de la situation. **Nous recommandons de conduire une enquête « sociologique » sur la question de la parité dans notre discipline.**

Pour ce qui concerne les promotions et les évolutions de carrière, la photographie de la répartition par genres en 2009 indique une situation (a) équilibrée au CNAP (à tous les grades), (b) favorable

2 http://www.cnrs.fr/mpdf/IMG/pdf/2006_PlacedesFemmes.pdf
3 http://www.cnrs.fr/mpdf/IMG/pdf/2006_PlacedesFemmes.pdf

aux femmes au CEA (mais avec une proportion globale de femmes nettement inférieure aux trois autres corps et un poids statistique moindre en raison du petit nombre), (c) proche de l'équilibre au CNRS (sauf en ce qui concerne la promotion sur les plus hauts grades DR1+DRCE où l'avantage masculin[4] reste anormalement élevé), et (d) un peu éloignée de l'équilibre au CNU où l'avantage masculin est notable.

L'évaluation des chercheurs

L'évaluation des chercheurs faisant parfois l'objet de débats, il est bon de rappeler les faits, et nous résumons ici les procédures d'évaluation statutaires des chercheurs selon leurs corps d'origine :

Evaluation des chercheurs CNRS

Les chercheurs CNRS sont évalués tous les 2 ans : ils soumettent un rapport d'activité quadriennal à l'occasion de l'évaluation de leur laboratoire de rattachement, ainsi qu'un rapport d'activité biennal à mi-parcours. Cette évaluation, effectuée par la section 17 au cours de sa session de printemps, permet de suivre de manière très précise et constante le travail des chercheurs. Les chercheurs sont informés des résultats de cette évaluation. Notons au passage que la section 17 du CNRS actuelle (mandat 2008-2012) est composée de 8 membres non CNRS sur les 18 chercheurs de la section, ce qui infirme les allégations d'autoévaluation des chercheurs du CNRS avancées par certains. Cette évaluation conduit à des avis de la section, favorables, réservés ou d'alerte dans le cas d'une productivité scientifique insuffisante. Ce mécanisme permet d'identifier les (rares) cas délicats, et souvent de les résoudre après intervention de la Direction des Ressources Humaines du CNRS. Les demandes de promotion et de changement de corps sont une autre source évidente d'évaluation, d'autant que les promotions étant rares, les candidatures peuvent se répéter de très nombreuses fois. Ceci se traduit *de facto* par une évaluation quasi-annuelle pour de très nombreux chercheurs du CNRS.

Evaluation des chercheurs CNAP

Les missions du corps incluent travail de recherche, tâches de service et enseignement[5]. Les personnels sont évalués tous les quatre ans par le CNAP lors de l'examen de leur unité de recherche par l'AERES. Chaque Astronome ou Astronome-Adjoint doit alors remplir une fiche d'activité qui est calquée sur celle du dossier quadriennal des agents CNRS mais qui comporte en plus un volet sur les tâches de service. Les personnels concernés ont en général une discussion avec le représentant du CNAP nommé dans le comité d'évaluation. La section du CNAP procède à l'évaluation des dossiers lors d'une session annuelle dédiée, en se basant sur des critères spécifiques à chacune des trois missions du corps. Un message individuel est élaboré par la section (restreint aux membres A pour les Astronomes) et transmis au chercheur concerné ainsi qu'à son directeur d'établissement. Les avancements de grade sont examinés tous les ans, sur la base d'un dossier plus détaillé que la fiche quadriennale et qui reprend les trois missions du corps.

Evaluation des chercheurs CNU

La réforme du statut des enseignants-chercheurs, dont un des objectifs est précisément l'évaluation, est trop récente pour qu'il soit possible d'en dresser un bilan.

Entretiens annuels

Dans divers organismes de recherche, en France, en Europe ou à l'étranger, il est d'usage (et souvent statutaire) de conduire un *entretien annuel* avec chaque chercheur. L'objectif d'un tel entretien est de faire le point sur l'avancement des projets de recherche, sur les résultats obtenus (cela permet de dégager éventuellement des faits marquants pour le laboratoire) et les difficultés rencontrées dans la réalisation des projets. C'est aussi l'occasion pour chaque chercheur d'établir une projection à quelques années et, pour le/la directeur/trice d'affiner la prospective du laboratoire en fonction des plans de chacun. Cet exercice est à dissocier de celui effectué à l'occasion des rapports d'activité rédigés par les chercheurs CNRS ou CNAP (voir ci-dessus), qui est préparé de manière individuelle, par écrit, et pas forcément annuellement selon les corps. La forme orale d'un entretien annuel permet l'apport d'informations complémentaires de celles fournies dans un rapport écrit : mieux situer les activités du chercheur dans le laboratoire d'accueil, apprécier la qualité et la quantité de ses apports au groupe, entendre ses besoins et ses aspirations, parler de son évolution de carrière. Il devrait donc être bénéfique aux deux parties, le chercheur et la personne représentant les intérêts du groupe (le/la directeur/trice du laboratoire pouvant déléguer cette fonction à une autre personne). C'est sur ce modèle qu'a lieu l'évaluation annuelle des personnels au CEA. **Nous suggérons que de tels entretiens annuels des chercheurs soient progressivement instaurés dans les laboratoires de la discipline.**

Les personnels IT

La pyramide des âges IT

La Figure 5 montre la pyramide des âges pour les personnels IT permanents, tous corps et statuts confondus. La pyramide est jeune, ce dont on ne peut que se réjouir. La volatilité du personnel IT est clairement plus grande que celle des chercheurs, surtout chez les jeunes. Cela se traduit par un taux de renouvellement relativement élevé chez les IT. L'emploi temporaire est souvent le seul recours pour pallier rapidement à un départ non planifié. Les départs en cours de carrière ou à la retraite peuvent amener des pertes de compétences dont le remplacement doit être préparé très en amont pour les profils à forte technicité, ce qui n'est pas possible pour les départs non planifiés.

Les corps, les grades, les carrières chez les IT

La Figure 6 montre la distribution des personnels IT par corps pour les personnels CNRS et non CNRS et la Figure 7 montre la distribution par branche d'activité professionnelle (BAP).

La répartition des IT selon leur corps d'origine (CNRS, Université, CEA) est très variable selon les laboratoires. La prédominance des techniciens au sein du personnel universitaire est générale et n'est pas propre à notre discipline. Notons que les agents universitaires peuvent avoir quelques tâches liées à l'accompagnement de

4 L'avantage masculin est défini comme le rapport de la proportion de directeurs de recherche ou équivalent parmi les hommes à la proportion de directrices de recherches parmi les femmes. Il est, dans notre discipline, de 1,06 pour le CNRS, 0,98 pour le CNAP, 1,22 pour le CNU et 0,64 pour le CEA

5 Voir document détaillé http://cnap.obspm.fr/missions95.html

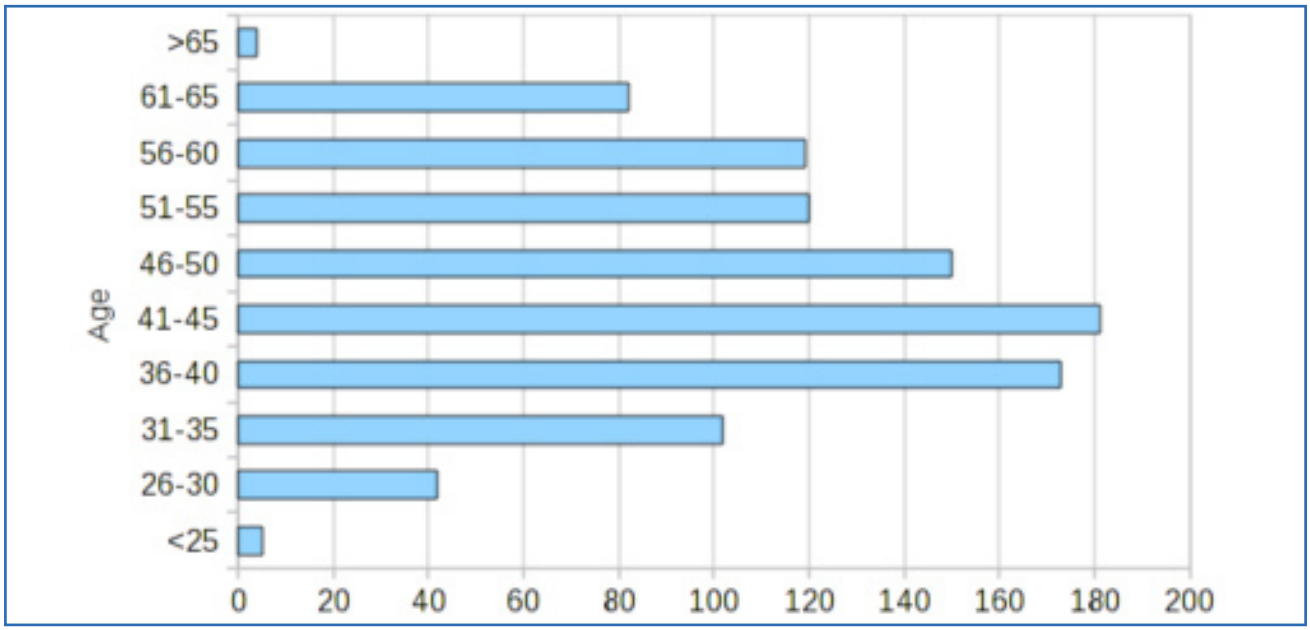


Figure 5 : Pyramide des âges des personnels IT permanents

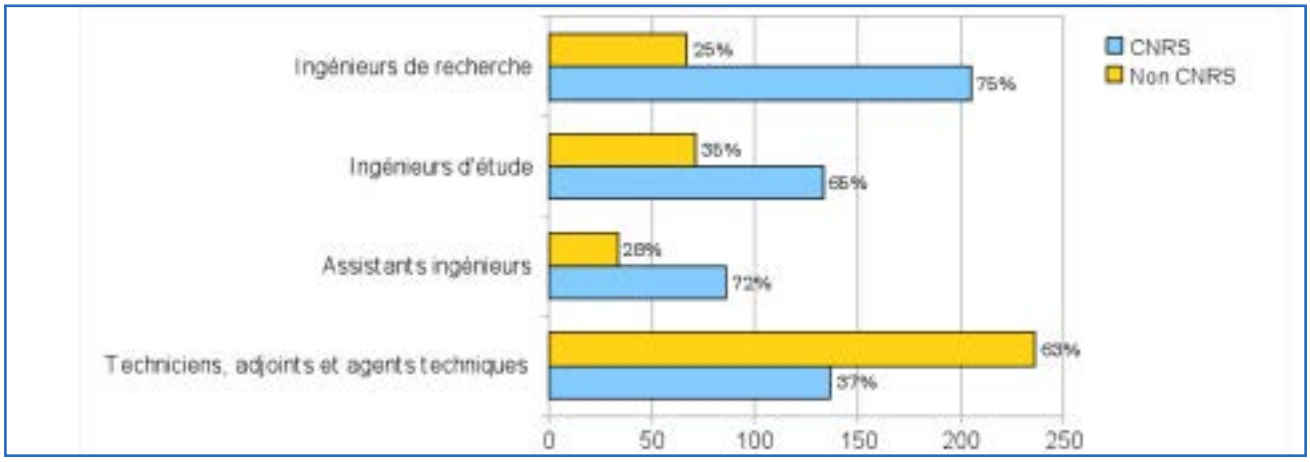


Figure 6 : Répartition des IT par corps pour le personnel CNRS et non CNRS.

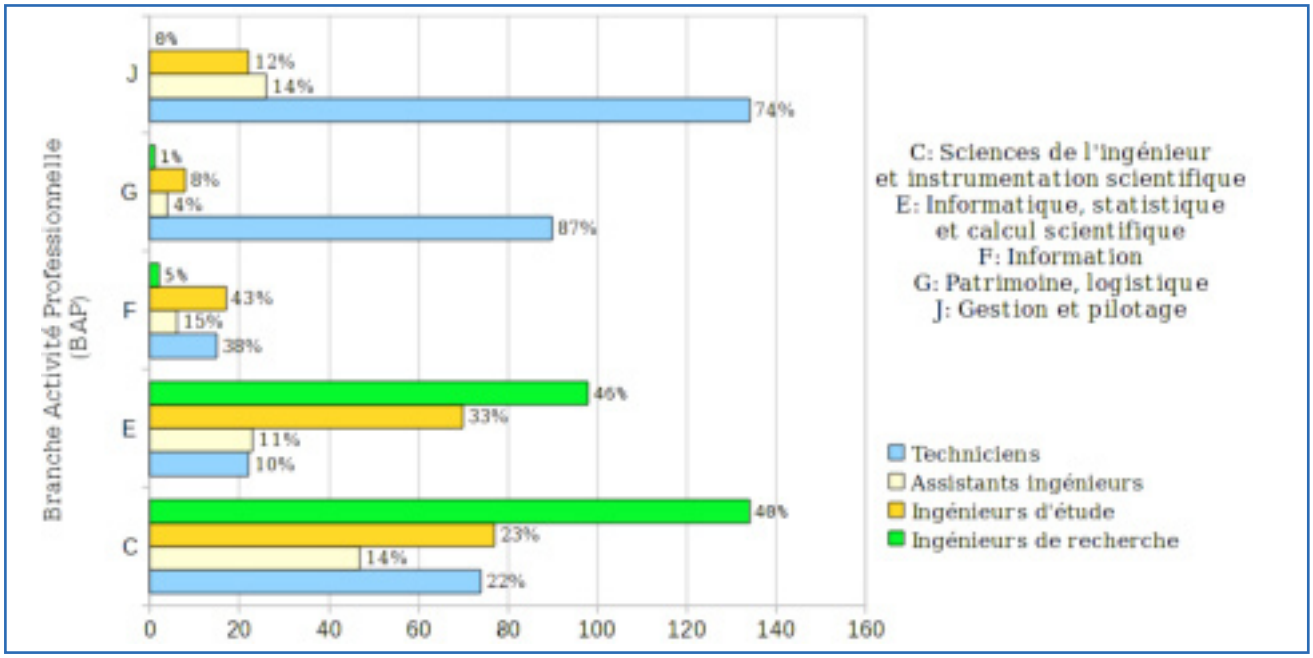


Figure 7 : Distribution des IT par BAP et par corps. Ne sont recensées que les personnes dont la BAP est renseignée dans Labintel, soit ~ 880 personnes sur un total de ~ 1 000 IT.

l'enseignement ou d'autres missions propres aux Universités.

La BAP C (instrumentation) est la BAP dominante, en particulier sur projets. Toutefois, le nombre d'agents relevant de cette BAP est inférieur au nombre d'agents relevant des BAPs E à J (à noter qu'une moitié environ des personnels de la BAP E est affectée à des projets). Les niveaux très qualifiés dans la BAP administrative sont rares, et ce en dépit d'une complexité croissante des tâches administratives (voir section « les métiers de l'astronomie »). Certaines fonctions administratives très qualifiées peuvent se concevoir dans un contexte de mutualisation (voir section « Mutualisation, centres de compétences »).

La situation des carrières des IT est dans l'ensemble très difficile. Les possibilités sont très variables selon les corps, et sont contingentées par BAP. Certaines catégories de personnel n'ont pratiquement aucune perspective de carrière, avec des taux de promotions de grade ou de corps de l'ordre du pourcent ou moins au CNRS, peut-être moins encore dans les Universités. Depuis 2 ans, le CNRS fait toutefois un effort sur le nombre de promotions au choix et sur concours, avec des taux de promotions (par rapport au nombre de promouvables) pouvant atteindre 10% pour les corps les plus durement touchés. La situation actuelle de blocage de carrières au CNRS ne sera résorbée que si cet effort se poursuit dans la durée. Du fait de la gestion nationale des promotions, il n'est pas possible de dresser un bilan propre aux laboratoires A&A de l'INSU. Quelques analyses au cas par cas suggèrent toutefois que notre discipline offre un bon tremplin pour les promotions de grades et/ou de corps au CNRS, en particulier au grade IR (BAP C). Il n'en demeure pas moins que la situation générale des carrières des agents IT au CNRS et dans les Universités reste globalement extrêmement difficile, une situation dont il ne faut cesser d'alerter les directions concernées.

Répartition par genre

La Figure 8 montre la répartition par genre des personnels IT permanents. La proportion de femmes dépend fortement du grade : 20% environ chez les ingénieurs de recherche, 33% chez les IE et AI et 46% chez les techniciens qui représentent la majorité des personnels administratifs dans les laboratoires. Il s'agit d'un phénomène général au CNRS. On notera que le pourcentage de femmes chez les IR est comparable à ce qu'il est chez les chercheurs.

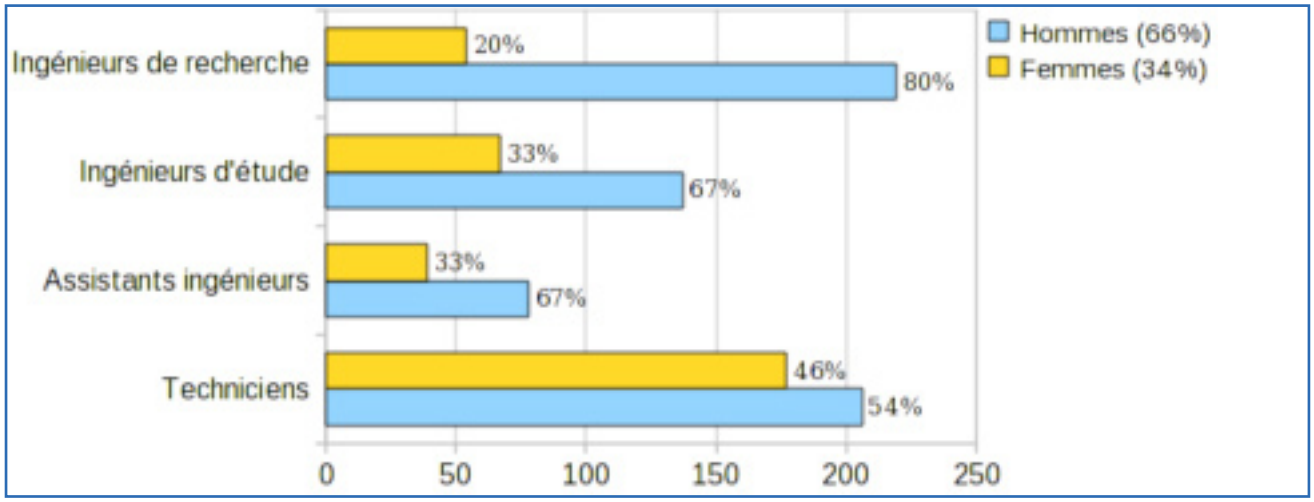


Figure 8 : Distribution par genre des IT.

L'évaluation des IT

La situation de l'évaluation des IT est symétrique de celle des chercheurs. Le suivi des carrières des agents IT se fait exclusivement au sein des laboratoires sous la forme d'un entretien annuel, en général avec le supérieur hiérarchique direct, à l'issue duquel un rapport est écrit. Dans certains laboratoires la procédure peut inclure en plus, des entretiens périodiques avec la direction du laboratoire. L'évaluation par des pairs extérieurs au laboratoire ne se fait que dans le cadre de concours internes ou externes ou de demandes d'avancement de grade ou de changement de corps. Ces demandes sont d'abord évaluées au niveau régional en délégation ou au sein des Universités avant d'être transmises à des commissions paritaires nationales ou académiques selon les corps.

Une expérimentation d'évaluation des ingénieurs et techniciens par les pairs a été menée en 2008 au CNRS suite à une recommandation du Conseil Scientifique du CNRS, mais cette expérimentation n'a pas été poursuivie. Le rôle de l'évaluation et des entretiens annuels dans les laboratoires demeure donc primordial, et nous rappelons ici l'aspiration des agents IT à être évalués sur une base pérenne et régulière par des commissions d'experts extérieurs à leurs laboratoires de rattachement ; le colloque a cependant signalé plusieurs écueils possibles et cette proposition mériterait d'être davantage instruite.

Les métiers

Les grandes évolutions

Le contexte programmatique de notre discipline évolue. Les projets techniques devenant de plus en plus ambitieux, ils s'internationalisent. L'accès à ces grands moyens de la discipline en devient plus réduit, que ce soit en temps d'observation ou en

opportunités pour y mener des développements techniques. Mais la quantité de données, leur complexité ainsi que celle des projets techniques se sont considérablement accrues dans le même temps. Si la quantité de travail n'a pas diminué, la qualité du travail à produire, elle, a augmenté. Ce contexte est particulièrement sensible aujourd'hui du fait que de nombreux laboratoires sont suspendus aux décisions à venir de l'ESO et de l'ESA sur les programmes E-ELT et Cosmic Vision.

Cette situation est très vraisemblablement conjoncturelle et ne devrait par perdurer ; elle a toutefois permis de mettre en valeur un certain nombre d'éléments qui resteront d'actualité dans un futur à moyen terme. Tout d'abord le fait que le poids des phases d'études, souvent compétitives, devient de plus en plus important. Ensuite, que la concurrence entre laboratoires, dans un contexte européen ou international, voire national, s'accroît. Enfin, qu'il apparaît une montée en puissance des aspects liés au traitement et à la mise à disposition des données, avec l'émergence de nombreux centres spécialisés dans cette activité.

Dans les faits, les programmes d'observation évoluent pour une grande part vers les grands relevés systématiques pouvant regrouper plusieurs dizaines voire centaines de collaborateurs, les simulations numériques astrophysiques requièrent les plus grands ordinateurs au monde, et les projets techniques deviennent de plus en plus complexes et d'une technicité accrue. Les incidences sur les métiers de l'astronomie en sont des besoins accrus en certains métiers (chercheurs instrumentalistes, chefs de projets, administration), en formation professionnalisante, et en mutualisation de compétences.

Les besoins en chercheurs instrumentalistes

Il s'agit d'un besoin affiché de manière récurrente par de nombreux laboratoires développant de l'instrumentation pour le spatial et/ou le sol. La présence dans les laboratoires de chercheurs instrumentalistes est en effet critique pour la réussite des projets. Le besoin recouvre deux types de profils : celui de scientifiques instrumentaux («instrument scientist») qui accompagnent les projets et les chercheurs en instrumentation faisant de la R&D amont, parfois dans un cadre projet mais plus souvent en dehors. Notons que cette définition est applicable autant aux projets instrumentaux au sens classique du terme qu'aux projets logiciels ou numériques. Les jeunes chercheurs ayant une thèse en instrumentation sont confrontés à diverses difficultés pour défendre leurs dossiers devant les jurys de concours. La bibliométrie est en général assez différente de celle des autres candidats. L'offre postdoctorale est limitée, et parfois peu compatible avec la très haute technicité et spécialisation du travail instrumental qui ont été développées au cours de la thèse. Certaines thèses instrumentales sont assorties d'un volet astrophysique, reposant souvent sur de la modélisation de données, ce qui peut permettre aux candidats de rééquilibrer leurs dossiers bibliométriques et faciliter l'obtention de séjours post-doctorants. La communauté HRA forme ainsi avec succès sur ce modèle plusieurs étudiants en thèse par an. Si cette méthode est efficace et a fait ses preuves, elle ne saurait être absolue ou exclusive. Il est important que des chercheurs avec des dossiers essentiellement instrumentaux puissent également être recrutés.

Si les concours d'ingénieurs de recherche sont une filière de recrutement possible pour les doctorants instrumentalistes, il ne peut ici non plus s'agir d'une filière exclusive, les fonctions et les attributions des ingénieurs de recherche et des chercheurs étant statutairement différentes au sein des laboratoires du CNRS[6] , engendrant de fait une assez forte différentiation entre les fonctions exercées par les uns ou par les autres. Ainsi, «instrument scientist» est un métier de chercheur, «ingénieur système» est un métier IT, et un chercheur a en général plus de facilités à initier des recherches ou des projets qu'un IT. Une autre difficulté pour les candidats instrumentalistes, et visiblement une source de découragement, semble également être l'absence de vision quant à la pérennité des politiques des jurys de recrutement vis-à-vis de leurs profils.

Nous recommandons donc que la section 17 et le CNAP se saisissent de la question du recrutement des instrumentalistes en affichant clairement et de manière pérenne leurs politiques et leurs critères de recrutement.

Les besoins en gestions de grands projets

Notre communauté a une tradition et une réputation fortes en instrumentation, pour le spatial comme pour le sol, comme en témoigne le rôle prépondérant que nous avons joué pour l'instrumentation VLT ou que nous jouons dans les études E-ELT ou Cosmic Vision. Il est important que la prise de responsabilité scientifique du développement instrumental puisse être accompagnée d'une prise de responsabilité au niveau de leur gestion technique. La nature des grands projets de la discipline, leur internationalisation, et leur mise en compétition accrue font apparaître des besoins renforcés, à défaut d'être nouveaux, en gestion de projet, ingénierie système et qualité. La part de la gestion dans les grands projets peut atteindre 20%, voire plus comme dans les grands projets technologiques industriels. Il y a dans nos laboratoires peu de véritables professionnels formés à ces métiers, lesquels sont le plus souvent occupés par des ingénieurs spécialisés (optique, mécanique, etc.) ayant développé leur expérience à ces fonctions sur des projets antérieurs. Si cette formation 'sur le tas' s'avère efficace et souvent suffisante, la présence de véritables professionnels de formation permettrait sans doute de renforcer notre compétitivité sur les grands projets, particulièrement dans le contexte international et hautement compétitif des grandes agences. Il restera alors à trouver la meilleure déclinaison de cette expertise entre le niveau local des laboratoires et des OSUs, le niveau régional et le niveau national. ***Nous recommandons que l'INSU, en relation avec les laboratoires concernés, élabore une politique de développement des métiers liés à la gestion des grands projets.***

Les métiers de l'administration

Une forte évolution se fait également sentir dans les métiers de l'administration. Le contexte évolutif actuel (les multiples réformes qui se succèdent depuis plusieurs années), l'apparition de l'ANR, les tutelles multiples, l'accroissement des procédures liées aux contrats européens, ainsi que l'accroissement de la

6 Contrairement au CEA où le corps unique permet précisément de lisser cette différence et de régler par la même occasion la question du recrutement des chercheurs instrumentalistes.

taille des projets et leur internationalisation, demandent un suivi administratif de plus en plus complexe et spécialisé. Le relais n'étant pas toujours pris par les délégations régionales, il incombe souvent au personnel administratif des laboratoires de régler les situations nouvelles sans formation préalable adéquate ce qui se traduit par une augmentation significative de la charge de travail et constitue souvent un frein à l'efficacité de la recherche. Les grands projets par exemple soulèvent des questions d'ordre juridique, une utilisation accrue de l'anglais, et autres tâches auxquelles le personnel administratif n'est pas forcément formé. L'offre de formation ne suit pas, et l'évolution des carrières est nulle. La question de l'évolution et de la complexité des métiers de l'administration a d'ailleurs conduit à une réflexion au niveau national sur les moyens d'harmonisation des tâches administratives et des procédures de gestion. Des tentatives d'harmonisation entre les différentes tutelles des laboratoires sont actuellement expérimentées dans quelques Etablissements.
Un des éléments de réponse, outre la nécessaire revalorisation des métiers de l'administration, serait de créer des réseaux de compétences, qui n'existent pas pour l'administration contrairement aux réseaux technologiques. Notons que de tels réseaux existent dans certaines délégations régionales mais pas au niveau national. L'INSU est un excellent vecteur pour initier de tels réseaux, de par sa forte insertion dans un contexte international et de relations avec les grandes agences (CNES, ESA, ESO, ...). L'INSU a d'ailleurs organisé dans le passé des rencontres entre administrateurs qui ont été très fructueuses pour les participants. ***Nous recommandons que l'INSU propose au CNRS la mise en place d'un ou de réseaux administratifs (réseaux d'administrateurs, de gestionnaires) et de formations spécifiques aux évolutions des métiers administratifs.***

Professionnalisation, spécialisation et formation

Une conséquence de l'évolution vers de très grands projets est la spécialisation et la professionnalisation de certains métiers. Au-delà des métiers directement liés à la gestion des projets dont il a été question plus haut, cette évolution est générale et peut s'appliquer à l'ensemble des métiers techniques. Les métiers liés aux grands projets numériques, ou d'une façon générale au développement logiciel, en sont des exemples. C'est aussi le cas pour certains métiers de documentalistes travaillant sur bases de données, et dont la spécialité, pourtant une des voies d'évolution du métier de documentaliste, peine à être reconnue.

Le besoin d'une plus grande professionnalisation et spécialisation de certains métiers suggère d'accroître l'offre de formation. L'offre actuelle de l'INSU est davantage orientée vers les aspects scientifiques plutôt que techniques, et les offres de formation régionales (via les délégations) sont souvent généralistes. Les besoins en formations spécialisées remontent actuellement vers les délégations régionales au travers des plans de formation des laboratoires, mais disposer d'une vision transverse nationale permettrait d'avoir une meilleure vision des besoins, de mutualiser certaines de ces formations et d'en faire bénéficier l'ensemble de la discipline. ***Nous recommandons que l'INSU prenne un rôle actif dans la coordination de formations techniques spécialisées, comme c'est par exemple le cas à l'IN2P3.***

Mutualisation, centres de compétences

La mutualisation de certains gros moyens techniques, sur le modèle des plateformes technologiques, est relativement facile à mettre en œuvre, et permet des économies d'échelle importantes. De la même façon, la mutualisation pourrait-elle être une réponse, au moins partielle, aux besoins accrus en de nouvelles compétences qui ne peuvent être satisfaits partout et en même temps ?
L'INSU dispose, via les OSUs, de structures régionales qui permettent d'aborder la question de la mutualisation de compétences en des termes relativement concrets. Certaines compétences administratives, peu ou pas disponibles dans les délégations régionales, pourraient par exemple être mutualisées à l'échelle d'un OSU. Il en va bien sûr de même de certains métiers techniques. La mutualisation peut également s'envisager dans un cadre régional. On imagine volontiers une 'cellule Europe' (par exemple) à un échelon régional regroupant plusieurs OSUs et/ou laboratoires.

Au-delà de la mutualisation à un niveau régional, c'est une structuration de certaines thématiques qui peut être envisagée au niveau national. Du fait de la spécialisation accrue des compétences, ainsi que du développement de plateformes technologiques hautement spécialisées, on peut imaginer des centres de compétences régionaux où la notion de mutualisation prendrait tout son sens. Dans les faits, de tels regroupements thématiques régionaux (sur un ou deux pôles au niveau national) existent déjà dans certains domaines, comme par exemple celui de la haute résolution angulaire dans le visible (Grand Sud-est et Ile-de-France). Les projets de 'centres de données' en discussion dans de nombreux laboratoires sont une illustration de ce que pourraient être des centres de compétences. ***Nous recommandons que l'INSU, en relation avec les OSUs, entame une réflexion sur la création de centres de compétences nationaux.***

Résumé des recommandations

Sensibiliser les unités à la nécessité du recrutement de handicapés ainsi qu'aux possibilités offertes par cette filière de recrutement.

Conduire une enquête « sociologique » sur la question de la parité dans notre discipline.

Instaurer progressivement des entretiens annuels de chercheurs dans les laboratoires de la discipline.

Que la section 17 et le CNAP se saisissent de la question du recrutement des instrumentalistes en affichant clairement et de manière pérenne leurs politiques et leurs critères de recrutement.

Que l'INSU, en relation avec les laboratoires concernés,

élabore une politique de développement des métiers liés à la gestion des grands projets.

Que l'INSU propose au CNRS la mise en place d'un ou de réseaux administratifs (réseaux d'administrateurs, de gestionnaires) et de formations spécifiques aux évolutions des métiers administratifs.

Que l'INSU prenne un rôle actif dans la coordination de formations techniques spécialisées, comme c'est par exemple le cas à l'IN2P3.

Que l'INSU, en relation avec les OSUs, entame une réflexion sur la création de centres de compétences nationaux.

Annexe

Périmètre de l'analyse

Les analyses de populations présentées dans ce document se rapportent aux unités rattachées à la Division scientifique Astronomie – Astrophysique de l'INSU, telles qu'indiquées dans la Table 1.

Les données de l'UTINAM ont été corrigées au prorata du nombre de chercheurs rattachés à la division Astronomie Astrophysique. Les données LPCE n'ont pas été corrigées et compensent sans doute en partie l'absence du LATMOS et du LPP dans le périmètre – au détriment d'un léger déséquilibre régional.

Table 1 – Unités relevant de la division A&A de l'INSU retenues dans les analyses de populations.

Acronyme	Intitulé	Code
GRAAL	Groupe de recherche en astronomie et astrophysique du Languedoc	UMR5024
LPG	Laboratoire de Planétologie de Grenoble	UMR5109
CESR	Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements	UMR5187
LAOG	Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble	UMR5571
LATT	Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse-Tarbes	UMR5572
CRAL	Centre de Recherche Astronomique de Lyon	UMR5574
LAB	Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux	UMR5804
LAM	Laboratoire d'Astrophysique de Marseille	UMR6110
LPCE	Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement	UMR6115
Cassiopée	Laboratoire Cassiopée	UMR6202
UTINAM	Univers, Transport, Interfaces Nanostructures, Atmosphère et Environnement, Molécules	UMR6213
FIZEAU	Laboratoire Hippolyte FIZEAU	UMR6525
IAP	Institut d'Astrophysique de Paris	UMR7095
AIM	Astrophysique Interactions Multi-échelles	UMR7158
Strasbourg	Observatoire astronomique de Strasbourg	UMR7550
IMCCE	Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides	UMR8028
LUTH	Laboratoire de l'Univers et de ses THéories	UMR8102
LESIA	Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique	UMR8109
GEPI	Galaxies, Etoiles, Physique, Instrumentation	UMR8111
LERMA	Laboratoire d'Etude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique	UMR8112
IAS	Institut d'Astrophysique Spatiale	UMR8617
SYRTE	SYstèmes de Référence Temps-Espace	UMR8630
OBSPM	Observatoire de Paris	UMS2201
OCA	Observatoire de la Côte d'Azur	UMS2202
Gassendi	Département Gassendi	UMS2244
THEMIS	Télescope héliographique pour l'étude du magnétisme et des instabilites solaires	UPS853
OHP	Observatoire de Haute-Provence	USR2207
TBL	Télescope Bernard Lyot	USR5026
Nançay	Station de Radioastronomie de Nançay	USR704

Services d'Observation, évaluation et évolutions

N. Aghanim (coordinatrice), J-L. Beuzit, B. Bézard, O. Bienaymé, Ch. Jacquey, Y. Mellier, N. Meunier, M. Pérault et W. Thuillot.

En 1995, un premier texte d'explication détaille les missions du corps des astronomes en général et les tâches de service en particulier. Il propose la première structuration des Services d'Observation (SO) en six grands types fonctionnels, il apparaît que cette organisation est bien adaptée aux missions de service en astronomie-astrophysique. Cependant la diversification et l'enrichissement des services ont abouti à une certaine perte de lisibilité. Afin d'y remédier, il est proposé de clarifier le sens du concept de service ainsi que l'objectif de la labellisation et ses critères.

Les principales recommandations spécifiques à chaque service sont les suivantes. Pour le SO2 (instrumentation au sol des grands observatoires au sol et spatiaux), il faut redéfinir le service comme la capacité à réaliser ces moyens, s'appuyant sur un ensemble de plateformes sol et spatiales coordonnées par l'INSU, en liaison avec le CNES, le CEA et les universités concernées. Le sort du SO3 (Stations d'observation nationales et internationales) est lié à l'évolution du statut national des moyens d'observation. L'articulation entre SO4 (Grands relevés et sondages profonds) et SO2 doit être précisée, et clarifiée. Il faudrait se doter d'outils standardisés permettant de mesurer l'utilisation et l'impact des services dépendant de SO5 (Centres de traitement et d'archivage de données), et clarifier les liens existants entre les instruments et les activités de traitement et d'archivage des données associées. Enfin, il convient de redéfinir SO6 (Surveillance solaire, relations Soleil-Terre, environnement terrestre) en mettant l'accent sur la surveillance de l'environnement spatial de la Terre, avec les volets environnement radiatif et géocroiseurs.

Chacune des six catégories de Services d'Observation devra être coordonnée à l'échelle nationale. Il conviendra également de renforcer les relations entre le CNAP, l'INSU et les OSU, et de clarifier et homogénéiser le rôle national des Actions Spécifiques et des Programmes. Au-delà de l'astronomie et astrophysique, il sera souhaitable de renforcer la coordination avec les autres disciplines de l'INSU, les autres Instituts du CNRS. Enfin pour optimiser la définition et la mise en place d'une politique des SO, le suivi et l'évaluation des services au niveau national devront être assurés par un groupe ad-hoc spécifique de la CSAA.

Introduction

L'astronomie est structurée autour de ses moyens nationaux, des moyens internationaux et des grands projets de la discipline menés dans la majorité des cas à l'échelle internationale. Ces moyens sous-tendent la recherche scientifique dans les différents domaines de la discipline. Le document de référence de l'INSU sur les Services d'Observation stipule que la communauté est aussi « investie d'une **mission de service** qui consiste en l'observation systématique, éventuellement sur de longues périodes, des milieux naturels, afin de suivre leur évolution, la comprendre et la modéliser. » Un service d'observation est alors un «moyen d'accompagnement de la recherche ayant un caractère national et souvent international.» [...] « La plupart de ces moyens sont déployés sur des longues périodes (plusieurs décennies) ce qui nécessite de les associer à des structures plus pérennes que les laboratoires : c'est le rôle des Observatoires des Sciences de l'Univers. »

Le texte propose aussi une définition des responsabilités et domaines d'intervention de chacun des acteurs. Les Services d'Observation définis et soutenus par l'INSU dans le cadre de sa politique scientifique sont mis en oeuvre sous la responsabilité des OSU. Ces SO sont labellisés par l'INSU, sur proposition de la CSAA. La labellisation assure la cohérence nationale du dispositif qui est mis en œuvre au sein des OSU. Pour prendre en charge ces SO, il convient « d'identifier autour de ces moyens des tâches de service scientifiques, au bénéfice de l'ensemble de la communauté scientifique... C'est précisément un corps spécifique de l'Enseignement Supérieur qui est affecté à ces OSU pour effectuer, en accord avec leur statut, ces tâches de service scientifiques. Il s'agit du corps des Astronomes et Physiciens géré par le CNAP. » La section Astronomie-Astrophysique du CNAP est donc chargée de la gestion et de l'évaluation des personnels du corps, et de la mise en œuvre des jurys de recrutement. Elle contribue de fait au fonctionnement des SO et à leur mise en œuvre selon les recommandations de la CSAA.

Pour cet exercice de prospective, le groupe SO a eu pour mandat de revoir et évaluer, après une quinzaine d'années de fonctionnement, l'organisation actuelle des SO de la discipline Astronomie-Astrophysique. Le groupe a donc travaillé sur deux points principaux : un état des lieux et une cartographie des SO labellisés par l'INSU, et leurs perspectives d'évolution. Les conclusions et recommandations s'appuient sur une enquête sous la forme d'un questionnaire visant à faire l'inventaire des moyens affectés aux SO et à répondre à des critères d'évaluation, adressé aux responsables ou points de contact pour chaque service, ainsi que sur le questionnaire du CNAP relatif aux personnels. Les programmes nationaux (PN) ont aussi été sollicités.

Organisation des SO

L'ensemble des activités recensées dans le cadre des missions de service en Astronomie couvre la construction et l'opération d'instruments et des grands moyens d'observation et de surveillance astronomiques ; la production, la distribution et la maintenance de logiciels ; la production de grands relevés, de données d'observation ou de simulation ; la sauvegarde de données patrimoniales ; le développement d'outils d'archivage et de distribution des données et d'outils d'interrogation et de manipulation des grandes bases de données hétérogènes.

Ces missions de service, déclinées en un ensemble de moyens instrumentaux, de centres de traitement et d'archivage ou de bases de données que nous appellerons dans la suite du document services, sont organisées selon six catégories fonctionnelles de SO :

- Métrologie de l'espace et du temps (SO1)
- Instrumentation des grands observatoires au sol et spatiaux (SO2)
- Stations d'observation nationales et internationales (SO3)
- Grands relevés et sondages profonds (SO4)
- Centres de traitement et d'archivage de données (SO5)
- Surveillance solaire, relations Soleil-Terre, environnement terrestre (SO6)

Ce document présente une synthèse qualitative des réponses au questionnaire adressé à la communauté, à partir de laquelle nous avons proposé des recommandations générales, ainsi que des recommandations spécifiques à chaque type fonctionnel de SO, et des recommandations sur le pilotage des SO. Il fait part des réflexions du groupe sur les évolutions possibles des SO et de leur organisation en vue d'une meilleure structuration, d'un suivi et d'une gestion plus homogène, et d'une plus grande lisibilité. Il intègre aussi les discussions menées au cours de l'exercice de prospective.

Etat des lieux et Cartographie des SO

Nous avons dressé une cartographie des SO labellisés par l'INSU en nous appuyant sur une enquête. Une première étape a été de mettre à jour et de compléter la liste des services compilée par la section Astronomie du CNAP (2004-2007) suite à l'enquête de l'INSU au printemps 2005. Pour décrire la situation actuelle, nous avons choisi une approche « analytique », i.e. un découpage détaillé des SO faisant apparaître notamment chaque instrument aux foyers des télescopes.

Dans ces conditions, nous avons décompté 110 services toutes tailles confondues, dont 44% relevant de SO2 et donc relatifs à l'instrumentation des grands télescopes au sol ou dans l'espace. Ce grand nombre indique que la communauté est impliquée dans beaucoup de projets, notamment pour la construction d'instruments, avec un très fort impact en particulier dans les programmes européens et internationaux sol et spatiaux pilotés par l'ESA, l'ESO et les sociétés multi-nationales. L'adjonction relativement récente dans la liste des moyens instrumentaux de SO2 d'une série de projets en phase d'étude explique aussi, en partie, le grand nombre de services dans SO2. La granularité choisie pour notre analyse, l'échelle de l'instrument ou la base de données, est plus fine que ce qui permet de définir un service d'observation, mais elle est nécessaire pour dresser une cartographie détaillée des SO (ce qui était l'objectif du groupe de travail), et pour gérer les besoins et l'affectation des moyens. Une de nos recommandations spécifiques a pour objet d'améliorer la lisibilité de ce SO.

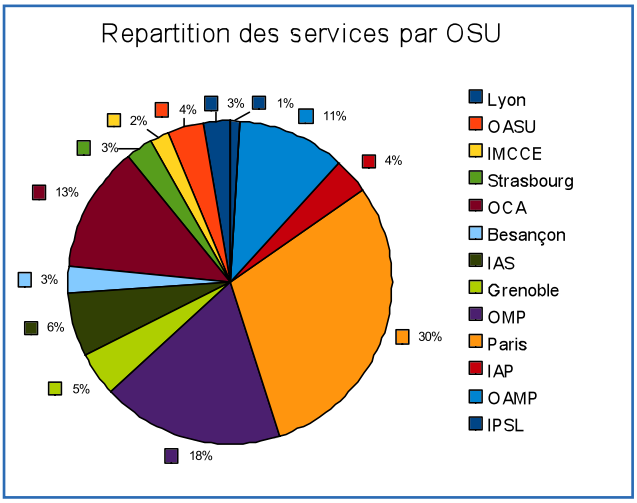
Le questionnaire, adressé aux responsables ou points de contact de chaque service, a été élaboré pour faire l'inventaire des moyens affectés et pour répondre aux critères d'évaluation suivants :

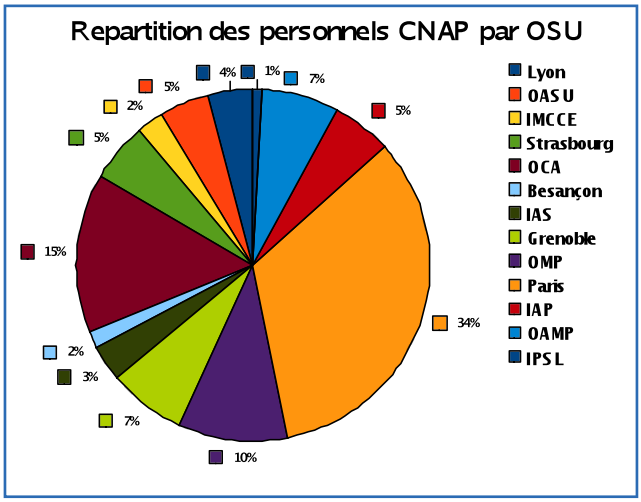
— cadre institutionnel,
— domaine d'application du service,
— produits ou services fournis (construction et opération d'instruments et des grands moyens d'observations et de surveillance astronomiques ; production, distribution et maintenance de logiciels et de codes communautaires ; production de grands relevés, de données d'observation ou de simulation ; sauvegarde de données patrimoniales ; outils d'archivage et de distribution des données ; outils d'interrogation et de manipulation des grandes bases de données hétérogènes),
— impact et visibilité (publications de rang A liées au service et ayant utilisé le service, rapports techniques, indices de fréquentation des centres d'archivage et bases de données, actions de communication et de formation),
— valorisation et expertise liées au service (brevets et contrats industriels, transfert de savoir-faire vers/depuis d'autres disciplines),
— structure, fonctionnement et pérennité (moyens humains, budget hors personnels, organisation et structure, plan de développement et évolution à long terme).

Le taux de réponses au questionnaire a été globalement élevé : 100% de réponses reçues pour SO1, SO3 et SO4, plus de 80% de réponses pour SO5 et SO6, et 55% de réponses pour SO2.
Il est important de noter que les chiffres et les informations que nous avons recueillis n'ont pas été systématiquement validées, ni au niveau local du ou des OSU responsables (certains *services* émargeant à plusieurs OSU), ni au niveau national par l'INSU. De surcroît, la qualité des réponses a été très variable. Pour ces raisons, les éléments présentés dans ce document ne font que dessiner les tendances générales de la situation actuelle. La difficulté à obtenir des informations systématiques relatives aux *services* nous conduit à une recommandation générale pour une gestion plus rigoureuse au niveau local dans les OSU et au niveau national par l'INSU.

Cadre institutionnel

L'enquête fait ressortir que la quasi totalité des services de notre communauté présente un caractère international, et implique





aussi bien des personnels CNRS que des personnels Ministère (notamment CNAP). Pour les services relevant de SO2 dans le cadre spatial, le CNES est un partenaire privilégié de l'INSU. Par son financement de projets de R&D, notamment lié à des grands projets de la discipline, l'ANR participe ponctuellement au financement de certains services malgré le fait que cela ne fait pas partie de ses attributions.

Domaine d'utilité

Deux des SO en Astronomie, SO1 et SO6, présentent une utilité sociétale. Les services relevant de SO1 « Métrologie de l'espace et du temps » sont dotés de structures permettant de répondre à la demande sociétale. Les services relevant de la surveillance solaire et de l'environnement terrestre dans SO6 ne sont pour la plupart pas en mesure, dans l'organisation présente, de remplir cette fonction. Une de nos recommandations spécifique vise à restructurer SO6 pour accroître son rôle sociétal et opérationnel de surveillance de l'environnement terrestre, et pour augmenter sa visibilité.

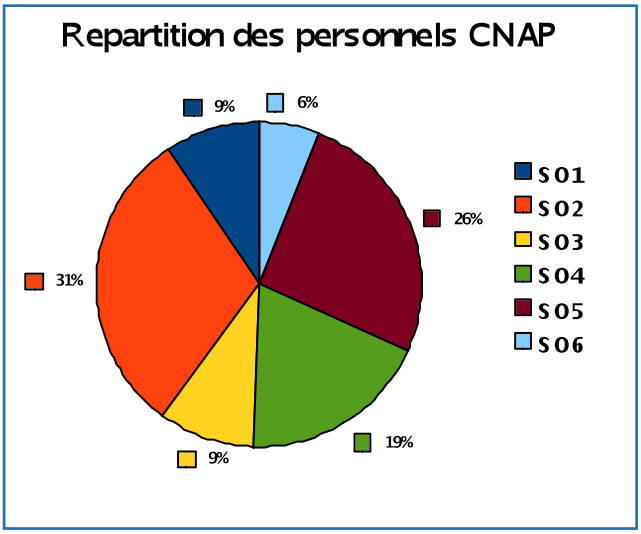
Impact et visibilité

Pour définir une grille d'analyse commune, malgré la grande diversité et la différence des activités de service, nous avons établi une liste exhaustive de critères pour évaluer l'impact des services et « tracer » leur utilisation: publications de rang A liées au service, et/ou l'ayant utilisé ; rapports techniques ; indices de fréquentation des centres d'archivage et bases de données ; actions de communication et de formation ; taille de la communauté nationale et internationale servie. En plus des réponses par les responsables ou points de contact, les programmes nationaux ont été sollicités sur ce dernier point. Malheureusement, les réponses au questionnaire n'ont pas toujours permis d'évaluer l'impact réel des services ni leur utilité. La situation est, là encore, très différente entre les services opérationnels et bien structurés qui pour la plupart se sont dotés de moyens d'estimer leur utilisation par la communauté, et les autres. Il nous semble donc prioritaire que tous les services se dotent à l'avenir des outils nécessaires pour estimer leur utilisation et leur impact. Nous avons fait de ce point, l'évaluation, une de nos recommandations générales.

Structure, fonctionnement et pérennité

Pour les informations relatives aux personnels affectés aux services, nous avons souhaité valider, a minima, les réponses en les comparant aux informations transmises par les OSU lors des mises à jour annuelles demandées par la section Astronomie du CNAP. En effet, certains services n'ont pas communiqué les informations relatives aux personnels qui leurs sont affectés. Par ailleurs, les informations sur les personnels non CNAP (chercheurs et IT) affectés aux services n'ont pas été communiquées systématiquement (ni par les responsables ou points de contact, ni par les OSU). Nous avons aussi constaté que les informations croisées services-OSU présentaient de nombreuses incohérences. Nous en avons conclu que cela révélait peut-être une insuffisance de la gestion effective des services au niveau des OSU, d'où la recommandation dont il a été fait mention plus haut.

Selon la dernière mise à jour de la section du CNAP, le corps compte 242 membres. Le graphique ci-contre indique l'affectation aux différents services et ne prend pas en compte les personnels



sans tâches de service (environ 6%). Pour la moitié d'entre eux, il s'agit de personnels qui n'effectuent pas de tâches de service au niveau, mais cela s'accompagne souvent par une forte implication dans la formation. Les autres (environ 3%) sont des personnels

souvent proches de la retraite et ayant investi dans les tâches de service à un niveau acceptable si l'on intègre sur leur carrière. Le suivi quadriennal des personnels par la section Astronomie-Astrophysiqe du CNAP contribue à réduire le déficit.

Nous nous attendons, vu la spécificité du corps des astronomes, à ce que l'essentiel des tâches de service dans les OSU soit effectué par des personnels CNAP. Avec les chiffres en notre possession, nous avons calculé le rapport d'ETP chercheurs non-CNAP, effectuant des tâches de service, aux ETP chercheurs CNAP. Il varie de 0,3 à 2 selon les OSU, et est le plus souvent inférieur à 1, suggérant que les tâches de service reposent essentiellement sur des personnels CNAP. Cette estimation met aussi en évidence que les évolutions dans la carrière des chercheurs, notamment CNRS, les amènent à participer aux activités de service. C'est le cas par exemple pour certains chercheurs instrumentalistes. Le rapport d'ETP personnels IT permanents aux ETP chercheurs CNAP varie quant à lui de 1 à 3, selon les OSU. Là encore les chiffres suggèrent que les OSU accompagnent effectivement les services dont ils ont la responsabilité. Ceci est particulièrement vrai pour les services opérationnels ainsi que pour ceux relevant de SO2.

Néanmoins étant donnés le manque d'information et/ou des doutes sur leur fiabilité, il a été difficile d'apprécier correctement les moyens affectés aux services et de juger de leur adéquation et d'en d'évaluer les budgets. Nous estimons qu'il est nécessaire de construire une base de données des moyens affectés aux services, fiable et validée aux niveaux local et national, pour améliorer la gestion des SO et le soutien qui leur est apporté. Ce point fait l'objet d'une recommandation à l'INSU et aux OSU (voir « Recommandation sur le pilotage »).

Il faut poursuivre le travail pour dégager une stratégie globale et pluriannuelle des services (labellisation, évolution, soutien) et mieux évaluer les besoins en accompagnement. Pour cette raison, nous avons établi des recommandations visant, en priorité:

- à améliorer la coordination nationale des SO 1, 5 et 6 ;
- à améliorer la gestion effective aux niveaux national (INSU) et local (OSU) ;
- à clarifier, lorsque c'était nécessaire, le périmètre des SO.

Ces recommandations, détaillées ci-dessous, devraient permettre d'optimiser la définition et la mise en place d'une politique de gestion des SO aussi bien à l'échelle locale que nationale. La mise en place des recommandations devra éviter d'accroître la lourdeur et la complexité compte tenu des niveaux d'interventions multiples (porteur/responsable, laboratoires, OSU, INSU).

Recommandations générales

Le groupe de travail propose les recommandations générales suivantes :

Re-clarifier le sens du concept de service ainsi que l'objectif de la labellisation et ses critères après une quinzaine d'années de mise en œuvre.

Etablir, pour chacun des types fonctionnels de SO, une coordination à l'échelle nationale par un comité de coordination national. Ceci est envisageable pour SO1, SO5 et SO6. Pour SO2, SO3 et SO4, la coordination incombe naturellement à l'INSU. Des solutions pour améliorer la lisibilité de SO2 sont proposées et devront être étudiées.

Renforcer les relations entre le CNAP, l'INSU, les OSU (articulation entre activités de service et SO, recrutement sur les SO prioritaires, réaffectation des personnels après dé-labellisation, etc). Cette coordination devra prendre en compte les laboratoires hébergeant les services.

Renforcer le rôle local des OSU (en coordination avec les laboratoires) à travers une stratégie pluri-annuelle de labellisation, une politique de mise en place et quand c'est nécessaire de redéploiement de moyens, et une gestion effective des SO qu'ils abritent.

Clarifier et homogénéiser le rôle national des Actions Spécifiques et des Programmes dans la stratégie pluri-annuelle, les recommandations de labellisation, et le suivi.

Améliorer le suivi et l'évaluation des services au niveau national par un groupe ad hoc de la CSAA adossé aux acteurs intervenant aux différentes échelles (nationale et locale). Pour la labellisation, ce groupe sera notamment chargé d'étudier les demandes, de solliciter les recommandations des AS et PN, ainsi que de consulter les coordinations nationales des SO (point 2) et les OSU. Le groupe émettra ses propositions à la CSAA qui établira ses recommandations à l'INSU en session plénière.

En plus de la coordination entre les acteurs à l'échelle nationale et locale, renforcer la coordination avec les autres disciplines de l'INSU et avec les autres Instituts du CNRS et EPIC (CEA, CNES).

Recommandations spécifiques par SO

Ces recommandations découlent d'une évaluation globale de chacune des catégories de SO (1 à 6). Elles portent sur leur contenu et leur ré-organisation en vue d'une meilleure lisibilité.

SO1 : Métrologie de l'espace et du temps

Les services dans cette catégorie, par leur pérennité et leur utilité sociétale évidente et reconnue, sont au cœur de la définition des services. Ils sont bien organisés et structurés. Leurs missions

sont pour la plupart rattachées également à des institutions ou agences qui leur confèrent un cadre précis. Nous n'avons pas de recommandations spécifiques à émettre si ce n'est de poursuivre la réflexion à l'échelle nationale sur la valorisation et les interfaces interdisciplinaires, notamment avec les sciences de la Terre et la physique fondamentale.

SO2: Instrumentation des grands observatoires au sol et spatiaux

Ce service regroupe les activités de conception, réalisation ou opération de 53 instruments sur 16 télescopes, satellites et sondes. Pour accroître la visibilité, améliorer la lisibilité et assurer la pérennité de ce service, il faut d'abord rappeler qu'il ne porte pas sur les instruments en tant que tels, mais sur la capacité de construire des instruments, sols ou spatiaux, fournissant des données pour la communauté. La liste des OSU concernés devra être établie par l'INSU. Les activités de service SO2 devront porter uniquement sur une liste d'instruments recommandés par la CSAA, en concertation avec les programmes nationaux, et endossée par l'INSU. Cette liste n'apparaîtrait plus dans la définition du service, mais établira le périmètre des activités relevant de SO2 dans les OSU.

Les activités labellisées en SO2 devraient couvrir la définition, la réalisation, les tests et calibration, les opérations des instruments ainsi que des activités de mise en forme des données. Un tel contour pour SO2 a l'avantage de prendre en compte automatiquement la modulation temporelle des tâches de services dans les différentes phases de développement des instruments. Sont exclues de SO2 les activités de traitement et d'archivage des données, prises en compte dans SO4 ou SO5, ainsi que la R&D amont (non orientée projets), qui ne relève pas des tâches de service. Les activités instrumentales, aussi bien pour le sol que pour l'espace, se caractérisent par des phases d'études de plus en plus nombreuses, détaillées et longues, dans un contexte de fortes incertitudes programmatiques. Cette évolution récente du paysage de l'instrumentation nous conduit à recommander que les activités de définition et les premières phases d'études des instruments se fassent avec un redéploiement des personnels chercheurs et IT au sein des OSU, de préférence à des recrutements CNAP. Ces redéploiements permettraient de mobiliser, et de maintenir, des équipes en place, et d'utiliser leur expertise, jusqu'à l'engagement de la communauté dans les projets acceptés ou présélectionnés.

Le groupe estime que sa recommandation ne peut être mise en place sans une coordination ou une structuration des OSU ayant la capacité de construire les instruments pour le bénéfice de la communauté. Une coordination des équipes instrumentales pour les instruments de l'E-ELT est déjà en cours de discussion, par exemple. Une réflexion sur la coordination/structuration de l'instrumentation sol et espace nous semble nécessaire. Elle devra être pilotée par l'INSU et impliquer le CNES et le CEA. Les liens avec les Universités et Etablissements devront être aussi abordés.

SO3 : Stations d'observation nationales et internationales

Nous proposons que ce service soit renommé « Stations d'observation ». Ce service comprend la gestion des moyens lourds, la réalisation et l'opération des instruments focaux sur les moyens d'observation, ainsi que la qualification et la protection des sites d'observation existants et futurs.

Les recommandations concernant le devenir, l'évolution et l'évaluation des services dans cette catégorie ne peuvent être proposées en dehors de l'INSU. Elles dépendent très fortement des réflexions sur les moyens (cf. Groupe de travail Moyens).

Aujourd'hui, la caractérisation des sites est centrée principalement sur le Dôme C. Nous recommandons qu'un rapport sur les activités entreprises soit produit dans des délais raisonnables pour tirer les premières conclusions et établir une stratégie si nécessaire.

SO4 : Grands relevés et sondages profonds

Ce service porte sur la réalisation des grands relevés et sondages profonds labellisés par l'INSU. Les activités couvertes vont de la conception à la réalisation et aux tests des instruments pour les relevés et sondages, à la mise en forme et distribution des produits à la communauté. SO4 se rapporte à la notion de programmes de collecte de données d'envergure internationale déployés sur de longues périodes (de l'ordre de la décennie), sous forme de grands relevés ou de sondages profonds.

Dans la définition actuelle, il y a des recouvrements importants entre les activités dans ce service et celles relevant de SO5, SO3 et SO2. Etant donnée la restructuration proposée pour SO2, nous recommandons de clarifier l'articulation/partage entre les activités liées à SO2 et les développements instrumentaux entrant actuellement dans le cadre de SO4. Par ailleurs, nous rappelons que les données obtenues doivent être mises dans le domaine public dans un délai court. De plus, le type d'observations entrant dans SO4 doit être plus clairement défini. Dans la définition actuelle de SO4, la coordination nationale de ce service doit être assurée par l'INSU.
Une évolution possible de SO4 serait celle proposée ci-dessous pour les centres de traitement des données thématiques mais elle n'a pas fait l'unanimité. Un effort de redéfinition des contours de SO4 sera néanmoins nécessaire pour clarifier les articulations avec les activités relevant, notamment, de SO2.

SO5 : Centres de traitement et d'archivage de données

Ce service d'observation couvre deux aspects distincts : le traitement des données et leur archivage et diffusion. Nous proposons que le terme « diffusion » soit ajouté dans l'intitulé. Il regroupe actuellement un ensemble de bases de données, souvent sous-critiques, co-existant avec des services établis et structurés sous forme de centres opérationnels. En ce qui concerne les activités OV, qui sont présentes dans tous les OSU, beaucoup ne sont actuellement pas des services labellisés individuellement.

Pour augmenter la visibilité sur les aspects archivage et diffusion des données, nous jugeons qu'il est nécessaire dans un premier temps de clarifier l'utilité de certaines des bases de données existantes et d'estimer les besoins futurs de la communauté à travers les PN. Par ailleurs, nous recommandons que toute activité d'archivage et de mise à disposition de données ou d'outils en ligne vise une intégration dans les OV. Il faudra différencier les activités

de R&D amont, non considérées comme service, des activités de définition des standards OV et des activités opérationnelles (incluant prototypage, développement, tests) qui relèvent, quant à elles, d'activités de service.

Nous recommandons par ailleurs que les services se dotent d'outils permettant d'estimer une série standardisée (à définir par l'INSU) de paramètres (indices de fréquentation, volumes téléchargés, …) caractérisant l'utilité/utilisation des bases de données et centres d'archivage et de diffusion.

Pour les centres de traitement des données, une réflexion pourrait être menée sur la coordination avec les activités menées dans SO4 et l'évolution vers un ensemble de centres de traitement "thématiques" (e.g. astronomie grand champ, spectroscopie, grandes longueurs d'onde, CMB, …). Une telle évolution permettrait en particulier d'assurer la pérennité des moyens attribués pour la réalisation des relevés et sondages après la fin des dits relevés et sondages.

Plus généralement, nous recommandons de clarifier les liens entre les instruments et les activités de traitement et d'archivage des données qui y sont associées, et de renforcer la coordination thématique à travers les programmes nationaux ou les actions structurantes (e.g. Europlanet), ainsi que la coordination nationale des services SO5 à travers un comité de coordination (voir recommandations générales).

SO6 : Surveillance solaire, relations Soleil-Terre, environnement terrestre

Ce service rassemble des activités dispersées, souvent sous-critiques, dont l'impact a parfois peu de visibilité. Nous proposons que ce service soit renommé "Surveillance de l'environnement spatial de la Terre". En s'inspirant du programme de l'ESA Space Situational Awareness (SSA) et pour accroître l'utilité sociétale de SO6, nous recommandons dans un premier temps une restructuration articulée selon deux volets: 1) surveillance continue et systématique ainsi que prévisions de l'environnement radiatif de la terre, 2) surveillance des géocroiseurs. Pour ces deux axes, la coordination avec le programme SSA de l'ESA, qui met en réseau les moyens nationaux, apparaît fondamentale. Une réflexion sur les débris spatiaux pourra être menée en collaboration avec le CNES.

Cette restructuration nécessite de renforcer les activités de surveillance sur les observations temps réel (ou quasi temps réel) et les mesures systématiques de l'activité solaire, magnétosphérique et iono/thermosphérique, ainsi que sur les activités de prédictions. C'est cette spécificité, qui pourrait caractériser la séparation entre les activités du SO6 et celles relevant des SO5 et SO2. Nous recommandons que les services de surveillance/prédictions de l'environnement radiatif du SO6 évoluent vers une fédération qui inclut les services du SO5 fournissant des données en temps quasi-réel et/ou systématiques.

La surveillance des objets géocroiseurs recouvre deux aspects principaux, d'une part la détection et le suivi observationnel des objets, d'autre part la caractérisation dynamique et physique pour l'appréciation des risques. A l'heure actuelle, aucune activité nationale n'est identifiée en tant que service pour le premier aspect. Le deuxième aspect, lui, rejoint en partie les activités du SO1 (éphémérides). Néanmoins, ces problématiques impliquent des techniques spécifiques et une approche combinée sans lesquelles aucune efficacité ne serait assurée.
Il apparaît important que soit mise en place une contribution nationale aux différents volets de cette activité européenne dont l'utilité sociétale est de premier ordre.

Recommandations sur le pilotage par l'INSU

Procédure de labellisation

La labellisation des services d'observation par l'INSU est faite sur recommandation de la CSAA après examen des demandes reçues en réponse à un appel annuel. Un avis des PN et, le cas échéant, des AS est utilisé pour élaborer la recommandation. Nous proposons d'apporter quelques modifications au processus de labellisation pour améliorer son efficacité.
En premier lieu, une stratégie globale au niveau local (OSU) et national (PN, AS, CSAA) doit être mise en place. Les OSU devront définir leur stratégie pluri-annuelle à moyen et long terme, et identifier les moyens mis en place pour réaliser leurs objectifs. Dans le même esprit et au niveau national, nous estimons que les avis émanant des PN et AS devraient être demandés sous la forme d'une stratégie générale et pluri-annuelle. Au sein de la CSAA, nous recommandons la mise en place d'un groupe ad hoc qui traiterait les dossiers de labellisation avec plus de suivi et selon des critères homogènes (e.g. pérennité, plan de développement, moyens dont ceux mis par l'OSU, …) qu'il définirait au préalable. Par ailleurs, nous recommandons de labelliser les services pour une période définie, et révisable, de 4 ans.

Suivi et évaluation des services

Le suivi et l'évaluation de l'utilité, l'utilisation et l'impact (pas uniquement en terme de publications) des services sont de la responsabilité de l'INSU. Ces deux actions ne peuvent être envisagées sans la mise en place d'outils appropriés pour la collecte des informations et leur traitement/gestion. Une base de données pérenne regroupant tout ou partie des informations collectées au cours de l'enquête permettrait de suivre l'évolution des SO. Une telle base serait donc souhaitable à court terme.
Nous recommandons un suivi annuel ou biennal des services par mise à jour des informations de la base de données (e.g. emplissage de champs associés par les responsables ou points de contact officiels des services). Une revue plus approfondie pourrait être envisagée tous les 2-4 ans, avec présentation à la CSAA, en association avec la section astronomie du CNAP.

Procédure de dé-labellisation

Nous estimons qu'il est nécessaire d'établir une procédure de dé-labellisation. Cette étape de la vie d'un service devrait notamment permettre d'effectuer un bilan complet sur l'utilité et l'impact du

service ainsi que sur les moyens, y compris humains, qui lui ont été affectés. Une telle procédure devra être préparée 1 à 2 ans avant la fin de la labellisation, en particulier pour gérer la réaffectation des personnels d'un service en fin de label à un service actif, et ce en relation avec les OSU concernés et le CNAP.

Conclusion

L'exercice de prospective a montré que l'organisation des SO en grands types fonctionnels, proposée vers 1995, reste bien adaptée aux missions de service en Astronomie. Il met, aussi, en évidence un grand nombre de services à fortes visibilité et utilité nationales et internationales.

Tout au long de l'exercice de prospective, la communauté a réaffirmé son attachement à la notion de services à la communauté. Ces derniers sont de réels atouts pour la discipline, et pour l'INSU, dont il faudrait optimiser retour et fonctionnement. Après une quinzaine d'années de fonctionnement, la diversification et l'enrichissement des services ont abouti à une certaine perte de lisibilité donc à une difficulté de dégager une stratégie globale.

La communauté a reconnu l'importance d'une gestion et d'un suivi au niveau national des SO Astronomie. Elle souhaite que la prospective aboutisse à une refonte et une révision de la liste des *services*, ainsi qu'à une clarification des critères et du processus de labellisation. Le groupe de travail, dans le présent document, émet des recommandations générales, spécifiques à chaque SO (structure, périmètre, organisation), ainsi que sur le pilotage national (groupe *ad hoc* de la CSAA). La mise en place effective des recommandations demandera, dès 2010, un travail détaillé des différents acteurs INSU, CSAA, PN et AS, OSU et laboratoires.

Organisation nationale

N. Aballéa, O. Bienayme, N. Brouillet, Pierre Drossart (coordinateur), Y. Langevin, H. Politano, L. Rezeau, M. Rieutord, D. Rouan.

Le contexte de l'organisation nationale de l'astronomie en France est en pleine évolution avec la réforme en cours du CNRS et l'application de la loi LRU (Libertés et Responsabilités des Universités). La particularité en Sciences de l'Univers et plus particulièrement en astronomie est d'avoir un pavage d'Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) en charge de l'organisation des services d'observations, avec la mise à disposition à ce titre des personnels du corps des astronomes, une charte des OSU en négociation avec les Universités, devant permettre de définir la répartition des rôles. Le rééquilibrage des responsabilités entre CNRS, Universités et Grands Etablissements est encore en pleine évolution, mais plusieurs axes se dessinent aujourd'hui.

Dans ce contexte, la réaffirmation du rôle des Unités Mixtes de Recherche (UMR), au cœur du dispositif de recherche est un élément essentiel des succès de la recherche scientifique nationale, permettant de combiner l'organisation nationale (CNRS) et régionale, avec des ambitions européennes partagées. L'importance d'une politique de laboratoire, dans les UMR, est rappelée et soutenue, permettant d'afficher des axes de recherche à long terme, par rapport à une dérive des laboratoires vers un simple rôle d'hôtel à projets.

La lourdeur grandissante de la gestion administrative des contrats, européens ou nationaux est un mal reconnu, qui complique aussi l'implication des laboratoires dans la définition d'une politique allant au-delà d'une gestion de contrats. Le regroupement des laboratoires en astronomie, engagé depuis longtemps, permet de dégager des moyens de gestion administrative qui restent nécessaires au niveau de base pour un suivi fin des activités de recherche ; elle rend cependant aussi la gestion même du laboratoire plus lourde, entre de multiples tutelles.

Le rôle des grands organismes reste essentiel pour la communauté astronomique : le CNES en particulier, au niveau national, est en particulier un acteur clé pour le bon déroulement et le suivi des expériences spatiales proposées au niveau européen ou mondial, grâce à la structuration des laboratoires spatiaux. La gestion des grands instruments, sol ou spatiaux nécessite une structuration nationale des laboratoires, face au risque de parcellisation d'une politique uniquement universitaire.

Rappel des objectifs donnés au groupe/méthode de travail

Le bouleversement de l'organisation de la recherche en France qui fait suite à la loi LRU (Loi relative aux Libertés et Responsabilités des Universités) et à la réforme du CNRS en cours conduit à poser plusieurs questions sur le fonctionnement des laboratoires, avec des spécificités dans la discipline de l'Astronomie et Astrophysique qu'il faut prendre en compte dans les relations avec les différentes tutelles. Le groupe de travail sur l'Organisation Nationale a eu pour objectif de mettre au point une liste de questions clés, puis de proposer des pistes pour aider à mettre en place une nouvelle structuration entre partenaires qui soit la plus adéquate pour la discipline.

La méthode de travail a consisté à préparer un questionnaire envoyé aux directeurs d'unités de la discipline (voir en annexe), et en analyser les réponses. Les réponses obtenues concernent 14 laboratoires (sur la quarantaine de laboratoires d'astronomie stricto sensu). En ajoutant à ces données les informations collectées directement par les membres du groupe, un échantillon significatif de situations a pu être exploré (observatoires de province/région parisienne ; petites/grandes structures ; implantation régionale / internationale). Ce rapport ne peut prétendre pour autant à une analyse exhaustive des questions d'organisation dans toute la discipline : nous pensons cependant pouvoir présenter ici les interrogations de base que se posent la plupart des unités.

Cette présentation reposera sur quelques exemples significatifs de projets astronomiques ; nous pensons que cette analyse est largement représentative des problèmes de la discipline et peut servir à poser les besoins organisationnels, quitte à contredire les préjugés idéologiques en cours dans certains cercles sur l'organisation de la recherche.

Description de la situation actuelle : un état des lieux

On partira dans ce rapport de l'unité de base que constitue le laboratoire. La structure administrative correspondante se décline en plusieurs variétés (UMR, UPR, USR, FRE, voire EA)[1], mais correspond à l'environnement dans lequel le travail de recherche s'organise au contact du chercheur de base ou de l'équipe dans laquelle il travaille au quotidien. L'UMR est la plus répandue des structures de laboratoires, et couvre deux tutelles principales, l'une nationale (CNRS) l'autre locale (Université ou grand établissement). Afin de couvrir l'ensemble des situations c'est ce mot générique de «laboratoire» qui sera utilisé dans la suite. L'établissement hébergeur constitue l'unité d'organisation à l'échelon supérieur : c'est en général une Université ou un grand établissement (Observatoire de Paris, OCA). Après quelques inquiétudes suite au rapport d'Aubert en 2008 sur le maintien d'une tutelle nationale, le ministère a conforté la structure d'UMR comme étant les «briques élémentaires du système de recherche ». Les

1 UMR : Unité Mixte de Recherche ; UPR : Unité Propre de Recherche ; USR : Unité de Service et de Recherche ; FRE : Formation de Recherche en Evolution ; EA : Equipe d'Accueil

questions subsistant concernent la gestion, en particulier l'évolution vers un mandat unique de gestion à l'hébergeur, et l'évolution des contrats, des ressources humaines, dans la politique générale des laboratoires, par rapport à leurs tutelles.

OSU (Observatoires des Sciences de l'Univers)

Un échelon d'organisation intermédiaire est la notion d'OSU (Observatoire des Sciences de l'Univers), qui correspond à la déclinaison d'une structuration nationale à l'échelon régional. Les OSU sont administrés par l'INSU, et regroupent différents laboratoires des sciences de l'Univers au sein d'un même établissement (sauf exception). Ceux-ci comprennent des laboratoires tant d'astronomie que de sciences de la Terre, de l'océan ou de l'atmosphère ; même si les relations interdisciplinaires sont parfois minimes, la logique de regroupement en OSU recouvre les aspects de gestion nationale par l'INSU, et peut permettre, à terme et dans certains domaines, des mises en place de synergies interdisciplinaires. L'un de leur rôle essentiel est la gestion des personnels CNAP, la coordination nationale prenant ici tout son sens, pour remplir des tâches de service définies au niveau national, dans les environnements locaux. La montée en puissance des Universités dans le dispositif de recherche nécessite cependant des adaptations : une «charte des OSU» est maintenant signée par la plupart des Universités. Elle permettra de définir les relations entre l'INSU et les Universités, mais de nombreuses questions restent en suspens : mise en place des moyens dans les OSU, remplacement des personnels CNAP (contingent national ou négociation locale), etc.

Gestion des budgets (soutien de base, BQR/NPI, contrats)

Les contrats (Europe, ANR, Région, …) sont mis en place, après proposition par les équipes de recherche, avec engagement du laboratoire, entre l'établissement et l'organisme. Une tendance à l'évolution de ces contrats va vers un système de gestion dit « à coûts complets », incluant les ressources humaines, comme dans les contrats européens FP7. Cette évolution complexifie lourdement la gestion des contrats, les personnels étant tenus de tenir rigoureusement des « fiches de temps », mais surtout implique une évolution que la plupart des laboratoires récuse, vers une gestion de la recherche « par compartiments » sur un objectif donné, comptabilisé de manière productiviste. Si certains projets s'accommoderont sans difficulté de cette philosophie, la recherche fondamentale, dont les objectifs même évoluent au cours du projet ne rentre pas dans un tel cadre. Le risque d'appauvrir le système de recherche vers des projets à courts termes, quantifiables (en temps comme en budget), est réel et dénoncé par beaucoup.

Secteur Spatial

Le secteur spatial reste d'organisation nationale puisque le CNES met en place les crédits via l'INSU dans les laboratoires. Cette organisation a fait ses preuves dans les réalisations des laboratoires français dans l'exploration spatiale. Sa dimension nationale est un élément clé dans son fonctionnement. En effet, les charges utiles des missions spatiales décidées sur des consortiums en général internationaux, sont réparties et financées sur tout le territoire national. On imagine mal une négociation contractuelle établissement par établissement pour la mise en place de crédits spatiaux pour ce type de crédits.

Gestion des personnels (CNRS / CNAP/Université et ITA/Chercheurs)

Cet aspect sera repris dans le groupe de travail sur les personnels et n'est mentionné ici que brièvement. La gestion des personnels chercheurs ou enseignants-chercheurs est réalisée jusqu'à présent au niveau national. Ce n'est toutefois plus entièrement vrai pour les enseignants-chercheurs des universités, qui seront désormais recrutés par les universités ; d'autre part, l'introduction de contrats CDI introduit encore d'autres catégories de personnels. Le même schéma est reproduit sur la gestion des personnels ITA. Les personnels CNAP restent en l'état actuel dans un schéma d'organisation national, même si l'affectation à un OSU, négocié localement avec l'Université, pourrait à l'avenir compliquer les choses. La question d'organisation des ressources humaines, vue du point de vue du laboratoire, si elle n'a jamais été simple, devient néanmoins encore plus complexe, entre les tutelles multiples des laboratoires.

Gestion des relations (National, Europe, international)

Cet aspect est également repris dans le groupe de travail « Europe ». L'aspect abordé dans ce chapitre concerne là encore, le point de vue du laboratoire. Les relations de tout type seront établies dans une logique de développement de recherche, à partir de collaborations d'équipes, dans le but d'institutionnaliser, et de rendre « visible » ces collaborations en vue d'appels d'offre (européens, nationaux, etc.). L'insertion du laboratoire dans les relations avec ses tutelles est là déterminante pour l'établissement de telles relations.

L'évolution en cours : LRU, décret CNRS : spécificités astro et difficultés particulières rencontrées

Une organisation nationale rationnelle de la Recherche Scientifique aura pour but de faciliter le travail des laboratoires en minimisant la charge de gestion revenant aux chercheurs et ingénieurs et en répartissant cette gestion selon les compétences de chaque structure. Les échanges avec les intervenants de tous niveaux, du directeur d'unité aux chercheurs et ITA de base, montrent que cet idéal de rationalité reste aujourd'hui du domaine de l'utopie, mais, plus inquiétant, que les évolutions récentes ont fortement compliqué la tâche des unités.

Un débat intense a concerné la question du mandat de gestion unique, c'est-à-dire le rattachement des crédits des différents intervenants à une seule tutelle, en l'occurrence en général l'hébergeur du laboratoire. Si cette proposition a clairement un intérêt de simplification théorique, les détails de son application sont contestés par la plupart des laboratoires, à des degrés divers selon les capacités de l'établissement hébergeur à gérer des crédits complexes. La recommandation de la plupart des interlocuteurs est de proposer qu'une telle évolution, qui paraît

tout à fait raisonnable dans le principe, soit conditionnée dans les faits à la démonstration de la capacité de l'hébergeur à gérer efficacement les crédits (missions, contrats, gestion), autant que la tutelle nationale (CNRS en l'occurrence).

Parmi les évolutions en cours, plus qu'une question de mode de gestion auquel les laboratoires s'adapteront tant bien que mal, des interrogations graves sont posées sur le principe même de l'évolution. Le passage vers une recherche majoritairement «sous contrat» dans la politique de la recherche, qui est mécaniquement une conséquence des crédits de soutien de base des laboratoires, conduit à une évolution qui n'est pas souhaitée par la majorité de la communauté. Le financement par contrats de courte durée (3 ans pour l'ANR) est particulièrement inadapté à notre discipline, où les avancées majeures requièrent des grands instruments avec des cycles de vies de 10 ans ou plus. De même, le renforcement du pôle « compétition » au détriment du pôle « collaboration » ne peut que nuire au développement de programmes en collaboration européenne, voire mondiale. Dans notre domaine, la continuité et le développement de compétences techniques et scientifiques de pointe sur des périodes longues s'inscrivent nécessairement dans le cadre d'unités de recherches structurées avec une forte proportion de personnels permanents. L'ANR et l'AERES ont de ce point de vue un impact négatif avec une vision éclatée des unités, qui s'effacent au profit d'équipes constituées autour de porteurs de projets. La politique contractuelle du CNES, avec un soutien programmé sur l'ensemble de la vie des projets, est beaucoup mieux adaptée. Cependant, la pression sur les postes IT et la forte montée en puissance qui en résulte pour les contrats CDD (pourtant fort utiles lorsqu'ils sont bien encadrés) représente un problème majeur pour les unités de recherche capables de réaliser les grands instruments sol et spatial.

La gestion des grands instruments dans le nouveau contexte de la recherche

L'une des spécificités des laboratoires d'astrophysique, par rapport à d'autres domaines scientifiques, concerne l'implication dans les grands projets internationaux spatiaux ou sol qui impliquent parfois des dizaines de laboratoires en Europe ou au-delà, avec un management international. La taille même de ces projets est en nette croissance, qu'il s'agisse de projets spatiaux, ou les missions de petite taille sont paradoxalement en raréfaction, ou des futurs télescopes au sol (ELT ou EST) qui par une loi naturelle de recherche d'effets toujours plus fins, demandent des infrastructures toujours plus lourdes.
- Laboratoires spatiaux : mise en commun de moyens, contexte.
- Instrumentation sol : consortiums pour l'instrumentation future (ELT en particulier).
- Cas particuliers.

Le recours en astrophysique à une maîtrise d'œuvre industrielle (qui est de règle en observation de la Terre) distendrait les liens essentiels entre équipes scientifiques et techniques, et aurait un impact très négatif sur les budgets nécessaires, même en prenant en compte les coûts consolidés. C'est d'autant plus préoccupant que le CNES remet en cause pour raisons budgétaires des programmes majeurs comme Simbol-X ou TARANIS, et que le financement des ELT « à budget constant » par l'ESO est un objectif extrêmement difficile.

Conclusion : quels moyens (humains et financiers) pour garantir la gestion de la recherche en astronomie dans les laboratoires après 2010 ?

Ce rapide survol de la situation d'organisation nationale a montré la complexité du système actuel, mais aussi le bouleversement qu'entraîne l'évolution du système de recherche et d'enseignement pour le laboratoire.
Un « détail » qui a son importance doit être souligné pour l'astronomie : le statut des personnels CNAP dans le contexte post-LRU. En effet, le transfert de la masse salariale vers les Universités passant aux compétences élargies (toutes d'ici fin 2011) laisse en suspens le cas d'un corps national (le CNAP) sous statut EC. Sil s'avère qu'effectivement les ETP sont ventilés par hébergeurs, la mutualisation des postes déclarés vacants par les OSU ne sera plus d'actualité, avec des conséquences désastreuses (reconduction à l'identique par OSU, même de petite taille, localisme, etc.). La spécificité de ce corps, lié par construction à la notion de tâches de service spécifiques pour la communauté astronomique, ne peut se satisfaire d'une dispersion des répartitions au niveau local, sans la structuration nationale qu'offre aujourd'hui le CNAP.

Résumé des recommandations

- L'astrophysique présente certaines spécificités dans le paysage de la recherche national qui doivent être prises en compte, qui s'accommodent mal d'une recherche sur contrat cours : recherche sur grands instruments, politique à long terme liée à ces instruments (spatiaux ou au sol).
- La présence du corps de personnels CNAP est garante en astronomie des tâches de service dédiées et pérennes, sur les grands instruments, les éphémérides ou la surveillance du ciel.
- Les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) sont l'élément clé assurant la cohérence de la discipline, comme échelon intermédiaire, interlocuteur privilégié entre les Universités et le niveau national.

Annexe : questionnaire envoyé aux directeurs d'unités

1) Dans votre unité, quelle proportion de moyens (humains/ financiers) sont gérés par l'Université et par le CNRS ?
2) Votre unité est-elle rattachée à un OSU ?
3) dans vos conseils d'unité, comment sont représentées les tutelles de rattachement (membres invités, membres de droit, ...) ?
4) Dans votre unité, quelles complémentarités ou incompatibilités retenez-vous entre les deux systèmes de gestion CNRS/Université ou CNRS/OSU ?
5) Au niveau de votre unité voyez-vous une simplification évidente de certains aspects de sa gestion entre tutelles ou à l'intérieur de chaque tutelle :
6) Quels avantages ou désavantages voyez-vous à aller vers le «mandat unique de gestion» des moyens financiers de votre unité ?
7) quelle évolution souhaitez-vous voir pour votre unité sur l'organisation nationale entre CNRS et Universités ?

Les résumés exécutifs

Evolution des moyens et nouveaux moyens à 5 – 10 ans

L'astronomie a toujours consacré une très grande part de ses moyens à la mise en œuvre de grands instruments mutualisés dans des observatoires nationaux ou internationaux. La course à la sensibilité et à la résolution angulaire, ainsi que l'ouverture vers les messagers autres que la lumière (ondes gravitationnelles, neutrinos et rayons cosmiques), nécessitent de très grands instruments qui ne sont plus à la portée d'une seule nation. Ceux ci sont maintenant développés dans le cadre de sociétés ou d'organisations internationales (ESO, CFHT, IRAM, etc.). Nos moyens nationaux historiques et leurs sites d'implantation (Nançay, OHP et Pic du Midi) ont donc amorcé une profonde mutation lors de la précédente prospective. Celle-ci doit se poursuivre pour aboutir à un pilotage par les OSU responsables en partenariat avec l'INSU. L'objectif fixé lors du présent exercice de prospective est que ce nouveau pilotage soit opérationnel dès 2012. En revanche, le réseau temps-fréquence et le CDS sont des services qui justifient pleinement de porter le label de « moyen national » de l'INSU. Le premier, avec la prise en compte des aspects de construction du repère géodésique (VLBI et géodésie spatiale), a vocation à évoluer vers un service du référentiel espace-temps. La réflexion sur l'évolution des services d'observation pourrait faire apparaître d'autres infrastructures de ce type sur le territoire national.

Pour la décennie qui commence, la construction de l'E-ELT, télescope de 42 mètres de diamètre, est la toute première priorité qui a émergé de cet exercice de prospective en terme d'investissement lourds. Après plusieurs années de pré-études menées par l'ESO, c'est maintenant une perspective crédible qui doit être réalisée sans retard dans le contexte mondial très compétitif de la découverte des exoplanètes et de l'exploration de l'univers primordial.

Dans cette perspective, le CFHT devient un « petit » télescope qui bénéficie d'un site astronomique exceptionnel et qui doit se spécialiser pour exploiter quelques niches scientifiques bien ciblées : 1/ la spectro-polarimétrie stellaire et la détection d'exoplanètes avec l'instrument SPIRou, 2/ l'accompagnement de la mission spatiale GAIA avec le spectromètre GYES, et/ou 3/ les grands relevés photométriques, en bande u avec MEGACAM, ou en très grand champ moyennant une rénovation importante du télescope avec la construction de l'instrument 'IMAKA.

Notre communauté a toujours été à l'avant garde de l'interférométrie visible et millimétrique. Avec la mise en service d'ALMA, observatoire submillimétrique mondial, l'extension de l'interféromètre millimétrique du plateau de Bure à l'IRAM est une priorité forte. Il deviendra ainsi un outil privilégié et complémentaire en longueur d'onde d'ALMA, avec des performances ouvrant la voie à l'exploration quantitative de la transformation en étoiles des grandes masses de gaz primordiales. Au VLTI, la communauté soutient fortement l'extension de 4 à 6 télescopes et la construction de VSI, instrument pour l'interférométrie infrarouge qui permettra de profiter pleinement des capacités d'imagerie du VLTI.

Il faut aussi garder la possibilité de s'associer de façon opportune à l'un des projets majeurs de l'astronomie américaine, au premier rang desquels figure le LSST, grand télescope destiné à effectuer des relevés du ciel profond au rythme de deux fois par semaines pendant dix ans. BigBOSS, projet de grand relevé spectral, et CCAT, télescope submillimétrique de 25 mètres, sont deux autres opportunités sérieuses qui pourraient s'ouvrir en fonction des priorités américaines et de nos possibilités financières.

Dans le domaine des astroparticules et de l'astronomie des nouveaux messagers, le grand observatoire des photons cosmiques de haute énergie CTA, est l'investissement lourd soutenu par notre communauté, derrière l'E-ELT, pour un engagement dans les 5 ans.

Enfin, il faut garder la capacité de préparer le long terme, avec des soutiens dédiés à la préparation du futur grand observatoire radio kilométrique SKA et du télescope solaire européen EST.

Astrophysique de Laboratoire

L'« Astrophysique de Laboratoire » a acquis en France une bonne visibilité internationale. C'est une activité incontournable d'accompagnement à l'exploitation scientifique des données astronomiques incluant maintenant l'analyse de la matière extraterrestre, in situ et en laboratoire. Elle s'appuie sur le développement de dispositifs expérimentaux dédiés et d'approches interdisciplinaires impliquant l'astrophysique, la physique et la chimie avec une interface notable avec les sciences de la Terre et de l'atmosphère. Cette diversité contribue à la pertinence des études réalisées. Pour les thématiques -- spectroscopie, plasmas chauds, microphysique, matière extraterrestre et analogues, et temps-fréquences --, on recense environ 140 ETP/an pour les chercheurs et 86 ETP/an pour le personnel technique pour un total de 55 M€ d'équipement et ~2,6 M€/an de fonctionnement. L'INSU fournit un soutien et une coordination en particulier par l'intermédiaire des programmes nationaux. Néanmoins, c'est une activité fragile qui ne s'inscrit pas suffisamment dans les missions des agences spatiales et repose souvent sur le dynamisme de quelques chercheurs motivés. Afin de limiter les effets de mode et pouvoir mener une véritable politique de fond, il est important que cette activité puisse constituer par elle-même un véritable champ disciplinaire et qu'une réflexion générale sur l'état de l'art et les évolutions souhaitées soit menée au niveau européen. De plus, la pérennisation de cette activité implique un soutien au financement récurrent du fonctionnement et de la jouvence des dispositifs expérimentaux, à la mise en place de chercheurs à profils interdisciplinaires et de personnels techniques permanents spécialisés, ainsi qu'à la reconnaissance, comme activité de service, de la collecte de données fondamentales validées expérimentalement qui enrichissent les bases de données au service des sciences de l'Univers. C'est un domaine où l'INSU a clairement la maîtrise d'œuvre et se doit de mener une politique inter-Instituts avec l'INP et l'INC ainsi qu'une politique européenne active.

Calcul, archivage, OV, logiciels

Ce rapport présente à la fois la prospective liée au calcul intensif sous ses divers aspects (matériel, logiciel et humain) ainsi que celle de l'Observatoire Virtuel. Ces deux thématiques n'ont pas de lien particulier, mais elles ont cependant évolué de manière assez semblable au cours des dernières années. En effet, dans les deux cas, un effort déterminant a été réalisé au niveau national et une structuration

importante est en train de se mettre en place au niveau européen. Dans ces deux domaines, il est donc essentiel de pérenniser et de valoriser au mieux les investissements réalisés en France mais également d'assurer une présence au meilleur niveau des équipes françaises dans le dispositif européen en émergence. Comme cela est clairement indiqué dans la prospective ASTRONET, les équipements de calcul et d'archivage de données ainsi que l'Observatoire Virtuel font partie intégrante de l'infrastructure de recherche et leur développement doit suivre celui des moyens d'observations.

Valorisation

L'impact économique de la discipline est difficile à analyser suivant les critères habituels de la valorisation des activités de recherche scientifique. Malgré un nombre réduit de brevets, licences d'exploitation, et entreprises créées, l'étude menée montre que les investissements alloués au développement de l'astronomie en général, et de l'instrumentation associée en particulier ont des retombées conséquentes dans le secteur industriel, avec un retour d'investissement hors salaire souvent proche de 1 pour l'essentiel de grands programmes. Les partenaires de la discipline considèrent que les réelles retombées dépassent ce qui est immédiatement mesurable par l'ouverture de marchés internationaux et bien au-delà des marchés de l'astronomie.
La valorisation au sens strict du terme est difficilement appréhendée par les laboratoires. Ceux-ci invoquent un manque de moyens appropriés et une méconnaissance des procédures. Les expériences de valorisation réussies correspondent en général aux endroits où un lien est bien établi entre les cellules de valorisation d'une des tutelles et le laboratoire.

Europe

L'impact économique de la discipline est difficile à analyser suivant les critères habituels de la valorisation des activités de recherche scientifique. Malgré un nombre réduit de brevets, licences d'exploitation, et entreprises créées, l'étude menée montre que les investissements alloués au développement de l'astronomie en général, et de l'instrumentation associée en particulier ont des retombées conséquentes dans le secteur industriel, avec un retour d'investissement hors salaire souvent proche de 1 pour l'essentiel de grands programmes. Les partenaires de la discipline considèrent que les réelles retombées dépassent ce qui est immédiatement mesurable par l'ouverture de marchés internationaux et bien au-delà des marchés de l'astronomie.
La valorisation au sens strict du terme est difficilement appréhendée par les laboratoires. Ceux-ci invoquent un manque de moyens appropriés et une méconnaissance des procédures. Les expériences de valorisation réussies correspondent en général aux endroits où un lien est bien établi entre les cellules de valorisation d'une des tutelles et le laboratoire.

Les interfaces interdisciplinaires de l'astronomie

L'astronomie et l'astrophysique ont toujours travaillé en relation étroite avec les autres sciences forndamentales. Pour la physique et la chimie, l'Univers permet l'étude de processus et de systèmes difficilement accessibles au laboratoire, températures et densités extrêmes, champs magnétiques intenses ou au contraire vide poussé et très basses températures. Ce document présente les principales thématiques d'interface dans une première partie, et aborde en deuxième partie la question des modalités permettant de tirer le meilleur parti de ces activités aux interfaces.
Le domaine des astroparticules et de la cosmologie apparaît comme une interface majeure, où les astrophysiciens travaillent conjointement avec les physiciens des particules et les théoriciens. La montée en gamme des projets au cours des dix dernières années et les étroites collaborations nouées ont permis l'émergence d'une communauté interdisciplinaire. Les progrès majeurs accomplis dans la détection des photons de haute énergie en particulier laisse entrevoir l'avènement d'un nouveau champ pour l'astronomie. Le principal enjeu devient la mise en œuvre d'une astronomie multi-messagers. Si la communauté de cosmologie est structurée au sein du programme PNCG, le besoin d'une structuration analogue pour l'astrophysique des hautes énergies est patent. La transformation du GDR PCHE en programme INSU permettrait d'atteindre cet objectif, en conservant la tutelle des instituts concernés (INSU, INP, IN2P3) et un conseil scientifique interdisciplinaire.
Le domaine de la physique fondamentale, de la métrologie de l'espace et du temps, et des systèmes de référence est en forte mutation, avec une convergence des communautés d'astronomie, physique et sciences de l'ingénieur pour de nouveaux projets dans l'espace et au laboratoire. Pour accompagner ce développement et faciliter la structuration de cette communauté en émergence, la création d'une structure INSU, ouverte à la participation des autres instituts concernés est recommandée.
L'étude des processus physiques et chimiques est un autre domaine où des collaborations interdisciplinaires existent de longue date, qui exploitent la très grande diversité des phénomènes naturels. L'astrophysique de laboratoire est une discipline en émergence, qui vise à contribuer à la connaissance des milieux et objets astrophysiques par des études en laboratoire, expérimentales et théoriques. C'est par essence un domaine d'interface avec la physique et la chimie, qui fait appel à des installations dédiées et aux grands instruments (par exemple synchrotron SOLEIL, lasers de puissance).
L'exploration toujours plus avancée du système solaire, combinée à la diversité des systèmes planétaires extrasolaires, offre un champ d'étude renouvelé à la planétologie, où les compétences des spécialistes de géophysique, géochimie, climatologie et astrophysique se complètent. Les thématiques de la météorologie de l'espace, et de la climatologie de l'espace sont deux exemples prometteurs, où astrophysiciens et spécialistes des atmosphères devraient travailler conjointement. L'étude des atmosphères des exoplanètes, notamment dans l'objectif d'identifier des critères d'habitabilité est de même un domaine naturellement interdisciplinaire à l'interface entre astrophysique, sciences de la Terre, biologie et écologie. La question des origines, qui sous-tend ces thématiques est féconde pour la réflexion épistémologique.

La réalisation des nouveaux instruments, depuis les étapes de recherche et développement amont, à celles de la conception puis de la construction et du traitement des signaux, permet de nouer des collaborations fructueuses dans les domaines des sciences de l'ingénieur et du traitement du signal. Quatre grandes orientations se dégagent pour les travaux en traitement du signal, situées dans la problématique générale des problèmes inverses : la déconvolution d'images, l'analyse temps – fréquence ou analyse spectrale, la reconnaissance des formes, et le traitement des données hyper-spectrales. Les activités d'instrumentation font émerger le besoin de faciliter l'accès aux plates-formes technologiques pour les laboratoires de la discipline, et de participer à la coordination du développement de ces plates-formes..

La deuxième partie s'appuie sur une enquête réalisée auprès des laboratoires. L'interdisciplinarité est perçue comme une richesse et un facteur de dynamisme scientifique. Cependant beaucoup de réponses soulignent les difficultés de l'évaluation des activités interdisciplinaires, au niveau des travaux de recherche, des personnels et des équipes. Il est recommandé de veiller à ce que les activités interdisciplinaires soient reconnues et valorisées comme des activités de recherche à part entière et non pas considérées comme des « activités de service ». Outre l'évaluation de la qualité du travail par les disciplines, il est également important d'évaluer le bénéfice apporté à la problématique scientifique étudiée par l'approche interdisciplinaire. Par conséquent, il est recommandé que des experts de l'ensemble des disciplines soient présents dans les comités d'évaluation, au niveau des laboratoires, des équipes ou des chercheurs. Le travail en collaborations interdisciplinaires nécessite des échanges et l'établissement d'un langage commun. Les activités d'animation scientifique doivent donc être encouragées et pleinement reconnues.
Même si le débat sur la formation initiale n'est pas tranché, il est souhaitable, quand les conditions locales le permettent, d'encourager les écoles doctorales de site à financer des thèses sur des sujets interdisciplinaires, par exemple en co-direction.

Enseignement - Diffusion des connaissances

Former des étudiants à l'astronomie, faire partager la passion de la découverte astronomique, la valeur des méthodes scientifiques et le plaisir qu'il y a à mieux comprendre l'Univers et la place que nous y occupons, sont des préoccupations que notre communauté a toujours considérées comme motivantes et dignes d'efforts particuliers. Elles sont d'ailleurs inscrites en toutes lettres dans les missions des chercheurs, notamment celles du corps des astronomes. L'astronomie est en effet un canal assez unique pour sensibiliser le public aux questions scientifiques, en particulier les jeunes de tous milieux, en offrant une ouverture à la démarche scientifique, qui part de questions que chacun se pose. Cette curiosité, qui souvent correspond à de vraies interrogations philosophiques, est aussi un portail sans guère d'équivalent pour attirer les jeunes vers des études scientifiques qui subissent une inquiétante érosion. C'est aussi une façon efficace de combattre la montée des fausses sciences et de la pensée irrationnelle. Le groupe de travail a passé en revue trois volets de cette question de l'enseignement et de la diffusion des connaissance : l'enseignement universitaire de l'astronomie, l'enseignement dans le primaire et le secondaire, la diffusion des connaissances et la communication des résultats. Le travail s'est fait sous forme d'enquêtes préliminaires puis de discussions sur leur analyse, les conclusions et les recommandations principales sont les suivantes :
• Etudes doctorales : le passage au LMD et au système des grandes Ecole Doctorales généralistes s'est accompagné d'une perte globale, hors Île-de-France, du nombre d'allocations ministérielles pour les doctorants en A-A. Par ailleurs l'astrophysique bien qu'elle reste une discipline vivante et attractive pour le grand public, souffre de la désaffection générale des étudiants pour les sciences. Enfin on note que la filière ne produit pratiquement pas de chômeurs, et donc que les flux ne sont pas trop élevés. Il est *recommandé : a) d'encourager des passerelles plus nombreuses entre les Masters nationaux et les ED, b) de développer l'internationalisation sous tous ses aspects (réseaux, programmes Erasmus Mundus, accords de co-tutelle, accords bilatéraux nationaux, des efforts sur la langue publicité internationale) c) mettre sur pied une concertation plus grande entre les organismes offrant des demi-financements, d) d'envisager la création d'un institut national de la formation doctorale en A-A qui coordonnerait et diffuserait l'offre de thèse, serait un interlocuteur des Masters, des organismes, maintiendrait des statistiques à jour du devenir des docteurs et un annuaire qui faciliterait l'insertion.*

• Licence, Master : l'offre est abondante et très diversifiée, mais l'astrophysique se retrouve au carrefour de différentes disciplines, avec parfois une difficulté à négocier une « bi appartenance » entre la physique et les Sciences de l'Univers, souvent séparés dans les structures universitaires et ministérielles. Afin de confronter les expériences et les actions, définir un socle de connaissance, il est recommandé qu'une réunion annuelle des responsables de filières soit systématiquement organisée. Il faudra aussi trouver un cadre adapté pour continuer à faire vivre l'activité de formation à l'astronomie observationnelle en Licence et Master sur le site de l'OHP : elle est irremplaçable.
- La formation ouverte à distance est désormais une composante forte de la formation en astronomie et elle doit se développer dans les nombreuses niches qui s'offrent à elle.
- Les programmes scolaires du primaire et secondaire affichent des objectifs louables en astronomie, mais les moyens et les instructions sont insuffisants : Il serait souhaitable d'œuvrer à obtenir la participation systématique d'un astrophysicien mandaté dans les comités d'élaboration des programmes.
- Les actions nationales et locales vers les scolaires sont bien développées et se structurent de plus en plus avec des actions comme LAMAP ou HOU, mais la formation des professeurs demeure rare et peu visible ou disparate. Il est recommandé que se mette en place une structure de coordination nationale de cette formation qui pourrait être pilotée par des personnels CNAP.
- Visites organisées, expositions, parcours, conférences, journées des planètes, soirées d'observations, Nuit des étoiles, Nuit des chercheurs, journées Portes Ouvertes : le public est friand de ces occasions qui lui sont offertes d'être au contact de l'astronomie

professionnelle et vient notamment y chercher la fiabilité du discours faits par des scientifiques. L'offre semble assez large et assez bien perçue, mais un certain déficit de personnels volontaires pour ces actions est constaté : les établissements pourraient d'avantage inciter « tous » leurs personnels à participer à ces actions, en échange de décharges ou de jours de rattrapage. Par ailleurs, quelques unes des actions de AMA09 ont été de belles réussites et des moyens devront être trouvés pour qu'elles puissent être prolongées sur plusieurs années. Enfin, afin de promouvoir le classement sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO d'éléments du patrimoine astronomique français, la création d'un comité national est recommandée.
- La communication des établissements d'A-A a bien évolué, avec le fort développement et la professionnalisation des pages web, la généralisation de «chargés de communication», la multiplication des communiqués de presse. Il est suggéré une coordination plus forte des chargés de communication et la création d'un « réseau ».

Prospective spatiale : synergies et comparaison sol/espace

Ces dernières décennies, l'astronomie a connu une révolution avec la mise en œuvre et le développement de très grands équipements sol – télescopes, radiotélescopes et interféromètres – et la naissance de l'astronomie multi-messagers – photons, neutrinos, rayons cosmiques et ondes gravitationnelles. L'accès à l'espace reste indispensable pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, il permet l'observation de l'ensemble du spectre électromagnétique, depuis les rayons gamma jusqu'aux ondes radio ; il permet de s'affranchir de la turbulence atmosphérique. Les observatoires en orbite terrestre peuvent aussi observer en continu les astres et permettent le fonctionnement des détecteurs à basse température, avec un moindre niveau de bruit et dans de meilleures conditions de stabilité. Pour la planétologie, les sondes spatiales permettent également d'obtenir des informations sur place et de ramener des échantillons.

Quelque soit le domaine scientifique, la complémentarité sol-espace est donc une nécessité et les prospectives «spatial» et «sol» ne peuvent être découplées. En particulier, la définition d'un projet spatial doit intégrer les projets sols qui pourraient préparer la mission, et les instruments sol d'accompagnement et/ou complémentaires. Tout projet spatial nécessite également un fort soutien au sol notamment pour les aspects «segments sol », de plus en plus complexes, ainsi que l'exploitation des données. En particulier, le traitement des données des expériences spatiales à la charnière sol/espace demande une bonne coordination entre le CNES et l'INSU.

Notre groupe n'avait pas pour mandat de donner des priorités en terme de moyens sol nécessaires aux expériences spatiales mais de recenser les synergies sol/espace et identifier les actions à mener afin d'améliorer ces synergies, d'un point de vue scientifique mais aussi en ce qui concerne la structuration des communautés. Le document détaille dans un premier temps les synergies scientifiques par thématique et étudie dans un deuxième temps les pôles thématiques et centres de données, et les actions de structuration. Les actions urgentes et importantes peuvent être reprises ici. La communauté GAIA a besoin de se doter d'un spectrographe multi-objets à haute résolution sur un télescope avec un champ de 0,5-1 deg^2 pour obtenir des abondances précises sur les étoiles observées par le RVS à bord. Pour la course à l'énergie noire, déployer un grand relevé « MegaCam-u » construit sur les nuits noires françaises du CFHT, et intéressant très fortement les expériences sol (comme Pan-STARRS4, Big-Boss), serait d'un atout considérable. Sur le même thème et dans le contexte de la pré-sélection d'Euclid, nous soutenons très fortement l'initiative du CNES avec la phase 0 DADA. Pour la physique fondamentale, le contexte change avec le démarrage réussi de T2L2, la confirmation du programme ACES sur Pharao, et les lancements programmés de LISA-Pathfinder et de Microscope. Dans ces conditions, une réflexion sur les besoins en traitement des données doit être conduite rapidement. Lié à ce nouveau contexte et à l'actuel manque de pavage disciplinaire, le projet de création d'action spécifique comprenant la gravité et physique fondamentale, la métrologie temps/fréquence, la mécanique céleste, l'astrométrie, les systèmes de référence et la géodésie spatiale est fortement recommandé. Pour les sursauts gamma, le satellite SVOM doit être complété au sol par deux télescopes robotisés (GFTs). Le GFT français, seul instrument allant vers l'IR, jouera un rôle crucial dans le projet, car il permettra à la communauté française d'aborder toute la science des rémanences et d'identifier les sursauts à grand z. Il convient de trouver une solution pour son financement. Le manque de structure particulière pour la communauté exoplanète, à cheval sur plusieurs instances et sous thème de plusieurs disciplines s'est fait sentir. La stratégie de la communauté française suite aux recommandations des groupes «Blue Dot» et «EPRAT», ainsi qu'à la pré-sélection de Plato, seront à intégrer dans un futur proche. Nous recommandons la création d'un groupe de travail ou action spécifique pour définir, en particulier, la prospective instrumentale. Nous encourageons la participation des laboratoires de l'INSU au projet CTA qui doit se développer vite pour bénéficier d'une synergie Fermi/CTA (synergie à développer autour de HESS2 dans un premier temps). Il nous apparaît opportun de soutenir la participation française à la mission d'opportunité japonaise JEM-EUSO, même dans le contexte concurrentiel d'Auger Nord. Nous engageons la communauté à mener une réflexion sur les futurs observatoires (sol versus espace) et l'avenir de l'astronomie des rayons cosmiques d'ultra-haute énergie. Enfin, le périmètre des laboratoires spatiaux a considérablement changé durant les 10 dernières années. Dans le nouveau contexte de l'autonomie des universités et de la redéfinition des contours du CNRS, il est apparu urgent de recenser les moyens spatiaux et réfléchir à l'organisation de la recherche spatiale en France (création d'un groupe de travail CNES, INSU, et CEA).

Personnels et métiers

Les laboratoires de la division A&A de l'INSU regroupent plus de 2 500 personnes, dont environ 800 chercheurs et 1 000 ingénieurs et techniciens sur emplois permanents, auxquels se rajoutent environ 350 personnels temporaires et autant d'étudiants. La proportion de femmes est d'environ 20% parmi les chercheurs, et 35% parmi les ingénieurs et techniciens, tous corps confondus, ce qui est très loin des moyennes nationales au CNRS (32% et 50% respectivement). Les agents CNRS représentent 40% des personnels chercheurs et enseignants-chercheurs, et 58% des personnels ingénieurs et techniciens permanents. Les procédures d'évaluation dépendent

des appartenances statutaires, ainsi que les perspectives de carrière qui sont particulièrement difficiles pour certaines catégories de personnels.
L'évolution du contexte programmatique de notre discipline, avec moins de projets, mais de très grande envergure, renforce les besoins spécifiques envers certains métiers, ainsi que la spécialisation et la professionnalisation de certains d'entre eux. Il y a un besoin récurrent en chercheurs instrumentalistes qu'il faut traiter. Notre capacité à assurer la gestion technique des grands projets sera rapidement un enjeu de notre compétitivité dans le contexte international et fortement concurrentiel des grandes agences. Les métiers de l'administration requièrent de plus en plus de compétences élargies, dans un contexte de carrières particulièrement difficiles. Ces évolutions des métiers font apparaître des besoins nouveaux en formation spécialisée, et en mutualisation de compétences à envisager à différentes échelles.

Services d'Observation, évaluation et évolutions

En 1995, un premier texte d'explication détaille les missions du corps des astronomes en général et les tâches de service en particulier. Il propose la première structuration des Services d'Observation (SO) en six grands types fonctionnels, il apparaît que cette organisation est bien adaptée aux missions de service en astronomie-astrophysique. Cependant la diversification et l'enrichissement des services ont abouti à une certaine perte de lisibilité. Afin d'y remédier, il est proposé de clarifier le sens du concept de service ainsi que l'objectif de la labellisation et ses critères.

Les principales recommandations spécifiques à chaque service sont les suivantes. Pour le SO2 (instrumentation au sol des grands observatoires au sol et spatiaux), il faut redéfinir le service comme la capacité à réaliser ces moyens, s'appuyant sur un ensemble de plateformes sol et spatiales coordonnées par l'INSU, en liaison avec le CNES, le CEA et les universités concernées. Le sort du SO3 (Stations d'observation nationales et internationales) est lié à l'évolution du statut national des moyens d'observation. L'articulation entre SO4 (Grands relevés et sondages profonds) et SO2 doit être précisée, et clarifiée. Il faudrait se doter d'outils standardisés permettant de mesurer l'utilisation et l'impact des services dépendant de SO5 (Centres de traitement et d'archivage de données), et clarifier les liens existants entre les instruments et les activités de traitement et d'archivage des données associées. Enfin, il convient de redéfinir SO6 (Surveillance solaire, relations Soleil-Terre, environnement terrestre) en mettant l'accent sur la surveillance de l'environnement spatial de la Terre, avec les volets environnement radiatif et géocroiseurs.

Chacune des six catégories de Services d'Observation devra être coordonnée à l'échelle nationale. Il conviendra également de renforcer les relations entre le CNAP, l'INSU et les OSU, et de clarifier et homogénéiser le rôle national des Actions Spécifiques et des Programmes. Au-delà de l'astronomie et astrophysique, il sera souhaitable de renforcer la coordination avec les autres disciplines de l'INSU, les autres Instituts du CNRS. Enfin pour optimiser la définition et la mise en place d'une politique des SO, le suivi et l'évaluation des services au niveau national devront être assurés par un groupe ad-hoc spécifique de la CSAA.

Organisation nationale

Le contexte de l'organisation nationale de l'astronomie en France est en pleine évolution avec la réforme en cours du CNRS et l'application de la loi LRU (Libertés et Responsabilités des Universités). La particularité en Sciences de l'Univers et plus particulièrement en astronomie est d'avoir un pavage d'Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) en charge de l'organisation des services d'observations, avec la mise à disposition à ce titre des personnels du corps des astronomes, une charte des OSU en négociation avec les Universités, devant permettre de définir la répartition des rôles. Le rééquilibrage des responsabilités entre CNRS, Universités et Grands Etablissements est encore en pleine évolution, mais plusieurs axes se dessinent aujourd'hui.
Dans ce contexte, la réaffirmation du rôle des Unités Mixtes de Recherche (UMR), au cœur du dispositif de recherche est un élément essentiel des succès de la recherche scientifique nationale, permettant de combiner l'organisation nationale (CNRS) et régionale, avec des ambitions européennes partagées. L'importance d'une politique de laboratoire, dans les UMR, est rappelée et soutenue, permettant d'afficher des axes de recherche à long terme, par rapport à une dérive des laboratoires vers un simple rôle d'hôtel à projets.
La lourdeur grandissante de la gestion administrative des contrats, européens ou nationaux est un mal reconnu, qui complique aussi l'implication des laboratoires dans la définition d'une politique allant au-delà d'une gestion de contrats. Le regroupement des laboratoires en astronomie, engagé depuis longtemps, permet de dégager des moyens de gestion administrative qui restent nécessaires au niveau de base pour un suivi fin des activités de recherche ; elle rend cependant aussi la gestion même du laboratoire plus lourde, entre de multiples tutelles.
Le rôle des grands organismes reste essentiel pour la communauté astronomique : le CNES en particulier, au niveau national, est en particulier un acteur clé pour le bon déroulement et le suivi des expériences spatiales proposées au niveau européen ou mondial, grâce à la structuration des laboratoires spatiaux. La gestion des grands instruments, sol ou spatiaux nécessite une structuration nationale des laboratoires, face au risque de parcellisation d'une politique uniquement universitaire.

Institut Nnational des Sciences de l'Univers
Centre National de la Recherche Scientifique
www.insu.cnrs.fr